



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VYUŽITÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ TYPU RBL
USAGE OF RICH BOTTOM LAYERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Lukáš Simkovič

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.

BRNO 2018



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

Student	Bc. Lukáš Simkovič
Název	Využití asfaltových směsí typu RBL
Vedoucí práce	Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

doc. Dr. Ing. Michal Varaus

Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Specifikační normy pro asfaltové směsi řady ČSN EN 13108

Zkušební normy pro asfaltové směsi za horka řady ČSN EN 12697

ČSN 736160 Zkoušení asfaltových směsí

ČSN 736121 Hutněné asfaltové vrstvy

Sborníky s konferencí Asfaltové vozovky 2009, 2011, 2013, 2015

Internetové zdroje

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce je věnována problematice využití směsí typu RBL (Rich Bottom Layers) v konstrukcích vozovek. V diplomové práci bude prováděno zjišťování vybraných empirických a funkčních vlastností tohoto typu asfaltových směsí.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je teoretické seznámení s problematikou „Rich bottom layer“ a v praktické části porovnání parametrů tří asfaltových směsí pro podkladní vrstvy s použitím běžného silničního + modifikovaného asfaltu a modifikovaného pryžovým granulátem. Na těchto směsích jsou provedeny vybrané empirické a funkční laboratorní zkoušky (nízkoteplotní vlastnosti, odolnost vůči únavě, objemové hmotnosti) a moduly tuhosti a výsledky jsou vzájemně porovnány.

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is theoretical knowledge of the problems rich bottom layer and practical part of comparison of three asphalt mixtures for base layers using common road bitumen and modified rubber granulate. Selected functional laboratory tests (low temperature, fatigue resistance, bulk density) and stiffness modules are performed on these mixtures and the results are compared to each other.

KLÍČOVÁ SLOVA

asfaltová směs, asfaltové pojivo, asfalt modifikovaný pryžovým granulátem, podkladní vrstva, nízkoteplotní vlastnosti, únavové vlastnosti,

KEYWORDS

asphalt mixture, asphalt binder, modified bitumen, base layer, low temperature properties, fatigue properties,

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Lukáš Simkovič *Využití asfaltových směsí typu RBL*. Brno, 2018. 72 s., 10 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 12. 1. 2018

Bc. Lukáš Simkovič
autor práce

**PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP
PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 12. 1. 2018

Bc. Lukáš Simkovič

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Petrovi Hýzlovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, cenné rady, připomínky a čas, který mi věnoval během jejího zpracování. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D., Ing. Ivě Coufalíkové a zaměstnancům školní laboratoře za ochotu a pomoc v silniční laboratoři.

OBSAH

ÚVOD	11
I. TEORETICKÁ ČÁST	13
1 Asfaltové pojiva.....	13
1.1 Asfalt, jeho charakteristika a využití.....	13
1.2 Výroba asfaltu	16
1.3 Vlastnosti a zkoušení asfaltů.....	20
2 Navrhování a výroba asfaltových směsí.....	22
2.1 Typy a klasifikace asfaltových směsí.....	22
2.1.1 Asfaltový beton	23
2.1.2 Asfaltový koberec – makadam	24
2.1.3 Lité asfalty	24
2.2 Navrhování asfaltových směsí	25
2.2.1 Metodika složení receptury	25
2.2.2 Metoda empirického návrhu.....	25
2.2.3 Analytická návrhová metoda.....	26
2.2.4 Volumetrická návrhová metoda	26
2.2.5 Metody návrhu vztahované k funkčnímu chování.....	26
2.2.6 Metody návrhu založené na funkčním chování asfaltové směsi	27
2.3 Vlastnosti a zkoušení asfaltových směsí.....	27
2.3.1 Vlastnosti kameniva užívaného v asfaltových směších.....	27
2.3.2 Zkoušení asfaltových směsí.....	28
3 Perpetual pavement systémy	30
3.1 Skladba systému Perpetual pavement	30
3.2 Výhody a nevýhody „Perpetual pavement systému“	32
3.3 Směsi RBL (Rich bottom layer).....	33
3.4 Funkční zkoušky asfaltových směsí.....	33
II. PRAKTICKÁ ČÁST	36
4 Cíl a metodika.....	36

4.1	Metodika	36
4.2	Charakteristika zkoušených vzorků	38
4.2.1	Dostupné frakce, síťový rozbor, čára zrnitosti.....	38
4.2.2	Vyrobené směsi, poměr složek.....	40
4.2.3	Postup výroby zkušebních těles.....	41
5	Provedené zkoušky	47
5.1	Stanovení objemové hmotnosti	47
5.2	Stanovení mezerovitosti	52
5.3	Stanovení modulu tuhosti.....	54
5.4	Stanovení únavových charakteristik	57
5.5	Stanovení nízkoteplotních vlastností.....	60
5.6	Diskuze výsledků	63
ZÁVĚR.....		64
SEZNAM LITERATURY A ZDROJŮ		66
SEZNAM OBRÁZKŮ		68
SEZNAM TABULEK.....		69
SEZNAM GRAFŮ		70
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK		71
VELIČINY A JEDNOTKY		71
SEZNAM PŘÍLOH		72

ÚVOD

Asfaltové směsi jsou tradičním materiálem pro obrusné, ložní i podkladní vrstvy vozovek namáhaných vysokým i nízkým dopravním zatížením. Klasické asfaltové směsi se skládají ze dvou základních složek, z matrice tvořené aplikačně optimálním typem asfaltu a kameniva působícího obecně jako skelet přenášející zatížení do spodních vrstev.

Klasické asfaltové směsi jsou aplikovány v horních skladebních vrstvách vozovky a navrhovány s ohledem na jejich aplikaci buď do obrusné vrstvy, nebo do ložní vrstvy, nebo do podkladní vrstvy, která obrusnou vrstvu vynáší a slouží k roznášení zatížení do spodních vrstev vozovky. Výzkumné a vývojové aktivity se v současné době zaměřují zejména na modifikaci realizace podkladní vrstvy vozovky směřující ke zmírnování vlivu únavového zatížení a zároveň zachování pevnostních charakteristik, zejména tuhosti. Kromě tuhých asfaltových směsí se k tomuto účelu v současné době začínají využívat tzv. RBL (rich bottom layer) systémy, které se v porovnání s běžnými typy podkladního asfaltobetonu vyznačují vyšším obsahem asfaltového pojiva. Zvýšení únavových parametrů podkladní vrstvy vozovky může vést k výraznému prodloužení životnosti vozovky a celkově lepší odolnosti.

Systémy provádění horní části vozovky prošly v posledních desetiletích výraznými změnami zejména s cílem dosáhnout jejich vysoké životnosti. Jedním z hlavních systémů, který je v současné době užíván, je systém vícevrstvého provedení horní části vozovky se specifickou skladbou je systém „Perpetual pavement“, který obvykle jako podkladní vrstvu využívá právě RBL. Sofistikované rozvrstvení horní části vozovky se zaměřuje na uplatnění různých typů asfaltových směsí synergicky odolávajících dynamickému zatížení a povětrnosti.

Problematika RBL systému byla v diplomové práci rozvedena z teoretického i praktického hlediska. Teoretická část tvoří znalostní bázi shrnující obecně charakteristiku klasických asfaltových směsí, jejich složení, vlastnosti a způsob navrhování se zaměřením na provádění RBL systémů. Ty byly charakterizovány jednak s ohledem na technologii výroby a pokládky, jednak z hlediska působení v rámci skladby vozovky, zejména pak v systému „Perpetual pavement“. Důležitou součástí teoretické části byla podrobná rešerše výzkumných prací týkajících se současných RBL systémů a způsobů jejich modifikace k zajištění požadovaných charakteristik.

V praktické části bylo provedeno posouzení tří typů vybraných typů směsí RBL. Hodnocení vzorků bylo zaměřeno především na stanovení pevnostních a únavových charakteristik, a také nízkoteplotních vlastností a modulů tuhosti.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 Asfaltová pojiva

Užití asfaltu pro realizaci obrusné, ložní i podkladní vrstvy krytu vozovky je běžným standardem. Vlastnosti asfaltových směsí musí odpovídat požadavkům na dynamické namáhání a trvanlivost, které jsou vymezeny příslušnými technickými normami. V následujících podkapitolách je provedena krátká rešerše základních poznatků o asfaltu uplatňovaných při realizaci silničních staveb se změřením na tradiční i moderní asfaltové směsi.

1.1 Asfalt, jeho charakteristika a využití

Asfalty patří spolu s dehty do kategorie živičných materiálů. Asfalty se ve stavebnictví uplatňují již od starověku. Z chemického hlediska tvoří asfalty směs „řady sloučenin převážně uhlovodíkového charakteru o molekulové hmotnosti 600 až 10 000 a poměrně vysokém podílu dalších látek“¹. Jedná se především o sloučeniny kyslíku, dusíku a síry. Uhlovodíky tvořící základní strukturu asfaltů nabývají obvykle dvou forem, a to formy:²

- **asfaltenů** – křehké kondenzované uhlovodíky, jež jsou nositeli tvrdosti. Jedná se o křehké netavitelné látky rozpustné v sirouhlíku a benzenu, ovšem nerozpustné v alkoholech. Asfalteny podmiňují tepelnou stálost, viskozitu a tmelící schopnost asfaltu a ovlivňují jeho reologii. Čím vyšší je poměr asfaltenů ve směsi, tím je výsledný produkt tvrdší a křehčí, hůře penetruje a má vyšší bod měknutí. Při zahřívání se asfalteny rozkládají na karbeny a karboidy. Molekulová hmotnost asfaltenů se pohybuje v rozmezí 1000 až 100 000 mol při velikosti částic dosahující 5 až 30 nm a poměru atomů vodíku a uhlíku (H/C) přibližně 1,1. Obvykle tvoří 5-25% podíl složení asfaltu,³

¹ KOLÁŘ, Karel a Pavel REITERMAN. *Stavební materiály: pro SPŠ stavební*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 208 s. Studium (Grada). ISBN 978-80-247-4070-6, s. 159.

² SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1, s. 247

³ GRÜNNER, Karol. *Asfalt v cestnom staviteľstve: história a súčasnosť*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia monografií. ISBN 80-227-2483-1, s. 74.

- **maltenů** – olejovité prostředí, v němž jsou asfalteny dispergovány. Malteny jsou nositeli spojovací schopnosti asfaltu. Zpravidla se tyto látky neodpařují, pokud teplota zahřívání nedosáhne 180 °C, rozpouštějí se v benzenu a podmiňují elasticitu asfaltu. Malteny se dále dělí do tří specifických skupin látek:⁴
 - parafiny – tuhé alifatické uhlovodíky s lineárními nebo rozvětvenými řetězci obsahující alkylnaftenové a alkylaromátové funkční skupiny. Jedná se o žluté nebo bílé polární viskózní látky tvořící 5 – 20 % podíl na složení asfaltu,
 - aromáty – jsou tvořeny naftenicko-aromatickými sloučeninami s molekulovou hmotností pohybující se v rozmezí 300 – 2000 mol. Aromáty jsou nenasycené cyklické systémy navázané na nepolární uhlíkové řetězce. Aromáty tvoří 20 – 65 % podíl asfaltů a separované mají tmavě hnědou viskózní konzistenci,
 - živice – jsou látky tvořené obdobně jako asfalteny převážně z vodíku a uhlíku, přičemž dále obsahují kyslík, dusík a síru. Jedná se o tmavě hnědé tuhé až polotuhé vysoce polární sloučeniny s dobrými adhesivními vlastnostmi vůči asflatenům. V asfaltu působí jako dispergační činidla nebo peptizátory a jejich poměr k asflatenům určuje solový nebo gelový typ asfaltu.

