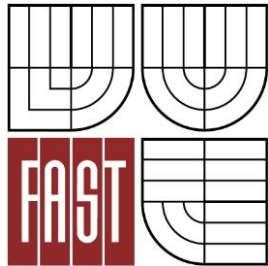




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

POROVNÁNÍ ŠVÉDSKÉHO A AMERICKÉHO KONCEPTU NÁVRHU SMĚSÍ S CRMB

SWEDISH AND US AR MIXTURE DESIGN COMPARISON

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ADAM PUDA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JAN KUDRNA, CSc.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | N3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3607T009 Konstrukce a dopravní stavby |
| Pracoviště | Ústav pozemních komunikací |

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | |
|--|---|
| Diplomant | Bc. Adam Puda |
| Název | Porovnání švédského a amerického konceptu návrhu směsí s CRmB |
| Vedoucí diplomové práce | prof. Ing. Jan Kudrna, CSc. |
| Datum zadání diplomové práce | 31. 3. 2014 |
| Datum odevzdání diplomové práce | 16. 1. 2015 |
| V Brně dne 31. 3. 2014 | |

.....
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

normy 12697-24, -26, -33, -46 a další zkušební normy

Laboratory comparison of Stone Mastic Asphalt mixtures with different binders

Arizona Design Guide

TP 148

Zásady pro vypracování

Porovnání výsledků dosavadních zkoušek, návrh směsi a příprava zkušebních vzorků dvou směsí (SMA 16 a ACL 16) s CRmB a srovnání jejich funkčních vlastností (tuhost, odolnost proti únavě a smršťovacím trhlinám), porovnání výsledků

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....
prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Tato práce se zabývá porovnáním dvou návrhových konceptů pro výrobu asfaltových směsí s použitím pojiva modifikovaného pryžovým granulátem. Návrhové koncepty pocházejí ze Švédska a USA. V teoretické části jsou stanoveny parametry pro návrhy směsí a zkoušky stanovující jejich charakteristiku. V praktické části jsou zkušební tělesa, vyrobená z navržených směsí, podrobena funkčním zkouškám, jejich cílem je simulovat účinky klimatických a dopravních zatížení. Porovnání zjištěných parametrů bude provedeno v matematických modelech používaných v programu LayEps.

Klíčová slova

Asfalt, asfaltová směs, pryžový granulát, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, funkční zkoušky, nízkoteplotní vlastnosti, modul tuhosti, únava, LayEps

Abstract

This master's thesis deals with comparison of two design concepts for producing asphalt mixture with CRmB. These design concepts are from Sweden and USA. The theoretical part sets parameters for design of asphalt mixture and characteristic tests. In the practical part test specimens of design asphalt mixture undergo performance tests that simulate climate and traffic load. Results are compared to mathematical model used in program LayEps.

Keywords

Bitumen, asphalt mixture, rubber granulate, Crumb Rubber modified Bitumen (CRmB), performance tests, low temperature characteristics, stiffness, fatigue, LayEps

Prohlášení:

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

V Brně dne 16. 1. 2015

.....
podpis autora
Bc. Adam Puda

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Adam Puda *Porovnání švédského a amerického konceptu návrhu směsí s CRmB*.
Brno, 2014. 82 s., 18 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta
stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.

Poděkování

Na tomto místě rád poděkuji vedoucímu své diplomové práce prof. Ing. Janu Kudrnovi, CSc., Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D., Pavlu Strakovi a Matěji Šafránkovi za rady jak k teoretické, tak k praktické části své práce. Obzvláště pak pracovníkům laboratoře za trpělivost při výrobě a zkoušení směsí.

Také děkuji své rodině, která mě podporovala během celého studia, a zejména děkuji své přítelkyni Silvii Koudelkové za svou přítomnost při psaní této práce.

OBSAH

| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 10 |
| 1.1. Asfaltové pojivo a metody aplikace pryžového granulátu..... | 11 |
| 1.2. Asfaltové směsi s CRmB | 15 |
| 1.3. Koncepty návrhu směsi pro diplomovou práci | 18 |
| 2. Cíl diplomové práce | 20 |
| 3. Použité zkušební metody..... | 21 |
| 3.1. Kamenivo..... | 21 |
| 3.2. Asfaltové pojivo..... | 23 |
| 3.3. Vyrobené asfaltové směsi | 29 |
| 4. Použité materiály..... | 40 |
| 4.1. Kamenivo..... | 40 |
| 4.2. Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem | 41 |
| 5. Návrh asfaltových směsí | 43 |
| 5.1. Návrh asfaltové směsi SMA 16 | 43 |
| 5.2. Návrh asfaltové směsi AC 16 | 45 |
| 5.3. Porovnání parametrů vzorových i návrhových směsí..... | 49 |
| 5.4. Výroba zkušebních těles | 51 |
| 6. Výsledky zkoušek | 55 |
| 6.1. Nízkoteplotní vlastnosti | 55 |



| | | |
|------|---|----|
| 6.2. | Moduly tuhosti..... | 59 |
| 6.3. | Odolnost proti únavě..... | 65 |
| 6.4. | Shrnutí výsledných parametrů z funkčních zkoušek | 67 |
| 6.5. | Porovnání jednotlivých směsí matematickým modelem | 68 |
| 7. | ZÁVĚR..... | 73 |
| 8. | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 75 |
| 9. | SEZNAM TABULEK..... | 78 |
| 10. | SEZNAM GRAFŮ | 80 |
| 11. | SEZNAM OBRÁZKŮ | 81 |
| 12. | SEZNAM PŘÍLOH | 83 |

1. Úvod

Pro rozvoj jakékoliv oblasti je zapotřebí nejen rozšiřování dosavadní dopravní sítě výstavbou nových komunikací, ale především neopomenout vhodně a včas rekonstruovat ty používané. Přestože na počátku zpracovávání ropy bylo asfaltové pojivo jen odpad, který zbyl po odebrání všech užitečných látek během řady destilací a jiných procesů, tak i pro tuto složku se našlo využití a to při výstavbě komunikací. Prvotní cena tohoto materiálu byla spíše symbolická, nicméně postupem času a uvědomění si, že se jedná o složku se značným potenciálem, která může dojít, se cena asfaltového pojiva, i jakožto odpadu, zvyšovala společně s cenou ropy.

Dnes jsme již o krok dále a v globálním měřítku se lidé snaží využít již jednou použitý materiál, který dosloužil pro svůj prvotní účel, a pokud je to možné, najít pro něj využití jiné, recyklovat jej a to z důvodu značné produkce a hromadění odpadů, ale i šetření omezených zdrojů a životního prostředí. A v dopravě tomu není jinak, neboť kromě vozidel samotných, které jsou po své době životnosti také odpad, tak každé vozidlo, bez ohledu na typ samotný, použije a opotřebuje během své životnosti několik sad pneumatik, které se odvezou na skládku a následně použijí nejčastěji jako palivo a právě ty představují významnou část odpadu z automobilové dopravy. V poslední době se i tento hromadící se odpad začal zpracovávat materiálově. Nejprve se rozdělí jednotlivé složky pneumatiky na pryž, ocelový kord a textil. Poté je mechanickým drcením pryž zpracována na jednotlivé frakce dle požadavku k následnému použití, které je poměrně rozsáhlého charakteru.

Ve stavebnictví lze pryžový granulát použít k výrobě desek, které jsou v interiéru používány jako podkladní vrstvy podlahy se schopností tlumit nárazy, nebo k výrobě tvárníc, jakožto izolace od hlučných míst. Dále ji ocení lidé s bazény, neboť vrstva má výborné protiskluzové vlastnosti. V exteriérech mohou být využity jako dlažby zvyšující komfort provozu v parcích, zahradách, pěších zónách a v období zimy nejsou náchylné k tvorbě náledí. Další předností je působení menších úrazů při kontaktu způsobené pádem, proto se používají nejen jako finální vrstva u dětských hřišť, ale i na běžeckých atletických drahách, v krytých tělocvičnách, kde jsou sportovci oceňováni i za šetrnost k jejich kloubům [1].



Obr. 1 Pryžový granulát ve frakcích 3/4, 2/4, 1/2 a 0/1 mm [31]

U dopravních staveb je lze použít jako železniční nebo tramvajový svršek, jež svými vlastnostmi snižuje negativní vlivy této dopravy. Další využití najde jako tvárnice určené pro uložení inženýrských sítí. V silniční dopravě je využití pryžového granulátu, který je nejpodstatnější pro tuto práci, jako příměs do modifikovaného asfaltového pojiva [1].

1.1. Asfaltové pojivo a metody aplikace pryžového granulátu

Asfaltové pojivo je směs vysoce molekulárních uhlovodíků, jejíž nejpodstatnější vlastností je elasticko-viskózní chování, které se vlivem změny teploty mění. Pojivo lze rozdělit na přírodní, které se vyskytuje ve velkých jezerech, nebo na ropné, a to jako zbytek po odsolení, odpaření a oddestilování vytěžené ropy. Tento viskoelastický materiál, který se za nízkých teplot chová jako pevná pružná látka a za vysokých jako kapalina, našel využití v dopravě k výrobě asfaltových směsí. Nicméně s rostoucí dopravou se zvyšuje zatížení komunikací, která klade vyšší požadavky na kvalitu cest a tím i na kvalitu samotného pojiva. Zlepšení asfaltového pojiva lze docílit přidáním různých druhů modifikátorů, kde nejpoužívanějším jsou polymery, jejichž účelem je zvýšit odolnost při tvorbě mrazových trhlin a trvalých deformací [2].

Kromě polymerů lze také modifikovat asfaltové pojivo přidáním jiných materiálů, mezi které patří latex nebo již zmiňovaný pryžový granulát [2]. V České republice se používají (nebo používaly) tři způsoby zabudování pryžového granulátu do asfaltové směsi.

1.1.1. Mokrý proces - (*wet proces, CRmB – Crumb Rubber modified Bitumen, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem*)

Tato metoda je globálně nejpoužívanější technologií zpracování pryžového granulátu ve výrobě asfaltových směsí, popsána je v TP 148 [4]. Metoda mokrého procesu je založena na vmíchání pryžového granulátu do asfaltového pojiva, ze kterého se následně vyrobí směs. Pojivo je označováno jako **asfalt modifikovaný pryžovým granulátem** a směs se označuje jako asfaltová směs s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem popř. asfaltová směs s CRmB. Při tomto procesu se pojivo vyrábí ve speciálním mísicím zařízení, které je nazýváno **blender** [3], [5].



Obr. 2 Mísicí zařízení (blender) pro výrobu CRmB [3]

Zařízení se skládá z dávkovací násypky s pryžovým granulátem, míchací nádrže určené pro promíchání granulátu a pojiva a reakční nádrže, kde za stálého míchání dochází k reakci a pojivo je modifikováno částečně rozpuštěním granulátu. Takto vyrobené modifikované pojivo se označuje zkratkou CRmB (Crumb Rubber modified Bitumen). Nejčastěji používaný typ asfaltu pro modifikaci je 50/70 nebo 70/100. Způsob přidávání granulátu má dva odlišné postupy [3], [5].

1.1.1.1. *Technologie kontinuální výroby – (Continuous blend)*

Do blendru se vmíchává granulát frakce 0/1 až 0/2 mm za provozní teploty 170 °C až 185 °C v celkovém množství 15 % až 25 %. S tímto procentuálním zastoupením granulátu je CRmB označováno jako **vysokoviskózní** a dle TP 148 [4] není potřeba posouzení na skladovatelnost, nicméně je nutné kontrolovat viskozitu pojiva. Skladovací stabilita se neposuzuje z toho důvodu, že pojivo je až do své spotřeby v reakční nádrži mísícího zařízení promícháváno [3], [5].

1.1.1.2. *Technologie terminálové výroby – (Terminal blend)*

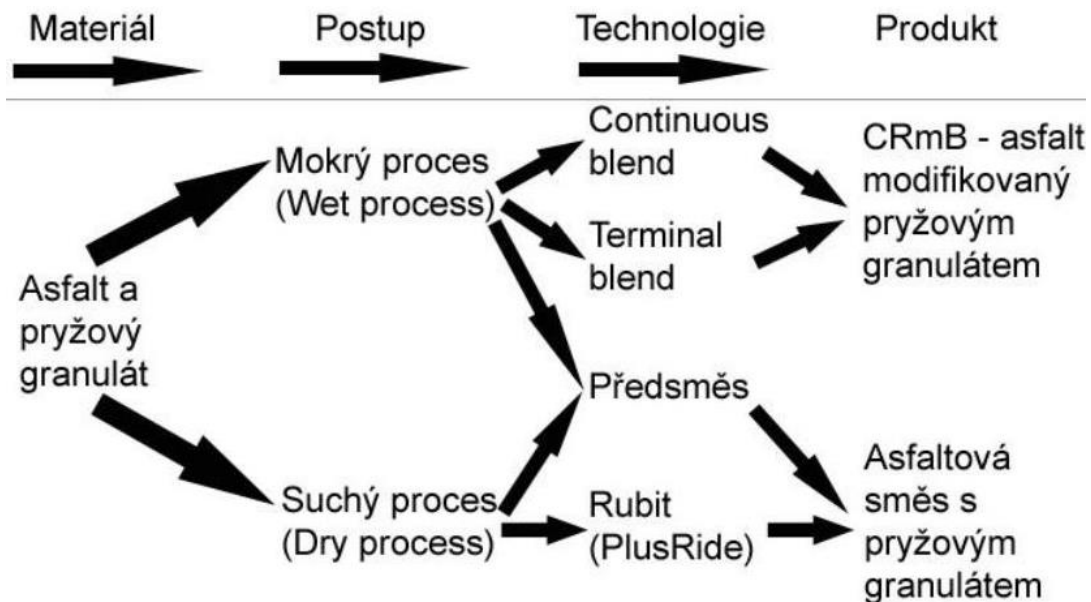
U této technologie se CRmB většinou vyrábí v rafinerii podobně jako modifikovaný asfalt. Používá se snížené dávkování pryžového granulátu a to v rozmezí 5 % až 15 %. Toto CRmB je označováno jako **nízkoviskózní** a dle TP 148 [4] je potřeba ověřit skladovatelnost za konkrétních podmínek, kdy jsou přidány do pojiva chemické přísady, které určitou dobu udrží jemné částice rozptýlené po celém objemu. Jinou možností je nepřidat přísady a vyšší teplotou, až 220 °C, docílit téměř úplného rozpuštění pryžového granulátu, čímž vznikne téměř homogenní modifikované pojivo, které je skladovatelné alespoň po omezenou dobu. V případě nízkoviskózního CRmB je tedy problém se skladováním, kdy po určitém čase dojde ke shlukování jednotlivých částic granulátu u dna, proto je doporučeno vyrobené pojivo, co nejrychleji použít [3], [5].

1.1.2. *Suchý proces – (dry proces, Rubit, asfaltová směs modifikovaná pryžovým granulátem)*

Při použití této technologie, pocházející ze Švédska, se přidává pryžový granulát zrnitosti 0/1 mm a 1/4 mm do míchačky na obalovně současně s kamenivem. Vhodné asfaltové pojivo je gradace jako při mokřém procesu a to 50/70 nebo 70/100. Pro dosažení požadované homogenity směsi je zapotřebí prodloužit dobu míchání a pro dostatečnou modifikaci je potřeba nechat horkou směs minimálně hodinu odstát v zásobníku pro asfaltové směsi. Tato směs je pojmenována jako **asfaltová směs modifikovaná pryžovým granulátem**. Nicméně od používání této metody se v ČR ustoupilo [3], [5].

1.1.3. Koncentrát CRmB – (TecRoad, technologie koncentrátu asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem)

Výroba koncentrátu CRmB používá výhod z metod suchého procesu a technologie terminal blend. Jde o výrobu granulovaného koncentrátu modifikovaného asfaltu z jemného granulátu a pojiva. Tato předsměs se vyrábí s obsahem 30 % až 50 % pryžového granulátu, kdy se nejprve vyrobí za stálého míchání klasické modifikované pojivo, do kterého se na konci výrobní linky přidá další pryžový granulát, dokud není z pojiva sypká hmota. Tento koncentrát se poté doveze na obalovnu, kde se snadno dávkuje do míchačky společně s kamenivem, stejně jako u technologie terminálové výroby [3], [5].



Obr. 3 Schéma zpracování pryžového granulátu v asfaltových směsích [6]



Obr. 4 Srovnání obyčejného pojiva a pojiva modifikovaného pryžovým granulátem [6]

1.2. Asfaltové směsi s CRmB

Přidáním pryžového granulátu do zahřátého tekutého pojiva se z pojiva stane „řidká kaše“, která zlepší své vlastnosti, a tím zlepší i vlastnosti asfaltové směsi z ní vyrobené. Viskozita pojiva se po přidání granulátu zvýší 5 až 50 krát. Dále se zvýší bod měknutí, vratné přetváření a sníží se původní hodnota penetrace. Asfaltová směs vyrobená s použitím modifikovaného pojiva je následně odolnější proti vzniku poruch a prodlouží se její životnost. Při použití vhodného množství CRmB v obrusné vrstvě může dojít i ke snížení hlukových emisí z dopravy [6].

Vyrobené asfaltové směsi s přidáním modifikovaného pojiva pryžovým granulátem se v České republice dělí na:

1.2.1. *BBTM – Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy*

Čára zrnitosti je složená z frakcí 0/4, 2/4 a vápencové moučky. Maximální velikost zrn je 8 mm. Tloušťka vrstvy se pohybuje v rozmezí 20 mm až 35 mm a mezerovitost v rozmezí od 7 % do 15 %. Oba dva parametry jsou závislé na velikosti maximálního zrna kameniva. Množství použitého CRmB se pohybuje od 8,0 % do 9,5 %. Tento typ obrusné vrstvy se používá v místech vyšší emise hluku způsobeného silničním provozem [8].



Obr. 5 Asfaltová směs BBTM [8]

1.2.2. *SMA – asfaltový koberec mastixový*

Kamenivo je zastoupeno přerušovanou čarou zrnitosti, kde je dominantní jedna větší frakce. Směs je používána jako obrusná vrstva a její tloušťka se pohybuje

od 25 mm do 40 mm s mezerovitostí od 4 % do 7 %. Množství CRmB je obvykle od 8 % do 9 %. Směs se používá pro vysoké dopravní zatížení, neboť se vyznačuje vysokou odolností vůči trvalým deformacím, vzniku trhlin a trvanlivostí z důvodu nižšího stárnutí pojiva, a také dobrými nízkoteplotními vlastnostmi [8].



Obr. 6 Asfaltová směs SMA [8]

1.2.3. PA – asfaltový koberec drenážní

Tloušťka této vrstvy se provádí od 25 mm do 35 mm. Vyznačuje se velkou mezerovitostí a to od 14 % do 22 % s dávkováním CRmB od 7,5% do 9,0 %. Díky své mezerovitosti má dobré protihlukové vlastnosti a také kvalitněji odvádí vodu, čímž dosahuje výborných protismykových vlastností i za deště. Je také odolná vůči vzniku trvalých deformací [8].



Obr. 7 Asfaltová směs PA [8]

1.2.4. AC – asfaltový beton

Tento typ směsi se vyznačuje plynulou čarou zrnitosti a může se použít pro výrobu vícevrstevných systémů, proto se mezerovitost pohybuje v rozmezí od 4 %

do 8 %, stejně tak se odvíjí i množství použitého CRmB, které se pohybuje od 5,5 % do 7,0 %. Směs se vyznačuje vysokou odolností vůči tvorbě trvalých deformací a vzniku trhlin, což je zapříčiněno dobrými únavovými a nízkoteplotními vlastnostmi [8].



Obr. 8 Asfaltová směs AC [8]

Nicméně u každé směsi je zapotřebí upravit čáru zrnitosti kameniva, neboť se přidáním pryžového granulátu zvýší celkový obsah jemných částic. Dále, oproti nemodifikovaným směsím je zapotřebí přidat větší množství pojiva, z důvodu jeho kašovitě konzistence, aby došlo k obalení kameniva [6].

1.2.5. Výhody a nevýhody směsí s CRmB

Mezi nevýhody směsí s CRmB oproti běžným směsím můžeme zařadit [6]

- Vyšší pořizovací cenu
- Vyšší nároky na organizaci a náročnější výrobu
- Vyšší energetickou náročnost a teplotu zpracování
- Problematiku skladování
- Potenciální uvolnění škodlivých látek

Výhody směsí s CRmB jsou [6]

- Odolnost proti únavě, vzniku trvalých deformací, trhlin a stárnutí pojiva
- Delší životnost
- Lepšími vlastnostmi lze snížit tloušťku vrstvy
- Snížení hlukových emisí z dopravy
- Použití odpadních materiálů

1.3. Koncepty návrhu směsi pro diplomovou práci

Tato práce má za úkol srovnat vlastnosti asfaltových směsí s CRmB vyrobené podle konceptu používaného ve Švédsku a Spojených státech amerických. Výběr těchto dvou zemí není náhodný, neboť jde o země, které se modifikováním asfaltového pojiva pryžovým granulátem zabývají nejdéle a nejintenzivněji.

1.3.1. Švédský koncept

Ve Švédsku vyvinuli v 60. letech minulého století technologii výroby asfaltové směsi s modifikovaným pojivem, metodou suchého procesu. Tato technologie, jak již bylo zmíněno výše (kap. 1.1.2), má svá negativa ohledně kvality, a proto bylo od této metody postupně upuštěno. V roce 2007 bylo zakoupeno mísící zařízení Phoenix Enviromental, Ltd. pro kontinuální výrobu CRmB a začali prosazovat metodu mokrého procesu. Zařízení bylo nejprve upraveno pro místní podmínky a poté úspěšně využíváno. Asfaltové směsi musí ve Švédsku odolávat otěru, neboť je v této zemi povoleno používat pneumatiky s hroty. Proto je návrh směsí upraven tomuto požadavku a výsledná směs podobná asfaltovému koberci mastixovému (**SMA**) s maximální frakcí kameniva do 16 mm se označuje jako GAP 16, resp. GAP 11. Tato směs obsahuje vysokoviskózní CRmB s množstvím pryžového granulátu 15 % až 20 %, frakce pryžového granulátu je nejčastěji 0/2 mm, a celkovém množství pojiva CRmB ve směsi v rozmezí 8,3 % až 9,0 % s větším obsahem přidaného fileru. Mezerovitost těchto asfaltových směsí se pohybuje kolem 2,0 % až 2,5 % [7], [8].

Byla odzkoušena i směs asfaltového koberce drenážního (**PA**) s použitou frakcí kameniva do 8 až 11 mm, která obsahovala CRmB 8,3 % až 9,0 % s mezerovitostí 15 % až 19 %, nicméně se tato vrstva ve Švédsku neosvědčila jak z hlediska snížení hlučnosti, tak z hlediska životnosti [7].

1.3.2. Americký koncept

První používání pryžového granulátu se v Americe datuje ke konci 30. let minulého století, kde se nejprve používal jako přídavek k materiálům pro spojovací nátěry, vysprávký a membrány. Metoda mokrého procesu byla vyvinuta v letech 1960

až 1970. V druhé polovině 70. letch byly směsi, vyrobené kontinuální technologií, s pojivem modifikovaným pryžovým granulátem použity na překrytí porušených vozovek s otevřenou nebo přerušenou zrnitostí a v roce 1980 byly výrobní metodou mokrého procesu vyrobeny první vozovky typu AC. V roce 1987 kalifornská správa silnic rozhodla upřednostnit používání směsi s CRmB a do roku 1990 byly ve 23 státech položeny zkušební úseky s touto směsí. Technologie mokrého procesu byla v roce 2001 vyjmuta z experimentálního stavu a začala se běžně využívat. Dřívějšímu použití těchto směsí bránilo i patentové právo v USA, které se vztahuje k vlastnickému právu a teprve v roce 1992 vypršela lhůta těchto práv. Od té doby se technologie zpracování pryžového granulátu, a tím i metody mokrého procesu a kontinuální výroby mohly plně rozvíjet.

V Americe jsou asfaltové směsi děleny podle čáry zrnitosti na **směs s uzavřenou zrnitostí** (*dense graded*), která má plynulou čáru zrnitosti, ale je vhodná především pro směsi CRmB vyrobené podle technologie terminálového postupu (kap. 1.1.1.2). Další typy zrnitosti jsou **směs s přerušenou zrnitostí** (*gap graded*) a **směs s otevřenou zrnitostí** (*open graded*). Rozdíl mezi nimi je v mezerovitosti zhutněné směsi. Směs s přerušenou čárou zrnitosti má mezerovitost v rozmezí 4,5 % až 6,5 % a směs s otevřenou čárou zrnitosti má mezerovitost v rozmezí 6 % až 15 %. Frakce kameniva pro obrusné vrstvy upřednostňují spíše jemnozrnější 8 mm až 9,5 mm před hrubozrnějšími 12,5 mm až 19 mm. Obsah modifikovaného pojiva se používá v rozmezí 6,5 % až 8,5% s nižším obsahem fileru. K výrobě těchto dvou typů směsí s CRmB se používá technologie kontinuálního postupu (1.1.1.1) [7].

Z obou národních konceptů jsou stanoveny parametry, které bude snahou dodržet při výrobě asfaltových směsí pro tuto práci. Podle specifikací v ČSN EN 13108 bude ze švédského konceptu vyrobena směs **SMA 16** a z amerického konceptu směs **AC 16**. Z vyrobených směsí se následně zhotoví zkušební tělesa, která stanoví charakteristické parametry pro danou směs. S ohledem na konečné posouzení naměřených parametrů je zohledněna maximální frakce použitého kameniva, která bude u obou směsí stejná, i když je výše zmíněno, že americká koncepce upřednostňuje frakce jemnozrnější (kap. 1.3.2), a to 16 mm. Dále je při návrhu zohledněna tloušťka filmu pojiva na povrchu kameniva ve směsi, neboť i tento faktor může hrát při funkčních zkouškách svojí roli, tak bude i tento parametr pro obě směsi stejný.

2. Cíl diplomové práce

Cílem této práce je porovnat výrobní koncepty asfaltových směsí s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem dvou národů, které se s používáním pryžového granulátu jako modifikátoru v asfaltovém pojivu intenzivně zabývají již řadu desítek let.

Jako zástupce amerického konceptu byla vybrána směs **AC 16** a švédského konceptu směs **SMA 16**, kde oba tyto návrhy představují směs pro obrusnou vrstvu. Návrh a výroba těchto směsí je také součástí práce. Při návrhu bude zohledněna maximální velikost kameniva, která bude pro obě směsi stejná. Přibližně stejných hodnot bude nabývat tloušťka filmu asfaltového pojiva na povrchu kameniva. Z navržených směsí budou vyrobeny zkušební tělesa, na kterých se následně provedou funkční zkoušky, jež simulují různá zatížení a prostředí. Jedná se o zkoušky zjišťující

- nízkoteplotní vlastnosti
- modul tuhosti
- odolnost proti únavě

Porovnány mezi sebou budou nejen jednotlivé naměřené hodnoty z každé zkoušky, ale i směsi jako celek se zjištěnými vlastnostmi. K tomu bude použit matematický model, kde budou zvoleny různé konstrukční uspořádání z TP 170 [30] a směsi AC 16 a SMA 16 budou použity jako obrusné a podkladní vrstvy. Matematický model pomůže nejen porovnat jednotlivé směsi a stanovit, která ze směsí je vhodnější pro použití, ale pomůže i najít neoptimálnější pozici v konstrukčním uspořádání vozovky pro navržené směsi AC 16 a SMA 16.