Asfalt je téměř nerozpustný nebo obtížně rozpustný materiál, který přijímá pouze stopová množství vody na svém povrchu. Z tohoto důvodu je považován za vhodný izolant. Asfalty rovněž odolávají „*polárním chemickým látkám – anorganickým solím, louhům, nízkým koncentracím kyselin i posypovým hmotám*“⁵, přičemž tato odolnost klesá s narůstající okolní teplotou. Naopak nízkou odolnost vykazuje vůči organickým rozpouštědlům (benzín, benzen apod.). Sloučeniny tvořící asfalty jsou obvykle těkavé a senzitivní ke slunečnímu, potažmo UV záření. Po vytvrzení dochází k jeho postupnému křehnutí vlivem vystavené slunečnímu záření, čímž je výrazně zkracována jeho životnost.

⁴ GRÜNNER, Karol. *Asfalt v cestnom staviteľstve: história a súčasnosť*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia monografií. ISBN 80-227-2483-1, s. 74.

⁵ SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty. 2. přeprac. a dopl. vyd.* Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1, s. 247

Tato obvykle vyžaduje provedení povrchové úpravy, častou sanaci nebo modifikaci materiálu přísadami kompenzujícími stabilitu v ultrafialovém záření.⁶

Důležitými vlastnostmi charakterizujícími jednotlivé typy asfaltů zejména z chemického, a tedy i aplikačního hlediska, jsou bod měknutí a bod lámavosti, mající klíčový význam při výběru vhodného typu pojiva pro výrobu kompozitu s asfaltovou matricí. Obě tyto charakteristiky mají specifický způsob stanovení a určují zpracovatelnost a použití daného typu asfaltu.⁷ Kromě těchto vlastností představují významné charakteristiky také penetrace a gradace (tvrdost), které určují aplikační schopnosti asfaltu.

Standardně se rozlišují dvě specifické skupiny asfaltů v závislosti na způsobu, jakým jsou získávány, tedy asfalty přírodní nebo umělé. Přírodní asfalty se získávají těžbou tzv. asfaltitu nebo tavením asfaltových hornin. Asfaltit představuje přírodní asfalt „s vysokou tvrdostí a nízkým obsahem minerálních příměsí“⁸. Naopak obsahuje-li hornina vysoké množství minerálních příměsí a nízký obsah asfaltu, jedná se o tzv. asfaltovou horninu. Přírodní asfalty zastávají pro vysoké nároky na těžbu a zpracování stále menší podíl na trhu a jsou nahrazovány levnějšími umělými asfalty.

Syntetické (umělé) nebo také ropné asfalty se získávají jako vedlejší produkt při zpracování ropy. Dle složení se ropa v souvislosti s asfalty dělí na tři základní typy, a to na ropy asfaltické (obsahující značné množství makromolekulových asfaltových uhlovodíků), poloasfaltické (poloparafinické – obsahující poměrně menší množství asfaltových uhlovodíků, z nichž lze zpracováním získat srovnatelně kvalitní produkty jako z rop asfaltických) a neasfaltické ropy (parafinické s obsahem parafínu vyšším než 2 %, neobsahující asfaltické uhlovodíky, ze kterých lze chemickým zpracováním asfaltové uhlovodíky získat). Ropné asfalty představují zbytkové podíly při frakční destilaci ropy, jejich vlastnosti tedy závisí zejména na efektivnosti destilačního procesu a míře olejovitých součástí, které jsou v jeho rámci odděleny.

⁶ KOLÁŘ, Karel a Pavel REITERMAN. *Stavební materiály: pro SPŠ stavební*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 208 s. Studium (Grada). ISBN 978-80-247-4070-6, s. 159.

⁷ SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1, s. 247 – 248.

⁸ KOLÁŘ, Karel a Pavel REITERMAN. *Stavební materiály: pro SPŠ stavební*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 208 s. Studium (Grada). ISBN 978-80-247-4070-6, s. 159.

1.2 Výroba asfaltu

Asfalt je získáván zejména z asfaltické a poloasfaltické ropy frakční destilací závisějící na teplotě. Touto technologií se ropa zpracovává na následující frakce:⁹

- syrový benzin (při 150 °C),
- petrolej (při 250 °C),
- motorová nafta a motorový olej (do 350 °C),
- mazut (topný olej, při teplotách vyšších než 350 °C).

Asfalt, a také mazný olej pro aplikaci ve strojírenství, jsou získávány další destilací mazutu jako neodpařený zbytek po oddestilování lehčích frakcí. Technologie výroby asfaltu obvykle závisí na parametrech vstupní suroviny (zejména podílu asfaltových podílů), a také na typu asfaltu, který má být produktem. Pro oddělení nejtěžší frakce ropy od mazutu se užívá následujících technologií:¹⁰

- kotlová destilace – založená na postupném zahřívání ropy a oddestilování jednotlivých frakcí. Nevýhodou této technologie je výrazná časová náročnost a při teplotách vyšších než 400 °C, kdy je destilován mazut, asfalt podléhá destrukčnímu rozkladu. Určitého zlepšení průběhu destilace bylo dosaženo přechodem z přetržité na nepřetržitou kotlovou destilaci, kdy dochází k odběrům destilované frakce pouze v rozmezí kvalitativně shodných parametrů,
- trubková destilace – probíhá v trubkové peci, kde je ropa proudící pod tlakem v soustavě trubek ohřívána na velmi vysokou teplotu, která umožňuje rychlé odstranění těkavých podílů. Výhodou této technologie je krátký interval zahřívání, který neovlivňuje výrazným způsobem konečnou kvalitu asfaltu,
- atmosférická (vakuová) destilace – využívá pro destilaci atmosférickou destilační kolonu, v níž se odstraní těkavé podíl. Zbytek po destilaci je pak odváděn do vakuové kolony, kde je dále zpracováván.

Zbytek po frakční destilaci, jak bylo zmíněno výše, tvoří dvě složky – asfalt a mazný olej, které je dále při výrobě asfaltu potřeba separovat. Separaci lze provést několika způsoby, z nichž se nejčastěji užívá následujících technologií:¹¹

⁹ GRÜNNER, Karol. *Asfalt v cestnom staviteľstve: história a súčasnosť*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia monografií. ISBN 80-227-2483-1, s. 81.

¹⁰ GRÜNNER, Karol. *Asfalt v cestnom staviteľstve: história a súčasnosť*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia monografií. ISBN 80-227-2483-1, s. 81.

¹¹ tamtéž, s. 81.

- extrakční (selektivní) rafinace – prostřednictvím propanu, který se při malém přetlaku zkapalní. Olejovité složky, které chemickou reakcí přejdou do kapaliny, se mechanicky oddělí od vysráženého asfaltu, který je vlivem použité technologie bohatý na asfalteny (obsahuje menší podíl parafinů). Asfalt vyrobený touto technologií se uplatňuje převážně pro výrobu izolačních asfaltových pásů,
- pyrogenetický rozklad (krakování) – realizovaný zahříváním na teploty vyšší než 350 °C za vysokého tlaku. Při této technologii nastává rozklad uhlovodíků na karbeny a karboidy (jemně rozptýlené částičky koksovitých látek) v asfaltickém zbytku. Kvalitativně lze rozlišit několik typů krakovaného asfaltu, jejichž parametry se liší v závislosti na teplotě, tlaku a celkové časové náročnosti průběhu reakcí krakování. V porovnání s asfaltem vyrobeným extrakční rafinací má krakovaný produkt vyšší hustotu, teplotní citlivost a menší odolnost vůči působení povětrnosti. Tento typ asfaltu se pro výrobu materiálů pro dopravní stavitelství nepoužívá.

Výstupem popsaných procesů je tzv. primární asfalt tvořící bázi pro produkty využívané ve stavebnictví. K dosažení požadovaných vlastností se primární asfalt technologií dále upravuje. Úprava asfaltů se provádí především změnou skupinového složení primárního asfaltu, pro potřeby dopravního stavitelství upravuje především podíl asfaltenů. Upravené syntetické asfalty se dále dělí na následující typy:^{12, 13}

- **oxidované (foukané) asfalty** – připravují se profukováním primárních asfaltů měkčího charakteru vzduchem při teplotách 250 – 300 °C. Jedná se o proces tzv. oxidace, při němž „*probíhají ve struktuře asfaltu chemické změny, na vzdušný kyslík se vážou atomy vodíku z řetězců, u nichž pak dochází ke spojování*“¹⁴. Oxidované asfalty se připravují přivedením destilačního vakuového zbytku na dno kolony, kam je vháněn vzduch nebo kyslík. Tímto procesem vzniká tak gelová struktura vzájemně propojených asfaltových sloučenin vyznačující se vysokým bodem měknutí (80 – 100 °C) a nízkou

¹² SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1, s. 248 – 249 a 253.

¹³ GRÜNNER, Karol. *Asfalt v cestnom staviteľstve: história a súčasnosť*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia monografií. ISBN 80-227-2483-1, s. 81-82.

¹⁴ SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1, s. 248.

penetrací, nárůst obsahu asfaltenů zapříčiňuje vyšší tvrdost a křehkost (nižší duktilitu – houževnatost) asfaltu. Oxidované asfalty se uplatňují především pro výrobu izolačních materiálů a asfaltových směsí pro realizaci krytu vozovek,

- **polofoukané asfalty** – jsou speciálním typem oxidovaných asfaltů, při jejichž výrobě dochází pouze k mírnému profukování vzduchem obohacující destilační zbytek aromatickými frakcemi. Za normální teploty jsou tyto asfalty tuhé až polotuhé. Neobsahují vodu ani mechanické nečistoty. Polofoukané asfalty se užívají při výrobě obalených směsí a litých asfaltů pro sanaci vozovek, chodníků apod.,
- **měkčené (fluxované) asfalty** – se připravují vylepšením primárního asfaltu přídavkem změkčovadel – mletého asfaltitu, elastomerů (latexu) nebo adhesiv pro zvýšení přilnavosti k plnivům (mletá pryž apod.),
- **ředěné asfalty** – u nichž dochází zejména k úpravě (snižování) viskozity promícháním primárních nebo oxidovaných asfaltů s organickým rozpouštědlem (40–50 % rozpouštědla na jednotku hmotnosti asfaltu). Standardně se užívají prchavá rozpouštědla na bázi ropných (benzin) nebo dehtových (toluen, xylen) frakcí. Ředěné asfalty eliminují nutnost zahřívání asfaltu při pokládce na velmi vysokou teplotu (150–200 °C). Dle typu rozpouštědla se rozlišují rychle tuhnoucí ředěné asfalty (při použití rychle prchavého rozpouštědla – např. lakového benzínu) a normálně tuhnoucí asfalty (při použití normálně prchavého rozpouštědla – např. petrolejové ropné frakce). Původně se hojně používali k výrobě studených asfaltových směsí pro sanaci svrchních vrstev vozovek. Kvůli požárně-bezpečnostním a mechanickým vlastnostem se však od jejich užívání upouští,
- **asfaltové emulze** – látky s nízkou viskozitou vyráběné jemným rozptýlením (dispergací) asfaltu ve vodě, přičemž obsah asfaltu v emulzi dosahuje 40-65 %. V případě, že je rozptýlen asfalt ve vodním médiu, jedná se o přímou emulzi, v opačném případě hovoříme o obrácené emulzi. K dispergaci kapaliny se užívají speciální přísady – emulgátory (povrchově aktivní látky vytvářející

na povrchu dispergované fáze soudržnou vrstvou umožňující rychlé oddělení dispergované fáze a média). Emulgátory se dle chemického složení dělí na:¹⁵

- anionaktivní emulgátory – zásaditého charakteru na bázi mastných kyselin vytvářející na vnější vrstvě obalu záporný náboj zabraňující koagulaci kapalin,
- kationaktivní – kyselého charakteru na bázi aminů vyšších mastných kyselin. Kladný náboj na vnější vrstvě obalu dispergované kapaliny zajišťuje lepší afinitu ke kamenivu plniva asfaltové směsi.