3. Použité zkušební metody

Každá asfaltová směs se skládá z kameniva, asfaltového pojiva a eventuálně z dalších přidaných materiálů, které upravují výsledné vlastnosti směsi. Ať už jsou jednotlivé složky výsledné směsi dodány odkudkoliv, i s certifikovaným složením či vlastnostmi, je žádoucí provést si zkoušky vlastní, jak pro zjištění vstupních parametrů, tak i pro jistotu kvality použitého materiálu. Proto na kamenivo a asfaltové pojivo budou provedeny zkoušky, které definují charakteristiky těchto vstupních materiálů pro následnou výrobu asfaltových směsí.

U dovezeného kameniva a fileru bude stanovena zrnitost síťovým rozborem. Vlastnosti dovezeného asfaltového pojiva modifikovaného pryžovým granulátem budou stanoveny pomocí zkoušek penetrace jehlou, stanovení bodu měknutí, resilience, dynamické viskozity a vratné duktility.

3.1. Kamenivo

3.1.1. Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor

Podstata zkoušky spočívá v roztřídění a oddělení materiálu pomocí sady sít, které jsou sestaveny sestupně. Velikost ok a počet sít je vybírán podle druhu vzorku a požadované přesnosti a stanovuje se hmotnost částic, které zůstaly na jednotlivých sítích k původní hmotnosti materiálu. Množství zkoušeného materiálu se nejprve vysuší při teplotě 110 °C do ustálené hmotnosti. Po vychladnutí se zváží a zaznamená se (M_1). Následně se provede tzv. praní vzorku, kdy se materiál promíchává s vodou, aby se dokonale oddělily jemné částice, a následně se všechna voda nechá protéci sítím 63 μm , dokud neodtéká čirá voda. Poté se zůstatek materiálu na sítě 63 μm opět vysuší a zváží (M_2).

Vysušený vzorek se nasype na sestavenou sadu sít, které jsou nad sebou, přičemž největší otvory jsou nahoře a směrem dolů se oka zmenšují. Následné třídění se provádí většinou mechanickým otřesem. Poté se odebírají jednotlivá síta a zaznamenávají se hmotnosti na každém z nich ($R_1, R_2, R_3 \dots$). Při praní se nejjemnější

částice nikdy nevyplaví všechny, proto se zaznamenává i hmotnost propadu částic přes nejmenší síto 63 μm (**P**).



Obr. 9 Elektro mechanická prosévačka kameniva

Všechny zaznamenané hmotnosti na jednotlivých sítích se v protokolu vyjádří procentuálně k původní vysušené hmotnosti (M_1) a následně se zhotoví tzv. čára zrnitosti, což je grafické vyjádření zaznamenaných hmotností [10]. Také se provede vyjádření procenta jemných částic, které propadly sítím 63 μm , a to ze vztahu

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

kde f je množství jemných částic menších než 63 μm , v %

M_1 je hmotnost vysušené zkušební navážky, v kg

M_2 je hmotnost vysušeného zůstatku na sítě 63 μm , v kg

P je hmotnost propadu jemných částic na dně přes síto 63 μm , v kg

Zkouška je platná, liší-li se součet všech hmotností R_i a P od hmotnosti M_2 o méně než 1%.

Podrobnější popis zkoušky je uveden v ČSN EN 993-1 [10].

3.2. Asfaltové pojivo

3.2.1. Stanovení penetrace jehlou

Tato zkouška stanovuje konzistenci pojiva nebo materiálu, kde se měří průnik normalizované jehly do zkoušeného vzorku a výsledná hodnota je vyjádřena jako hloubka průniku v desetinách milimetrů. Zkoušený materiál se dá do válcové nádoby o vnitřním průměru 55 mm až 70 mm. Nechá se temperovat ve vodní lázni, jejíž teplota, pro běžnou hodnotu penetrace do 330 x 0,1 mm, je 25 °C. Zkouška samotná se provádí s pomocí penetrometru, kde je upevněná jehla, která se zatíží závažím o váze 100 g a na dobu 5 s se nechá vtlačit do vzoru. Pro plnohodnotný výsledek se provedou nejméně tři platná stanovení v různých místech, která jsou vzdáleny od sebe, i kraje nádoby, nejméně 10 mm.



Obr. 10 Penetrometr [33]

Výsledek je přijat, za předpokladu, že se rozdíl mezi maximálním a minimálním stanovením nachází v dovolených hodnotách.

| Penetrace v 0,1 mm | do 49 | 50 až 149 | 150 až 249 | 250 a výše |
|--|-------|-----------|------------|------------|
| Maximální rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším stanovením | 2 | 4 | 6 | 8 |

Tab. 1 Maximální rozdíly platných stanovení pro zkoušku penetrace jehlou

Výsledná hodnota penetrace je potom aritmetický průměr hodnot akceptovatelných stanovení v desetinách milimetru zaokrouhlených na celé číslo [11].

Podrobnější popis zkoušky je uveden v ČSN EN 1426 [11].

Dle TP 148 [29] se u zkoušky penetrace jehlou na vzorku CRmB provádějí 4 stanovení, přičemž se nejnižší hodnota nezapočítává do průměru. Dále je stanoveno, že hodnota penetrace je při 25 °C jak u nízkoviskózní, tak i u vysokoviskózní v rozmezí 25 až 75 penetračních jednotek, tedy 2,5 mm až 7,5 mm.

3.2.2. Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička

Cílem zkoušky je stanovení teploty, při které materiál dosáhne určité konzistence. A to tak, že se pojivo odlije do mosazných kroužků, které se osadí do kapalinové lázně, a na každé z nich je umístěna ocelová kulička. Lázeň se zahřívá řízenou rychlostí a bod měknutí je zaznamenán jako průměr teplot, při kterých tyto dva kotoučky zkoušeného pojiva změknou natolik, aby umožnily každé z kuliček, propadnout o vzdálenost 25,0 mm.



Obr. 11 Souprava pro stanovení bodu měknutí [34]

Jako kapalina pro vodní lázeň může být použita čerstvě převařená destilovaná voda, deionizovaná voda nebo glycerín. Typ kapaliny se zvolí dle předpokládané teploty při bodu měknutí, kdy voda je používána od 28 °C do 80 °C a glycerín od 80 °C do 150 °C. Pro obě kapaliny je stanovena počáteční teplota měření. Rychlost zahřívání

je nastaveno na 5 °C/min. Zkouška je neplatná, je-li rozdíl mezi teplotami větší než 1 °C pro bod měknutí pod 80 °C, nebo je rozdíl větší než 2 °C pro bod měknutí nad 80 °C. U modifikovaných asfaltů je zkouška neplatná při rozdílu větším než 2 °C nebo pokud kulička poruší vrstvu pojiva před tím, než se dotkne destičky vyznačující požadované propadnutí 25 mm.

Výsledná teplota pro bod měknutí nižší nebo rovný 80 °C se vyjádří jako průměr zaznamenaných teplot zaokrouhlený na nejbližší 0,2 °C. Pro bod měknutí nad 80 °C se výsledná teplota bodu měknutí vyjádří jako průměr zaznamenaných teplot zaokrouhlený na nejbližší 0,5 °C [12].

Podrobnější popis zkoušky je uveden v ČSN EN 1427 [12].

Dle TP 148 [29] teplota bodu měknutí pro nízkoviskózní CRmB nabývá minimální hodnoty 55 °C a pro vysokoviskózní je minimální hodnota stanovena na 60 °C.

3.2.3. Stanovení penetrace a pružné regenerace – Resilience

Tato zkouška stanovuje hodnotu resilience, což je vyjádření procentuálního navrácení materiálu do původního stavu a to vtlačení ocelové kuličky do zkoušeného vzorku, čímž se zjistí elastomerní vlastnosti materiálu. Pojivo se nalije do kovových nádobek s vnitřním průměrem 70 mm a hloubkou 45 mm. Vzorky se překryjí víčkem a nechají se zchladit na vzduchu nebo ve vodní lázni, po dobu (1,75 ± 0,25) h při stanovených teplotách 25 °C pro vodní lázeň a 23 °C pro vzduch. Zkouška se provede ihned po temperaci, za pomoci penetrometru, kde je uchycen nástavec s kuličkou o váze 75 g. Tento nástavec se nechá působit na vzorek po dobu 5 s, po které se stanoví počáteční hodnota penetrace kuličkou (**P**) s přesností na 0,1 mm. Poté se nástavec s kuličkou během 10 s vtlačí do vzorku o dalších 10 mm (tzn. P + 10 mm) a v této pozici se ponechá po dobu 5 s. Následně je nástavec povolen a vzorek se nechá 20 s regenerovat. Po regeneraci se zaznamená konečná hodnota penetrace (**F**) s přesností na 0,1 mm a resilience vzorku se stanoví ze vztahu

$$R = (P + 10 - F) * \frac{100}{10}$$

- kde R je resilience, v %
 P je počáteční penetrace kuličky, v mm
 F je konečná penetrace, v mm

Výsledná hodnota R se vyjádří jako průměr ze tří stanovení a zaokrouhlený na nejbližší 1% [13].

Podrobnější popis zkoušky je uveden v ČSN EN 13880-3 [13].

Dle TP 148 [29] je hodnota resilience při 25 °C pro nízkoviskózní CRmB minimálně 15 % a pro vysokoviskózní minimálně 20 %.

3.2.4. Stanovení dynamické viskozity rotačním vřetenovým viskozimetrem

Tato zkouška stanovuje poměr mezi použitým smykovým napětím a smykovou rychlostí, neboli určuje míru odporu toku kapaliny. Zkoušený vzorek se zahřeje na teplotu o 80 °C vyšší, než je jeho bod měknutí (maximální teplota zahřátí je 200 °C), a množství, stanovené výrobcem viskozimetru, se nalije do nádoby. Samotná zkouška se provádí pomocí otáčejícího se vřetene viskozimetru, většinou ve tvaru válce, která se vloží do zahřátého pojiva a hodnota se odečte z měřícího zařízení, vyjádřená v Pa*s. Kvůli rychlému chladnutí pojiva by zkouška neměla trvat déle než 60 s. Rychlost otáčení vřetene je stanovena výrobcem měřícího zařízení a uvedena v návodu.



Obr. 12 Viskozimetr [35]



Obr. 13 Různé velikosti vřeten [35]

Výsledná hodnota dynamické viskozity je stanovena jako aritmetický průměr dvou výsledků získaných ze dvou samostatných vzorků, za předpokladu, že se liší o méně než 10 %. Je-li rozdíl větší, zaznamenají se jednotlivé výsledky a jejich průměr [14].

Podrobnější popis zkoušky je uveden v ČSN EN 13302 [14].

Dle TP 148 [29] je hodnota dynamické viskozity pro nízkoviskózní CRmB 0,5 až 2,0 Pa*s při teplotě zkoušení 160 °C a pro vysokoviskózní CRmB 1,5 až 4,0 Pa*s při teplotě 175 °C.

3.2.5. Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů

Tato zkouška procentuálně vyjadřuje hodnotu navrácení materiálu k původní délce protažení 200 mm. Předehřáté pojivo se nalije do nachystané formy. Přečnávající část se, po ochlazení na laboratorní teplotu, seřízne a formička s pojivem se nechá po dobu přibližně 90 minut temperovat ve vodní lázni o teplotě obvykle 25 °C. Po temperaci se boční části formičky odejmou a vzorek se začne ve vodní lázni mechanicky protahovat rychlostí 50 mm/min na požadovanou délku prodloužení 200 mm. Protahování vzorku se provádí v duktilometru.



Obr. 14 Duktilometr [36]



Obr. 15 Natahovaný a přestřížený vzorek [6]

Takto natažený vzorek se ponechá 10 s a poté se uprostřed přestřihne a pár polovláken. Po 30 minutách se změří vzdálenost mezi konci polovláken a vratná duktilita se stanoví ze vztahu

$$R_E = \frac{d}{L} * 100$$

kde R_E je vratná duktilita, v %
 d je vzdálenost polovláken po 30 min, v mm
 L je délka protažení, obvyklá hodnota 200, v mm

Výsledná hodnota vratné duktility se stanovuje jako aritmetický průměr dvou zkušebních vzorků stanovených v absolutních procentech zaokrouhlených na celé 1 %. Vypočtené hodnoty zkušebních vzorků se od sebe v absolutní hodnotě od sebe nesmí lišit o více než 5 %, jinak je zkouška neplatná a je potřeba nového měření [15].

Podrobnější popis zkoušky je uveden v ČSN EN 13398 [15].

3.2.6. *Množství asfaltového pojiva*

Množství použitého pojiva pro výrobu směsí je stanoveno v konceptech, nicméně právě obsah pojiva je podstatná hodnota pro stanovení tloušťky filmu pojiva ve vyrobených směsích. V cíli práce je zmíněno, že tloušťka asfaltového filmu pojiva má v obou vyrobených směsích pro funkční zkoušky nabývat přibližně stejných hodnot.

Tloušťka filmu asfaltového pojiva se ovlivňuje součinitelem sytosti asfaltové směsi. Je to číslo, kterým se násobí pátá odmocnina měrného povrchu uvažované směsi kameniva a vychází ze vztahu pro teoretické optimální množství pojiva, které se vypočte

$$p = n * \sqrt[5]{\varepsilon} * \frac{2,650}{\rho_a}$$

kde p je teoretické množství pojiva, v kg na 100 kg kameniva
 n je součinitel sytosti
 ε je měrný povrch kameniva, v $m^2 * kg^{-1}$

ρ_a je objemová hmotnost kameniva dle ČSN EN 1097-6, v $Mg * m^{-3}$

Pro stanovení měrného povrchu kameniva ε , lze použít výpočet po jednotlivých použitých frakcích kameniva, které prošli sítím s oky D , v mm, a zůstalo na sítě s oky d , v mm, dle následujícího vztahu

$$\varepsilon = \frac{2,3}{\sqrt[5]{d * D}}$$

Měrný povrch se stanoví součtem jednotlivých frakcí s ohledem na jejich procentuální zastoupení ve směsi. Nicméně pro běžně používané frakce se měrný povrch stanovuje podle upraveného vzorce

$$\varepsilon = 0,01 * (0,174 * G + 0,40 * g + 2,30 * S + 15,33 * s + 140 * f)$$

- kde G je podíl kameniva v %, které zadrží síto 8
 g je podíl kameniva v %, které propadne sítím 8 a zadrží síto 4
 S je podíl kameniva v %, které propadne sítím 4 a zadrží síto 0,25
 s je podíl kameniva v %, které propadne sítím 0,25 a zadrží síto 0,063
 f je podíl kameniva v %, které propadne sítím 0,063

Hledaný parametr tloušťky asfaltového filmu se vyjádří vztahem

$$t = \frac{V_{CRmB} * 10^6}{\varepsilon} = \frac{p * 10^6}{\rho_{CRmB} * \varepsilon}$$

- kde t je tloušťka filmu asfaltového pojiva, v mm
 V_{CRmB} je objem teoretického množství pojiva, v m^3
 ρ_{CRmB} je objemová hmotnost použitého pojiva, v kg/m^3

Podrobnější popis výpočtu je uveden v ČSN 73 6160 [16].

3.3. Vyrobené asfaltové směsi

Každá vyrobená asfaltová směs je podrobena zkouškám, které stanovují její charakteristické vlastnosti. Pro asfaltové směsi za horka se provádí zkoušky podle řady

norem ČSN EN 12697. Nejprve je ovšem zapotřebí připravit zkušební tělesa, kterých je více typů.

Marshallovo těleso se vyrábí podle ČSN EN 12697-30 [17] rázovým zhutňovačem a následně se podrobí zkouškám pro stanovení objemové hmotnosti, maximální objemové hmotnosti a mezerovitosti.



Obr. 17 Marshallova tělesa

Další tělesa se vyřezávají z desek, které jsou vyrobeny dle normy ČSN EN 12697-33 [18] pomocí segmentového zhutňovače, na hranolová zkušební tělesa tzv. **trámečky**, na kterých se zjistí nízkoteplotní vlastnosti, a **komolý klín** pro zjištění modulu tuhosti a odolnosti proti únavě.



Obr. 17 Komolý klín



Obr. 18 Trámeček

Výroba zkušebních těles je popsána v kapitole 5.4.

3.3.1. Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa

Objemová hmotnost zhutněného asfaltového zkušební tělesa se stanovuje z hmotnosti zkušební tělesa a jeho objemu. Vážení se provádí na suchém vzorku na vzduchu (m_1), na nasyceném vzorku pod vodou (m_2) a následně na osušeném vzorku nasyceném vodou (m_3).

Doba sycení vzorku je minimálně 30 minut. Stanovuje se také hustota vody při době sycení a to podle její teploty. Pro povrchové osušení se používá vlhká jelenice, která má odstranit vlhkost z povrchu tělesa, nikoliv z vnitřních mezer [19].

Výpočet objemové hmotnosti se provádí na přesnost 1 kg/m^3 , dle stanoveného vztahu

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

- kde ρ_{bssd} je objemová hmotnost zkušební tělesa, v kg/m^3
 m_1 je hmotnost suchého tělesa, v g
 m_2 je hmotnost nasyceného tělesa ve vodě, v g
 m_3 je hmotnost nasyceného osušeného tělesa, v g
 ρ_w je hustota vody při zkušební teplotě, v kg/m^3 , s přesností na $0,1 \text{ kg/m}^3$

Podrobnější popis zvolené metody je uveden v ČSN EN 12697-6 [19].

3.3.2. Stanovení maximální objemové hmotnosti

Maximální objemová hmotnost se společně s objemovou hmotností zkušební tělesa používá k výpočtu mezer zkušební tělesa a stanovení dalších vlastností, které se vztahují k jejímu objemu. U volumetrického postupu se maximální objem stanovuje jako objem rozpouštědla vytěsněného vzorkem v pyknometru.



Obr. 19 Pyknometr

Stanoví se hmotnost použitého pyknometru (m_1) s nástavcem o známém objemu (V_p), do kterého se, ze 2/3 jejího objemu, nasype vysušená a rozdrobená asfaltová směs, z původního Marshallova tělesa, a stanoví se hmotnost (m_2). Pyknometr se naplní rozpouštědlem 30 mm pod okraj a nechá se temperovat. Po temperaci se rozpouštědlo doplní po značku v pyknometru a stanoví se hmotnost (m_3).

Důležité je při naplňování rozpouštědlem nezanechat v láhvi mezi jednotlivými zrny vzduchové bubliny. Doba temperace je 60 minut až 180 minut. Doplnované rozpouštědlo je také potřeba nechat temperovat [20].

Výpočet maximální objemové hmotnosti se provádí na přesnost 1 kg/m^3 , dle stanoveného vztahu

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

- kde ρ_{mv} je maximální objemová hmotnost asfaltové směsi, v kg/m^3
 m_1 je hmotnost pyknometru, v g
 m_2 je hmotnost pyknometru a zkušební vzorku, v g
 m_3 je hmotnost pyknometru, zkušební vzorku a rozpouštědla, v g
 V_p je objem pyknometru po stanovenou značku, v m^3
 ρ_w je hustota vody při zkušební teplotě, v kg/m^3 , s přesností na $0,1 \text{ kg/m}^3$

Podrobnější popis zvolené metody je uveden v ČSN EN 12697-5 [20].

3.3.3. Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí

Tato zkouška je čistě výpočetního charakteru a pracuje již s naměřenými a vypočítanými hodnotami. Mezerovitost zkušebního tělesa se vypočítá pomocí maximální objemové hmotnosti a objemové hmotnosti zkušebního tělesa [21].

Výpočet mezerovitosti se provádí na přesnost 0,1 %, dle stanoveného vztahu

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

kde V_m je mezerovitost směsi, vyjádřená v %

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

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

Podrobnější popis zvolené metody je uveden v ČSN EN 12697-8 [21].

V souvislosti se stanovením mezerovitosti asfaltových směsí se tatáž norma zabývá mezerovitostí směsi kameniva a stupněm vyplnění mezer pojivem.

3.3.3.1. Mezerovitost směsi kameniva

Stanovuje objem mezer mezi kamenivem zhutněné asfaltové směsi, včetně mezer vyplněných vzduchem, a objemem asfaltového pojiva ve zkušebním tělese [21].

Vztah se počítá s přesností na 0,1 % a je vyjádřen

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

kde VMA je mezerovitost směsi kameniva, v %

V_m je mezerovitost zkušebního tělesa, v %

B je obsah pojiva ve zkušebním tělese (směs jako celek 100 %), v %

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

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

3.3.3.2. *Stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem*

Vyjadřuje kolik procent mezer v kamenivu je vyplněno asfaltovým pojivem [21]. Vztah se počítá s přesností na 0,1 % a je vyjádřen

$$VFB = \left(\frac{B * \rho_b}{\frac{\rho_B}{VMA}} \right) * 100 \%$$

kde **VFB** je stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem, v %

B je obsah pojiva ve zkušebním tělese (směs jako celek 100 %), v %

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

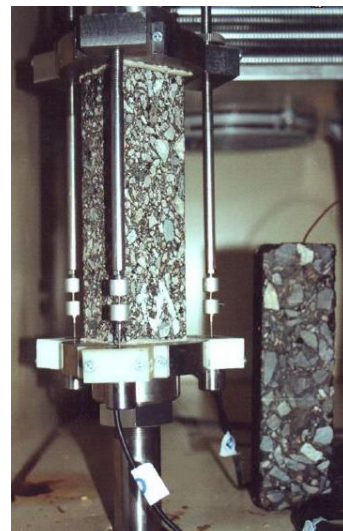
ρ_B je objemová hmotnost pojiva, v kg/m^3

3.3.4. *Nízkoteplotní vlastnosti asfaltové směsi*

U zkoušky pro zjištění nízkoteplotních vlastností se udržuje konstantní délka zkušebního tělesa, mezitím se řízeně rovnoměrně snižuje teplota, které je zkušební těleso neustále vystavováno. Vlivem zadržování smršťování vzniká v tělese kryogenní napětí, které při určité teplotě v tělese, dosáhne svého maxima a dojde k porušení vzorku. Měření se provádí na zkušebním tělese tvaru trámečku.



Obr. 20 Cyclon – 40[37]



Obr. 21 Uchycení trámečku[37]

Rychlost ochlazování je $10^{\circ}C/hod$ při $\varepsilon = 0$. Zabránění zkracování tělesa je docíleno ohřevem upínacího zařízení. Zahřívání je vyhodnocováno automaticky dle

přípevněných snímačů, které jsou přípevněny v podložkách přilepených na zkušební těleso [22]. Při zkoušce jsou zaznamenávány hodnoty

| | |
|-------------------------|--|
| dT | rychlost řízení teploty, v $^{\circ}C/hod$ |
| $\sigma_{cry, failure}$ | napětí při porušení vzorku, v MPa |
| $T_{failure}$ | teplotu vzorku při porušení, v $^{\circ}C$ |

Výsledkem měření je grafické znázornění závislosti kryogenního napětí (σ_{cry}) a teploty (T) ve zkušebním tělese.

Podrobnější popis zkoušky je uveden v ČSN EN 12697-46 [22]

Tato zkouška simuluje vznik mrazových trhlin, které vznikají při poklesu teploty pod kritickou hodnotu pro danou směs. Cílem je tedy zaznamenat teplotu při porušení a napětí ve zkušebním tělese, které vznik trhliny způsobí.

3.3.5. Modul tuhosti asfaltové směsi

Při této metodě se zkouška provádí dvoubodovým ohybem na zkušebním tělese ve tvaru komolého klínu, který je jednostranně vetknut do podložky. Zkušební vzorky jsou deformovány sinusovou silou nebo sinusovým průhybem v rozsahu lineárního přetvoření, které nepřesáhne hodnotu $\epsilon \leq 50 * 10^{-6}$, při opakovaném zatížení. Na základě působené síly nebo způsobeného průhybu a fázovému úhlu se vypočítá komplexní modul (E^*). Frekvence zatěžování zkušebního tělesa je závislá na zkušebním zařízení, nicméně je dodržen rozsah 0,1 Hz až 50 Hz. Zkušební teplota se také mění a je dodržen rozsah $-30^{\circ}C$ až $+40^{\circ}C$, kde se každé těleso temperuje na požadovanou teplotu po dobu minimálně 4 hodin [23].



Obr. 22 Zařízení pro měření modulu tuhosti a odolnosti proti únavě

Každé zkušební těleso je tedy ve spodní části pevně uchyceno a na horní část působí různé frekvenční zatěžování při různých teplotách. Modul tuhosti se z naměřených hodnot vypočte za použití těchto vztahů

3.3.5.1. Výpočet okamžitého napětí σ

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

kde σ je okamžité napětí, v *MPa*

σ_0 je amplituda maximálního napětí ve zkušebním tělese, v *MPa*

ω je úhlová rychlost, v s^{-1}

t je doba zatěžování, v *s*

φ je fázový úhel posunu průběhu mezi napětím a deformací, ve $^\circ$

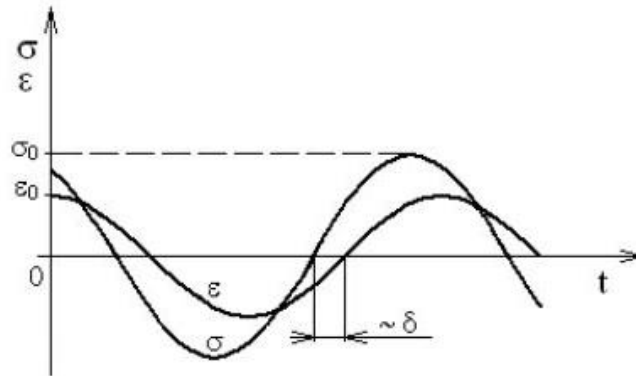
3.3.5.2. Výpočet okamžitého přetvoření ε při působení cyklického namáhání

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

kde ε je okamžité poměrné přetvoření

ε_0 je amplituda maximálního přetvoření ve zkušebním tělese

ψ je fázový úhel posunu průhybu a síly, ve $^\circ$



Obr. 23 Fázový posun u viskoelastického materiálu při harmonickém namáhání[38]

3.3.5.3. Výpočet komplexního modulu z reálné a imaginární složky

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * \cos\delta$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} * \sin\delta$$

$$E^* = E_1 + iE_2$$

kde E_1 je reálná složka charakterizující pevnostní vlastnosti, v *MPa*

E_2 je imaginární složka charakterizující tlumící vlastnosti, v *MPa*

E^* je komplexní modul, v *MPa*

3.3.5.4. Výpočet modulu tuhosti

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

kde S je modul tuhosti, v *MPa*

Podrobnější popis zkoušky je v ČSN EN 12697-26 [23].

Modul tuhosti je tedy materiálová charakteristika vazkopružného přetvoření při krátkodobém proměnném namáhání, které je závislé na teplotě a době trvání. Zároveň je asfaltová směs viskoelastický materiál, u kterého dochází k fázovému opoždění mezi σ a ε . Tento fázový posun φ je způsoben setrvačnými silami, které vznikají během

zkoušky při harmonickém kmitání, kdy je horní část zkušebního vzorku vychýlena na jednu stranu a setrvačné síly působí na druhou. Při harmonickém zatěžování s přetvořením ε do $50 * 10^{-6}$ se neprojevuje únava materiálu.

3.3.6. *Odolnost asfaltové směsi vůči únavě*

Zatěžování probíhá ve stejném zařízení jako při zkoušce měření tuhosti, kdy je komolý klín na spodní straně vetknut a horní strana je cyklicky zatěžována. Při této metodě se zvolí počáteční přetvoření, které je během průběhu zkoušky konstantní (strain control), kde působením namáhání dochází k poklesu komplexního modulu, v závislosti na počtu cyklů, a tím i k šíření únavových trhlin.

Počáteční přetvoření ε je nastaveno v rozsahu $100 * 10^{-6}$ až $400 * 10^{-6}$, čemuž odpovídá předpokládaná životnost 10^3 až 10^7 zatěžovacích cyklů pro asfaltové směsi. Zkouška se provádí při zatěžovací frekvenci 25 Hz za stálé teploty 10 °C, kdy minimální doba temperace zkušebního tělesa je 4 hodiny. Výsledkem měření je grafické znázornění únavové čáry ve Wöhlerově diagramu, které v logaritmickém měřítku vyjadřuje závislost deformace na počtu cyklů před dosažením únavy. Do grafu se zaznamenává počáteční hodnota přetvoření a k ní odpovídající počet cyklů zatížení, kdy je dosažena poloviční hodnota počátečního modulu tuhosti. Zaznamenanými body se proloží spojnice trendu, z jejichž sklonu se stanoví poměrné přetvoření ε pro hodnotu 10^6 zatěžovacích cyklů, které určuje odolnost směsi proti únavě [24].
Parametry ke stanovení únavy

3.3.6.1. *Výpočet maximální amplitudy poměrného přetvoření*

$$\log \varepsilon_0 = a + b * \log N$$

- kde ε_0 je maximální amplituda počátečního poměrného přetvoření
 a je kvocient únavové zkoušky
 b je sklon únavové křivky
 N je počet cyklického zatížení

3.3.6.2. Výpočet počátečního přetvoření ε_6 odvozený při 10^6 zatěžovacím cyklu

$$\log \varepsilon_6 = a + 6b$$

kde ε_6 je průměrné přetvoření odvozené z únavové přímky při 10^6 cyklech

3.3.6.3. Výpočet cyklů zatížení odpovídající počátečnímu přetvoření ε_0

$$N = 10^6 * \frac{\varepsilon_6^B}{\varepsilon_0^B}$$

kde B je charakteristika únavy

3.3.6.4. Výpočet charakteristiky únavy

$$B = -\frac{1}{b}$$

Podrobnější popis zkoušky je uveden v ČSN EN 12697-24[24]

Únava zhutněné asfaltové směsi je definována jako následek porušování vnitřní struktury při opakovaném střídání zatížení. Stanovuje se tedy životnost asfaltové směsi, která se odvíjí od počtu opakování zatížení. Životnost je ukončena při vzniku trhliny nebo při poklesu modulu tuhosti na polovinu počáteční hodnoty. Parametr únavy je stanoven z proložené čáry z naměřených hodnot a odpovídá poměrnému přetvoření ε pro hodnotu 10^6 zatěžovacích cyklů.

4. Použité materiály

Pro výrobu obou směsí bylo použito stejných materiálů. Kamenivo bylo přivezeno z lomu Luleč. Další složkou pro výrobu asfaltové směsi byl filer neboli vápencová moučka, která byla dovezena ze Šumperka. A poslední složkou pro výrobu bylo asfaltové pojivo modifikované pryžovým granulátem, které bylo vyrobeno na obalovně v mísicím zařízení.

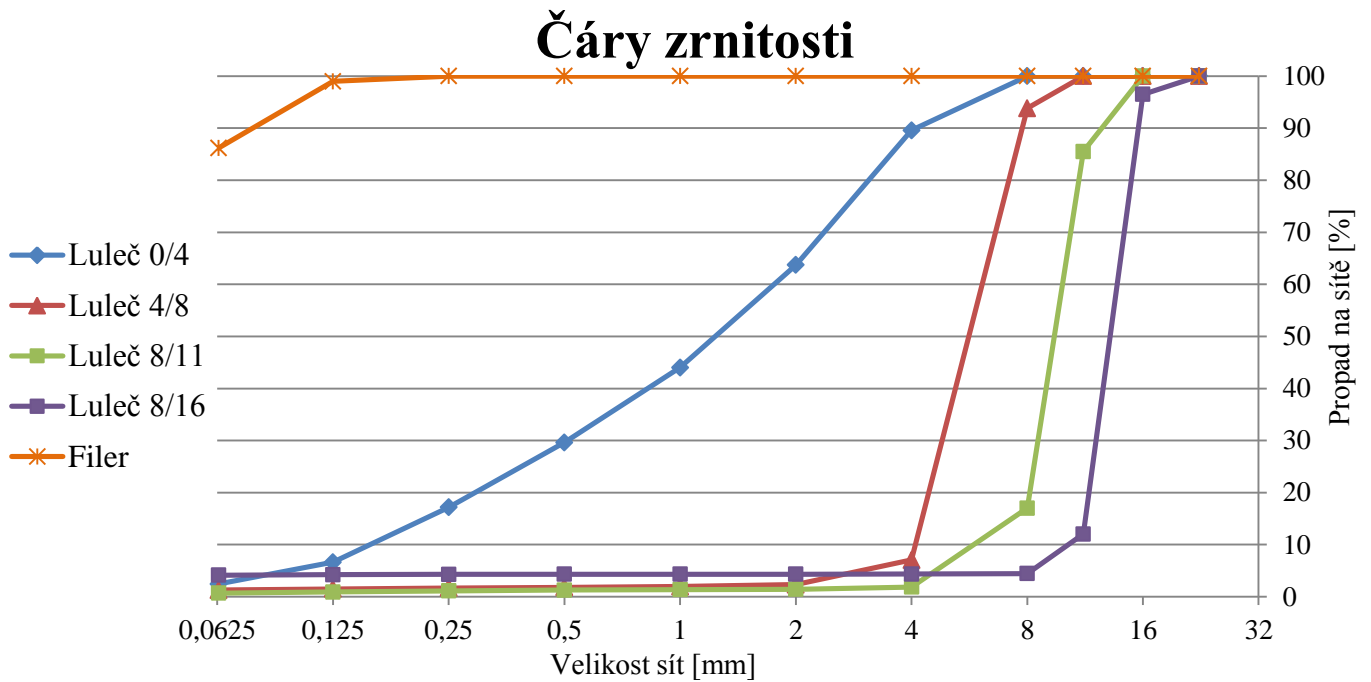
4.1. Kamenivo

Pro výrobu směsí bylo použito frakcí 0/4, 4/8, 8/11 a 8/16 mm kameniva a fileru. U každé frakce byla stanovena zrnitost podle síťového rozboru (kap. 3.1.1). Výsledné zrnitosti jsou uvedeny v tabulce 2.

| | | Frakce kameniva a fileru | | | | |
|----------------------|-------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0/4 | 4/8 | 8/11 | 8/16 | Filer |
| Velikost ok sít [mm] | 22,4 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| | 16 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 96,5 | 100,0 |
| | 11,2 | 100,0 | 100,0 | 85,5 | 12,0 | 100,0 |
| | 8 | 100,0 | 93,8 | 17,0 | 4,5 | 100,0 |
| | 4 | 89,6 | 7,0 | 1,9 | 4,3 | 100,0 |
| | 2 | 63,7 | 2,3 | 1,4 | 4,3 | 100,0 |
| | 1 | 44,0 | 2,0 | 1,4 | 4,3 | 100,0 |
| | 0,5 | 29,6 | 1,8 | 1,3 | 4,3 | 100,0 |
| | 0,25 | 17,2 | 1,7 | 1,1 | 4,3 | 100,0 |
| | 0,125 | 6,6 | 1,5 | 0,9 | 4,2 | 99,0 |
| | 0,063 | 2,5 | 1,3 | 0,7 | 4,1 | 86,2 |

Tab. 2 Stanovené zrnitosti jednotlivých frakcí

Ze stanovených zrnitostí lze sestavit čáry zrnitosti jednotlivých frakcí (graf 1), které jsou podkladem pro návrhy čar zrnitostí asfaltových směsí obou konceptů.



Graf 1 Čáry zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva a fileru



Obr. 24 Jednotlivé frakce použitého kameniva a fileru

4.2. Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem

Silniční asfalt výrobce OMV gradace 50/70 byl modifikován na obalovně v Hulíně přidáním 15 % celkové hmotnosti pryžového granulátu od společnosti RPG recycling s.r.o. o zrnitosti 0/1 mm. Pojivo bylo odebráno 21. 8. 2014 ve 20.00 hodin. Množství přidaného pryžového granulátu vypovídá, že se jedná o pojivo vysokoviskózní (kap. 1.1.1). V laboratoři byly následně provedeny zkoušky penetrace jehlou, bod měknutí, resilience, dynamická viskozita a vratná duktilita (kap. 3.2). Naměřené parametry jsou uvedeny v tabulce 3.

CRmB 15% - výsledné hodnoty z měření

| | | |
|----------------------------|---------------|------|
| Penetrace jehlou | <i>[p.j.]</i> | 28 |
| Bod měknutí | <i>[°C]</i> | 66,0 |
| Resilience | <i>[%]</i> | 32 |
| Dynamická viskozita | <i>[Pa*s]</i> | 4,3 |
| Vratná duktilita | <i>[%]</i> | 74 |

Tab. 3 Naměřené vlastnosti asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem použitého pro výrobu směsí



Obr. 25 Použitý asfalt modifikovaný pryžovým granulátem

5. Návrh asfaltových směsí

Při návrhu jednotlivých směsí bylo vždy několik parametrů, které byla snaha dodržet, eventuálně byly k dispozici vzory, ke kterým byla snaha se přiblížit. Asfaltová směs navržená podle švédského konceptu je dále označována jako **SMA 16**, protože její složení se blíží směsím typu asfaltový koberec mastixový. Asfaltová směs navržená podle konceptu USA je označena jako **AC 16**.

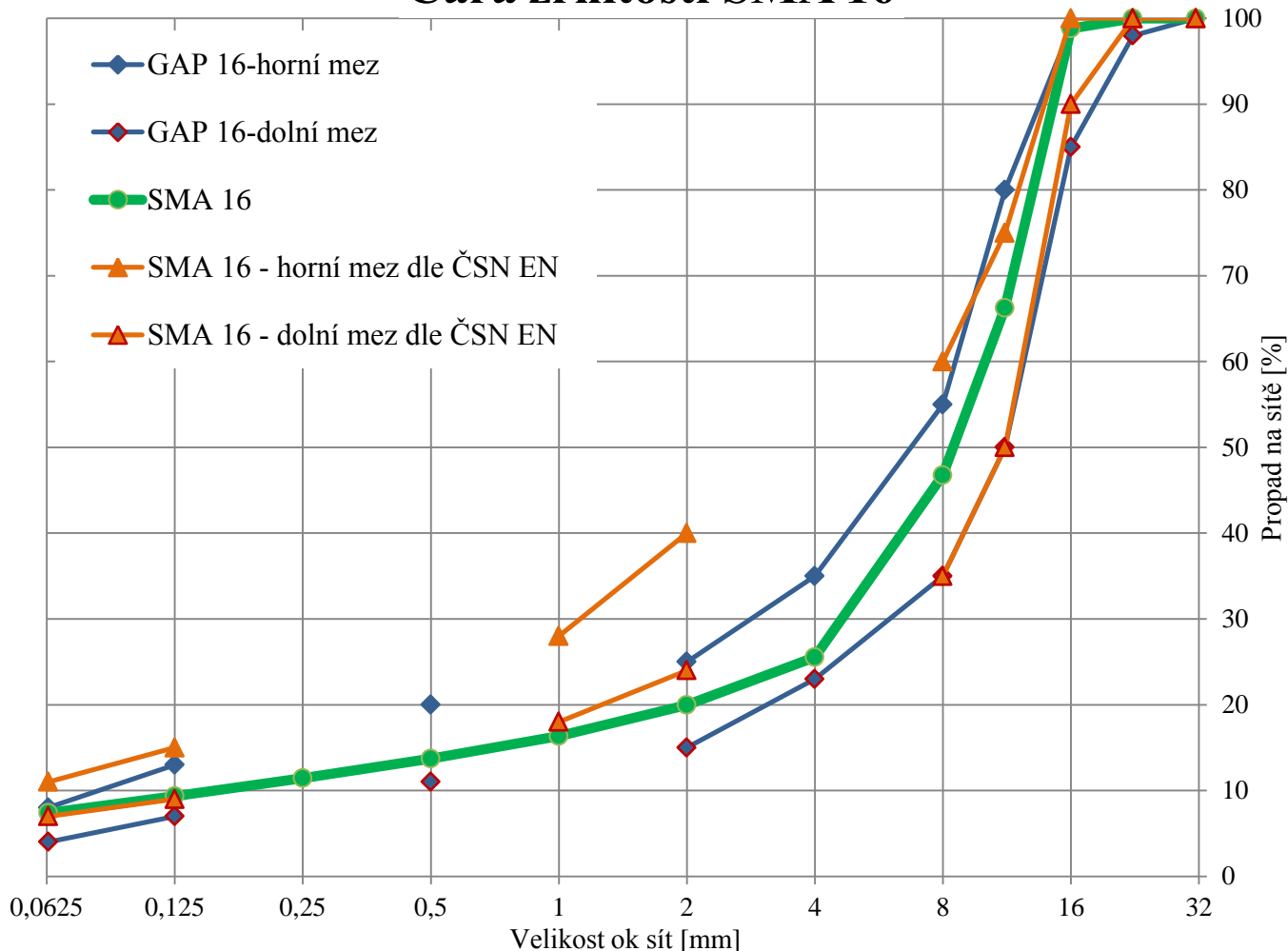
5.1. Návrh asfaltové směsi SMA 16

Pro návrh asfaltového koberce mastixového posloužila jako vzor švédská směs GAP 16 [7]. Tato směs používá kamenivo maximální frakce 16 mm, je používán viskovizkózní asfalt modifikovaný pryžovým granulátem s obsahem přibližně kolem 8,3 % až 9,0 % s větším množstvím fileru, kde se výsledná mezerovitost asfaltové směsi pohybuje kolem 2,0 % až 2,5 % [7], [8]. V tabulce 4 jsou uvedeny meze pro navrženou čáru zrnitosti.

| | | GAP 16 meze dle [7] | SMA 16 meze dle [25] | SMA 16 - navržené |
|----------------------|--------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| Velikost ok sít [mm] | 31,5 | 100 | 100 | 100,0 |
| | 22,4 | 100 - 98 | 100 | 100,0 |
| | 16 | 99 - 85 | 100 - 90 | 98,8 |
| | 11,2 | 80 - 50 | 75 - 50 | 66,2 |
| | 8 | 55 - 35 | 60 - 35 | 46,8 |
| | 4 | 35 - 23 | - | 25,5 |
| | 2 | 25 - 15 | 40 - 24 | 20,0 |
| | 1 | - | 28 - 18 | 16,3 |
| | 0,5 | 20 - 11 | - | 13,7 |
| | 0,25 | - | - | 11,4 |
| | 0,125 | 13 - 7 | 15 - 9 | 9,4 |
| | 0,063 | 8 - 4 | 11 - 7 | 7,4 |

Tab. 4 Hranice mezi vzorové směsi GAP 16 [7], meze SMA 16 dle [25] a zrnitost navržené asfaltové směsi SMA 16

Čára zrnitosti SMA 16



Graf 2 Čára zrnitosti SMA 16, horní a dolní meze GAP 16[7] a SMA 16 dle [25]

Jako dolní a horní mez za GAP 16 bylo vzato návrhové rozmezí čáry zrnitosti pro tuto směs. Dle ČSN EN 13108-5 [25] jsou uvedeny meze pro standardní nemodifikovanou asfaltovou směs. TP 148 [29] se zabývá asfaltovými směsmi s modifikovaným pojivem, kde je zmíněna i směs SMA společně se stanovenými mezemi, nicméně počítá s použitím maximální frakce 11, čili pro SMA 16 s modifikovaným pojivem meze nejsou stanoveny. Navržená čára zrnitosti pro SMA 16 by se měla nacházet ve stanovených mezích. Primárně dle návrhového konceptu GAP 16 [7] (graf 2).

K již navržené čáře zrnitosti pro směs SMA 16 bylo stanoveno návrhové množství pojiva 8,5 %, 9,0 % a 9,5 % CRmB. Toto množství bylo stanoveno v rámci pokrytí používaného množství CRmB v národním konceptu Švédska, navíc se obecně

pro směs SMA množství pojiva navrhuje empiricky, tedy na základě předchozích zkušeností.

Pro každé množství byla vyrobena sada tří Marshallových těles, dle ČSN EN 12697-30 [17] (kap. 5.4), ze kterých byla stanovena charakteristika navržené směsi SAM 16 (tabulka 5).

| SMA 16 | | | | | | |
|---------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|------------|------------|
| CRmB | ρ_{bssd} | ρ_{mv} | V_m | t | VMA | VFB |
| [%] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [%] | *10 ⁻³ [mm] | [%] | [%] |
| 8,5 | 2 239 | 2 382 | 6,0 | 7,93 | 6,2 | 3,0 |
| 9,0 | 2 229 | 2 354 | 5,3 | 8,45 | 5,5 | 3,6 |
| 9,5 | 2 238 | 2 314 | 3,3 | 8,97 | 3,5 | 6,0 |

Tab. 5 Charakteristické hodnoty navržené směsi SMA 16

Podrobné naměřené parametry jsou uvedeny v příloze 12.1

Ze tří návrhových množství pojiva pro určenou křivku zrnitosti bylo, na základě naměřených charakteristických vlastností – zejména mezerovitosti, jako optimální množství pro asfaltovou směs SMA 16 zvoleno 9,5 % CRmB.

5.2. Návrh asfaltové směsi AC 16

U navrhování asfaltového betonu podle amerického konceptu bylo zapotřebí dodržet více parametrů. Spojené státy svojí rozlohou značně převyšují Švédsko, a tudíž si musí poradit s širším spektrem klimatických podmínek, navíc každý jednotlivý stát může používat vlastní recepturu, která těmto podmínkám vyhovuje a v celkovém porovnání se od sebe liší jak požadované parametry, tak jednotlivé návrhy na výrobu směsi. Pro tento koncept bylo stanoveno, že výsledná čára zrnitosti bude navržena podle Americké asociace státních dálnic a dopravních úředníků (AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials) [26], dále podle Washingtonského oddělení dopravy pro asfaltové povrchové úpravy (WSDOT - BST – Washington state Department of Transportation - Bitumen Surface Treatment) [27] a Texaského návrhu na hrubozrnnou směs SMAR [7].

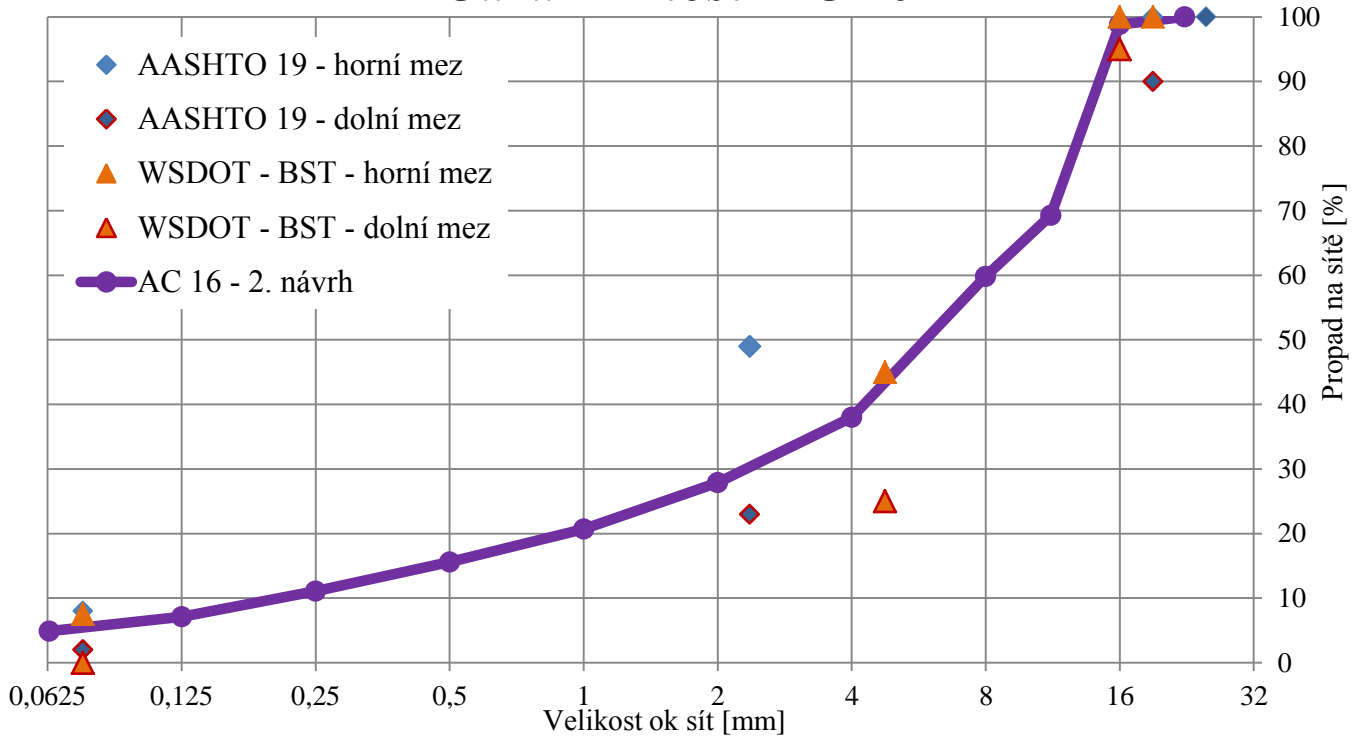
Z AASHTO a WSDOT byly pro návrh čáry zrnitosti vybrány meze pro použití největší frakce 19 mm (v USA používají jiný systém velikostí pro frakce kameniva i jiné velikosti ok sít). Texaský návrh byl také vybrán kvůli používání větších frakcí zrn, než častěji používaných 9,5 mm pro obrusnou vrstvu (tabulka 6). Mezerovitost navržené směsi by se měla pohybovat kolem 4,5 % až 6,5 % s obsahem 6,5 % až 8,5 % asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem a nižším obsahem fileru.

| | | AASHTO 19 meze dle [26] | WSDOT - BST meze dle [27] | Texas SMAR meze dle [7] | | | AC 16 meze dle [9] | AC 16 1. návrh | AC 16 2. návrh |
|----------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|--------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Velikost ok sít [mm] | 25 | 100 | | | Velikost ok sít [mm] | 22,4 | 100 | 100 | 100 |
| | 19 | 100 - 90 | 100 | 100 | | 16 | 100 - 90 | 98,8 | 98,8 |
| | 16 | - | 100 - 95 | - | | 11,2 | - | 69,1 | 69,3 |
| | 12,5 | - | - | 85 - 72 | | 8 | 80 - 52 | 58,5 | 59,8 |
| | 9,5 | - | - | 70 - 50 | | 4 | 61 - 31 | 36,6 | 38 |
| | 4,75 | - | 45 - 25 | 45 - 30 | | 2 | 45 - 20 | 26,4 | 27,9 |
| | 2,36 | 49 - 23 | - | 27 - 17 | | 1 | - | 19,2 | 20,7 |
| | 1,18 | - | - | 22 - 12 | | 0,5 | - | 14,1 | 15,6 |
| | 0,6 | - | - | 20 - 8 | | 0,25 | - | 9,6 | 11,1 |
| | 0,3 | - | - | 15 - 6 | | 0,125 | 12 - 4 | 5,7 | 7,1 |
| | 0,075 | 8 - 2 | 7,5 - 0 | 9 - 5 | | 0,063 | 10 - 3 | 3,6 | 4,9 |

Tab. 6 Hranice mezi vzorových směsí AASHTO 19[26], WSDOT – BST[27], Texas SMAR[7], meze AC 16[9] a zrnitost navržené asfaltové směsi AC 16

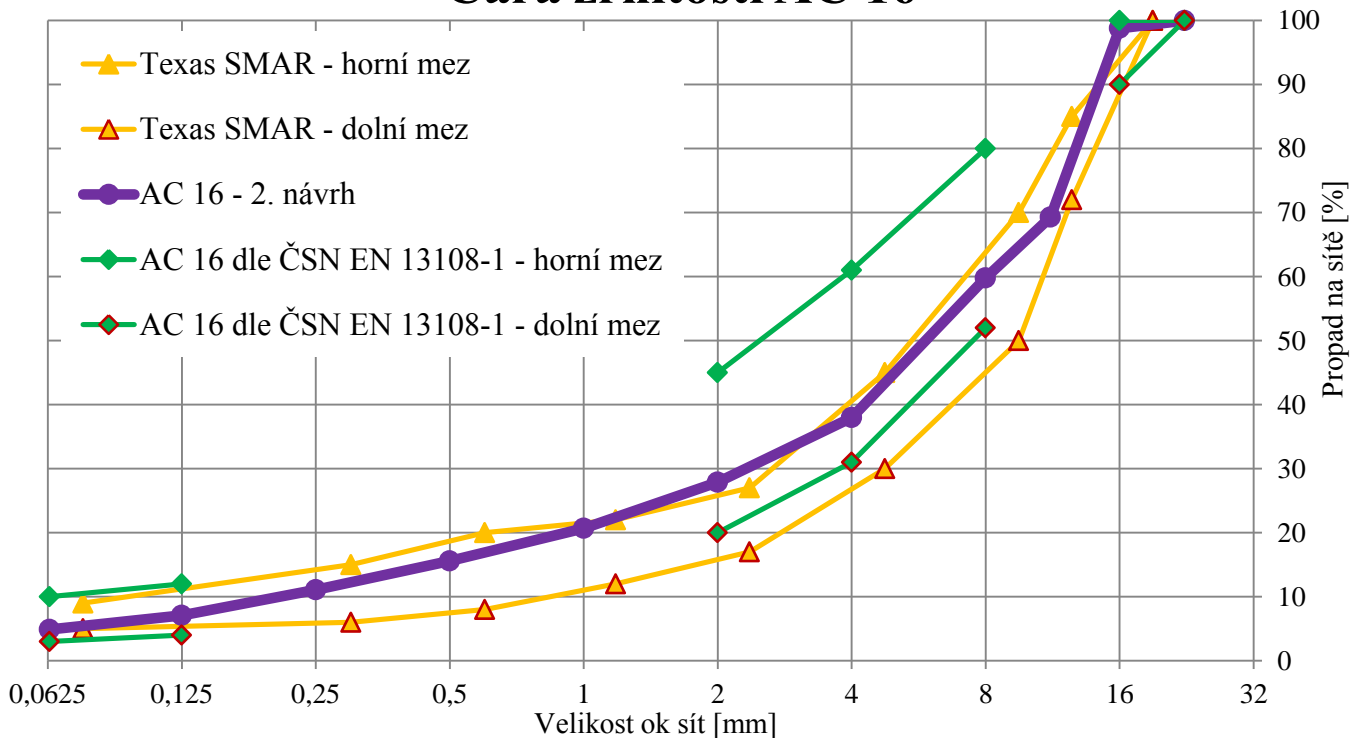
Podobně jako u navržené směsi SMA 16, tak i v tomto případě byly meze určeny z jednotlivých rozmezí vzorových návrhů. Dále jsou ještě zobrazeny meze dle ČSN EN 13108-1 [9] pro klasifikaci navržené směsi, že splňuje parametry pro označení AC neboli asfaltový beton.