Stálost emulze a regulaci doby jejího štěpení podporují emulgační stabilizátory. Dle rychlosti štěpení emulze (tedy rychlosti vylučování asfaltu z emulze na povrchu kameniva) jsou rozlišovány emulze rychloštěpné (vhodné pro nátěry a penetrační makadamy), středněštěpné (vhodné pro obalové směsi s otevřenou zrnitostí neobsahující jemné podíly kameniva) a pomaluštěpné (vhodné pro směsi s uzavřenou zrnitostí s nízkým podílem nejjemnější frakce kameniva).¹⁶

- **modifikované asfalty** – primární asfalt je modifikován příměsí polymeru. Jedná se vždy buď o elastomery (nejčastěji kaučuky) nebo termoplasty. Integrací makromolekul polymeru do struktury primárního asfaltu dochází ke změně jeho zpracovatelských i uživatelských vlastností. Dochází zejména ke změně – snížení viskozity materiálu, která má vliv na mísení s dalšími složkami kompozitů s asfaltovou maticí (a tedy horší zpracovatelnost), a ke zvýšení teplotního intervalu vymezeného bodem měknutí (na straně vysokých teplot) a bodem lámavosti (na straně teplot nízkých). Polymerní příměsí však umožňují také dosáhnout lepších fyzikálně-mechanických vlastností asfaltů. Jedná se zejména o vyšší pružnost (po odstranění zatížení se materiál vrací do původního tvaru obdobně jako polymerní sloučeniny), „vyšší tažnosti, větší adhezi, menším stékáním a bývají odolnější vůči stárnutí“¹⁷. Výrazný vliv na zmíněné vlastnosti modifikovaných asfaltů má podíl modifikujících přísad, který se promítne také do konečné ceny suroviny.

¹⁵ GRÜNNER, Karol. *Asfalt v cestnom staviteľstve: história a súčasnosť*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia monografií. ISBN 80-227-2483-1, s. 81-82.

¹⁶ tamtéž, s. 82-83.

¹⁷ KOLÁŘ, Karel a Pavel REITERMAN. *Stavební materiály: pro SPŠ stavební*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 208 s. Studium (Grada). ISBN 978-80-247-4070-6, s. 161.

Ve stavebnictví, tedy zejména v oblasti silničního stavitelství, kde se uplatní zvýšená odolnost vytvrzeného modifikovaného asfaltu, jsou aplikovány levnější modifikované asfalty s nižším podílem modifikujících přísad. Dražší typy s vyšším podílem modifikujících látek nacházejí své uplatnění především v izolační technice,

- síroasfalt – představuje materiál, který byl navržen k uplatnění produktu procesu odsiřování při zpracování ropy. Síra tvořící dlouhé řetězce „*má zvýšenou chemickou reaktivitu k maltenové fázi asfaltu, přitom při chemické vazbě s asfaltem nastává dehydrogenizace, podobně jako při oxidačních procesech*“¹⁸ Přítomnost síry ve struktuře asfaltu má tedy dále vliv na jeho vlastnosti obdobně jako u oxidovaného asfaltu zejména v oblasti teplotní citlivosti (snížení bodu lámavosti a zvýšení bodu měknutí), dále zvýšení pevnosti, přilnavosti a zejména pak odolnosti vůči vlivům vlhkosti a chemických látek. Síroasfalt lze uplatnit zejména v silničním stavitelství pro výrobu hutněných asfaltových směsí i pro horké lité asfaltové směsi. Výraznou nevýhodou omezující použití síroasfaltu je uvolňování oxidů síry a sírovodíku při jeho zpracování a pokládce představující negativní environmentální dopad aplikace.

1.3 Vlastnosti a zkoušení asfaltů

Nejdůležitějšími vlastnostmi asfaltů, pro které se využívají v dopravním stavitelství, jsou pružnost a plasticita. Je žádoucí, aby si asfalt při své aplikaci zachoval plastické schopnosti v co nejširším teplotním rozsahu, jelikož mu dodávají schopnost přenášet deformaci do pevných plniv. Rozsah plastického stavu asfaltu nelze měřit přímo, usuzuje se na něj na základě výsledků zkoušek sekundárních vlastností, jako jsou penetrace, bod měknutí, duktilita, bod lámavosti, bod vzplanutí, rozpustnost a odolnost vůči působení nepříznivého prostředí (UV záření, vlhkosti, mrazu apod.).¹⁹

Základní zkouškou asfaltů je stanovení penetrace. Penetrační zkouška je založena na měření hloubky vniku standardizovaného tělesa (penetrační jehly) do zkušebního

¹⁸ SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1, s. 253.

¹⁹ GRÜNNER, Karol. *Asfalt v cestnom staviteľstve: história a súčasnosť*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia monografií. ISBN 80-227-2483-1, s. 86.

vzorku asfaltu. Zkouška je vyhodnocována jako stanovení konzistence, resp. stupně plasticity asfaltu při definované teplotě. Na zkoušku penetrace navazuje stanovení penetračního indexu definujícího rozdíl dvou měření penetrace při různých teplotách, které určují konzistenčně-teplotní citlivost asfaltu. Zkouška se provádí při teplotách, jejichž rozdíl činí nejméně 10 °C.²⁰

Stanovení bodu měknutí se provádí prostřednictvím dvou metodik (bod měknutí stanovený kroužkem nebo kuličkou), které se vzájemně liší použitým postupem, vnikacím tělesem je však vždy ocelová kulička. Princip zkoušky spočívá v rovnoměrném zahřívání vzorků asfaltu do definovaného stavu (protážení na stanovenou délku vlivem hmotnosti kuličky nebo se vzorky v kroužcích protáhnou tak, že se dotknou podkladní desky). Teplota zaznamenaná ve chvíli definovaného stavu představuje bod měknutí daného vzorku asfaltu.²¹

Bod lámavosti se stanovuje metodikou dle Frasse a charakterizuje odolnost asfaltu vůči působení mrazu. Princip zkoušky stanovení bodu lámavosti spočívá v nanesení vzorku asfaltu na ocelový plíšek a postupném ochlazování. Teplota, při které vzorek praskne, definuje bod lámavosti daného asfaltu. Duktilita pak charakterizuje tažnost asfaltového vzorku. Zkouška se provádí postupným natahováním zkušebního tělesa, které má tvar pásu rovnoměrným natahováním ve speciálním přípravku zpravidla při teplotách 15 °C a 25 °C rychlostí 5 cm za minutu. Často se však rovněž zkouší tělesa temperovaná na 0 °C. Výsledkem zkoušky je aritmetický průměr tří souběžně tažených vzorků zaokrouhlený na 0,5 cm.²²

Kromě pevnostních charakteristik a odolnosti asfaltu se stanovují také vlastnosti definující jeho působení v asfaltové směsi. Jednou z takových zkoušek je stanovení přilnavosti asfaltu ke kamenivu, kterým je usuzováno na konečnou odolnost směsi vůči vlhkosti. Zároveň se určují vlastnosti technologické, na jejichž základě se pak vyhodnocuje zpracovatelnost asfaltové směsi. Mezi tyto vlastnosti patří např. stanovení viskozity, bodu vzplanutí nebo odolnost vůči tvrdnutí definovanými metodikami.²³

²⁰ tamtéž, s. 86-88.

²¹ tamtéž, s. 88.

²² tamtéž, s. 89-90.

²³ tamtéž, s. 90-91.

2 Navrhování a výroba asfaltových směsí

Asfalt se v dopravním stavitelství používá nejčastěji ve formě asfaltových směsí. Asfaltová směs je kompozitní materiál vznikající spojením asfaltové matrice a kameniva, jehož vlastnosti jsou vylepšovány speciálními přísadami (případně příměsemi). Obvykle se jako pojiva používá asfalt ve formě přírodní, asfaltové emulze nebo ředěného asfaltu. „Rozhodující pro správnou volbu těchto dvou vstupních materiálů a volbu druhu asfaltové směsi jsou požadované funkce ve vozovce zejména s ohledem na dopravní zatížení, návrhovou úroveň porušení a charakteristiky klimatu“²⁴. Následující podkapitoly se budou věnovat způsobu klasifikace, navrhování, výrobě a pokládce asfaltových směsí.

2.1 Typy a klasifikace asfaltových směsí

Asfaltové směsi se uplatňují především v silničním stavitelství či obecně při realizaci krytových částí vozovek k ochraně dynamicky namáhaného podloží. Pro výrobu asfaltových směsí se užívají tzv. asfalty silniční, které jsou charakterizovány specifickou třídou penetrace při 25 °C (zejména 20/30, 30/45, 50/70 a 70/100) oxidované polofoukáním, nebo asfalty modifikované. Silniční stavitelství rozlišuje dle složení a uplatnění tři základní typy asfaltových směsí:²⁵

- asfaltový beton – hutněné asfaltové směsi s plynulou čarou zrnitosti kameniva, které tvoří podpůrnou strukturu materiálu,
- asfaltový koberec (typ makadam) – hutněné asfaltové směsi s přerušovanou čarou zrnitosti umožňující na základě kombinace hrubých a jemných podílů dosáhnout lepšího vyplnění prostoru kamenivem,
- lité asfaltové směsi – obsahující větší podíl asfaltového pojiva.

²⁴ HÝZL, Petr. *BM 52 Praktické aplikace pozemních komunikací*. Brno: 2006.

²⁵ tamtéž.

Vedle klasifikace na základě složení a vlastností lze asfaltové směsi dělit dále také dle jejich výroby, resp. způsobu pokládky. V tomto ohledu jsou rozeznávány následující typy:²⁶

- horké asfaltové směsi – tyto směsi jsou vyráběny v obalovně při zvýšené teplotě odpovídající požadavkům optimálního obalení navrženého obsahu kameniva. Pokládka a hutnění těchto směsí probíhá rovněž za zvýšené teploty k eliminaci nežádoucí pórovitosti vytvořené vrstvy a dobré zpracovatelnosti. Horké asfaltové směsi jsou nejběžnějším typem využívaným pro úpravu vozovek,
- asfaltové směsi pokládané za studena – jsou připravovány v obalovně smícháním asfaltového pojiva a kameniva za normální teploty. Pokládka a hutnění probíhá rovněž bez nutnosti zvýšení teploty při zpracování,
- směsi obalované in situ – jsou vyráběny přímo v místě pokládky dle návrhového složení prostřednictvím speciálního míchacího zařízení,
- penetrační makadam (koberec) – je vyráběn ve třech stupních. V prvním stupni je vytvořen skelet z kameniva přetržité křivky zrnitosti, ve druhém stupni pak probíhá penetrace asfaltovým pojivem postříkem. Pojivo je obvykle při penetraci naplněno jemnou frakcí, používá se však také asfaltové emulze.