Čára zrnitosti AC 16



Graf 3 Čára zrnitosti AC 16, horní a dolní meze AASHTO [26] a WSDOT – BST [27] obě pro frakci 19 mm

Čára zrnitosti AC 16



Graf 4 Čára zrnitosti AC 16, horní a dolní meze Texas SMAR [27] a AC 16 [7]

V grafu 3 jsou meze AASHTO a WSDOT - BST zobrazeny bodově, neboť hodnoty jsou pouze lokální a snaha při návrhu čáry zrnitosti pro AC 16 byla, aby se držela mezi horní a dolní mezí pro danou hodnotu frakce. V grafu 4 jsou meze pro Texas SMAR zobrazeny již čarou, neboť hodnoty mezí se nacházejí ve frakcích, které následují po sobě. Stejně tak u mezí dle ČSN EN 13108-1 [9] se meze nacházejí pro každou frakci a proto je možné je spojit. Navržená čára zrnitosti AC 16 by se opět měla pohybovat mezi hodnotami mezí, primárně pro návrhy AASHTO [26], WSDOT – BST [27] a Texas SMAR [27].

K 1. návrhu čáry zrnitosti pro směs AC 16 bylo stanoveno návrhové množství pojiva 6,3 %, 6,8 % a 7,3 % CRmB. Toto množství bylo určeno z rozmezí dle používaného konceptu. Také pro tuto směs byla vyrobena sada tří Marshallových, dle ČSN EN 12697-30 [17] (kap. 5.4), těles pro každé návrhové množství pojiva, ze kterých byly stanoveny charakteristické parametry pro navrženou směs AC 16 (tabulka 7).

| AC 16 – 1. návrh | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|------------|------------|
| CRmB | ρ_{bssd} | ρ_{mv} | V_m | t | VMA | VFB |
| [%] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [%] | *10 ⁻³ [mm] | [%] | [%] |
| 6,3 | 2 198 | 2 429 | 9,5 | 9,78 | 9,6 | 1,4 |
| 6,8 | 2 230 | 2 418 | 7,8 | 10,61 | 7,9 | 1,9 |
| 7,3 | 2 255 | 2 400 | 6,1 | 11,45 | 6,2 | 2,6 |

Tab. 7 Charakteristické hodnoty navržené směsi AC 16 – 1. návrh

Podrobné naměřené parametry jsou uvedeny v příloze 12.2

Naměřené charakteristické hodnoty 1. návrhu nesplňují požadavek na mezerovitost a také tloušťka filmu asfaltového pojiva je značně rozdílná ve všech třech případech. Proto byl proveden 2. návrh pro směs AC 16, u kterého byla upravena čára zrnitosti (tabulka 6). Stanovené návrhové množství pojiva zůstalo stejné jako u předchozího návrhu a to 6,3 %, 6,8 % a 7,3 % CRmB. Z následně vyrobených Marshallových těles byla opět stanovena charakteristika pro všechna navržená množství pojiva (tabulka 8).

AC 16 – 2. návrh

| CRmB | ρ_{bssd} | ρ_{mv} | V_m | t | VMA | VFB |
|-------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|------------|------------|
| [%] | [kg/m ³] | [kg/m ³] | [%] | *10 ⁻³ [mm] | [%] | [%] |
| 6,3 | 2 256 | 2 432 | 7,2 | 7,68 | 7,4 | 1,9 |
| 6,8 | 2 252 | 2 407 | 6,5 | 8,33 | 6,6 | 2,3 |
| 7,3 | 2 262 | 2 392 | 5,4 | 8,99 | 5,6 | 2,9 |

Tab. 8 Charakteristické hodnoty navržené směsi AC 16 – 2. návrh

Podrobné naměřené parametry jsou uvedeny v příloze 12.3

Ze tří návrhových množství pojiva je hodnota 7,3 % neoptimálnější, neboť splňuje požadovaný parametr mezerovitosti a tloušťkou asfaltového filmu se téměř rovná požadované hodnotě z předchozího návrhu pro směs SMA 16.

Rozdíl mezi prvním a druhým návrhem čáry zrnitosti pro směs AC 16 je uveden v tabulce 5, nicméně je onen rozdíl u určitých frakcí nejvýš pár jednotek, proto je v grafech 3 a 4 je uveden pouze druhý výsledný návrh čáry zrnitosti, neboť by se ve zmiňovaných grafech téměř překrývaly.

5.3. Porovnání parametrů vzorových i návrhových směsí

| | <i>Vzorové parametry pro směs SMA 16</i> | <i>Návrhové parametry směsi SMA 16</i> | | |
|---|--|--|-------|--------------|
| Obsah pojiva CRmB [%] | 8,3 % - 9,0 % | 8,5 % | 9,0 % | 9,5 % |
| Mezerovitost [%] | 2,0 % - 2,5 % | 6,0 % | 5,3 % | 3,3 % |
| Tloušťka filmu [*10⁻³ mm] | - | 7,93 | 8,45 | 8,97 |

Tab. 9 Vzorové a návrhové parametry pro směs SMA 16

Obecně platí, že s vyšším obsahem pojiva se při stejné míře zhutnění snižuje mezerovitost dané směsi. Při návrhu této směsi nebylo dosaženo přesného vzorového konceptu, nicméně při navýšení množství pojiva by nebyla zaručena požadovaná mezerovitost, navíc by vzrostl rozdíl od vzorového množství pojiva. S vyšším množstvím pojiva souvisí i vyšší náklady na výrobu a paradoxně i náročnější výroba směsi, proto návrhové parametry s 9,5 % pojiva pro výrobu SMA 16 byly schváleny jako přijatelné. Ze stanoveného návrhu pro SMA 16 byl pro návrh AC 16 navíc předán další parametr a to na tloušťku filmu pojiva (tabulka 9).

| | Vzorové parametry pro směs AC 16 | Návrhové parametry směsi AC 16 | | |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------|-------|
| | | 1. návrh | | |
| Obsah pojiva CRmB [%] | 6,5 % - 8,5 % | 6,3 % | 6,8 % | 7,3 % |
| Mezerovitost [%] | 4,5 % - 6,5 % | 9,5 % | 7,8 % | 6,1 % |
| Tloušťka filmu [$*10^{-3}$ mm] | 8,97 | 9,78 | 10,61 | 11,45 |

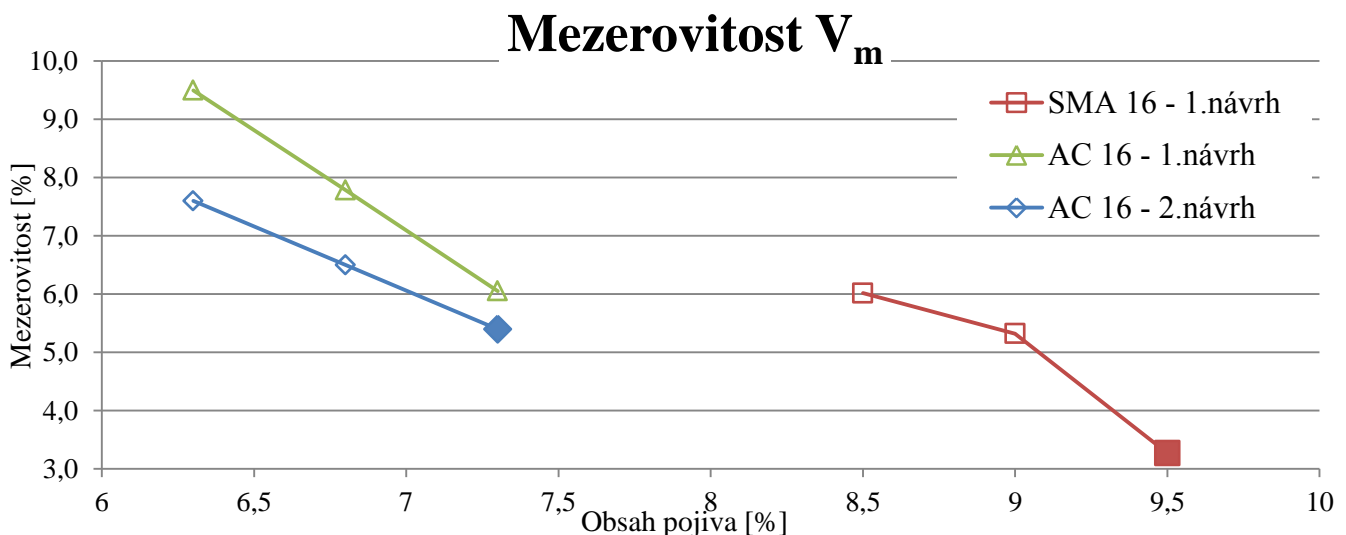
Tab. 10 Vzorové a návrhové parametry pro směs AC 16 – 1. návrh

I přesto, že se v jednom návrhovém parametru mezerovitost a obsah pojiva 1. návrhu vešly do mezních hodnot vzorového konceptu, tak pro dané množství 7,3 % pojiva neodpovídá ani se neblíží požadovaná tloušťka filmu asfaltového pojiva. Navíc u zbylých dvou návrhových parametrů směs dosahovala vysoké mezerovitosti (tabulka 10), která je znázorněna i v grafu 5. Proto byla čára zrnitosti upravena a byl vytvořen 2. návrh.

| | Vzorové parametry pro směs AC 16 | Návrhové parametry směsi AC 16 | | |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------|--------------|
| | | 2. návrh | | |
| Obsah pojiva CRmB [%] | 6,5 % - 8,5 % | 6,3 % | 6,8 % | 7,3 % |
| Mezerovitost [%] | 4,5 % - 6,5 % | 7,2 % | 6,5 % | 5,4 % |
| Tloušťka filmu [$*10^{-3}$ mm] | 8,97 | 7,68 | 8,33 | 8,99 |

Tab. 11 Vzorové a návrhové parametry pro směs AC 16 – 2. návrh

V tomto 2. návrhu již upravená čára zrnitosti a množství 7,3 % pojiva splňují všechny požadované parametry konceptu (tabulka 11), včetně tloušťky filmu pojiva o podobné hodnotě jako v případě směsi SMA 16.



Graf 5 Návrhové množství pojiv a jim odpovídající mezerovitost pro stanovenou čáru zrnitosti – plné body představují konečný návrh směsi

5.4. Výroba zkušebních těles

Výroba směsí byla provedena dle postupu v ČSN EN 12697-35 [28]. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.3, z namíchaných asfaltových směsí se vyrábí několik typů zkušebních těles.

Prvním typem zkušebních těles je tzv. *Marshallovo těleso*. Toto těleso se vyrábí dle postupu uvedeného v normě ČSN EN 12697-30 [17] s kamenivem o zrnitosti do 22,4 mm. Čerstvě namíchaná směs se nasype do ocelové formy pro hutnění a následně se v rázovém zhutňovači hutnícím beranem pěchu, který padá z předepsané výšky, asfaltová směs hutní požadovaným počtem rázů.



Obr. 26 Rázový zhutňovač

Ze zkušenosti je doporučeno hutnění provádět ve třech vrstvách, pro stejnou hodnotu zhutnění v celém tělese. Hutnící teplota asfaltové směsi se stanoví dle ČSN EN 1269-35 [28] nebo její hodnotu definuje dodavatel. Kvůli rychlému klesání teploty při hutnění je vhodné nechat temperovat pomocné pracovní náčiní a to ocelovou formu, podložku i trychtýř. Požadované množství materiálu pro výrobu jednoho zkušebního tělesa je pro každou směs jiné, to z důvodu rozdílné objemové hmotnosti. U

zkušebních těles je potřeba dodržet její výšku $63,5 \pm 2,5$ mm, průměr tělesa by měl být roven vnitřnímu průměru ocelové formy a to $101,6 \pm 0,1$ mm [17].

Z tohoto zkušebního tělesa se pro vyrobenou směs, v této práci, stanovuje objemová hmotnost (kap. 3.3.1.), maximální objemová hmotnost (kap 3.3.2.) a mezerovitost (kap. 3.3.3.).

Podrobnější popis zkoušky je uveden v ČSN EN 12697-30 [17].

Dalšími typy zkušebních těles jsou *trámečky* a *komolé klíny*. Tyto dva druhy těles se od sebe liší rozměry, kde trámeček je kvádr o stranách 50 x 50 mm a délce 200 mm, kdežto komolý klín má tloušťku 50 mm, dolní hrana má šířku 70 mm, horní hrana 50 mm a délka je 250 mm. Oba tyto typy těles jsou nařezány na kotoučové pile ze ztuhlé asfaltové desky o rozměrech 260 x 320 mm. Hutnění této desky se provádí dle ČSN EN 12697-33 [18] pomocí segmentového zhutňovače, který simuluje hutnění válcem pomocí ocelového běhounu, na kterém lze nastavit požadovanou tloušťku desky. Při tomto zvoleném typu hutnění desky lze hutnit celou desku najednou, kde se předeřtává směs rovnoměrně rozprostře do formy.



Obr. 27 Segmentový zhutňovač

Teoretické množství materiálu pro výrobu směsi se dá vypočítat z objemu desky, neboť známe rozměry hutnicí formy, a objemovou hmotnost zkoušené směsi z Marshallova tělesa. U vyrobené desky se taktéž stanoví objemová hmotnost, ze které se stanoví její míra zhutnění. Teploty hutnění jsou stanoveny normou ČSN EN 12697-35 [28], doporučuje se ze zkušenosti, pro udržení požadované hutnicí teploty, přehřát samotný segmentový zhutňovač.

Po zhutnění se vypočítá mezerovitost vyrobené desky a porovná se s mezerovitostí Marshallova tělesa ze stejné směsi. Výsledná míra zhutnění desky má odpovídat 99 % až 101 % objemové hmotnosti zjištěné z Marshallova tělesa [18].

V této práci trámečky slouží k zjištění nízkoteplotních vlastností (kap. 3.3.4) a na komolých klínech zjistíme modul tuhosti (kap. 3.3.5) a odolnost proti únavě (kap. 3.3.6).

Podrobnější popis zkoušky je uveden v ČSN EN 12697-33 [18].

5.4.1. Charakteristika vyrobených desek

Vstupní parametry pro výrobu desek byly stanoveny v předchozích kapitolách. Návrh a podrobnější složení obou směsí je uvedeno v kapitole 5.1, 5.2 a 5.3. Pro každou navrženou směs byla vyrobena sada 3 desek, jejichž charakteristika je uvedena v tabulce 12. Z jedné desky bylo vyřezáno 5 zkušebních trámeček pro zjištění nízkoteplotních vlastností a ze zbylých dvou desek bylo nařezáno 10 komolých klínů pro naměření modulů tuhosti a zjištění odolnosti proti únavě.

| Název desky | Maximální objemová hmotnost směsi ρ_{mV} [kg/m ³] | Objemová hmotnost desky ρ_{bssd} [kg/m ³] | Mezerovitost desky V_m [%] | Míra zhutnění desek [%] |
|--------------------------------------|---|---|---------------------------------|----------------------------|
| SWE (9,5%) 0 - SMA 16 | 2 314 | 2 256 | 2,5 | 100,8 |
| SWE (9,5%) I - SMA 16 | 2 314 | 2 235 | 3,4 | 99,9 |
| SWE (9,5%) II - SMA 16 | 2 314 | 2 230 | 3,6 | 99,6 |
| USA (7,3%) 0 - AC 16 | 2 392 | 2 266 | 5,2 | 100,5 |
| USA (7,3%) I - AC 16 | 2 392 | 2 241 | 6,3 | 99,4 |
| USA (7,3%) II - AC 16 | 2 392 | 2 251 | 5,9 | 99,8 |

Tab. 12 Charakteristické vlastnosti asfaltových desek



Obr. 28 Vyrobené desky obou směsí segmenotvým zhutňovačem

Podrobné naměřené parametry jsou uvedeny v příloze 12.4.

6. Výsledky zkoušek

Na zkušebních trámečcích a komolých klínech byly provedeny funkční zkoušky, které určují charakteristické vlastnosti obou výrobních konceptů asfaltových směsí. Výroba zkušebních těles je popsána v kapitole 5.4, návrhy obou použitých asfaltových směsí jsou uvedeny v kapitole 5.1, 5.2 a 5.3.

6.1. Nízkoteplotní vlastnosti

Zkouška byla provedena v zařízení Cyklon – 40 při rychlosti ochlazování 10 °C/hod a celý postup je popsán v kapitole 3.3.4. Pro oba koncepty asfaltové směsi bylo vyrobeno 5 zkušebních těles – trámečků. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 13 a 14 a jednotlivé průběhy znázorněny v grafech 6, 7 a 8.

SMA 16 - 9,5 % CRmB

| Těleso | Teplota vzorku při porušení [°C] | Max. napětí [MPa] | Max. síla při porušení [kN] | Plocha zkušebního tělesa [mm] |
|----------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| I | -23,8 | 3,53 | 8,83 | 50,0 x 50,0 |
| II | -23,4 | 3,19 | 8,22 | 50,9 x 50,7 |
| III | -22,8 | 3,31 | 8,54 | 50,9 x 50,7 |
| Ø | -23,3 | 3,34 | | |

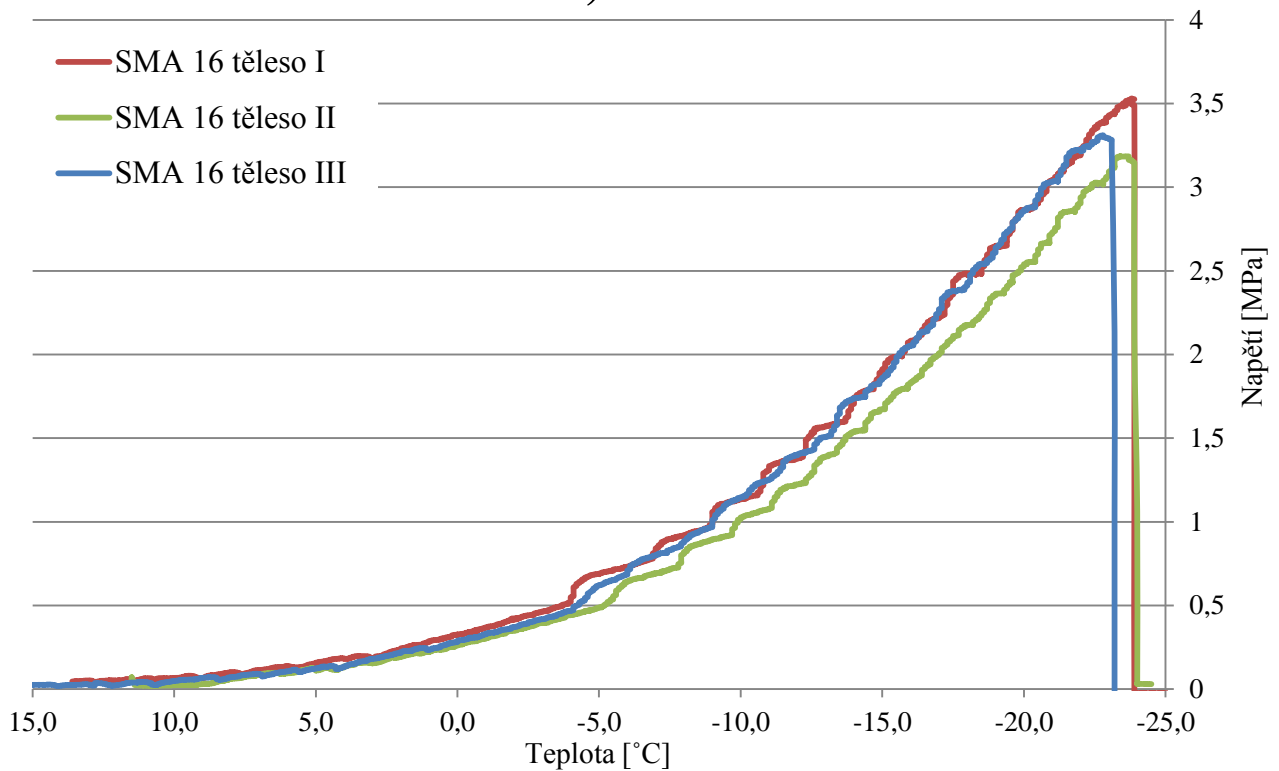
Tab. 13 Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi SMA 16

AC 16 - 7,3 % CRmB

| Těleso | Teplota vzorku při porušení [°C] | Max. napětí [MPa] | Max. síla při porušení [kN] | Plocha zkušebního tělesa [mm] |
|----------|-------------------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| I | -26,4 | 4,35 | 10,89 | 50,0 x 50,0 |
| II | -25,7 | 4,30 | 10,76 | 50,0 x 50,0 |
| IV | -23,5 | 4,14 | 10,65 | 50,7 x 50,7 |
| Ø | -25,2 | 4,27 | | |

Tab. 14 Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi AC 16

SMA 16 - 9,3 % CRmB



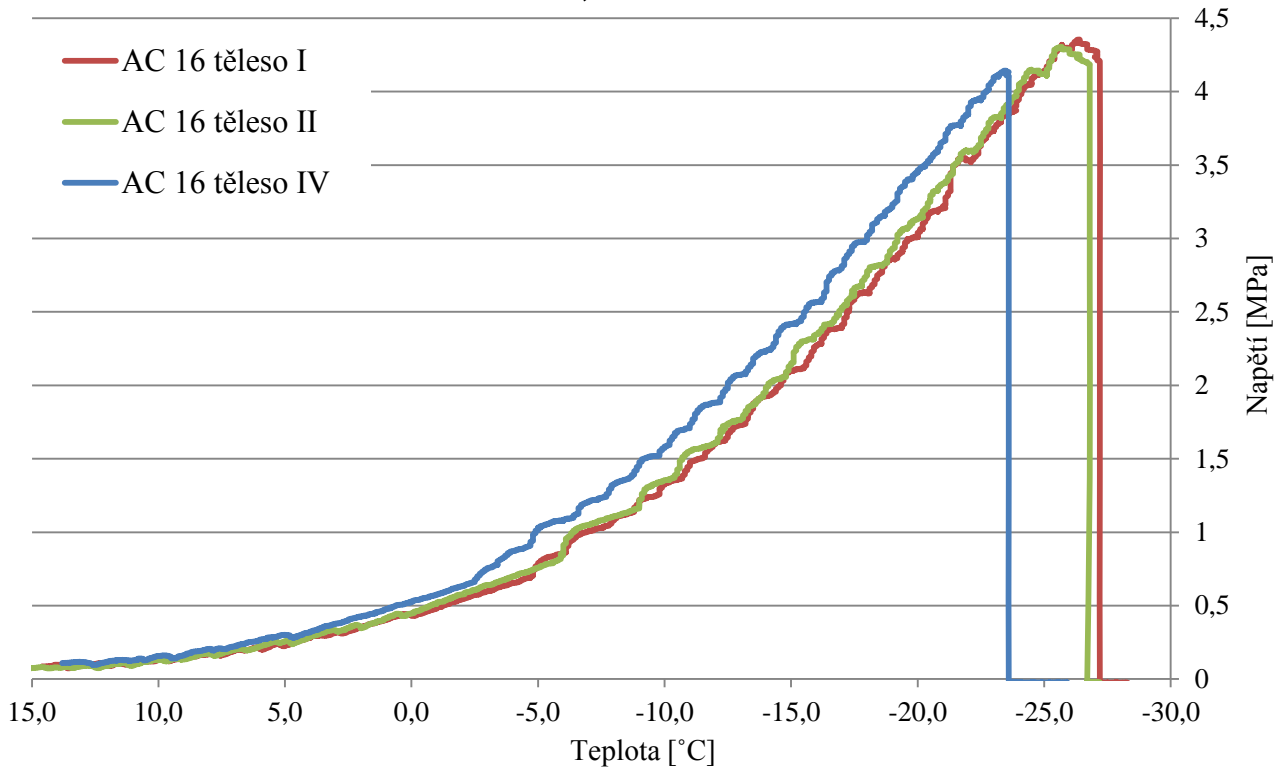
Graf 6 Průběh napětí při poklesu teploty ve zkušebním vzorku směsi SMA 16



Obr. 29 Porušené vzorky směsi SMA 16 při zjišťování nízkoteplotních vlastností

Obr. 30 Zvětšená plocha porušení jednoho vzorku SMA 16

AC 16 - 7,3 % CRmB



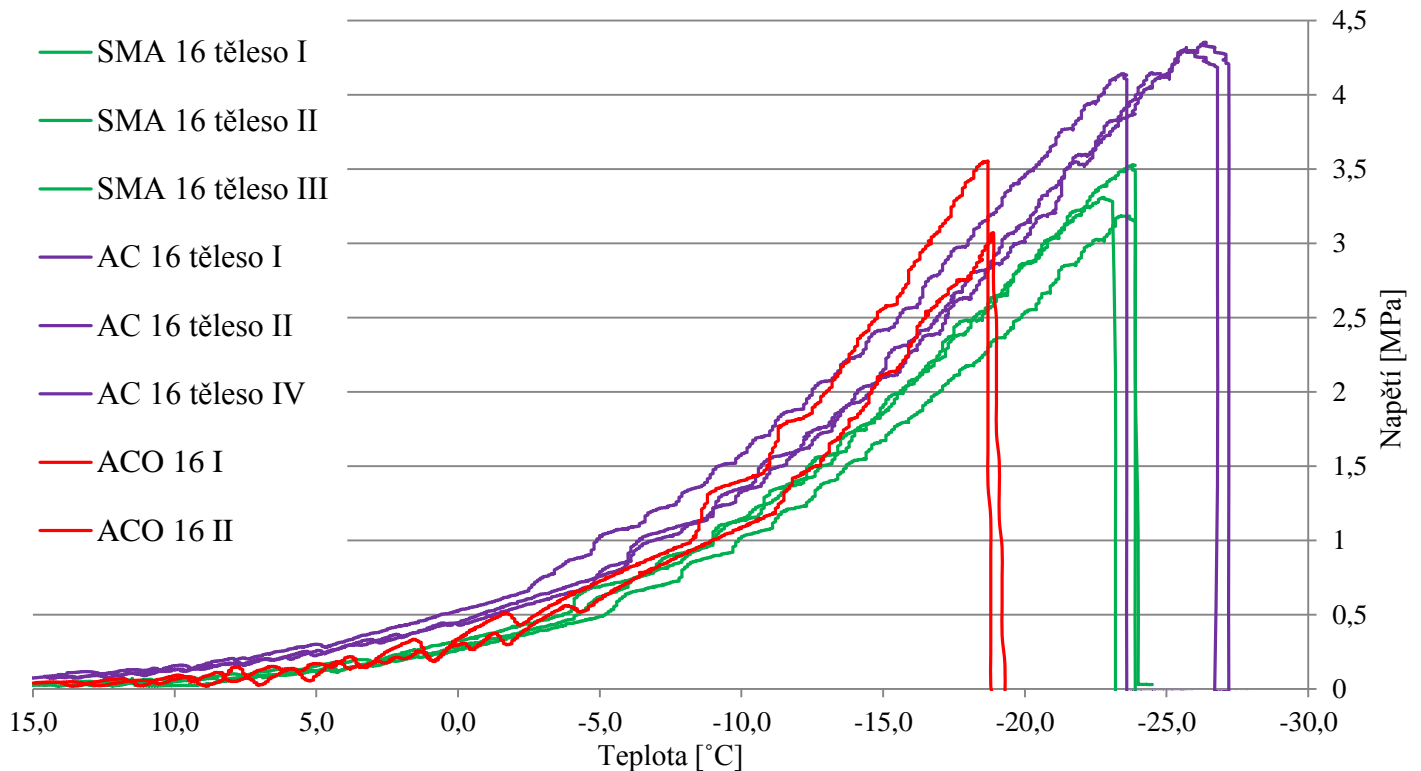
Graf 7 Průběh napětí při poklesu teploty ve zkušebním vzorku směsi AC 16



Obr. 31 Porušené vzorky směsi AC 16 při zjišťování nízkoteplotních vlastností

Obr. 32 Zvětšená plocha porušení jednoho vzorku AC 16

Porovnání



Graf 8 Vzájemné porovnání konceptů SMA 16, AC 16 a k přirovnání průběh nemodifikované asfaltové směsi ACO 16

Z naměřených hodnot vyplývá, že obě směsi s CRmB prokázaly výborné nízkoteplotní vlastnosti. Teplota při porušení obou směsí tahovou trhlinou byla nižší než $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Složení směsi podle amerického konceptu příznivě ovlivňuje odolnost vůči vzniku mrazové trhliny. V grafu 8 je uveden průběh zkoušky nízkoteplotních vlastností obou srovnávaných směsí ve srovnání s nízkoteplotními vlastnostmi běžně používané směsi asfaltového betonu pro obrusné vrstvy se 4,4 % silničního asfaltu a z jeho průběhu lze vyčíst, že k porušení vzorku nastalo ještě před dosažením teploty $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zato při použití modifikovaného pojiva došlo k porušení vždy pod teplotou $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, u směsi SMA 16 kolem teploty $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ a u směsi AC 16 i pod $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Směs AC 16 (koncept USA) navíc dosáhla vyššího maximálního tahového napětí (v průměru 4,27 MPa). V případě směsi SMA 16 docházelo oproti směsi AC 16 k lepší relaxaci tahového napětí, protože k nárůstu tohoto napětí začalo docházet později v průběhu zkoušky. Z toho tedy vyplývá, že použití asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem a úprava návrhu asfaltové směsi zlepší nízkoteplotní vlastnosti asfaltové směsi. Nicméně u této zkoušky není v žádné ČSN EN ani TP uveden požadovaný parametr, tudíž tuto zkoušku lze použít jen k porovnání různých typů směsí mezi sebou.

Jednotlivé protokoly zkoušky nízkoteplotních vlastností jsou uvedeny v příloze 12.6

6.2. Moduly tuhosti

Zkouška byla provedena dvoubodovým ohybem komolého klínu při teplotách $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ při působení zatěžovacích frekvencí 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz a 25 Hz. Celý postup měření je uveden v kapitole 3.3.5. Z obou navržených směsí bylo vyrobeno 10 zkušebních těles. První měření proběhlo při teplotě $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a u každé frekvence zatížení bylo provedeno 7 měření. Z naměřených parametrů bylo provedeno první stanovení průměrných hodnot modulu pružnosti. Měření při všech ostatních teplotách bylo provedeno u pouze 5 zkušebních těles z každé směsi, které byly průměru nejbližší, a při každé frekvenci zatěžování bylo provedeno 10 měření. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulkách 15 a 16 a průběh je znázorněn v grafech 9 a 10. V grafu 11 je zobrazena teplotní citlivost obou směsí, tedy vliv změny teploty na průměrnou hodnotu modulu tuhosti při frekvenci zatížení 10 Hz.

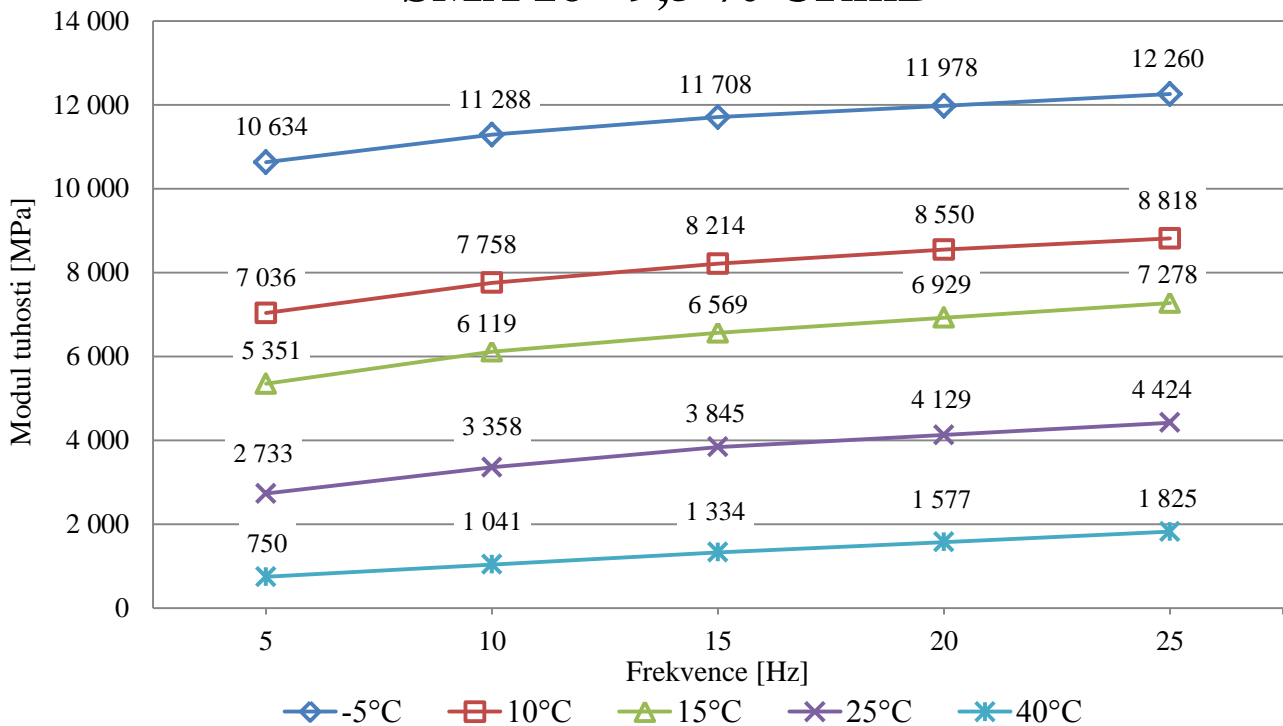
| SMA 16 - 9,5 % CRmB | | | | | | |
|--------------------------------|----------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | | Frekvence [Hz] | | | | |
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Teplota [$^{\circ}\text{C}$] | -5°C | 10 634 | 11 288 | 11 708 | 11 978 | 12 260 |
| | 10°C | 7 036 | 7 758 | 8 214 | 8 550 | 8 818 |
| | 15°C | 5 351 | 6 119 | 6 569 | 6 929 | 7 278 |
| | 25°C | 2 733 | 3 358 | 3 845 | 4 129 | 4 424 |
| | 40°C | 750 | 1 041 | 1 334 | 1 577 | 1 825 |

Tab. 15 Průměrné hodnoty modulu tuhosti SMA 16

| AC 16 – 7,3 % CRmB | | | | | | |
|--------------------------------|----------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| | | Frekvence [Hz] | | | | |
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Teplota [$^{\circ}\text{C}$] | -5°C | 11 505 | 12 187 | 12 616 | 12 941 | 13 269 |
| | 10°C | 8 461 | 9 249 | 9 706 | 10 012 | 10 341 |
| | 15°C | 6 844 | 7 616 | 8 101 | 8 443 | 8 740 |
| | 25°C | 3 980 | 4 725 | 5 179 | 5 528 | 5 920 |
| | 40°C | 1 330 | 1 725 | 2 050 | 2 296 | 2 737 |

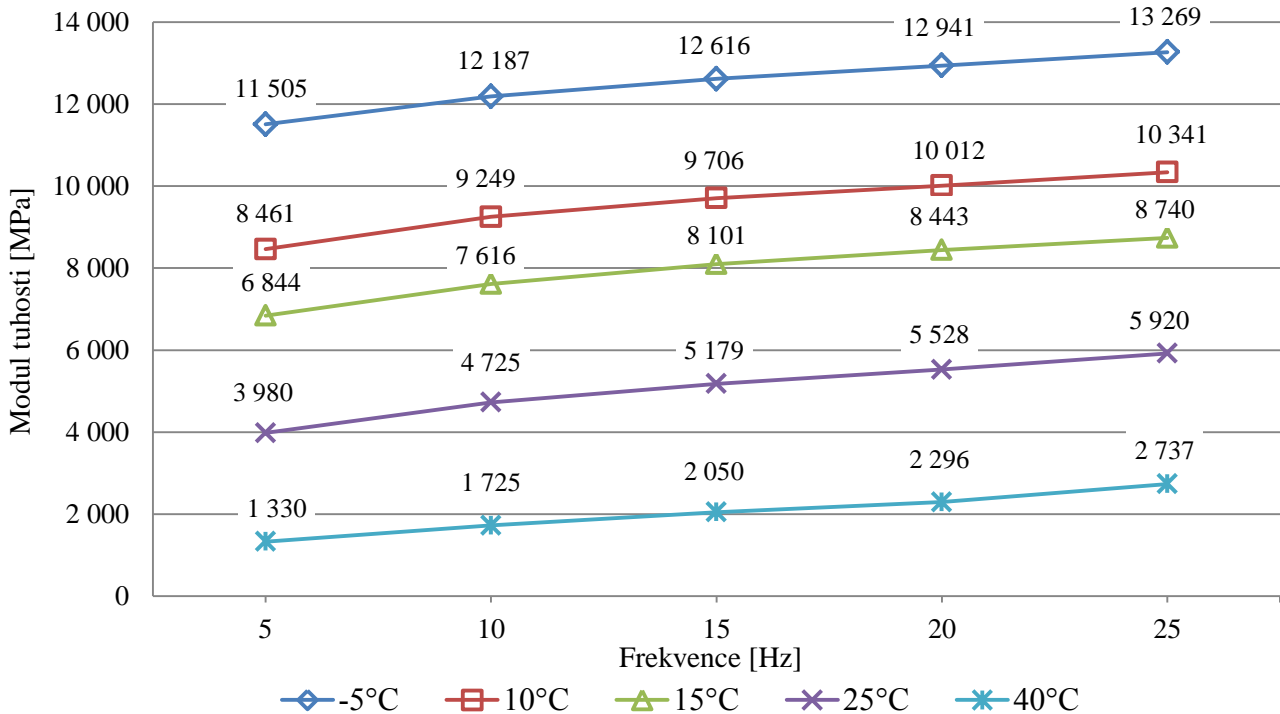
Tab. 16 Průměrné hodnoty modulu tuhosti AC 16

SMA 16 - 9,5 % CRmB



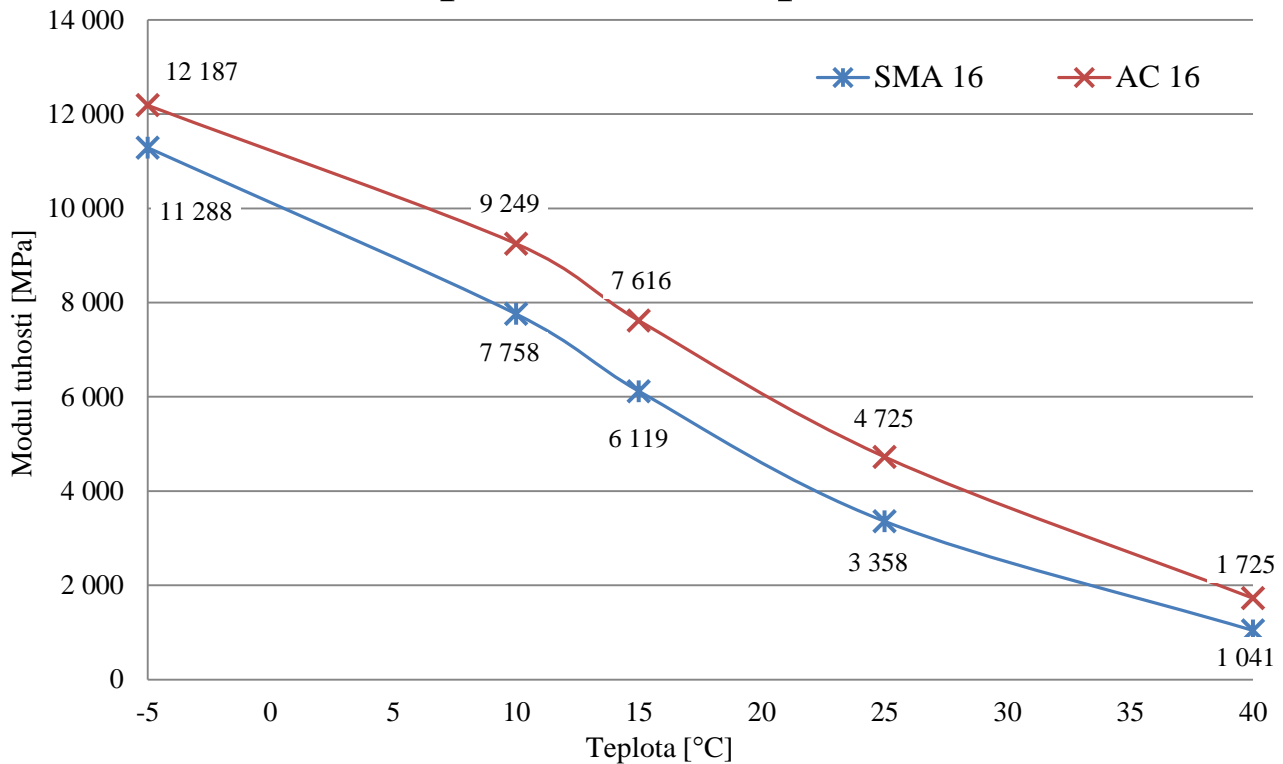
Graf 9 Výsledné moduly tuhosti směsi SMA 16 a jejich závislost na teplotě a frekvenci zatěžování

AC 16 - 7,3 % CRmB



Graf 10 Výsledné moduly tuhosti směsi AC 16 a jejich závislost na teplotě a frekvenci zatěžování

Teplotní citlivost při 10Hz



Graf 11 Teplotní citlivost obou směsí pro frekvenci zatížení 10 Hz

Z naměřených hodnot je patrné, že u asfaltové směsi AC 16, s použitím menšího množství CRmB (7,3 %), jsou naměřeny vyšší hodnoty modulu tuhosti, než u asfaltové směsi SMA 16 s obsahem 9,5 % modifikovaného pojiva. Z průběhu křivek v grafu teplotní citlivosti lze vyjádřit, že pokles teploty má na modul tuhosti u obou směsí přibližně stejný vliv.



Obr. 33 Zkušební komolé klíny pro zjištění modulu tuhosti a odolnosti proti únavě

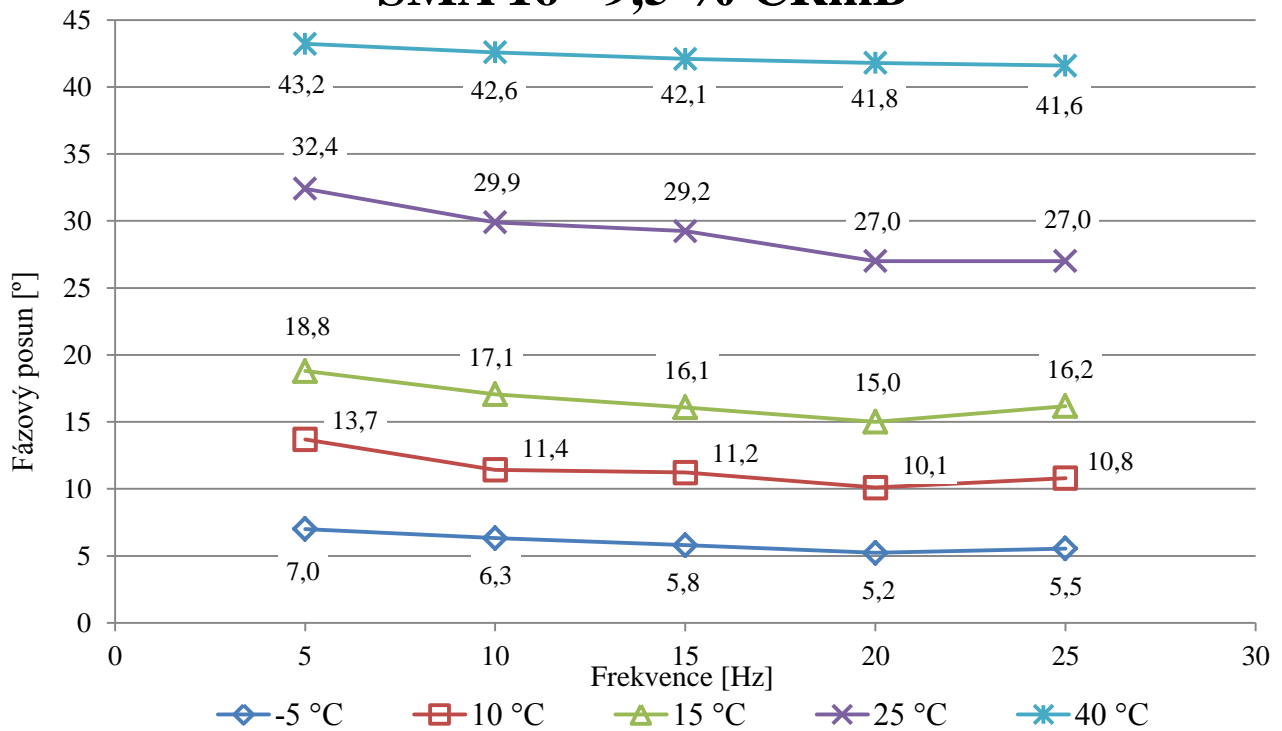
V platné TP 148 [4] z roku 2009 je uveden minimální požadavek modulu tuhosti pouze pro modifikovanou asfaltovou směs typu AC a to $S_{min} = 4500 \text{ MPa}$, což zkoušená směs AC 16 s modulem tuhosti $S_{AC\ 16} = 7616 \text{ MPa}$ splňuje.

V revidované, nicméně ještě neplatné, TP 148 [29] jsou uvedeny nové minimální hodnoty modulu tuhosti, tentokrát i pro směs SMA. Pro směs AC i SMA nabývá minimální hodnota modulu tuhosti stejných parametrů a to $S_{min} = 5500 \text{ MPa}$, kterou obě směsi ($S_{AC\ 16} = 7\ 616 \text{ MPa}$, $S_{SMA\ 16} = 6\ 119 \text{ MPa}$) s rezervou splňují.

Požadované minimální hodnoty modulu tuhosti jsou uváděny při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz .

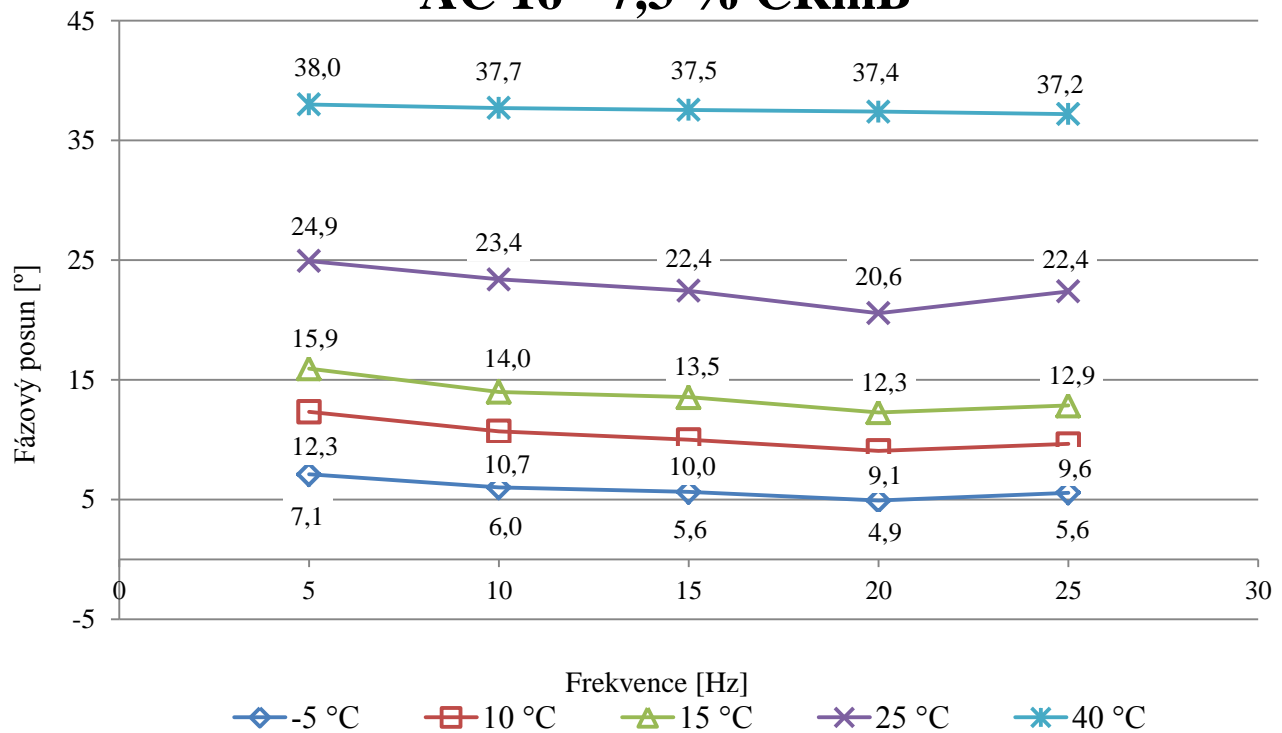
Podrobné naměřené parametry jsou uvedeny v příloze 12.5

SMA 16 - 9,5 % CRmB



Graf 12 Naměřené hodnoty fázového posunu směsi SMA 16 v závislosti na frekvenci

AC 16 - 7,3 % CRmB



Graf 13 Naměřené hodnoty fázového posunu směsi AC 16 v závislosti na frekvenci

V grafu 12 a 13 jsou zobrazeny hodnoty fázového posunu, které vyjadřují opoždění mezi napětím σ a přetvořením ε ve zkoušeném tělese (kap. 3.3.5). Z naměřených hodnot lze říci, že u obou směsí dochází s rostoucí teplotou ke zvětšení hodnoty fázového posunutí. Při měření ve stejné teplotě si lze všimnout trendu, že s rostoucí hodnotou zatěžovací frekvence má hodnota fázového posunu tendenci klesat.

Při porovnání jednotlivých hodnot obou směsí lze vyjádřit, že hodnoty fázového posunu při zkušební teplotě $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou si velice blízké, nicméně s rostoucí teplotou jednotlivých měření jsou rozdíly značnější. Ve směsi SMA 16 s obsahem 9,5 % CRmB jsou fázové posuny s rostoucí teplotou větší, tedy dochází v ní k většímu opoždění, než ve směsi AC 16 s obsahem 7,3 % CRmB.