2.1.1 Asfaltový beton

Asfaltový beton je využíván pro vytváření krytů silničních a dálničních vozovek, povrchů letištních a jiných zpevněných ploch se spojitou křivkou zrnitosti plnivového kameniva. Pokládka se provádí hutněním v souladu s příslušnou normou. Výroba probíhá na obalovnách a dopravuje se hotová směs s přesnými návrhovými parametry.²⁷

²⁶ TIA, Mang v CHEN, W.F. and J.Y. RICHARD LIEW. *The Civil Engineering Handbook*. 2nd ed. Hoboken: CRC Press, 2002. ISBN 9781420041217, s. 45-18.

²⁷ HÝZL, Petr. *BM 52 Praktické aplikace pozemních komunikací*. Brno: 2006.

2.1.2 Asfaltový koberec – makadam

Asfaltové koberce představují asfaltové směsi s přetržitou čarou zrnitosti založené na kombinaci hrubých frakcí tvořících kostru plniva a jemných výplňových podílů. Hanzík a kol.²⁸ rozeznávají následující typy asfaltových koberců:

- asfaltové koberce tenké – určené ke stavbě nebo obnově obrusných vrstev vozovek v tloušťce 20-30 mm s maximální velikostí směsi kameniva 8-11 mm, k výrobě se používají převážně modifikované asfalty,
- asfaltové koberce mastixové – vyráběné obvykle pouze z drceného (ostrohranného) kameniva s velikostí zrna do 11 mm nebo 8 mm. Jedná se o asfaltové koberce převážně z hrubé frakce tvořící skeletové plnivo uplatňované pro obrusné vrstvy vozovek v tloušťkách 25-40 mm,
- asfaltové koberce drenážní – vyráběné výhradně z drceného kameniva s maximální velikostí zrna do 11 mm, 8 mm nebo 16 mm zpravidla s modifikovaným asfaltem jako plnivem. Drenážní koberce se uplatňují na obrusné vrstvy vozovek v tloušťce 25-60 mm. „*Díky své vysoké mezerovitosti (cca. 16 až 30 % objemu) mají výborné protihlukové vlastnosti, vesměs dobré protismykové vlastnosti a dobře odvádějí srážkovou vodu z povrchu vozovky*“²⁹. V klimatických podmínkách České republiky se tento typ užívá pouze zřídka.

2.1.3 Lité asfalty

Lité asfalty představují skupinu kompozitních materiálů s výrazným podílem asfaltové matrice. Kamenivo v tomto typu asfaltových směsí netvoří skelet, ale pouze vylepšující příměs. K vytvoření směsi se užívá tvrdších asfaltů ztužena vápencovou moučkou. Lité asfaltové směsi obsahují 7,5-9,5 % pojiva a uplatňují se pro tvorbu vrstvy silnic, chodníků, dopravních a skladovacích ploch, ale především pro ochranné vrstvy izolací mostních objektů.³⁰

²⁸ HANZÍK, Václav, Pavel KLAPKA, Petr MONDSCHHEIN, František LUXEMBURK, Martin OTTA a Daniel SOVA. *Pokládka hutněných asfaltových směsí: revidované a rozšířené vydání s počítačovým programem*. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic Praha, 2015. ISBN 978-80-903925-6-4, s. 24.

²⁹ HANZÍK, Václav, Pavel KLAPKA, Petr MONDSCHHEIN, František LUXEMBURK, Martin OTTA a Daniel SOVA. *Pokládka hutněných asfaltových směsí: revidované a rozšířené vydání s počítačovým programem*. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic Praha, 2015. ISBN 978-80-903925-6-4, s. 24.

³⁰ HÝZL, Petr. *BM 52 Praktické aplikace pozemních komunikací*. Brno: 2006.

2.2 Navrhování asfaltových směsí

Optimální složení asfaltové směsi je dáno především jejím předpokládaným uplatněním.³¹ Uvádí šest základních typů návrhových metodik zahrnujících:

- složení receptury,
- empirický způsob návrhu,
- analytický způsob návrhu,
- volumetrický způsob návrhu,
- návrh vztažený k funkčnímu chování,
- návrh založený na funkčním chování.

2.2.1 Metodika složení receptury

Tato návrhová metodika je založená na využívání standardních směsí známého složení, u kterých je známá odolnost vůči kombinaci klimatických podmínek a dynamickému zatížení. Klasické receptury jsou definovány na základě základních parametrů jednotlivých komponentů, tedy zrnitosti kameniva, gradace (tvrdosti) asfaltového pojiva, tloušťky pokládané vrstvy a charakteristik spojených se zpracováním na obalovně, během pokládky, a také hutnění. Obvykle se používají standardizované receptury, jejichž složení se již dále neupravuje.³²

2.2.2 Metoda empirického návrhu

Empirický způsob návrhu asfaltových směsí vychází z nutnosti vyrovnat se se specifickou visko-elastickou povahou asfaltového pojiva a využitím jejich vlastností k dosažení optimálního charakteru výsledného produktu. Tato metoda je založená na „volbě obsahu asfaltového pojiva s optimalizací několik proměnných parametrů sledovaných v rámci dovoleného rozpětí mezních hodnot, které jsou nastaveny pro tyto parametry na základě předchozích zkušeností“³³. Nastavená rozmezí proměnných odpovídají charakteristikám klimatických podmínek a namáhání vozovky. Návrhové vlastnosti takto vytvořených receptur asfaltových směsí jsou stanoveny laboratorně na

³¹ VARAUS, Michal. *Funkční způsob navrhování asfaltových směsí podle evropských norem: Functional design of asphalt mixtures according to the European standards : teze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3950-4, s. 7-8.

³² tamtéž, s. 7.

³³ VARAUS, Michal. *Funkční způsob navrhování asfaltových směsí podle evropských norem: Functional design of asphalt mixtures according to the European standards : teze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3950-4, s. 7., s. 7.

zkušebních tělesech vyrobených technologickým způsobem zcela neodpovídajícím skutečné pokládce směsi, nejsou tedy dostatečně vypovídající.³⁴

2.2.3 Analytická návrhová metoda

Analytická návrhová metoda je založená na výpočtu složek asfaltové směsi v objemových parametrech na základě křivky zrnitosti kameniva, které udává optimální podíl asfaltového pojiva a konečnou mezerovitost skeletu. Metoda je výhradně výpočtová a má obvykle podobu iteračního programu, její výstupy se však doporučuje laboratorně verifikovat. Zkoušky se provádí jak s ohledem na zhutnitelnost, tak na odolnost vůči mechanickému porušení povrchových vrstev.³⁵

2.2.4 Volumetrická návrhová metoda

Tato metoda je založená na volbě obsahu pojiva a křivky zrnitosti kameniva „na základě analýzy mezerovitosti, mezerovitosti směsi kameniva a obsahu asfaltového pojiva“³⁶. Do této kategorie návrhových metod je možné zařadit více specifických postupů. Návrh představuje iterativní proces vycházející z laboratorního posouzení směsi hutněné postupem simulujícím reálné podmínky v místě pokládky.³⁷

2.2.5 Metody návrhu vztažené k funkčnímu chování

Metody navrhování asfaltových směsí vztažené na jejich funkční chování vychází z laboratorního stanovení funkčních vlastností zkušebních vzorků s ohledem na předpokládanou aplikaci směsi. Obvykle se provádí soubor simulačních nebo funkčních testů (případně jejich kombinace) změřených na vyhodnocení vybraných charakteristik klíčových pro dané uplatnění směsi, na základě jejichž výsledků je pak optimalizován složení i způsob zpracování. Obvykle se stanoví jedna pevná vlastnost a zkoušky jsou provedeny pro sérii směsí s proměnlivým parametrem (např. křivkou zrnitosti).³⁸

³⁴ tamtéž, s. 7.

³⁵ tamtéž, s. 7-8.

³⁶ tamtéž, s. 8.

³⁷ tamtéž, s. 8.

³⁸ VARAUS, Michal. *Funkční způsob navrhování asfaltových směsí podle evropských norem: Functional design of asphalt mixtures according to the European standards : teze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3950-4, s. 8.

2.2.6 Metody návrhu založené na funkčním chování asfaltové směsi

Metody zahrnuté do skupiny založené na funkčním chování asfaltové směsi vychází z předchozích zmíněných metod. Kromě predikce vlastností navrženého surovinového složení kompozitu a způsobu jeho zpracování se však zaměřují na vyjádření sekundární vlastností při užívání a závislosti na obvyklých reálných podmínkách aplikace. V návaznosti na přípravu zkušebních těles je v rámci těchto metodik provedeno také zkoušení odolnosti různým specifickým vlivům, dle něž lze usuzovat na celkovou životnost asfaltové směsi v běžném užívání a následně vlastnosti a podíl jednotlivých složek s cílem dosáhnout ideálního chování pod zatížením. Mezi funkční zkoušky patří zejména posouzení únavových charakteristik a predikce vzniku únavových trhlin, vznik trvalých deformací (zejména nerovností povrchových vrstev, a také mrazuvzdornost a odolnost působení chemickým rozmrazovacími prostředky.³⁹

2.3 Vlastnosti a zkoušení asfaltových směsí

Při zabudování do vozovky jsou veškeré materiály podílející se na její skladbě vystaveny kombinaci působení různých zátěžových faktorů, zejména povětrnosti a dynamickému zatížení. Kromě vnějších faktorů ovlivňuje životnost vozovky také vnitřní napětí použitých materiálů únavou. Vnitřní stavy napjatosti ve vozovce se s postupem času a působením vnějších faktorů mění a v laboratorních podmínkách jsou jen těžce reprodukovatelné.

Při návrhu asfaltových směsí se primárně vychází z vlastností hlavních složek, tedy asfaltového pojiva (jehož charakteristikám se podrobněji věnovala kap. 1.3) a kameniva. Kamenivo tvoří u většiny asfaltových směsí podstatný podíl objemu, proto je před vlastním návrhem a testováním chování směsi v simulovaném prostředí žádoucí znát jeho vlastnosti. Charakteristiky kameniva s ohledem na aplikaci do asfaltových směsí zahrnují především jeho mechanické vlastnosti, morfologii a křivku zrnitosti.

2.3.1 Vlastnosti kameniva užívaného v asfaltových směsích

Pevnostní charakteristiky kameniva jsou, obdobně jako pevnostní charakteristiky asfaltu, posuzovány na základě sekundárních vlastností zahrnujících pevnost (zrna v tahu

³⁹ tamtéž, s. 8-9.

nebo tlaku), jeho tvrdost, houževnatost, odolnost vůči povětrnosti, obrusnost a odolnost vůči opotřebení.⁴⁰

Základní charakteristikou kameniva je jeho zrnitost, která určuje velikost a distribuci jednotlivých zrn a souhrnně se promítá do křivky zrnitosti. Tradiční zkouškou stanovující zrnitost kameniva je síťový rozbor, u kterého velikost sít definuje horní a dolní velikostní omezení jednotlivých frakcí. Kromě křivky zrnitosti je pro tvorbu asfaltových směsí důležitý také tvarový index kameniva (udávající poměr mezi největším a nejmenším rozměrem zrna) a jeho charakter související s původem (ostrohranné – drcené, nebo hladké – těžené) ovlivňující zejména schopnosti kameniva tvořit skelet asfaltové směsi a přilnavost k pojivu).⁴¹

Vedle zrnitosti je další významnou charakteristikou kameniva jeho objemová hmotnost, od níž se odvíjí další fyzikální veličiny. Dle objemové hmotnosti (stanovená obvykle zkouškou zhutnění ve válci) se rozlišují tři druhy kameniva – těžké (OH více jak 3000 kg.m^{-3} , hutné (OH $2000\text{-}3000 \text{ kg.m}^{-3}$) a pórovitě (OH menší než 2000 kg.m^{-3} a sypné hmotnosti menší než 1200 kg.m^{-3}). Objemová hmotnost kameniva obvykle souvisí s jeho pórovitostí, nasákavostí a implicitně i mrazuvzdorností. Pro tvorbu klasických a asfaltových směsí se užívá zpravidla kameniva hutného.⁴²

2.3.2 Zkoušení asfaltových směsí

Vlastnosti asfaltových směsí jsou vzhledem ke kompozitní povaze a reálné aplikaci výrazně vzájemně závislé a nelze je jednoznačně definovat. Obvykle se tedy řadí do jednotlivých charakteristických skupin navázaných na určitý typ chování nebo odolnosti. Mezi základní vlastnosti asfaltů patří:⁴³

- základní fyzikální vlastnosti – měrná hmotnost, objemová hmotnost, objemová hmotnost zhutněné asfaltové směsi a další,
- odvozené fyzikální vlastnosti – nasákavost, bobtnání, mezerovitost, stupeň vyplnění směsi kameniva asfaltem a další,

⁴⁰ WANG, Linbing. *Mechanics of asphalt: microstructure and micromechanics*. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-149854-8.

⁴¹ SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1, s. 223.

⁴² tamtéž, s. 234-242.

⁴³ GRÜNNER, Karol. *Asfalt v cestnom staviteľstve: história a súčasnosť*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia monografií. ISBN 80-227-2483-1, s. 99.

- základní mechanické vlastnosti – pevnost v tahu, tlaku, v tahu za ohybu, v příčném tahu, ve smyku, stabilita, přetvoření, míra tuhosti, modul pružnosti a další,
- odvozené mechanické vlastnosti – teplotní citlivost, odolnost proti mrazu a další,
- přetvárné vlastnosti – statické dotvarování, deformace vlivem dynamického zatížení, únavové charakteristiky,
- objemové vlastnosti – spojené se sekundárními vlastnostmi, jejich hodnotu lze nejlépe vyjádřit objemem, např. zrnitost, obsah pojiva, mezerovitost a další,
- provozní vlastnosti – charakterizující asfaltovou směs s ohledem na její aplikovatelnost ve vybrané aplikaci. Provozními vlastnostmi jsou zejména charakteristiky vztahující se k odolnosti, jako jsou odolnost proti deformaci, únavě, působení vlhkosti nebo teploty.

Vedle zkoušek odolnosti pevnostního a povětrnostního charakteru se asfaltové směsi hodnotí také z hlediska odolnosti deformačním faktorům. V tomto ohledu jsou nejčastěji prováděny zkoušky:⁴⁴

- dotvarování asfaltových směsí – v rámci zkoušky jednoosové, tříosové, dotvarování v příčném tahu, na dutém válečku, v prostém smyku nebo v tahu za ohybu. Zkoušky se vzájemně liší především směrem působení deformační zátěže, principiálně se zakládají na zatěžování asfaltové směsi a odečítání její deformace v závislosti na směru působení zatížení,
- odolnost proti trvalým deformacím – se stanovuje různými metodickými postupy na vývrtech nebo laboratorních tělesech válcovitého tvaru. Zkouška spočívá obvykle v opakovaném zatěžování stejným zátěžovým cyklem a srovnání změny deformací s ohledem na postupné snižování odolnosti,
- únava asfaltových směsí – se projevuje postupným poklesem modulu pružnosti směsi. Zkouška se provádí prostřednictvím různých způsobů zatěžování jako závislost únavové životnosti na napětí ohybové, jednoosé, tříosé nebo zatížení v příčném tahu, přičemž je sledován pokles tvaru trapezoidního tělesa v závislosti na počtu cyklů opakování zkoušky zatěžování. Porušení je pak

⁴⁴ GRÜNNER, Karol. *Asfalt v cestnom staviteľstve: história a súčasnosť*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia monografií. ISBN 80-227-2483-1, s. 104-108.

definováno jako počet cyklů zatěžování do dosažení definovaného deformačního stavu (při přechodu tvaru funkce závislosti z přímého tvaru na exponenciální – předpokládaný vznik trhliny; při dosažení určité míry deformace definované pro dané napětí a teplotu, při úplném porušení).

3 Perpetual pavement systémy

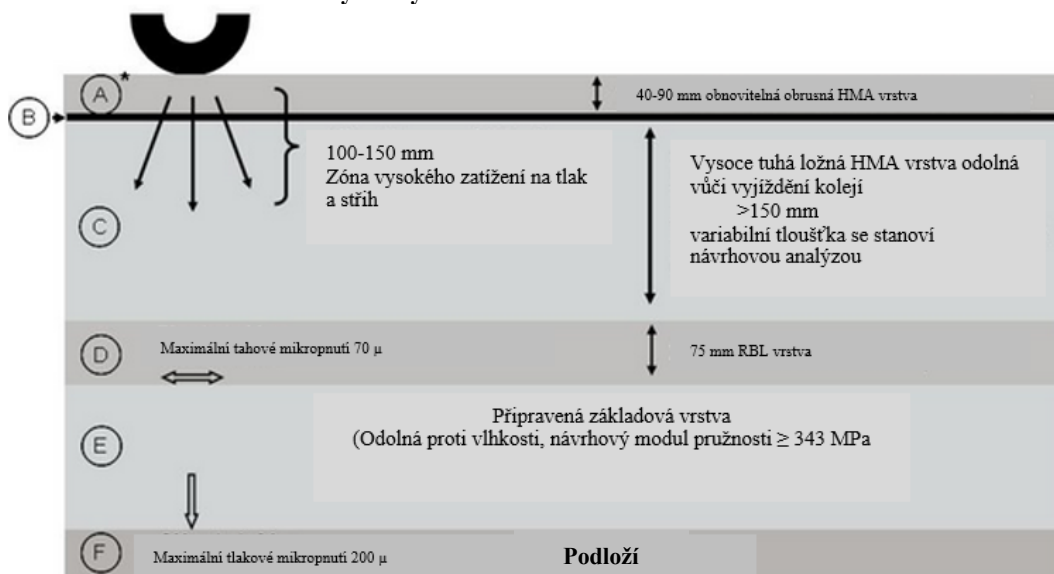
Perpetual pavement (PP) systémy jsou systémy s dlouhodobou životností navrhovány pro minimální životnost 50 let bez nutnosti zásadních sanací nebo rekonstrukcí. Tyto systémy jsou obvykle pravidelně udržovány pouze v horní vrstvě vozovky v návaznosti na její porušení nebo provozní opotřebení. Koncept PP systémů je založen na vytvoření velmi odolné svrchní asfaltové vrstvy vozovky vhodnou skladbou a výběrem materiálů s požadovanými vlastnostmi. Vzhledem k výrobním nákladům se PP systémy zpravidla uplatňují v lokalitách s vysokým dynamickým zatížením, jako jsou dálnice nebo povrchy letištních drah. Jejich aplikace je však výhodná také u méně namáhaných vozovek, u nichž dojde k redukci nákladů na sanace a rekonstrukce v průběhu trvání jejich životnosti.⁴⁵

3.1 Skladba systému Perpetual pavement

Hlavním předpokladem dlouhé životnosti PP systémů je vhodně zvolená tloušťka vrstvy horké asfaltové směsi položené na pevné základové vrstvě, která omezí napětí vznikající ve spodních vrstvách vozovky obvykle zapříčiňující nutnost provedení rekonstrukce celé vozovky. Základní skladba asfaltového PP systému je uvedena na následujícím obrázku (Obrázek 1).

⁴⁵ Perpetual pavement: A Synthesis. In: *The University of Memphis* [online]. Lanham: Asphalt Pavement Alliance, 2002 [cit. 2016-06-25].

Obrázek 1 Základní skladba vozovky PP systému⁴⁶



Perpetual pavement systémy jsou navrhovány na základě výpočtu předpokládaného zatížení vozovky. Skladba vozovky bývá obvykle tvořena následujícími vrstvami s variabilní návrhovou tloušťkou (dle předchozího obrázku – Obrázek 1):⁴⁷

- A – obnovitelný povrch (obrusná vrstva) – obnovuje se dle potřeby v rozmezí periody 8-14 let. Pokládá se asfaltový mastixový koberec (SMA) s nízkou propustností vody, v lokalitách s vysokou dopravní zátěží a průměrnými ročními srážkami vyššími než 635 mm se obrusná vrstva opatřuje perfluorovaným povlakováním. Jedná se o metodu, která je využívána převážně v zahraničí,
- B – izolační vrstva – je doporučována zejména v lokalitách s vysokým dlouhodobým dopravním zatížením a proměnlivou povětrností,
- C – vrstva odolná vůči vyježděným kolejm – pokládá se v několika vrstvách, minimální odolnost svrchní asfaltové vrstvy musí dosahovat výkonnostní stupeň (US klasifikace) PG 70-22 (nejvyšší a nejnižší teplota odolnosti v °C), nižší vrstvy mohou dosahovat PG 64-22. Je požadováno, aby bylo zajištěno dokonalé propojení vrstev vhodným spojovacím postříkem,
- D – RBL – rich bottom layer (bohatá spodní vrstva) – primárním účelem provedení této vrstvy je zajištění odolnosti vozovky vůči únavě. Velký

⁴⁶ LENZ, Russel W. Pavement Design Guide. In: *Onlinemanuals.txdot.gov* [online]. 2011 [cit. 2016-07-10].

⁴⁷ Generalized Perpetual Pavement Design Construction Considerations. In: *Ftp.dot.state.tx.us* [online]. 2011 [cit. 2016-07-10].

význam má u vozovek s celkovou tloušťkou vrstev menší než 300 mm. Povrch vrstvy musí být opatřen spojovacím postříkem zajišťující dokonalé přilnutí přiléhající vrstvy zajišťující odolnost vůči vyjetým kolejím. Zároveň musí být RBL vrstva odolná vůči vlhkosti vztlínající z podloží,

E – podkladní vrstva – je klíčovou vrstvou zajišťující stabilitu celé konstrukce vozovky. Materiály užívané pro základovou vrstvu musí vyhovět nárokům laboratorního testování odolnosti vůči vlhkosti a případně být vylepšeny stabilizační přísadou. Nejčastěji jsou využívány následující materiály:⁴⁸

- nestmelené podkladní vrstvy
- stmelené podkladní vrstvy
- prolévané podkladní vrstvy

F – podloží – musí být podrobena geotechnickému průzkumu stanovujícímu obsah asphaltů a síranů k provedení případné stabilizace injektáží.

3.2 Výhody a nevýhody „Perpetual pavement systému“

Hlavní výhodou Perpetual pavement systémů je jejich životnost. Návrh a provedení jednotlivých vrstev musí tedy vycházet z výpočtu, který zajistí dostatečnou odolnost všech vrstev vůči specifickým vlivům. Dlouhá životnost PP systému je zajištěna relativně nízkou tloušťkou svrchní obrusné vrstvy vozovky. Tento typ skladby umožňuje maximálně snížit únavové zatížení spodních vrstev vozovky.⁴⁹

Dlouhá životnost PP systému se promítá do další významné výhody, kterou jsou výrazně nízké náklady na rekonstrukci vznikající v provozu. Vozovka obvykle vyžaduje pouze pravidelnou údržbu, sanaci nebo rekonstrukci svrchní obrusné vrstvy, a to ve velmi dlouhém časovém rozpětí. Rekonstrukce spodních vrstev vozovky vyžadují opravy zpravidla pouze minimálně. Výhodou je v tomto směru také způsob pokládky, který zajišťuje kratší dodací lhůty a eliminaci víceprací.