6.3. Odolnost proti únavě

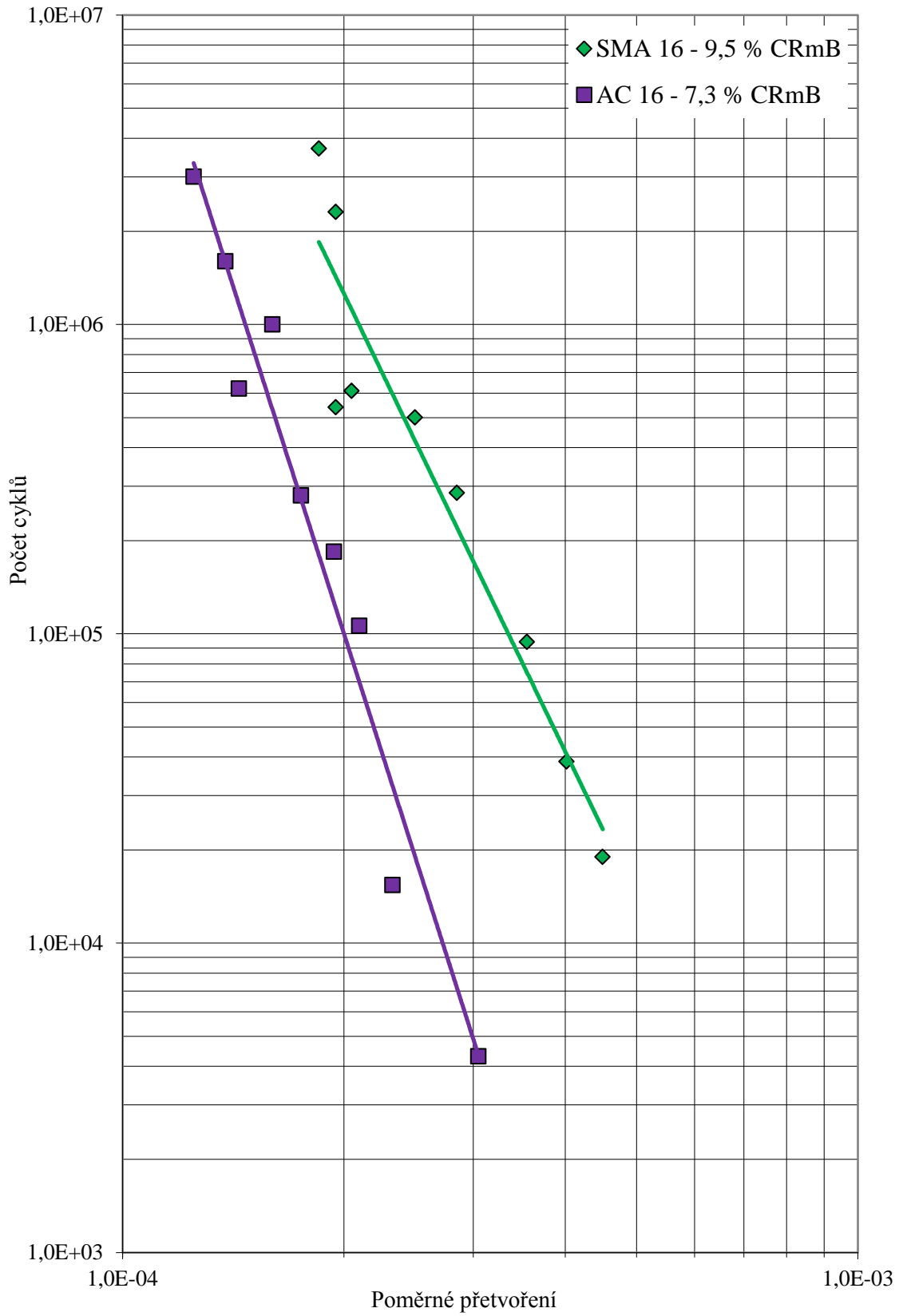
Odolnost proti únavě byla měřena ve stejném zařízení jako moduly tuhosti pomocí dvoubodového ohybu komolého klínu, kdy je nastavena hodnota počátečního přetvoření a při teplotě 10 °C a frekvenci zatěžování 25 Hz se zjišťuje, při kterém cyklu zatížení klesne modul tuhosti zkoušeného vzorku na 50 % původní hodnoty. Podrobnější postup měření je uveden v kapitole 3.3.6. Měření bylo provedeno na všech 20 vyrobených zkušebních vzorcích, z nichž některé byly víckrát použity pro měření modulů tuhosti. Naměřené parametry jsou uvedeny v tabulkách 17, 18 a vyhodnocení znázorněno v grafu 14.

| SMA 16 - 9,5 % CRmB | | | | | |
|---------------------|---------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|----------------|
| Měření | Naměřené parametry | | Výsledné únavové charakteristiky | | |
| | Přetvoření [$*10^{-6}$] | Počet cyklů | ϵ_6 [$*10^{-6}$] | B | R ² |
| 1. | 205 | 610 000 | 209,6 | 4,92 | 0,91 |
| 2. | 285 | 285 000 | | | |
| 3. | 355 | 94 000 | | | |
| 4. | 450 | 19 000 | | | |
| 5. | 195 | 540 000 | | | |
| 6. | 185 | 3 700 000 | | | |
| 7. | 195 | 2 310 000 | | | |
| 8. | 402 | 38 600 | | | |
| 9. | 250 | 500 000 | | | |

Tab. 17 Naměřené únavové charakteristiky směsi SMA 16

| AC 16 - 7,3 % CRmB | | | | | |
|--------------------|---------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|----------------|
| Měření | Naměřené parametry | | Výsledné únavové charakteristiky | | |
| | Přetvoření [$*10^{-6}$] | Počet cyklů | ϵ_6 [$*10^{-6}$] | B | R ² |
| 1. | 233 | 15 400 | 146,9 | 7,45 | 0,96 |
| 2. | 305 | 4 300 | | | |
| 3. | 194 | 184 000 | | | |
| 4. | 175 | 280 000 | | | |
| 5. | 125 | 3 000 000 | | | |
| 6. | 138 | 1 600 000 | | | |
| 7. | 210 | 106 000 | | | |
| 8. | 144 | 620 000 | | | |
| 9. | 160 | 1 000 000 | | | |

Tab. 18 Naměřené únavové charakteristiky směsi AC 16



Graf 14 Wöhlerův diagram únavové charakteristiky obou směsí

Z grafického zobrazení odolnosti směsi proti únavě je nejdůležitější parametr přetvoření ε při 10^6 cyklu zatížení. Tato hodnota přetvoření se odečte ze spojnice trendu naměřených parametrů. K této hodnotě přetvoření se vztahují minimální požadavky odolnosti proti únavě pro asfaltové směsi. V TP 148 [4] je uveden minimální požadavek pro únavu $\varepsilon_6 = 160 \cdot 10^{-6}$.

Z naměřených hodnot vyplývá, že směs AC 16 s nižším obsahem CRmB (7,3 %) vykazuje nižší odolnost proti únavě než směs SMA 16 s 9,5 % CRmB. Při 10^6 cyklu zatížení vykazuje směs AC 16 poměrné přetvoření $\varepsilon_6 = 146,9 \cdot 10^{-6}$, což je hodnota, která nesplňuje minimální požadavek stanovený v TP 148 [4]. Směs SMA 16 při stejném cyklu zatížení odpovídá hodnota poměrného přetvoření $\varepsilon_6 = 209,6 \cdot 10^{-6}$, což splňuje požadavek v TP 148 [4] s rezervou.

6.4. Shrnutí výsledných parametrů z funkčních zkoušek

| | | SMA 16 | AC 16 | Minimální požadavky |
|---------------------------------|---|-----------------------|-----------------------|---|
| Nízkoteplotní vlastnosti | Průměrná teplota vzorku při porušení | -23,3 °C | -25,2 °C | - |
| | Průměrné napětí při porušení | 3,34 MPa | 4,27 MPa | - |
| Modul tuhosti | | 6119 MPa | 7616 MPa | Dle TP 148 [29] $S_{\min} = 5\,500$ MPa |
| Odolnost proti únavě | ε_6 - poměrné přetvoření odpovídající 10^6 zátěžových cyklů | $209,6 \cdot 10^{-6}$ | $146,9 \cdot 10^{-6}$ | Dle TP 148 [4] $\varepsilon_6 = 160 \cdot 10^{-6}$ |

Tab. 19 Naměřené parametry z funkčních zkoušek

Z naměřených parametrů je patrné, že směs AC 16 s obsahem 7,3 % CRmB vykazuje lepší nízkoteplotní vlastnosti a to jak teplotu porušení (-25,2 °C), tak i maximální napětí (4,27 MPa), které toto porušení vyvolalo. Stejně tak tato směs vykazuje i lepší modul tuhosti (7 616 MPa). Nicméně navržená směs AC 16 ($\varepsilon_6 = 146,9 \cdot 10^{-6}$) vykazuje horší odolnost proti únavě než směs SMA 16 ($\varepsilon_6 = 209,6 \cdot 10^{-6}$), navíc nesplňuje minimální požadavek stanovený v TP 148 [4]. Směs SMA 16 vykazuje vyšší teplotu porušení (-23,3 °C) než AC 16 a nižší napětí při porušení, i přesto jsou tyto hodnoty více než příznivé (kap. 6.1 – graf 8).

SMA 16 dosahuje i nižšího modulu tuhosti (6 119 MPa), nicméně i tak splňuje minimální požadavek s dostatečnou rezervou.

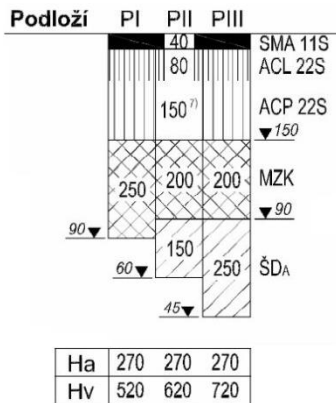
6.5. Porovnání jednotlivých směsí matematickým modelem

Z funkčních zkoušek jsou stanoveny návrhové parametry pro oba koncepty. Porovnání jednotlivých výsledků zkoušek je uvedeno v předchozí kapitole, nicméně z těchto hodnot nelze určit, která z navržených směsí má lepší charakteristiky. Proto je použito matematického modelu (program LayEps), který využije naměřené parametry směsí (modul tuhosti a odolnost proti únavě) při zadaném dopravním zatížení a stanoví, která z vyrobených směsí zajistí delší teoretickou životnost konstrukce vozovky. Obě směsi budou použity v obrusné a poté v podkladní vrstvě s jejich vzájemným porovnáním.

Z TP 170 [30] byla pro všechny návrhy konstrukčního uspořádání vozovky stanovena úroveň porušení D0 pro třídu dopravního zatížení S. Tomuto dopravnímu zatížení odpovídá hodnota průměrné denní intenzity všech těžkých nákladních vozidel (TNV₀) 23 500 vozidel/den. Matematický model bude počítat s návrhovým obdobím 25 let. Z TP 170 [30] bylo pro katalogové uspořádání vozovek použito obvyklých charakteristických parametrů jednotlivých vrstev, kde E je modul pružnosti (tuhosti) materiálu, ϵ_6 vyjadřuje průměrnou velikost přetvoření při 10^6 cyklech zatížení (parametr odolnosti proti únavě) a parametr B charakterizuje sklon čáry únavy. Výsledkem matematického modelu je potom parametr poměrného porušení D_{cd} , který vyjadřuje poměr mezi počtem cyklů zatěžování, která odpovídá daným tloušťkám vrstev vozovky a jejich charakteristikám pružnosti a odolnosti proti únavě, a požadovaného počtu zatěžování dané dopravním zatížením*.

* Výsledný parametr D_{cd} vyjadřuje využití vrstvy po návrhovou dobu životnosti, kde hodnoty do 0.7 signalizují předdimenzování vrstvy, od 0.7 do 1.0 optimální využití vrstvy a nad 1.0 jsou vrstvy poddimenzované. Toto rozdělení je jen čistě orientační, neboť se jedná pouze o matematický model a nikoliv skutečnost. Jde tedy jen o teoretické poškození dané vrstvy na návrhové období, tzn., je-li po výpočtu na navrhované období (v tomto případě vždy 25 let) u vrstvy hodnota D_{cd} 1,0, tak vrstva vyhoví své životnosti 25 let. Hodnota např. $D_{cd} = 0,5$ říká, že životnost vrstvy je dvojnásobná oproti návrhovému období (50 let) a hodnota $\epsilon = 2,0$, že životnost je poloviční (12,5 let).

První konstrukce vozovky, pro porovnání směsí, je na obrázku 34 pro typ podloží PI.



| | tl. [mm] | E [MPa] | ϵ_6 | B | D_{cd} |
|----------|----------|---------|--------------|---|----------|
| SMA | 40 | 5500 | 160 | 5 | .0 |
| ACL S | 80 | 7500 | 115 | 5 | .0 |
| ACP S | 150 | 7500 | 100 | 5 | .4159 |
| MZK | 250 | 600 | - | - | .0 |
| Σ | 520 | | | | .4532 |
| Ha | 270 | | | | |

Ha – celková tloušťka asfaltových vrstev v mm

Obr. 34 Konstrukce vozovky z TP 170 [30] pro D0-N-1; TDZ S

Tab. 20 Modelový výpočet vozovky z obr. 34 pro podloží PI

| | tl. | D_{cd} | | tl. | D_{cd} | | tl. | D_{cd} | | tl. | D_{cd} |
|---------------|-----|----------|--------------|-----|----------|---------------|-----|----------|--------------|-----|----------|
| SMA 16 | 40 | .0 | AC 16 | 40 | .0 | SMA | 40 | .0 | SMA | 40 | .0 |
| ACL S | 80 | .0 | ACL S | 80 | .0 | ACL S | 80 | .0001 | ACL S | 80 | .0 |
| ACP S | 150 | .4020 | ACP S | 150 | .3806 | SMA 16 | 150 | .0175 | AC 16 | 150 | .0751 |
| MZK | 250 | .0 | MZK | 250 | .0 | MZK | 250 | .0 | MZK | 250 | .0 |
| Σ | 520 | .4289 | Σ | 520 | .3848 | Σ | 520 | .5573 | Σ | 520 | .4470 |
| Ha | 270 | | Ha | 270 | | Ha | 270 | | Ha | 270 | |

Tab. 21 Modelový výpočet po dosazení návrhových směsí AC 16 a SMA 16 na místo obrusné a podkladní vrstvy z katalogové vozovky

V tabulce 21 je uvedena stejná skladba vozovky jako v tabulce 20, nicméně v první části jsou dosazeny parametry směsi SMA 16 a AC 16 do obrusné vrstvy místo katalogové vrstvy SMA, a v druhé části jsou parametry směsí dosazeny do podkladní vrstvy místo ACP S. Dosazením parametrů směsí SMA 16 a AC 16 do výpočetního modelu na místo obrusné vrstvy standardní skladby se zvýší teoretická životnost podkladní vrstvy i podloží (sníží se parametr D_{cd}). V případě SMA 16 se zvýší životnost podkladní vrstvy o dva roky a životnost podloží se zvýší o více než tři roky. Při použití parametrů směsi AC 16 do obrusné vrstvy se životnost podkladní vrstvy zvýší o více než pět let a podloží o téměř deset let. Dosazení parametrů obou směsí místo podkladní vrstvy ACP S má na celkovou teoretickou životnost vozovky rozdílné vlivy. Parametry směsi AC 16 zvýší teoretickou životnost podloží jen nepatrně a směs SMA 16 naopak sníží teoretickou životnost podloží, při stejné skladbě vozovky, o deset let. Nicméně přínosem směsi SMA 16 v podkladní vrstvě je právě její teoretická životnost, která je

více než čtyřikrát větší oproti použití vrstvy AC 16 v této podkladní vrstvě a více než dvacetkrát větší oproti katalogové vrstvě ACP S. To, že směs SMA 16 v podkladní vrstvě zkracuje životnost podloží je kompenzováno navýšením MZK nebo ŠD.

Z důvodu předimenzování vozovek bude provedena redukce tloušťek asfaltových vrstev na katalogové vozovce, dále pak na vozovkách s použitými parametry směsí AC 16 a SMA 16, ale pouze tam, kde jejich použití dosahovalo lepšího výsledku. Tedy parametry směsí AC 16 budou dosazeny pouze pro obrusnou vrstvu a parametry směsí SMA 16 jen v podkladní. Snižování tloušťek asfaltových vrstev je nahrazeno přidáním vrstvy ŠD, která má nižší pořizovací cenu.

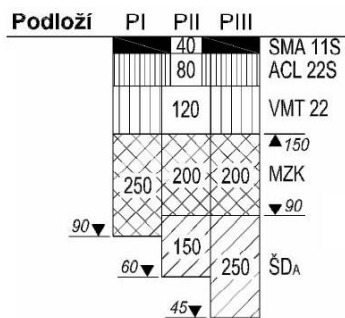
| | tl. | D _{cd} | | tl. | D _{cd} | | tl. | D _{cd} |
|-------|-----|-----------------|-------|-----|-----------------|--------|-----|-----------------|
| SMA | 40 | .0 | AC 16 | 40 | .0 | SMA | 40 | .0 |
| ACL S | 80 | .0001 | ACL S | 80 | .0 | ACL S | 60 | .0 |
| ACP S | 100 | .8294 | ACP S | 100 | .7663 | SMA 16 | 70 | .3081 |
| MZK | 250 | .0 | MZK | 250 | .0 | MZK | 250 | .0 |
| ŠD | 250 | .0 | ŠD | 250 | .0 | ŠD | 250 | .0 |
| Σ | 720 | .1621 | Σ | 720 | .1400 | Σ | 670 | .5151 |
| Ha | 220 | | Ha | 220 | | Ha | 170 | |

Tab. 22 Redukce tloušťek asfaltových vrstev u jednotlivých vozovek

V první části tabulky 22 je uvedeno, že vzorová vozovka zvýšila svojí celkovou tloušťku o 200 mm, nicméně snížila celkovou tloušťku asfaltových vrstev o 50 mm. Při použití parametrů směsí AC 16 v obrusné vrstvě je celková tloušťka vozovky i tloušťka asfaltových vrstev stejná jako u vzorové zredukované vozovky, nicméně životnost podkladní vrstvy ACP S a podloží je vyšší. V případě směsí SMA 16 jako podkladní vrstvy je celková tloušťka vozovky, oproti tloušťce vzorové zredukované vozovky, snížena o 50 mm a to právě o tloušťku asfaltových vrstev.

Z výsledků prvního výpočetního modelu je patrné, že při dosazení parametrů směsí SMA 16 a AC 16 do výpočetního modelu je příznivě ovlivněna teoretická životnost vozovky. Nicméně každá směs ovlivňuje vozovku v jiné vrstvě. Směs AC 16 má větší vliv na životnost, když jsou její parametry dosazeny v obrusné vrstvě a parametry směsí SMA 16 ovlivňují životnost vozovky při dosazení do podkladní vrstvy. Navíc použitá směs SMA 16 jako podkladní vrstva umožňuje snížení jak celkové tloušťky vozovky, tak i celkové tloušťky asfaltových vrstev.

V následujícím výpočetním modelu (obrázek 35) bude použita katalogová vozovka také pro podloží PI. Stejně jako v předchozím modelu bude tloušťka jednotlivých vrstev vozovky upravována tak, aby bylo zapotřebí co nejmenší tloušťky asfaltových vrstev. Cílem tohoto modelu je navrhnout k této upravené katalogové vozovce jinou alternativní skladbu vozovky, která bude mít výhodnější výsledné parametry (poměrné přetvoření D_{cd}). Dopravní zatížení je stejné jako u prvního výpočetních modelů ($TNV_0 = 23\,500$ vozidel/den).



| | | | |
|----|-----|-----|-----|
| Ha | 240 | 240 | 240 |
| Hv | 490 | 590 | 690 |

| | tl. [mm] | E [MPa] | ϵ_6 | B | D_{cd} |
|----------|----------|---------|--------------|---|----------|
| SMA | 40 | 5500 | 160 | 5 | .0 |
| ACL S | 80 | 7500 | 115 | 5 | .0 |
| VMT A | 120 | 9000 | 130 | 5 | .3688 |
| MZK | 250 | 600 | - | - | .0 |
| Σ | 490 | | | | .8230 |
| Ha | 240 | | | | |

Ha – celková tloušťka asfaltových vrstev v mm

Obr. 35 Konstrukce vozovky z TP 170 [30] pro D0-N-2; TDZ S

Tab. 23 Modelový výpočet upravené vozovky z obr. 35 pro podloží PI

U alternativní vozovky má každá jednotlivá vrstva svoji funkci, kterou musí splňovat. Obrusná vrstva musí snižovat emise dopravního hluku a mít dostatečnou přilnavost (součinitel tření), ložní vrstva nesmí propustit vodu a dokonale ji odvést, a podkladní vrstva přenést účinky dopravního zatížení. Na stejném podloží PI byla navržena skladba s použitím parametrů navržených směsí AC 16 a SMA 16 jako podkladních vrstev

| | tl. [mm] | E [MPa] | ϵ_6 | B | D_{cd} |
|--------------|----------|---------|--------------|------|----------|
| BBTM | 30 | 9000 | 135 | 5 | .0 |
| SAL | 70 | 6000 | 135 | 5 | .0 |
| AC 16 | 120 | 7600 | 140 | 7,45 | .4617 |
| MZK | 200 | 2500 | - | - | .0 |
| ŠD | 250 | 400 | - | - | .0 |
| Σ | 670 | | | | .2296 |

Tab. 24 Modelový výpočet alternativní vozovky se směsí AC 16

| | tl. [mm] | E [MPa] | ϵ_6 | B | D _{cd} |
|---------------|----------|---------|--------------|------|-----------------|
| BBTM | 30 | 9000 | 135 | 5 | .0 |
| SAL | 70 | 6000 | 135 | 5 | .0 |
| SMA 16 | 120 | 6100 | 205 | 4,92 | .1048 |
| MZK | 200 | 2500 | - | - | .0 |
| ŠD | 250 | 400 | - | - | .0 |
| Σ | 670 | | | | .2582 |

Tab. 25 Modelový výpočet alternativní vozovky se směsí SMA 16

| | tl. | D _{cd} | | tl. | D _{cd} | | tl. | D _{cd} |
|-------|-----|-----------------|--------------|-----|-----------------|---------------|-----|-----------------|
| SMA | 40 | .0 | BBTM | 30 | .0 | SMA | 30 | .0 |
| ACL S | 80 | .0 | SAL | 70 | .0 | ACL S | 70 | .0040 |
| VMT A | 80 | .7515 | AC 16 | 100 | .8015 | SMA 16 | 70 | .3355 |
| MZK | 200 | .0 | MZK | 200 | .0 | MZK | 200 | .0 |
| ŠD | 200 | .0 | ŠD | 200 | .0 | ŠD | 250 | .0 |
| Σ | 600 | .6254 | Σ | 600 | .5835 | Σ | 620 | .7775 |
| Ha | 200 | | Ha | 200 | | Ha | 170 | |

Tab. 26 Redukce tloušťek asfaltových vrstev u jednotlivých vozovek

Z výsledků v tabulce 26 je patrné, že u katalogové vozovky bylo dosaženo redukce asfaltových vrstev o 40 mm. V alternativní vozovce s dosazenými parametry směsi AC 16 v podkladní vrstvě je celková tloušťka vozovky, stejně tak tloušťka asfaltových vrstev, stejná jako o redukované katalogové vozovky. Při použití parametrů směsi AC 16 v podkladní vrstvě vozovky je její teoretická životnost podloží vyšší, než u katalogové vozovky, nicméně životnost ji samotné jako podkladní vrstvy je menší, než životnost podkladní vrstvy VMT A v katalogové vozovce. Při dosazení parametrů směsi SMA 16 v podkladní vrstvě alternativní vozovky bylo dosaženo, oproti tloušťce redukované vzorové vozovky, dalšího snížení celkové tloušťky asfaltových vrstev o 30 mm.

I z výsledků druhého výpočetního modelu je patrné, že každá katalogová vozovka je pro danou třídu dopravního zatížení, na stranu bezpečnou, předimenzována. To dává prostor možnosti upravení jednotlivých tloušťek vrstev s cílem snížení použití asfaltových vrstev. Z návrhu alternativní vozovky při dosazení parametrů směsi SMA 16 do podkladní vrstvy, oproti směsi AC 16, je právě tato možnost redukce asfaltových vrstev uplatněna.

7. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo porovnat výrobní koncepty asfaltový směsí s použitím asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem (CRmB) dvou zemí, které mají s touto modifikací pojiva nejvíce zkušeností. První směs byla vyrobena podle švédského národního konceptu a navržená směs je označena jako SMA 16. Druhý národní koncept je americký a navržená směs je označena jako AC 16. Rozdíl mezi těmito koncepty je v mezerovitosti, množství použitého pojiva a fileru. Český koncept asfaltových směsí se blíží ke konceptu americkému.

Navržená a vyrobená asfaltová směs AC 16 obsahuje 7,3 % CRmB s mezerovitostí zhutněné směsi 5,4 % a nižším obsahem fileru (5,5 %). K výrobě asfaltové směsi SMA 16 bylo použito 9,5 % CRmB a vyšší obsah fileru (8,5 %) a výsledná mezerovitost zhutněné směsi byla stanovena na 3,3 %.

Asfaltová směs s označením AC 16 dosáhla vyšší tuhosti ($E_{AC16} = 7\,616$ MPa) a lepších nízkoteplotních vlastností tzn. nižší teploty při porušení ($-25,2$ °C) s vyšší maximální pevností při této teplotě (4,27 MPa) než směs označená SMA 16, která zaznamenala vyšší teplotu ($-23,3$ °C) a nižší pevnost (3,34 MPa). Naproti tomu směs SMA 16 prokázala kvalitnější únavové vlastnosti při zatěžování zkušebních těles dvoubodovým ohybem, kdy z výsledné čáry únavy byl pro 10^6 opakovaných zatížení stanoven parametr přetvoření $\varepsilon_6 = 209,6 \cdot 10^{-6}$, tedy vyšší než u směsi AC 16, pro kterou byl pro stejný počet opakování zatížení stanoven parametr přetvoření $\varepsilon_6 = 146,9 \cdot 10^{-6}$.

Při aplikaci získaných funkčních parametrů směsí SMA 16 a AC 16 do výpočtového modelu (program LayEps) byly potvrzeny lepší vlastnosti navržených směsí, neboť při jejich použití v obrusné nebo v podkladní vrstvě byla vždy příznivě ovlivněna životnost jak vozovky, tak i podloží v porovnání se standardními katalogovými vozovkami. Na vzájemné porovnání parametrů navržených směsí SMA 16 a AC 16 pro stejné dopravní zatížení měla vliv především poloha ve vozovce. Dosazené parametry směsi AC 16 v obrusné vrstvě zvyšovaly teoretickou životnost vozovky oproti směsi SMA 16, naopak parametry směsi SMA 16 dosazené v podkladních vrstvách zvyšovaly teoretickou životnost vozovky oproti směsi AC 16.

Navíc při použití parametrů navržené směsi SMA 16 v podkladní vrstvě byla, díky její odolnosti proti únavě, umožněna redukce celkové tloušťky použitých asfaltových vrstev. Při porovnání s ACP S došlo k celkovému snížení asfaltových vrstev o 50 mm a oproti směsi VMT A o 30 mm.

Lze tedy shrnout, že směs navržená podle amerického konceptu AC 16 má příznivější vliv na únosnosti vozovky, pokud bude použita v krytových vrstvách, neboť má vyšší modul pružnosti, a při stejném dopravním zatížení příznivěji zvyšuje její životnost sníženým namáháním podloží. Dále díky svým výborným nízkoteplotním vlastnostem je více odolná proti mrazovým trhlinám. Její použití v podkladní vrstvě přinese stejné snížení celkových tloušťek asfaltových vrstev jako asfaltová vrstva s vysokým modulem tuhosti a s vyšším obsahem modifikovaného nebo multigrádového asfaltu (VTM A). Směs vyrobenou podle švédského konceptu je výhodnější použít jako podkladní vrstvu v komunikacích s vysokým dopravním zatížením, kde hrozí porušení únavou asfaltových vrstev. Rovněž by bylo vhodné tento typ směsi použít i v ložní vrstvě, neboť díky své nízké mezerovitosti nepropustí vodu. V každém případě směs SMA 16 v podkladní vrstvě sníží celkovou tloušťku asfaltových vrstev o 50 mm oproti směsi ACP S a oproti směsi VTM A o 30 mm.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Sycorex s.r.o. In: [online]. Dostupné z: <http://www.sycorex.cz/>
- [2] VARAUS, Michal. Pozemní komunikace II: modul 3 Asfaltová pojiva. Brno, 2005.
- [3] KUDRNA, Jan, Jiří KACHTÍK a Ondra DAŠEK. ZKUŠENOSTI S VÝROBOU ASFALTU MODIFIKOVANÉHO PRYŽOVÝM GRANULÁTEM V ČR. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Brno.
- [4] TP 148: HUTNĚNÉ ASFALTOVÉ VRSTVY S ASFALTEM MODIFIKOVANÝM PRYŽOVÝM GRANULÁTEM Z PNEUMATIK. Brno, 2009.
- [5] DAŠEK, Ondra a Jan KUDRNA. Možnosti uplatnění odpadní pryže z ojetých pneumatik při modifikaci asfaltů. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Brno.
- [6] DAŠEK, Ondra. GUMOASFALT: Asfalt modifikovaný pryžovým granulátem. VUT, FAST. Brno.
- [7] DAŠEK, Ondra. UPLATNĚNÍ PRYŽOVÉHO GRANULÁTU V ASFALTOVÝCH POJIVECH A HUTNĚNÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH: DISERTAČNÍ PRÁCE. Brno, 2013.
- [8] GASFALT: Modifikovaná pojiva. [online]. Dostupné z: <http://www.gasfalt.cz/>
- [9] ČSN EN 13108-1. Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály: Část 1: Asfaltový beton. 2008.
- [10] ČSN EN 993-1. Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor. 1998.
- [11] ČSN EN 1426. Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení penetrace jehlou. 2007.
- [12] ČSN EN 1427. Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička. 2007.
- [13] ČSN EN 13880-3. Zálivky za horka: Část 3: Zkušební metoda pro stanovení penetrace a pružné regenerace (resilience). 2004.
- [14] ČSN EN. Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem. 2010.
- [15] ČSN EN 13398. Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů. 2010.
- [16] ČSN EN. Zkoušení asfaltových směsí. 2008.