Hlavní nevýhodou PP systému jsou jeho vstupní náklady. Jak pokládka a provedení, tak samotné vysoce kvalitní použité materiály zvyšují pořizovací náklady výstavby. Prostřednictvím dlouhé životnosti a minimálních nákladů na údržbu a opravy spodních

⁴⁸ tamtéž.

⁴⁹ Newcomb, Buncher a Huddleston v *Transportation Research Circular: Perpetual Bituminous Pavements*. 2001 (503). ISSN 0097-8515.

pevných vrstev je však při správném provedení pokládky zajištěna rychlá návratnost investic.

3.3 Směsi RBL (Rich bottom layer)

Rich bottom layer je jednou z důležitých vrstev Perpetual pavement systémů, kterou se dosahuje vysoké odolnosti vůči únavě. Jedná se o asfaltové směsi bohaté na pojivo s vyšším modulem pružnosti, které obsahují asi o 0,5 % více pojiva než běžné směsi používané do podkladových a ložních vrstev.⁵⁰ V následujících podkapitolách je přiblížena problematika asfaltových směsí pro RBL vrstvy a jejich aspekty.

Vrstva RBL slouží k přenášení a omezování projevů únavy materiálů svrchních i spodních vrstev vozovky. Zvýšený obsah asfaltu, a tedy větší tloušťka vrstvy pojiva kameniva umožňuje snížit tahové napětí na styku zrn. Ohybové napětí, které je koncentrováno v pojivu, je vlivem většího obalení zrn kameniva přenášeno pružnější složkou směsi.⁵¹ Podíl pojiva v RBL směsi je v porovnání s běžnými asfaltovými směsmi vyšší o 0,6-0,8 %.

3.4 Funkční zkoušky asfaltových směsí

Funkční zkoušení RBL směsí vychází z metodik pro obecné zkoušky asfaltových směsí a zaměřuje se na stanovení specifických návrhových vlastností nezbytných pro posouzení vhodnosti dané směsi k použití ve skladbě Perpetual pavement systému. Zkoušky zahrnuté do této skupiny simulují jak proces výroby, dopravy, pokládky a hutnění i chování směsi po zabudování do vozovky při dopravním i povětrnostním zatížení. Jedná se zejména o následující zkoušky:⁵²

1. **Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových směsí** (ČSN EN 12697-46) – zkušební tělesa jsou vystavena cyklickému zmrazování a rozmrazování, přičemž je stanovena deformace těles a kritická teplota vzniku trhliny.
2. **Modul tuhosti** (ČSN EN 12697-26) – využívající opakované dynamické zatěžování. Využívají se následující metodiky:⁵³

⁵⁰ MONDSHEIN, Petr, Jan VALENTIN, Martin KÜHNEL a Petr HÝZL. ÚNAVOVÉ CHARAKTERISTIKY ASFALTOVÝCH SMĚSÍ TYPU VMT A RBL. In: *Sborník technických listů CESTI 2015*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015, s. 8-9.

⁵¹ MANOHARAN, Selvendran. *Development of Hot Mix Asphalt Mixtures for Truckee Meadows Area*. Reno, 2006, s. 44.

⁵² HÝZL, Petr. Funkční zkoušky asfaltových směsí. *Stavebnictví*. 2007(6-7). ISSN 1802-2030.

⁵³ tamtéž.

- 2 bodové zkoušky na komolém klínu,
- 3 bodové zkoušky na trámečcích (v zatěžovacím schématu prostého nosníku),
- 4 bodové zkoušky na trámečcích (v zatěžovacím schématu prostého nosníku),
- zkoušky v příčném tahu na zkušebních tělesech tvaru válečků.

Modul tuhosti se pak stanoví jako závislost síly, deformace a rozměrů zkušebního tělesa, přičemž je zohledňováno fázové zpoždění.

3. **Odolnost proti únavě** (ČSN EN 12697-24) – definují postupně vznikající deformace při opakovaném zatěžování. Výstupem zkoušky je tzv. Wöhlerův diagram, tedy záznam funkční závislosti deformace zkušebního tělesa na počtu zatěžovacích cyklů. Z diagramu (tvaru křivky) lze dále usuzovat na chování směsi při vysokém počtu cyklů (až v řádu milionů). Zatěžování se provádí prostřednictvím:⁵⁴

- 2 bodové zkoušky na komolém klínu,
- 4 bodové zkoušky na trámečcích (v zatěžovacím schématu prostého nosníku).

4. **Stanovení odolnosti proti účinkům vody** (ČSN EN 12697-12) – porovnání pevnosti v tahu referenčních (suchých) a testovaných (mokrých) zkušebních těles (pásů) po vystavení vodnímu uložení při 40°C. Výstupem je bezrozměrné číslo – poměr příčné pevnosti v tahu suchých a mokrých těles.

5. **Stanovení náchylnosti asfaltové směsi k segregaci** (ČSN EN 12697-15) – modelující proces manipulace s nezhutněnou asfaltovou směsí v průběhu sypání na korbu, dopravy a průchodem finišerem. Působení vibrací při těchto činnostech zapříčiňuje dezintegraci asfaltové směsi a následnou tvorbu shluků kameniva při pokládce. Zkouška je prováděna v rozehřáté izolované kuželovité násypce, z níž posunutím šoupátka nasypaný objem horké asfaltové směsi propadne na podložku opatřenou otvorem pro propad jemných podílů a posuvným otvorem pro propad podílů střední velikosti. Na podložce zůstanou hrubé podíly. Vyhodnocení zkoušky se provádí stanovením poměru propadlých jemných a hrubých podílů (hodnota segregace pojiva), rozdíl síťových rozborů

⁵⁴ HÝZL, Petr. Funkční zkoušky asfaltových směsí. *Stavebnictví*. 2007(6-7). ISSN 1802-2030.

jemných a hrubých podílů (hodnota segregace kameniva pro určená síta) a rozdíl mastixového podílu jemné a hrubé části (hodnota kvality mísení).

6. **Zhutitelnost asfaltových směsí** (ČSN EN 12697-10) – výška zkušebního tělesa po aplikaci definovaného procesu – počtu rázů Marshallova zhutňovače. Výstupem zkoušky je křivka proložená zaznamenanými hodnotami výšky.
7. **Odolnost proti tvorbě trvalých deformací** (ČSN EN 12697-25) – provádí se cyklickým zatěžováním válcových zkušebních těles v triaxiální komoře. Zkouška je určena spíše pro asfaltové směsi do vyšších vrstev vozovky.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 Cíl a metodika

Zkoušení asfaltových směsí je důležitou součástí navrhování skladby vozovky, jejímž prostřednictvím jsou ověřovány zaručené významné vlastnosti materiálu. Zkoušky jsou obvykle prováděny v laboratorním prostředí v souladu se standardizovanými postupy na zkušebních tělesech speciálně připravených dle požadavků příslušných norem, případně na upravených poškozených částech vozovky. Stanovené vlastnosti pak slouží ke kategorizaci typu asfaltové směsi a verifikaci její použitelnosti pro vybranou aplikaci.

Předmětem praktické části je provedení zkoušek, na jejichž základě byly posouzeny primární vlastnosti tří vybraných asfaltových směsí a poté bylo usuzováno na jejich aplikaci pro RBL vrstvy Perpetual pavement systémů. Zkoušení bylo zaměřeno na tři specifické oblasti vlastností asfaltových směsí – stanovení modulu tuhosti, únavových charakteristik a mezerovitosti související s objemovou hmotností materiálu. Stanovení všech vlastností bylo realizováno v souladu s příslušnými normami a bylo provedeno v laboratorním prostředí dle specifických podmínek požadovaných těmito normami. Na základě vyhodnocení zkoušek bylo následně provedeno srovnání směsí a výběr nejvhodnějšího typu pro provedení RBL vrstvy. Hlavním záměrem praktické části bylo posoudit splnění podmínek požadovaných danými standardy pro zvolený typ asfaltobetonu pro podkladové vrstvy. Rozdíl mezi navrženými typy asfaltobetonů spočíval v typu pojiva, které bylo v jednom případě standardní a ve druhém obsahovalo asfalt modifikovaný pryžovým granulátem.

4.1 Metodika

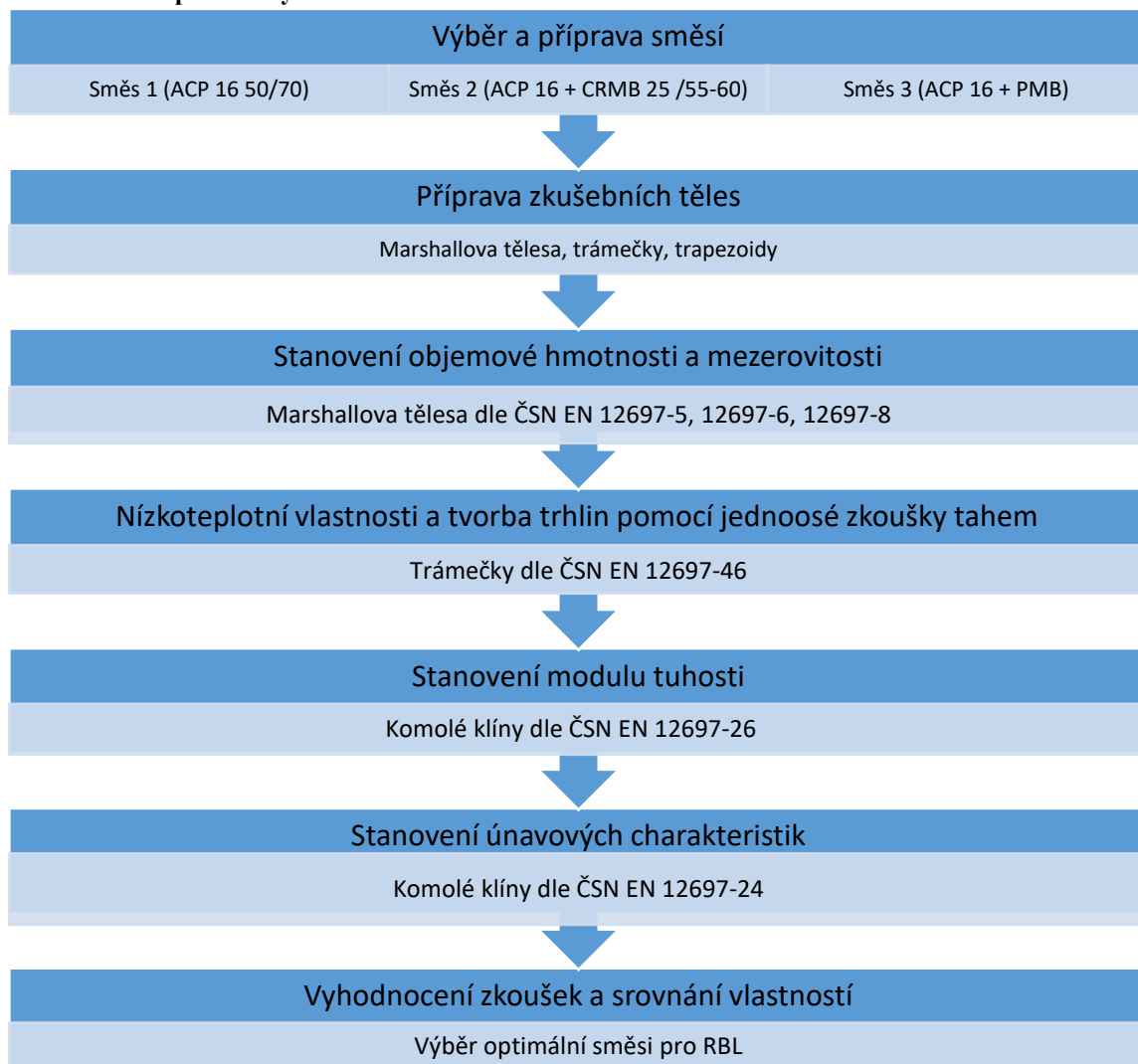
V rámci praktické části byly odzkoušeny tři typy asfaltových směsí (ACP16 + 5070 a ACP16 + CRMB a ACP16 + PMB). Návrh složení směsí byl realizován na základě postupu definovaného normou ČSN EN 13108-1 z charakteristické čáry zrnitosti. Primárně bylo nutné ze zvolených frakcí kameniv stanovit síťový rozbor, na jehož základě byl následně stanoven poměr frakcí pro konečnou granulometrii. Dle postupu uvedeného v dané normě ČSN 736160 bylo následně optimalizováno množství použitého pojiva (asfaltu) vybraných charakteristik, aby bylo dosaženo úplného obalení zrn kameniva.