- [17] ČSN EN 12697-30. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. 2007.
- [18] ČSN EN 12697-33. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. 2007.
- [19] ČSN EN 12697-6. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. 2007.
- [20] ČSN EN 12697-5. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. 2007.
- [21] ČSN EN 12697-8. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. 2004.
- [22] ČSN EN 12697-46. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem. 2012.
- [23] ČSN EN 12697-26. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 26: Tuhost. 2006.
- [24] ČSN EN 12697-24. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 24: Odolnost vůči únavě. 2007.
- [25] ČSN EN 13108-1. Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály: Část 5: Asfaltový koberec mastixový. 2008.
- [26] Superpave Gradation Requirements: Table 3: 19 mm (3/4 inch) Nominal Size. WSDOT Pavement Guide: 5. Mix Design. Mix design overview and the principal methods of HMA and PCC mix design. [online]. 2014. Dostupné z: http://classes.engr.oregonstate.edu/cce/spring2014/ce492/Modules/05_mix_design/superpave_gradation.htm
- [27] WSDOT Gradation Specifications: WSDOT BST Gradation Specifications. WSDOT Pavement Guide: 3. Materials. Aggregate, asphalt and portland cement and their associated material tests. [online]. 2014. Dostupné z: http://classes.engr.oregonstate.edu/cce/spring2014/ce492/state_information/03_materials/wsdot_gradations.htm#hma_gradations_superpave
- [28] ČSN EN 12697-35. Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 35: laboratorní výroba směsi. 2007.
- [29] TP 148 – revidované (zatím neplatné): HUTNĚNÉ ASFALTOVÉ VRSTVY S ASFALTEM MODIFIKOVANÝM PRYŽOVÝM GRANULÁTEM. Brno, 2011
- [30] TP 170: NAVRHOVÁNÍ VOZOVEK POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ. Brno, 2010.
- [31] Dostupné: http://www.sycorex.cz/wp-content/uploads/2012/10/granulat_vzorek.jpg

[32] Dostupné: <http://www.strojeprozkusebnictvi.cz/elektro-mechanicka-prosevaccka.html>

[33] Dostupné: <http://www.strojeprozkusebnictvi.cz/penetrometr.html>

[34] Dostupné: <http://www.strojeprozkusebnictvi.cz/zkouska-krouzek-kulicka.html>

[35] Dostupné: <http://www.strojeprozkusebnictvi.cz/pokrocily-rotacni-viskozimetr.html#zalozka-1>

[36] Dostupné: http://www.stroyinforms.ru/upload/shop_4/2/9/7/item_297/shop_property_file_297_667.jpg

[37] HÝZL, Petr. ZKOUŠENÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ: Funkční zkoušky. VUT, FAST. Brno.

[38] Dostupné: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_06.pdf

9. SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Maximální rozdíly platných stanovení pro zkoušku penetrace jehlou

Tab. 2 Stanovené zrnitosti jednotlivých frakcí

Tab. 3 Naměřené vlastnosti asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem použitého pro výrobu směsí

Tab. 4 Hranice mezi vzorové směsi GAP 16 [7], meze SMA 16 dle [25] a zrnitost navržené asfaltové směsi SMA 16

Tab. 5 Charakteristické hodnoty navržené směsi SMA 16

Tab. 6 Hranice mezi vzorových směsí AASHTO 19[26], WSDOT – BST [27], Texas SMAR[7], meze AC 16[9] a zrnitost navržené asfaltové směsi AC 16

Tab. 7 Charakteristické hodnoty navržené směsi AC 16 – 1. návrh

Tab. 8 Charakteristické hodnoty navržené směsi AC 16 – 2. návrh

Tab. 9 Vzorové a návrhové parametry pro směs SMA 16

Tab. 10 Vzorové a návrhové parametry pro směs AC 16 – 1. návrh

Tab. 11 Vzorové a návrhové parametry pro směs AC 16 – 2. návrh

Tab. 12 Charakteristické vlastnosti asfaltových desek

Tab. 13 Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi SMA 16

Tab. 14 Hodnoty nízkoteplotních vlastností směsi AC 16

Tab. 15 Průměrné hodnoty modulu tuhosti SMA 16

Tab. 16 Průměrné hodnoty modulu tuhosti AC 16

Tab. 17 Naměřené únavové charakteristiky směsi SMA 16

Tab. 18 Naměřené únavové charakteristiky směsi AC 16

Tab. 19 Naměřené parametry z funkčních zkoušek

Tab. 20 Modelový výpočet vozovky z obr. 34 pro podloží PI

Tab. 21 Modelový výpočet po dosazení návrhových směsí AC 16 a SMA 16 na místo obrusné a podkladní vrstvy z katalogové vozovky

Tab. 22 Redukce tloušťek asfaltových vrstev u jednotlivých vozovek

Tab. 23 Modelový výpočet upravené vozovky z obr. 35 pro podloží PI

Tab. 24 Modelový výpočet alternativní vozovky se směsí AC 16

Tab. 25 Modelový výpočet alternativní vozovky se směsí SMA 16

Tab. 26 Redukce tloušťek asfaltových vrstev u jednotlivých vozovek

10. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Čáry zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva a fileru

Graf 2 Čára zrnitosti SMA 16, horní a dolní meze GAP 16 [7] a SMA 16 dle [25]

Graf 3 Čára zrnitosti AC 16, horní a dolní meze AASHTO [26] a WSDOT – BST [27]
obě pro frakci 19 mm

Graf 4 Čára zrnitosti AC 16, horní a dolní meze Texas SMAR [27] a AC 16 [7]

Graf 5 Návrhové množství pojiv a jim odpovídající mezerovitost pro stanovenou čáru zrnitosti – plné body představují konečný návrh směsi

Graf 6 Průběh napětí při poklesu teploty ve zkušebním vzorku směsi SMA 16

Graf 7 Průběh napětí při poklesu teploty ve zkušebním vzorku směsi AC 16

Graf 8 Vzájemné porovnání konceptů SMA 16, AC 16 a k přirovnání průběh nemodifikované asfaltové směsi ACO 16

Graf 9 Výsledné moduly tuhosti směsi SMA 16 a jejich závislost na teplotě a frekvenci zatěžování

Graf 10 Výsledné moduly tuhosti směsi AC 16 a jejich závislost na teplotě a frekvenci zatěžování

Graf 11 Teplotní citlivost obou směsí pro frekvenci zatížení 10 Hz

Graf 12 Naměřené hodnoty fázového posunu směsi SMA 16 v závislosti na frekvenci

Graf 13 Naměřené hodnoty fázového posunu směsi AC 16 v závislosti na frekvenci

Graf 14 Wöhlerův diagram únavové charakteristiky obou směsí

11. SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Obr. 1 Pryžový granulát ve frakcích 3/4, 2/4, 1/2 a 0/1 mm [31]
- Obr. 2 Mísící zařízení (blender) pro výrobu CRmB [3]
- Obr. 3 Schéma zpracování pryžového granulátu v asfaltových směsích [6]
- Obr. 4 Srovnání obyčejného pojiva a pojiva modifikovaného pryžovým granulátem [6]
- Obr. 5 Asfaltová směs BBTM [8]
- Obr. 6 Asfaltová směs SMA [8]
- Obr. 7 Asfaltová směs PA [8]
- Obr. 8 Asfaltová směs AC [8]
- Obr. 9 Elektro mechanická prosévačka kameniva
- Obr. 10 Penetrometr
- Obr. 11 Souprava pro stanovení bodu měknutí [34]
- Obr. 12 Viskozimetr [35]
- Obr. 13 Různé velikosti vřeten [35]
- Obr. 14 Duktilometr [36]
- Obr. 15 Natahovaný a přestřížený vzorek [6]
- Obr. 16 Marshallova tělesa
- Obr. 17 Komolý klín
- Obr. 18 Trámeček
- Obr. 19 Pyknometr
- Obr. 20 Cyklon – 40 [37]
- Obr. 21 Uchycení trámečku [37]
- Obr. 22 Zařízení pro měření modulu tuhosti a odolnosti proti únavě
- Obr. 23 Fázový posun u viskoelastického materiálu při harmonickém namáhání[38]

Obr. 24 Jednotlivé frakce použitého kameniva a fileru

Obr. 25 Použitý asfalt modifikovaný pryžovým granulátem

Obr. 26 Rázový zhutňovač

Obr. 27 Segmentový zhutňovač

Obr. 28 Vyrobené desky obou směsí segmentovým zhutňovačem

Obr. 29 Porušené vzorky směsi SMA 16 při zjišťování nízkoteplotních vlastností

Obr. 30 Zvětšená plocha porušení jednoho vzorku SMA 16

Obr. 31 Porušené vzorky směsi AC 16 při zjišťování nízkoteplotních vlastností

Obr. 32 Zvětšená plocha porušení jednoho vzorku AC 16

Obr. 33 Zkušební komolé klíny pro zjištění modulu tuhosti a odolnosti proti únavě

Obr. 34 Konstrukce vozovky z TP 170 [30] pro D0-N-1; TDZ S

Obr. 35 Konstrukce vozovky z TP 170 [30] pro D0-N-2; TDZ S

12. SEZNAM PŘÍLOH

12.1. Naměřené hodnoty pro charakteristiku směsi SMA 16 z Marshallových těles

12.1.1. Objemová hmotnost

| CRmB | číslo vzorku | m_1 | m_2 | m_3 | ρ_{bssd} | $\varnothing \rho_{bssd}$ |
|-------|--------------|---------|-------|---------|----------------------|---------------------------|
| [%] | | [g] | [g] | [g] | [kg/m ³] | [kg/m ³] |
| 8,5 % | 1 | 1 117,7 | 618,3 | 1 120,8 | 2 220 | 2 239 |
| 8,5 % | 2 | 1 124,1 | 627,7 | 1 126,7 | 2 249 | |
| 8,5 % | 3 | 1 129,0 | 630,0 | 1 131,6 | 2 247 | |
| 9,0 % | 1 | 1 127,2 | 622,4 | 1 129,8 | 2 218 | 2 229 |
| 9,0 % | 2 | 1 126,5 | 626,6 | 1 128,7 | 2 240 | |
| 9,0 % | 3 | 1 125,3 | 624,5 | 1 128,7 | 2 228 | |
| 9,5 % | 1 | 1 122,4 | 623,4 | 1 125,0 | 2 234 | 2 238 |
| 9,5 % | 2 | 1 128,1 | 629,5 | 1 132,4 | 2 239 | |
| 9,5 % | 3 | 1 126,4 | 627,1 | 1 128,7 | 2 242 | |

ρ_{bssd} je objemová hmotnost zkušební tělesa, v kg/m³

m_1 je hmotnost suchého tělesa, v g

m_2 je hmotnost nasyceného tělesa ve vodě, v g

m_3 je hmotnost nasyceného osušeného tělesa, v g

12.1.2. Maximální objemová hmotnost

| CRmB | číslo pyknometru | m_1 | m_2 | m_3 | V_p | ρ_{mv} |
|-------|------------------|--------|--------|--------|-------------------|----------------------|
| [%] | | [g] | [g] | [g] | [m ³] | [kg/m ³] |
| 8,5 % | III | 685,31 | 1419,6 | 2870,5 | 1308,3 | 2 382 |
| 9,0 % | V | 693,68 | 1445,4 | 2905,1 | 1323,3 | 2 354 |
| 9,5 % | VI | 700,52 | 1397,7 | 2868,4 | 1312,8 | 2 314 |

*Teplota vody při zkoušce byla 20,6 až 20,7 °C

ρ_{mv} je maximální objemová hmotnost asfaltové směsi, v kg/m³

m_1 je hmotnost pyknometru, v g

m_2 je hmotnost pyknometru a zkušební vzorku, v g

m_3 je hmotnost pyknometru, zkušební vzorku a rozpouštědla, v g

V_p je objem pyknometru po stanovenou značku, v m^3

12.1.3. Mezerovitost směsi

| CRmB | ρ_m | ρ_b | V_m | VMA | VFB |
|-------|------------|------------|-------|-----|-----|
| [%] | $[kg/m^3]$ | $[kg/m^3]$ | [%] | [%] | [%] |
| 8,5 % | 2 382 | 2 239 | 6,0 | 6,2 | 3,0 |
| 9,0 % | 2 354 | 2 229 | 5,3 | 5,5 | 3,6 |
| 9,5 % | 2 314 | 2 238 | 3,3 | 3,5 | 6,0 |

V_m je mezerovitost směsi, vyjádřená v %

VMA je mezerovitost směsi kameniva, v %

VFB je stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem, v %

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

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

12.2. Naměřené hodnoty pro charakteristiku směsi AC 16 – 1. Návrh z Marshallových těles

12.2.1. Objemová hmotnost

| CRmB | číslo vzorku | m_1 | m_2 | m_3 | ρ_{bssd} | $\varnothing \rho_{bssd}$ |
|-------|--------------|--------|-------|--------|---------------|---------------------------|
| [%] | | $[g]$ | $[g]$ | $[g]$ | $[kg/m^3]$ | $[kg/m^3]$ |
| 6,3 % | 1 | 1133,4 | 633,9 | 1146,0 | 2 209 | 2 198 |
| 6,3 % | 2 | 1118,9 | 625,2 | 1135,1 | 2 190 | |
| 6,3 % | 3 | 1103,2 | 615,6 | 1117,0 | 2 196 | |
| 6,8 % | 1 | 1096,3 | 610,2 | 1109,3 | 2 192 | 2 230 |
| 6,8 % | 2 | 1097,6 | 616,8 | 1103,7 | 2 250 | |
| 6,8 % | 3 | 1097,5 | 616,7 | 1104,2 | 2 247 | |
| 7,3 % | 1 | 1099,1 | 617,5 | 1103,3 | 2 258 | 2 255 |
| 7,3 % | 2 | 1097,4 | 615,5 | 1101,8 | 2 252 | |
| 7,3 % | 3 | 1107,3 | 620,2 | 1110,5 | 2 254 | |

ρ_{bssd} je objemová hmotnost zkušebního tělesa, v kg/m^3

m_1 je hmotnost suchého tělesa, v g

m_2 je hmotnost nasyceného tělesa ve vodě, v g

m_3 je hmotnost nasyceného osušeného tělesa, v g

12.2.2. Maximální objemová hmotnost

| CRmB | číslo pyknometru | m_1 | m_2 | m_3 | V_p | ρ_{mw} |
|-------|------------------|-------|---------|---------|-----------|--------------|
| [%] | | [g] | [g] | [g] | [m^3] | [kg/m^3] |
| 6,3 % | III | 685,3 | 1 532,9 | 2 927,9 | 1 308,3 | 2 429 |
| 6,8 % | V | 693,7 | 1 529,9 | 2 951,3 | 1 323,3 | 2 418 |
| 7,3 % | VI | 700,5 | 1 467,5 | 2 911,8 | 1 312,8 | 2 400 |

*Teplota vody při zkoušce byla 20,6 - 20,7 °C

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

m_1 je hmotnost pyknometru, v g

m_2 je hmotnost pyknometru a zkušební vzorku, v g

m_3 je hmotnost pyknometru, zkušební vzorku a rozpouštědla, v g

12.2.3. Mezerovitost směsi

| CRmB | ρ_m | ρ_b | V_m | VMA | VFB |
|-------|--------------|--------------|-------|-----|-----|
| [%] | [kg/m^3] | [kg/m^3] | [%] | [%] | [%] |
| 6,3 % | 2 429 | 2 198 | 9,5 | 9,6 | 1,4 |
| 6,8 % | 2 418 | 2 230 | 7,8 | 7,6 | 1,9 |
| 7,3 % | 2 400 | 2 255 | 6,1 | 6,2 | 2,6 |

V_m je mezerovitost směsi, vyjádřená v %

VMA je mezerovitost směsi kameniva, v %

VFB je stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem, v %

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

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

12.3. Naměřené hodnoty pro charakteristiku směsi AC 16 – 2. Návrh z Marshallových těles

12.3.1. Objemová hmotnost

| CRmB | číslo vzorku | m_1 | m_2 | m_3 | ρ_{bssd} | $\varnothing \rho_{bssd}$ |
|-------|--------------|--------|-------|--------|---------------|---------------------------|
| [%] | | [g] | [g] | [g] | [kg/m^3] | [kg/m^3] |
| 6,3 % | 1 | 1105,4 | 620,3 | 1109,4 | 2 256 | 2 256 |
| 6,3 % | 2 | 1102,2 | 618,9 | 1106,6 | 2 256 | |
| 6,3 % | 3 | 1098,7 | 617,1 | 1103,6 | 2 254 | |

| | | | | | | |
|-------|---|--------|-------|--------|-------|-------|
| 6,8 % | 1 | 1100,6 | 615,3 | 1106,5 | 2 236 | 2 252 |
| 6,8 % | 2 | 1107,7 | 623,7 | 1110,5 | 2 271 | |
| 6,8 % | 3 | 1095,4 | 614,1 | 1100,6 | 2 247 | |
| 7,3 % | 1 | 1109,5 | 622,2 | 1111,8 | 2 262 | 2 262 |
| 7,3 % | 2 | 1108,3 | 622,0 | 1111,7 | 2 259 | |
| 7,3 % | 3 | 1108,6 | 623,6 | 1112,0 | 2 265 | |

ρ_{bssd} je objemová hmotnost zkušební tělesa, v kg/m^3

m_1 je hmotnost suchého tělesa, v g

m_2 je hmotnost nasyceného tělesa ve vodě, v g

m_3 je hmotnost nasyceného osušeného tělesa, v g

12.3.2. Maximální objemová hmotnost

| CRmB | číslo pyknometru | m_1 | m_2 | m_3 | V_p | ρ_{mw} |
|-------|---------------------|--------|---------|---------|-----------|--------------|
| [%] | | [g] | [g] | [g] | [m^3] | [kg/m^3] |
| 6,3 % | III | 685,31 | 1 564,1 | 2 953,1 | 1 308 | 2 432 |
| 6,8 % | V | 693,68 | 1 575,6 | 2 967,0 | 1 323 | 2 407 |
| 7,3 % | VI | 700,52 | 1 559,6 | 2 946,1 | 1 312 | 2 392 |

*Teplota vody při zkoušce byla 20,6 - 20,7 °C

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

m_1 je hmotnost pyknometru, v g

m_2 je hmotnost pyknometru a zkušební vzorku, v g

m_3 je hmotnost pyknometru, zkušební vzorku a rozpouštědla, v g

V_p je objem pyknometru po stanovenou značku, v m^3

12.3.3. Mezerovitost směsi

| CRmB | ρ_m | ρ_b | V_m | VMA | VFB |
|-------|--------------|--------------|-------|-----|-----|
| [%] | [kg/m^3] | [kg/m^3] | [%] | [%] | [%] |
| 6,3 % | 2 432 | 2 256 | 7,2 | 7,4 | 1,9 |
| 6,8 % | 2 407 | 2 252 | 6,5 | 6,6 | 2,3 |
| 7,3 % | 2 392 | 2 262 | 5,4 | 5,6 | 2,9 |

V_m je mezerovitost směsi, vyjádřená v %

VMA je mezerovitost směsi kameniva, v %

VFB je stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem, v %

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

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

12.4. Naměřené parametry pro charakteristiku asfaltových desek

| Název desky | m_1 | m_2 | m_3 | ρ_{mV} | ρ_{bssd} | V_m | ρ_{MT} | Míra zhutnění desek |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|--------------|---------------|-------|--------------|---------------------|
| | [g] | [g] | [g] | [kg/m^3] | [kg/m^3] | [%] | [kg/m^3] | [%] |
| SWE _(9,5%) 0 - SMA 16 | 9 083 | 5 112 | 9 128 | 2 313,8 | 2 256,1 | 2,5 | 2 238 | 100,8 |
| SWE _(9,5%) I - SMA 16 | 9 093 | 5 127 | 9 185 | 2 313,8 | 2 235,2 | 3,4 | 2 238 | 99,9 |
| SWE _(9,5%) II - SMA 16 | 9 076 | 5 124 | 9 184 | 2 313,8 | 2 230,0 | 3,6 | 2 238 | 99,6 |
| USA _(7,3%) 0 - AC 16 | 9 742 | 5 590 | 9 878 | 2 391,5 | 2 266,3 | 5,2 | 2 255 | 100,5 |
| USA _(7,3%) I - AC 16 | 9 702 | 5 538 | 9 856 | 2 391,5 | 2 241,3 | 6,3 | 2 255 | 99,4 |
| USA _(7,3%) II - AC 16 | 9 735 | 5 557 | 9 871 | 2 391,5 | 2 251,0 | 5,9 | 2 255 | 99,8 |

*Teplota vody při zkoušce byla 23,0 °C

m_1 je hmotnost suché desky, v g

m_2 je hmotnost desky ve vodě, v g

m_3 je hmotnost desky nasycené vodou po osušení, v g

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

ρ_{bssd} je objemová hmotnost desky, v kg/m^3

V_m je mezerovitost desky, vyjádřená v %

ρ_{MT} je průměrná objemová hmotnost Marshallových těles pro danou směs, v kg/m^3

Míra zhutnění desek je stanovena jako $(\rho_{bssd}/\rho_{MT}) \cdot 100\%$

12.5. Modul tuhosti – jednotlivá měření

12.5.1. Rozměry komolých klínů

| Komolé klíny | | | | | | | |
|------------------|-------------------|-------|-------|------|------|-------|---------|
| | číslo vzorku | h_1 | h_2 | b | l | m | |
| | | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [g] | |
| Švédský koncept | SMA 16 9,5 % CRmB | 1 | 67,8 | 26,4 | 49,7 | 249,5 | 1 300,9 |
| | | 2 | 69,6 | 25,5 | 49,2 | 249,5 | 1 311,6 |
| | | 3 | 69,0 | 25,5 | 49,5 | 249,5 | 1 305,8 |
| | | 4 | 70,3 | 26,0 | 50,1 | 250,1 | 1 336,6 |
| | | 5 | 69,8 | 26,3 | 49,8 | 250,1 | 1 335,6 |
| | | 6 | 68,9 | 26,4 | 50,4 | 251,2 | 1 329,4 |
| | | 7 | 68,6 | 26,4 | 49,9 | 251,3 | 1 326,9 |
| | | 8 | 69,3 | 26,2 | 49,0 | 251,5 | 1 306,5 |
| | | 9 | 71,2 | 25,6 | 50,0 | 251,3 | 1 338,8 |
| | | 10 | 69,2 | 26,7 | 49,6 | 251,4 | 1 322,1 |
| Americký koncept | AC 16 7,3 % CRmB | 11 | 71,8 | 27,9 | 50,7 | 251,8 | 1 454,4 |
| | | 12 | 69,7 | 27,7 | 51,7 | 252,1 | 1 443,8 |
| | | 13 | 69,9 | 28,8 | 51,2 | 252,0 | 1 427,3 |
| | | 14 | 70,1 | 26,5 | 52,8 | 251,9 | 1 453,4 |
| | | 15 | 69,8 | 27,5 | 51,3 | 251,9 | 1 443,1 |
| | | 16 | 70,3 | 28,1 | 51,2 | 251,2 | 1 432,8 |
| | | 17 | 70,7 | 27,6 | 52,3 | 251,4 | 1 480,7 |
| | | 18 | 69,1 | 28,1 | 53,2 | 251,5 | 1 472,6 |
| | | 19 | 70,5 | 28,0 | 52,0 | 250,9 | 1 466,2 |
| | | 20 | 69,7 | 28,3 | 51,1 | 251,3 | 1 431,3 |

12.5.2. Moduly tuhosti švédského konceptu SMA 16

| Modul tuhosti [MPa] při teplotě -5 °C | | | | | |
|---------------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|
| číslo vzorku | Frekvence [Hz] | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 1 | 10 160 | 10 752 | 11 051 | 11 267 | 11 472 |
| 2 | 10 044 | 10 503 | 10 897 | 11 130 | 11 381 |
| 3 | 9 591 | 10 211 | 10 624 | 10 874 | 11 120 |
| 4 | - | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - | - |
| 6 | 9 501 | 10 135 | 10 578 | 10 860 | 11 156 |

| | | | | | |
|-------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 7 | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - |
| 10 | 9 041 | 9 710 | 10 066 | 10 315 | 10 597 |
| průměrné hodnoty* | 9 667 | 10 262 | 10 643 | 10 889 | 11 145 |

Modul tuhosti [MPa] při teplotě 10 °C

| číslo vzorku | Frekvence [Hz] | | | | |
|-------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 1 | 6 886 | 7 456 | 7 881 | 8 176 | 8 293 |
| 2 | 6 138 | 6 755 | 7 226 | 7 542 | 7 770 |
| 3 | 6 217 | 6 994 | 7 459 | 7 758 | 8 028 |
| 4 | - | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - | - |
| 6 | 6 587 | 7 211 | 7 593 | 7 825 | 8 110 |
| 7 | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - |
| 10 | 6 156 | 6 845 | 7 176 | 7 564 | 7 882 |
| průměrné hodnoty* | 6 397 | 7 052 | 7 467 | 7 773 | 8 017 |

Modul tuhosti [MPa] při teplotě 15 °C

| číslo vzorku | Frekvence [Hz] | | | | |
|--------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 1 | 5 013 | 5 558 | 5 923 | 6 429 | 6 677 |
| 2 | 4 716 | 5 471 | 5 857 | 6 131 | 6 374 |
| 3 | 4 940 | 5 638 | 6 076 | 6 360 | 6 706 |
| 4 | 4 586 | 5 227 | 5 669 | 5 970 | 6 401 |
| 5 | 4 476 | 5 288 | 5 722 | 6 070 | 6 404 |
| 6 | 4 809 | 5 495 | 5 888 | 6 236 | 6 540 |
| 7 | 4 642 | 5 387 | 5 863 | 6 129 | 6 454 |
| 8 | 5 588 | 6 254 | 6 667 | 7 026 | 7 333 |
| 9 | 5 043 | 5 782 | 6 157 | 6 462 | 6 748 |
| 10 | 4 834 | 5 525 | 5 898 | 6 174 | 6 527 |

| | | | | | |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| průměrné hodnoty* | 4 865 | 5 563 | 5 972 | 6 299 | 6 616 |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|

Modul tuhosti [MPa] při teplotě 25 °C

| číslo vzorku | Frekvence [Hz] | | | | |
|-------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 1 | 2 555 | 3 096 | 3 552 | 3 774 | 4 147 |
| 2 | 2 377 | 2 921 | 3 559 | 3 789 | 4 075 |
| 3 | 2 523 | 3 057 | 3 476 | 3 752 | 4 011 |
| 4 | - | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - | - |
| 6 | 2 577 | 3 190 | 3 556 | 3 808 | 4 033 |
| 7 | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - |
| 10 | 2 392 | 2 999 | 3 334 | 3 646 | 3 842 |
| průměrné hodnoty* | 2 485 | 3 053 | 3 495 | 3 754 | 4 022 |

Modul tuhosti [MPa] při teplotě 40 °C

| číslo vzorku | Frekvence [Hz] | | | | |
|-------------------|----------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 1 | 602 | 976 | 1 246 | 1 439 | 1 647 |
| 2 | 625 | 675 | 1 189 | 1 246 | 1 494 |
| 3 | 590 | 964 | 1 131 | 1 389 | 1 611 |
| 4 | - | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - | - |
| 6 | 880 | 1 144 | 1 290 | 1 574 | 1 758 |
| 7 | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - |
| 10 | 712 | 973 | 1 207 | 1 521 | 1 785 |
| průměrné hodnoty* | 682 | 946 | 1 213 | 1 434 | 1 659 |

12.5.3. Moduly tuhosti amerického konceptu AC 16

| Modul tuhosti [MPa] při teplotě -5 °C | | | | | |
|--|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| číslo vzorku | Frekvence [Hz] | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 11 | - | - | - | - | - |
| 12 | 10 432 | 11 055 | 11 363 | 11 582 | 11 879 |
| 13 | - | - | - | - | - |
| 14 | - | - | - | - | - |
| 15 | 11 030 | 11 681 | 12 139 | 12 431 | 12 785 |
| 16 | - | - | - | - | - |
| 17 | 10 302 | 10 841 | 11 182 | 11 483 | 11 738 |
| 18 | - | - | - | - | - |
| 19 | 10 130 | 10 755 | 11 216 | 11 522 | 11 767 |
| 20 | 10 402 | 11 063 | 11 447 | 11 805 | 12 144 |
| průměrné hodnoty* | 10 459 | 11 079 | 11 469 | 11 765 | 12 063 |

| Modul tuhosti [MPa] při teplotě 10 °C | | | | | |
|--|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| číslo vzorku | Frekvence [Hz] | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 11 | - | - | - | - | - |
| 12 | 7 295 | 7 933 | 8 378 | 8 622 | 9 026 |
| 13 | - | - | - | - | - |
| 14 | - | - | - | - | - |
| 15 | 7 673 | 8 488 | 8 894 | 9 203 | 9 494 |
| 16 | - | - | - | - | - |
| 17 | 7 911 | 8 534 | 8 961 | 9 197 | 9 516 |
| 18 | - | - | - | - | - |
| 19 | 7 775 | 8 539 | 8 937 | 9 230 | 9 459 |
| 20 | 7 804 | 8 549 | 8 950 | 9 257 | 9 510 |
| průměrné hodnoty* | 7 692 | 8 409 | 8 824 | 9 102 | 9 401 |

| Modul tuhosti [MPa] při teplotě 15 °C | | | | | |
|--|----------------|----|----|----|----|
| číslo vzorku | Frekvence [Hz] | | | | |
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |

| | | | | | |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 11 | 6 785 | 7 426 | 7 838 | 8 144 | 8 375 |
| 12 | 6 391 | 7 077 | 7 462 | 7 824 | 8 115 |
| 13 | 5 923 | 6 549 | 6 934 | 7 222 | 7 543 |
| 14 | 6 429 | 7 154 | 7 604 | 7 987 | 8 247 |
| 15 | 6 310 | 7 063 | 7 531 | 7 861 | 8 057 |
| 16 | 5 972 | 6 653 | 7 033 | 7 226 | 7 487 |
| 17 | 6 145 | 6 884 | 7 384 | 7 620 | 7 945 |
| 18 | 5 691 | 6 454 | 6 906 | 7 281 | 7 474 |
| 19 | 6 213 | 6 884 | 7 348 | 7 653 | 7 919 |
| 20 | 6 361 | 7 096 | 7 603 | 7 940 | 8 289 |
| průměrné hodnoty* | 6 222 | 6 924 | 7 364 | 7 676 | 7 945 |

Modul tuhosti [MPa] při teplotě 25 °C

| číslo vzorku | Frekvence [Hz] | | | | |
|-------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 11 | - | - | - | - | - |
| 12 | 3 480 | 4 103 | 4 544 | 4 802 | 5 279 |
| 13 | - | - | - | - | - |
| 14 | - | - | - | - | - |
| 15 | 3 635 | 4 436 | 4 830 | 5 132 | 5 512 |
| 16 | - | - | - | - | - |
| 17 | 3 604 | 4 249 | 4 683 | 5 080 | 5 311 |
| 18 | - | - | - | - | - |
| 19 | 3 632 | 4 306 | 4 680 | 4 998 | 5 301 |
| 20 | 3 738 | 4 385 | 4 803 | 5 114 | 5 507 |
| průměrné hodnoty* | 3 618 | 4 296 | 4 708 | 5 025 | 5 382 |

Modul tuhosti [MPa] při teplotě 40 °C

| číslo vzorku | Frekvence [Hz] | | | | |
|--------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 11 | - | - | - | - | - |
| 12 | 1 092 | 1 426 | 1 726 | 2 015 | 2 467 |
| 13 | - | - | - | - | - |
| 14 | - | - | - | - | - |
| 15 | 1 189 | 1 552 | 1 837 | 2 090 | 2 471 |

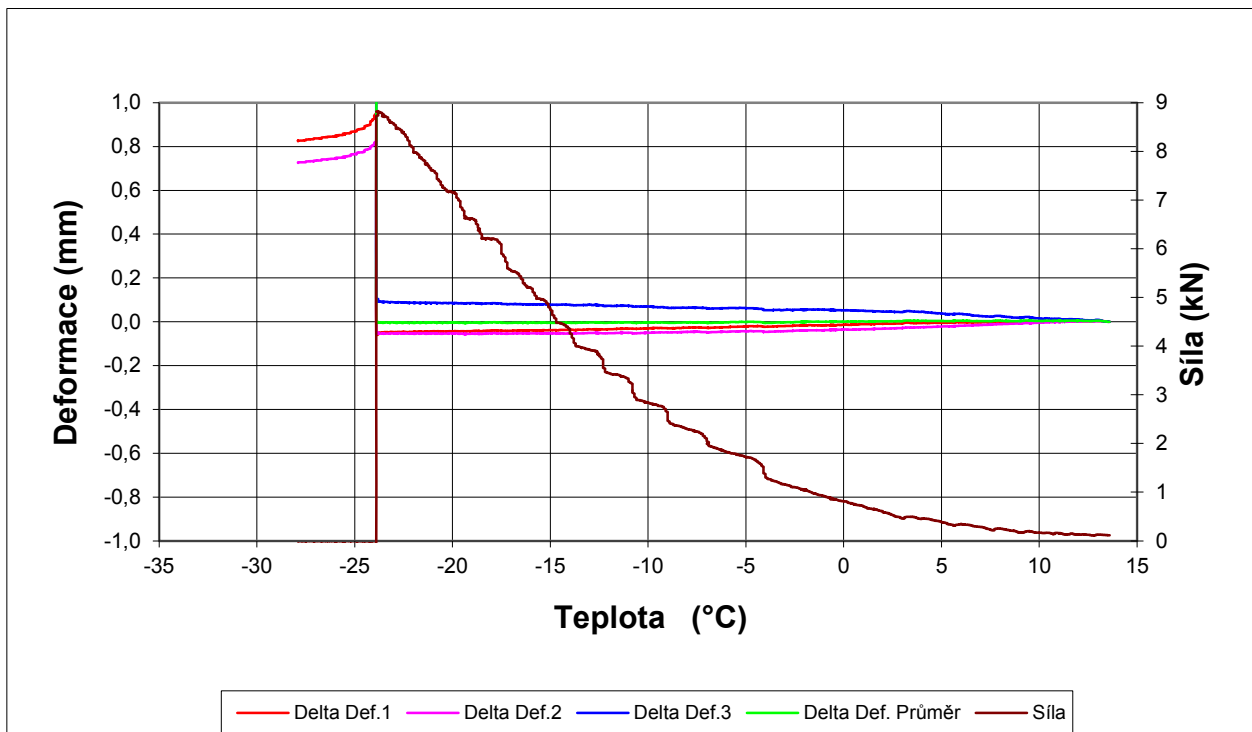
| | | | | | |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 16 | - | - | - | - | - |
| 17 | 1 236 | 1 633 | 1 897 | 1 992 | 2 512 |
| 18 | - | - | - | - | - |
| 19 | 1 226 | 1 633 | 1 915 | 2 173 | 2 528 |
| 20 | 1 302 | 1 598 | 1 944 | 2 166 | 2 465 |
| průměrné hodnoty* | 1 209 | 1 568 | 1 864 | 2 087 | 2 489 |

* Průměrné hodnoty jsou hodnoty naměřené přístrojem. V kapitole 6.2 jsou uváděny hodnoty přepočtené dle kalibračního vzorku se známým modulem tuhosti, u kterého byl také stanoven modul tuhosti na přístroji a podíl skutečného a naměřeného modulu je stanoven jako součinitel skutečného modulu tuhosti.

12.6. Nízkoteplotní vlastnosti – jednotlivé protokoly

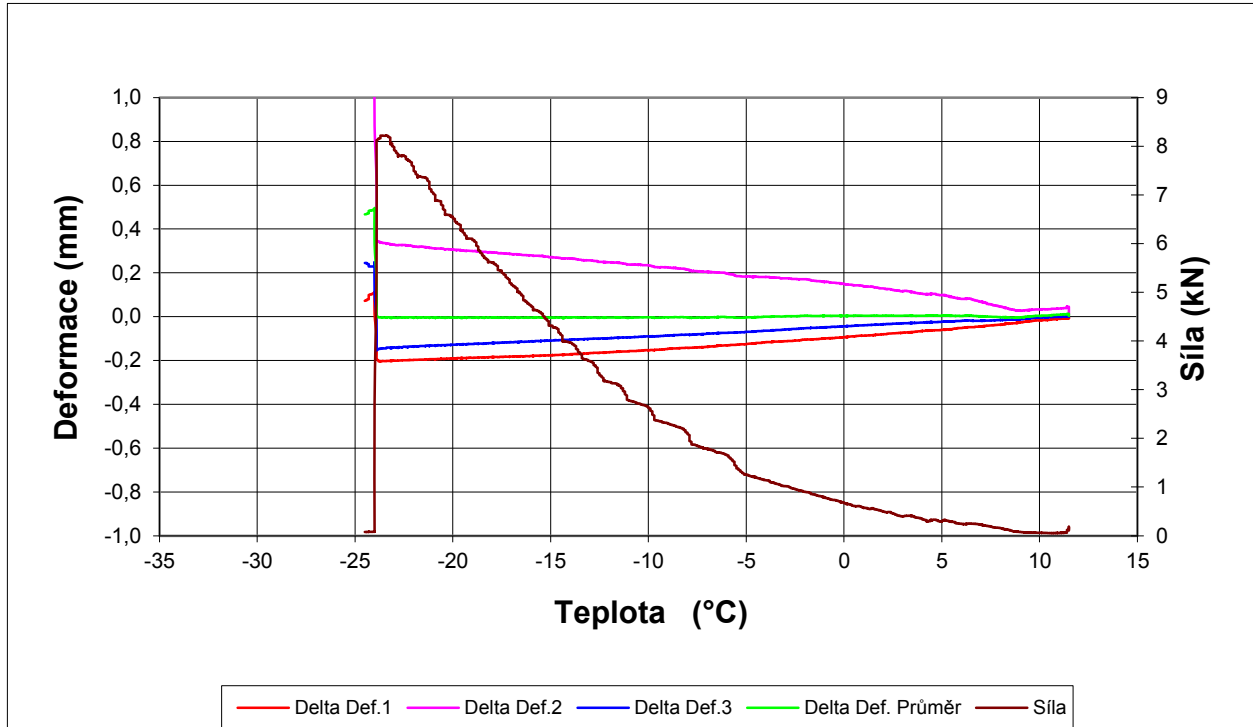
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|---|-----------------------|
| Akce : | D. P. |
| Asfaltová směs : | SMA 16 I – 9,5 % CRmB |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 50 x 50 x 200 |
| Datum zkoušky : | 15. 10. 2014 |
| Zkoušku provedl : | Adam Puda |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 8,83 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 3,53 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -27,8 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -23,8 |



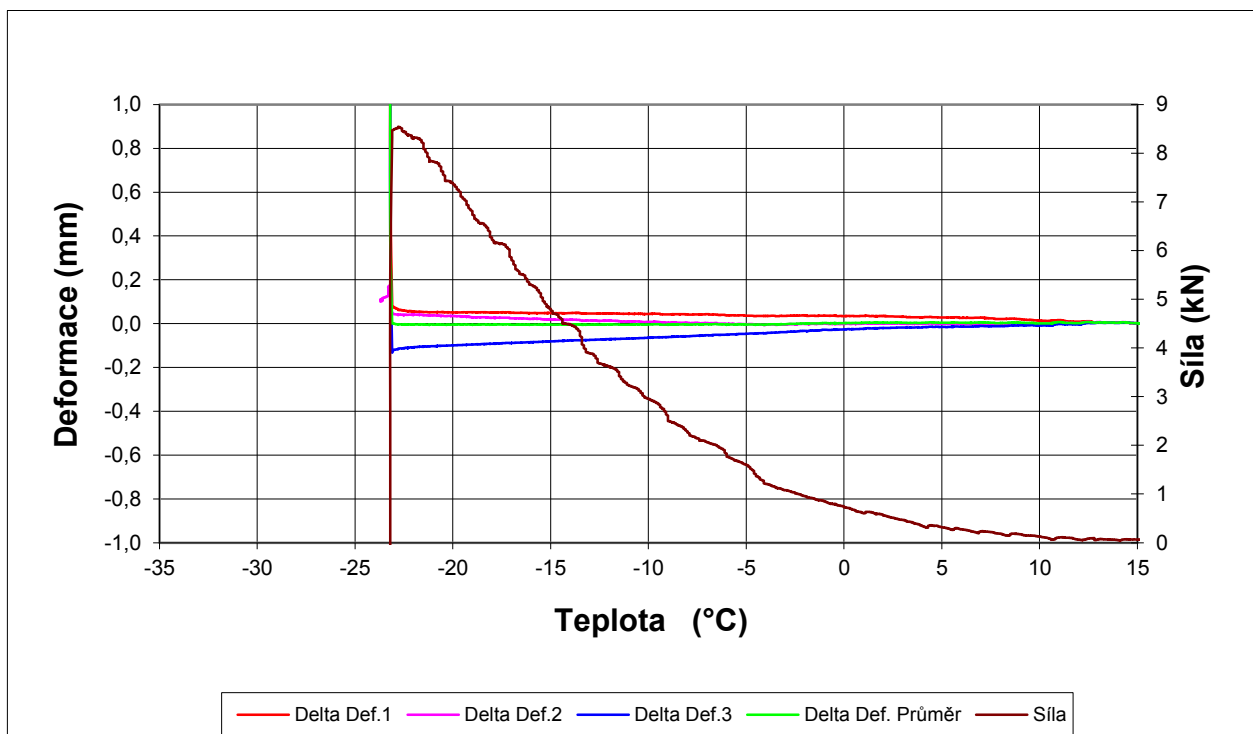
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|---|------------------------|
| Akce : | D. P. |
| Asfaltová směs : | SMA 16 II – 9,5 % CRmB |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 50.9 x 50.7 x 200.3 |
| Datum zkoušky : | 6. 11. 2014 |
| Zkoušku provedl : | Adam Puda |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 8,22 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 3,19 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -27,1 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -23,4 |



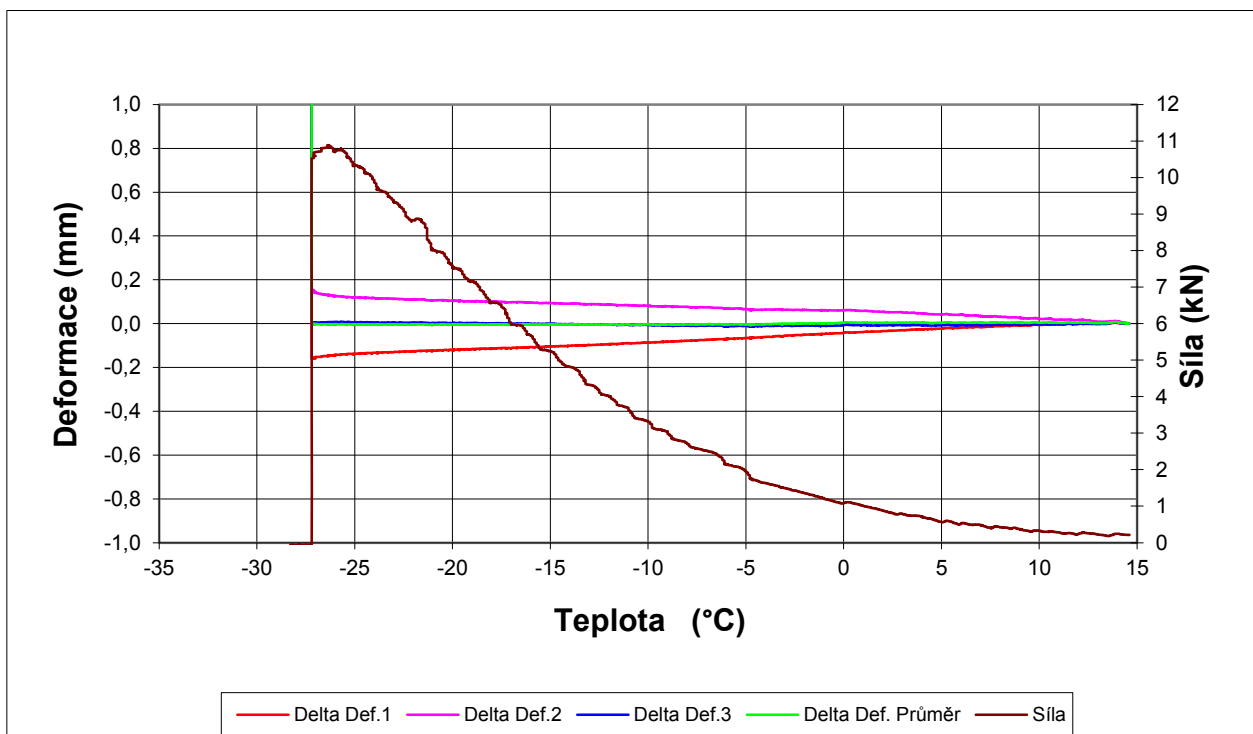
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|---|-------------------------|
| Akce : | D. P. |
| Asfaltová směs : | SMA 16 III – 9,5 % CRmB |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 50.7 x 50.9 x 200.3 |
| Datum zkoušky : | 2. 12. 2014 |
| Zkoušku provedl : | Adam Puda |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 8,54 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 3,31 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -26,4 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -22,8 |



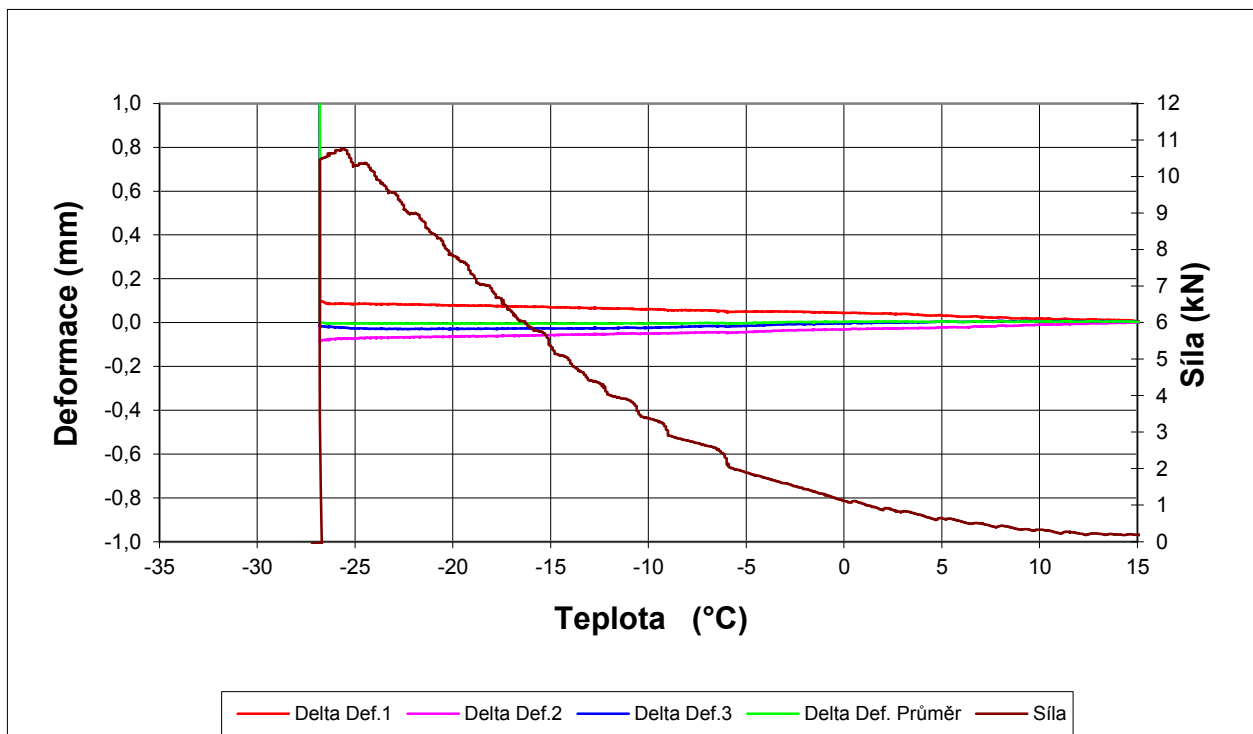
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|---|----------------------|
| Akce : | D. P. |
| Asfaltová směs : | AC 16 I – 7,3 % CRmB |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 50 x 50 x 200 |
| Datum zkoušky : | 13. 10. 2014 |
| Zkoušku provedl : | Adam Puda |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 10,89 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 4,35 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -29,7 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -26,4 |



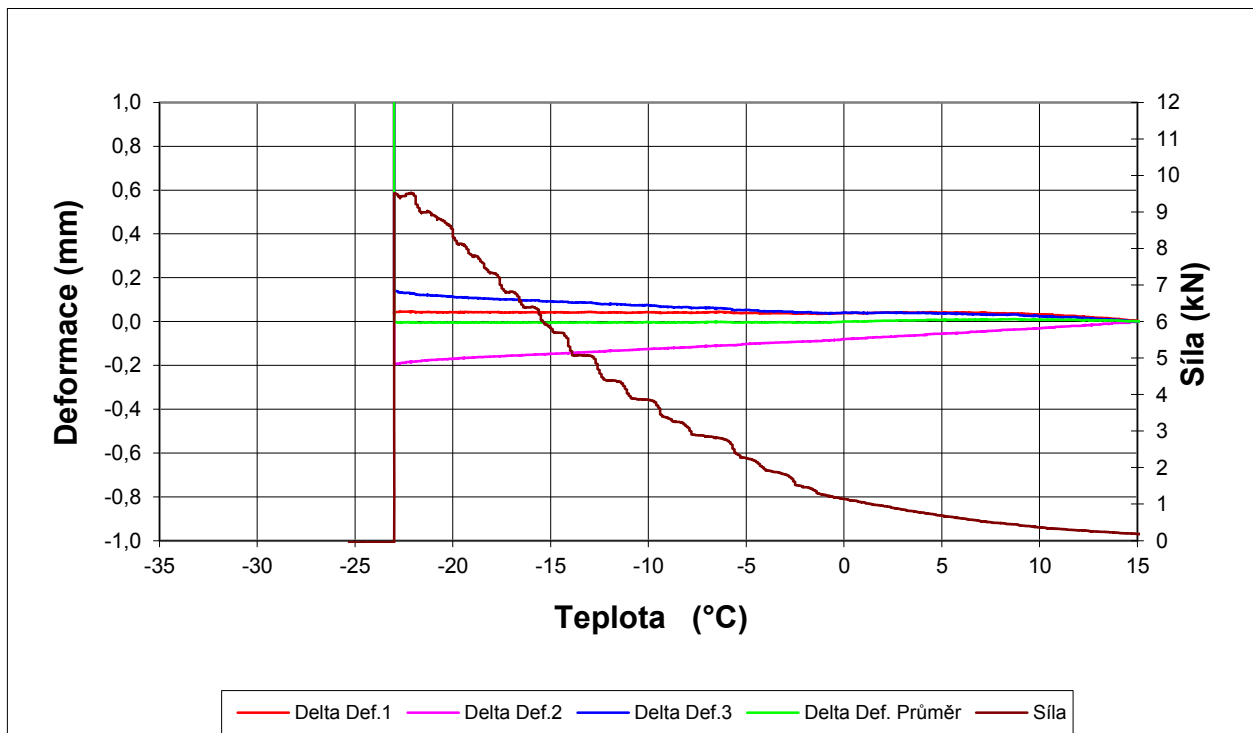
Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|---|-----------------------|
| Akce : | D. P. |
| Asfaltová směs : | AC 16 II – 7,3 % CRmB |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 50 x 50 x 200 |
| Datum zkoušky : | 24. 10. 2014 |
| Zkoušku provedl : | Adam Puda |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 10,76 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 4,30 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -29,6 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -25,7 |



Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|---|------------------------|
| Akce : | D. P. |
| Asfaltová směs : | AC 16 III – 7,3 % CRmB |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 50.6 x 51 x 200.7 |
| Datum zkoušky : | 18. 11. 2014 |
| Zkoušku provedl : | Adam Puda |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 9,52 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 3,69 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -26,2 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -22,1 |



Zkouška odolnosti asfaltové směsi proti vzniku mrazových trhlin

| | |
|---|-----------------------|
| Akce : | D. P. |
| Asfaltová směs : | AC 16 IV – 7,3 % CRmB |
| Rozměry zkušebního tělesa - mm : | 50.7 x 50.7 x 200 |
| Datum zkoušky : | 9. 12. 2014 |
| Zkoušku provedl : | Adam Puda |
| Teplota temperování - °C : | 10 |
| Doba temperování - min. : | 15 |
| Rychlost ochlazování - °C/hod : | 10 |
| Max. síla při porušení - kN : | 10,65 |
| Max. napětí při porušení - MPa : | 4,14 |
| Teplota v komoře při porušení - °C : | -27,7 |
| Teplota vzorku při porušení - °C : | -23,5 |