Ze zhutněných směsí byla následně vyrobena zkušební tělesa pro jednotlivé laboratorní zkoušky. Pro laboratorní zkoušení vybraných směsí byly použity normativní postupy udávané standardy:

- Stanovení objemových hmotností a mezerovitosti dle:
 - ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti
 - ČSN EN 12697-6 + A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa
 - ČSN EN 12697-8 Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí
- Stanovení odolnosti vůči únavě dle ČSN EN 12697-24 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 24: Odolnost vůči únavě
- Stanovení modulu tuhosti dle ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost

Zkušební metody obsažené v uvedených standardech byly prováděny na zkušebních tělesech připravených dle požadavků příslušných norem a při definovaných podmínkách. Postup a metodika provedených zkoušek je uvedena v následujícím schématu (Obrázek 2).

Obrázek 2 Metodika provedených zkoušek



4.2 Charakteristika zkoušených vzorků

V rámci praktického testování asfaltových směsí byly připraveny dvě receptury, jež byly následně zkoušeny dle stanovených postupů. Poměrové složení receptur a popisy zkoušek jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

4.2.1 Dostupné frakce, síťový rozbor, čára zrnitosti

Primárním krokem návrhu směsi bylo stanovení čáry zrnitosti kameniva pro optimalizaci granulometrie plnění. Pro výrobu RLB směsí byla zvolena granulometrie kameniva obsahující frakce 8/16, 8/11, 4/8, 0/4 (drcené i těžené) a filer s horní hranicí rozměru zrna 0,063 mm. Pro další návrh rozložení plniva asfaltového

betonu byl proveden síťový rozbor jednotlivých frakcí, který je uveden v následující Tabulka 1.

Tabulka 1 Síťový rozbor jednotlivých frakcí kameniva

kamenivo – frakce / zůstatek na síť	32	22	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
8/16	100	100	98,2	25,9	2,8	1,3	1,3	1,2	1,1	0,9	0,6	0,1
8/11	100	100	100	94,7	23,8	2,6	2,2	2,0	1,8	1,5	0,8	0,2
4/8	100	100	100	100	94,8	9,7	2,7	2,1	1,9	1,6	1,1	0,1
0/4 (drcené)	100	100	100	100	100	97,5	73,7	51,1	35,9	24,3	15,5	9,2
0/4 (těžené)	100	100	100	100	100	96,6	82,4	67,9	44,5	9,6	2,0	1,3
Filer	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98,2	87,0	71,7

Standardizovaným postupem byla následně stanovena čára zrnitosti kameniva pro oba typy směsí. Konečnou granulometrii kameniva pro jednotlivé směsi uvádí následující Tabulka 2. Jednotlivé frakce použitého kameniva uvádí pak následující Obrázek 3.

Tabulka 2 Granulometrie kameniva pro jednotlivé směsi

Směs	nepřetříděná frakce	filer	0/4 (drcené)	4/8	8/16	kontrolní součet
ACP16 50/70	% zastoupení	1%	41%	16%	42%	100%
	navážka (g)	11,8	483,8	188,8	495,6	1180
ACP16 + CRMB	% zastoupení	2%	38%	26%	35%	100%
	navážka (g)	17,7	448,4	306,8	407,1	1180
ACP16 + PMB	% zastoupení	3%	41%	24%	32%	100%
	navážka (g)	35,4	483,8	283,2	377,6	1180

Obrázek 3 Jednotlivé frakce použitého kameniva z lomu Zárubka



Filer



Frakce 0/4



Frakce 4/8



Frakce 8/16

4.2.2 Vyrobené směsi, poměr složek

Pro provedení zvolených zkoušek posouzení vhodného složení směsi RBL byly připraveny tři typy směsí ACP (tedy asfaltobetonu pro podkladní vrstvy), z nichž byla dále připravena zkušební tělesa pro stanovení jednotlivých parametrů. Na základě navržené granulometrie kameniva byl podle ČSN EN 13108-1 stanoven návrh podílu pojiva směsi pro kompletní obalení zrn ve třech variantách, a to se silničním asfaltem 50/70 a s pojivem CRMB (asfalt modifikovaný pryžovým granulátem) a s pojivem PMB. Následující Tabulka 3 uvádí složení jednotlivých směsí, podíl frakcí a požadovanou teplotu hutnění směsí.

Tabulka 3 Poměr složek navržených směsí

Směs	Frakce	Podíl kameniva (g)	Celková navážka (g)	Podíl asfaltu (g)	Teplota hutnění (°C)
ACP16 s pojivem CRMB	filer	17,7	1180,0	75,3	155
	0/4	448,4			
	4/8	306,8			
	8/16	407,1			
ACP16 50/70	filer	236,0	1392,4	64,7	150
	0/4	531,0			
	4/8	177,0			
	8/16	448,4			
ACP16 s pojivem PMB	filer	35,4	1180,0	66,0	155
	0/4	483,8			
	4/8	283,2			
	8/16	377,6			

Materiálové charakteristiky obou typů pojiva uvádí následující Tabulka 4.

Tabulka 4 Materiálové charakteristiky použitých asfaltových pojiv

Charakteristika	ACP16 + CRMB	ACP16 5070	ACP16 + PMB
Penetrace 25°V (0,1 mm)	31	60	42
Bod měknutí (°C)	68,1	49,8	76,7

4.2.3 Postup výroby zkušebních těles

Pro každou směs byla vyrobena sada vzorků Marshallových těles pro stanovení charakteristik zpracovatelnosti směsi, na nichž byla rovněž volumetricky stanovená objemová hmotnost a mezerovitost doplněná pyknometrickým stanovením objemových charakteristik. Následně byly vyrobeny zkušební vzorky pro zkoušení nízkoteplotních vlastností (trámečky o rozměrech 20×5×5 cm) a trapezoidy pro stanovení modulu tuhosti směsi a odolnosti proti únavě.

Výroba Marshallových těles probíhala kontinuálně hutněním ve standardizovaném prstenci o vnitřním průměru 100 mm a výšce 65 mm. Po zamíchání směsi byly prstence naplněny a zhutněny prostřednictvím speciálního zhutňovače Marshallových těles (Obrázek 4). Po zhutnění byla tělesa odformována a dále zkoušena na objemovou hmotnost.

Obrázek 4 Příprava Marshallových těles: vlevo odformovaná tělesa připravená ze směsi ACP16 50/70, vpravo zhutňovač Marshallových těles.



Obrázek 5 Odformovaná a vytvrzená Marshallova tělesa



Pro stanovení objemové hmotnosti byla kromě Marshallových těles uplatněna také pyknometrická zkouška. Jako médium byl při zkoušce použit trichloretylen dle ČSN EN 12697-5. Přípravu vzorků z CRMB směsi a použitý typ pyknometru zobrazují následující obrázky.



Obrázek 6 Pyknometrická zkouška: vlevo směs CRMB připravená pro vložení do pyknometru, vpravo pyknometry se směsí

Pro stanovení modulu tuhosti a odolnosti proti únavě materiálu byla připravena specifická zkušební tělesa – trapezoidy dle ČSN EN 12697-24 a pro stanovení nízkoteplotních charakteristik trámečky daných dimenzí. Oba typy těles byly nařezány z asfaltobetonových desek připravených na lamelovém zhutňovači (Obrázek 7 a Obrázek 8) pomocí kotoučové pily s diamantovým kotoučem.



Obrázek 7 Výroba asfaltbetonových desek na lamelovém zhutňovači (vlevo) a zhutněná deska (vpravo)



Obrázek 8 Desky pro výrobu trámečků a trapezoidů

Z desek byla následně nařezána zkušební tělesa požadovaného tvaru a rozměrů, tedy trámečky (Obrázek 9) a trapezoidy (Obrázek 10 a Obrázek 11).



Obrázek 9 Trámečky pro zkoušení nízkoteplotních charakteristik



Obrázek 10 Zkušební tělesa pro stanovení modulu tuhosti a únavové odolnosti (trapezoidy)



Obrázek 11 Trapezoid (komolý klín) připravený ke zkoušení únavových charakteristik

Asfaltobetony pro podkladové vrstvy vozovek s charakteristikou RBL jsou navrhovány tak, aby splňovaly požadavky dané normativními předpisy. Pro zkoušení byl vybrán typ asfaltu ACP, tedy podkladní asfaltobeton. Při modifikaci pryžovým granulátem jsou na tento typ asfaltobetonu kladeny specifické požadavky, které jsou podrobně popsány v TP 148.

5 Provedené zkoušky

V rámci posuzování vlastností zvolených směsí asfaltového betonu byla provedena série zkoušek zaměřených na zhodnocení jejich charakteristik s ohledem na zpracovatelnost směsi a použití. Tyto zkoušky zahrnovaly především stanovení objemové hmotnosti, modulu tuhosti a únavových charakteristik. Průběh a vyhodnocení zkoušek uvádí následující podkapitoly.

5.1 Stanovení objemové hmotnosti

Stanovení objemové hmotnosti směsí bylo realizováno třemi způsoby, a to hydrostatickým vážením na základě rozměrů a hmotnosti Marshallových těles a volumetrickým způsobem (pyknometricky). Při stanovení objemové hmotnosti na Marshallových tělesech bylo postupováno podle metodiky uvedení v ČSN EN 12697.

Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením spočívá ve stanovení hmotnosti těles v suchém stavu, po saturaci vodou po dobu přibližně 30 minut do ustálené hmotnosti a po vyjmutí z lázně a povrchovém osušení. Ze stanovených hmotností je následně vypočtena hmotnost nasyceného tělesa dle vztahu:

$$\rho = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \cdot \rho_w,$$

příčemž ρ je objemová hmotnost tělesa v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,

m_1 je hmotnost suchého tělesa v kg,

m_2 je hmotnost nasyceného tělesa v kg,

m_3 je hmotnost nasyceného tělesa po vyjmutí z lázně a otření v kg,

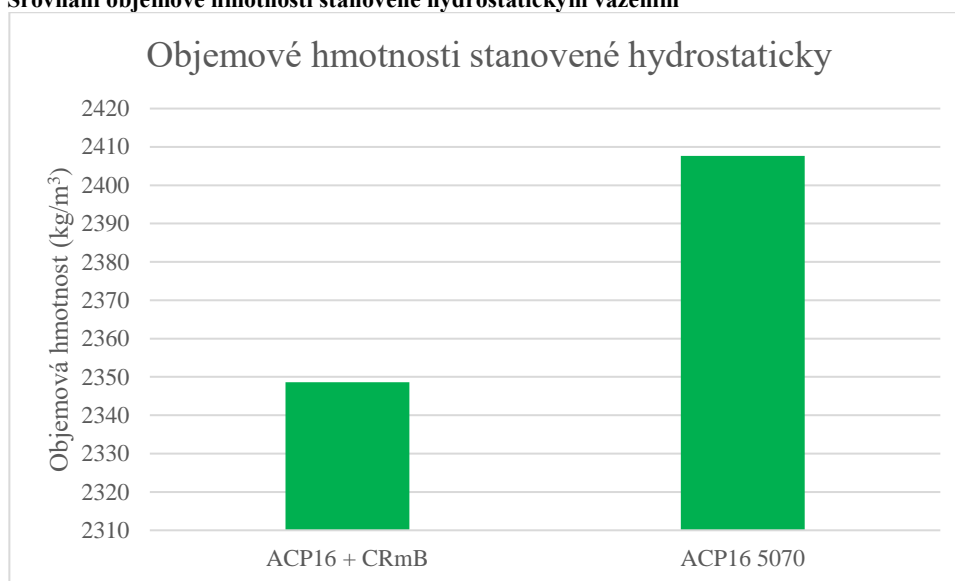
ρ_w je hustota vody v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Objemové hmotnosti hydrostaticky vážených Marshallových těles uvádí následující Tabulka 5, srovnání průměrných hodnot ze tří zkoušených vzorků je zobrazeno na následujícím grafu (Graf 1).

Tabulka 5 Objemová hmotnost stanovená hydrostatickým vážením

Zkušební těleso	Číslo vzorku	Suché (g)	Pod vodou (g)	Vlhké (g)	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Průměr
ACP16 + CRMB	1	1200,8	695,6	1207,7	2341	2349
	2	1245,1	725,2	1254,6	2348	
	3	1250,2	728,8	1258,2	2357	
ACP16 50/70	1	1178,6	691,0	1181,1	2401	2408
	2	1190,4	697,7	1194,1	2394	
	3	1183,3	700,2	1186,6	2429	

Graf 1 Srovnání objemové hmotnosti stanovené hydrostatickým vážením



Z uvedených hodnot je zřejmé, že objemová hmotnost suchých směsí dosáhla vyšších hodnot u směsi bez přísady CRMB, rozdíl v naměřených hodnotách činí přibližně 2,5 %.

Pro stanovení objemové hmotnosti na základě rozměrů a hmotnosti se používá suchých Marshallových těles. Rozměry byly stanoveny průměrem ze tří měření, a to pro průměr válcového tělesa a výšku. Toto měření bylo zaměřeno pouze dodatečně pro informativní účely nikoliv jako srovnání s hydrostatickým vážením. Objemová hmotnost se vypočte dle vztahu:

$$\rho_b = \frac{m_1}{\pi / 4 \cdot d^2 \cdot h},$$

přičemž ρ_b je objemová hmotnost tělesa v kg.m⁻³,

m_1 je hmotnost suchého tělesa v kg,

d je průměr podstavy válcového tělesa v m,

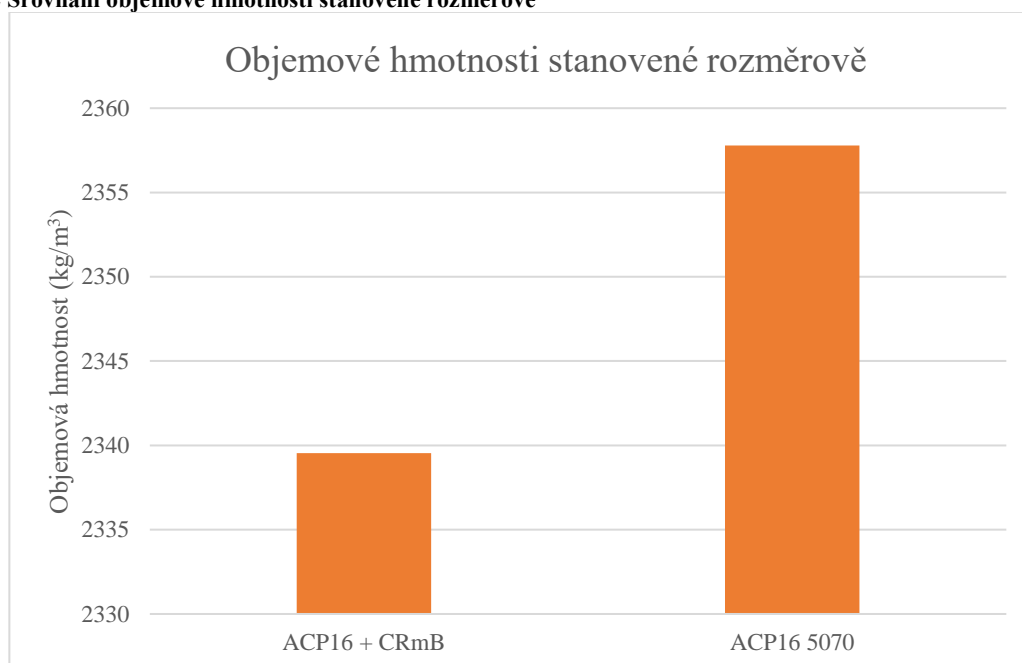
h je výška válcového tělesa v m.

Vyhodnocení stanovení objemové hmotnosti na základě rozměrů Marshallových těles uvádí následující Tabulka 6 a srovnání zobrazuje Graf 2.

Tabulka 6 Objemová hmotnost stanovená rozměrově

Číslo	Zkušební těleso	Suché (g)	Výška tělesa (mm)			Φ	Průměr tělesa (mm)		Φ	Objemová hmotnost (kg/m ³)
ACP16 s pojivem CRMB	1	1200,8	64,7	65,0	64,9	64,9	100,9	102,0	101,5	2340
	2	1245,1	66,0	65,3	66,0	65,8	101,9	101,8	101,9	
	3	1250,2	65,7	65,5	65,7	65,6	100,0	101,0	100,5	
ACP16 50/70	1	1178,6	61,6	61,9	61,6	61,7	101,9	101,6	101,7	2358
	2	1190,4	62,7	62,7	62,5	62,6	101,7	101,6	101,7	
	3	1183,3	61,0	61,1	61,0	61,0	102,0	101,9	101,9	

Graf 2 Srovnání objemové hmotnosti stanovené rozměrově



Při stanovení objemové hmotnosti na základě rozměrů Marshallových těles bylo dosaženo obdobného trendu jako v předchozím případě. Směs s pojivem CRMB (tedy modifikována pryžovým granulátem) dosáhla o méně než 1 % nižší objemové hmotnosti.

Stanovení maximální objemové hmotnosti obou směsí byla volumetrická metoda využívající pyknometrického měření. To spočívá v rozdrcení Marshallova tělesa na drť požadované hrubosti zrn, která je následně vsypána do pyknometru známé hmotnosti. Navážka je rovněž zvážena a doplněna médiem do známého objemu. Stanovení objemové hmotnosti vylučující otevřenou pórovitost materiálu se následně stanoví z vztahu:

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

přičemž ρ_{mw} je objemová hmotnost tělesa v kg.m^{-3} ,

m_1 je hmotnost pyknometru v kg,

m_2 je hmotnost pyknometru se zkušebním vzorkem v kg,

m_3 je hmotnost se zkušebním vzorkem a médiem v kg,

V_p je objem pyknometru po referenční značce nástavce,

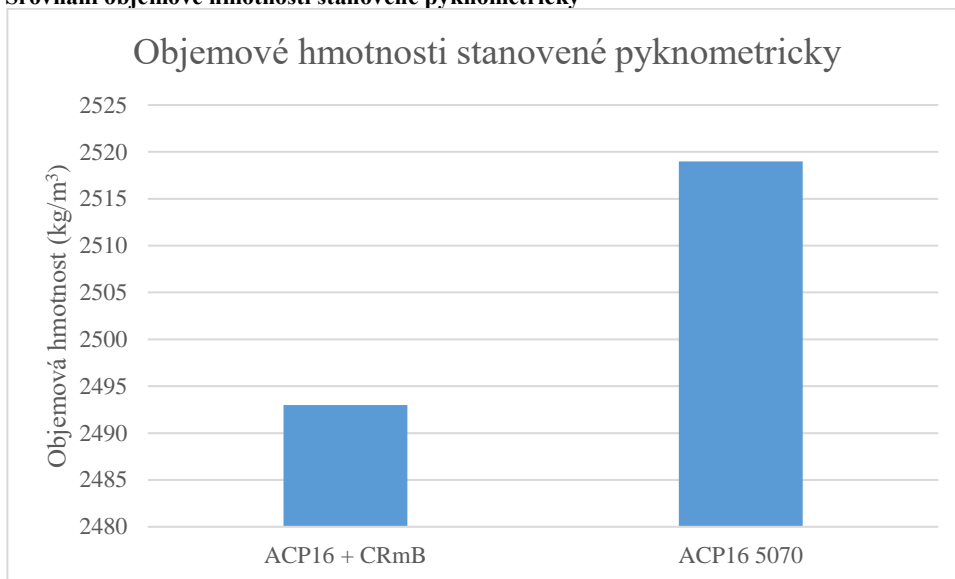
ρ_m je hustota média v kg.m^{-3} .

Vyhodnocení objemové hmotnosti stanovené pyknometricky uvádí následující Tabulka 7 a Graf 3.

Tabulka 7 Objemová hmotnost stanovená pyknometricky

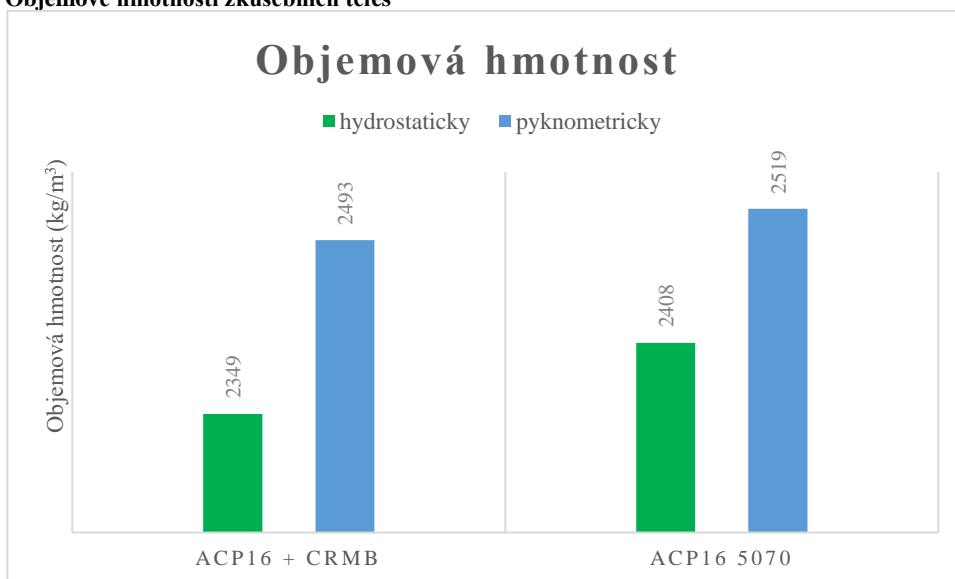
Obsah pojiva (%)	ACP16 + CRMB		ACP16 50/70	
	6,8		5,2	
Označení pyknometru	I	II	III	IV
Pyknometr prázdný m_1 (g)	348,2	364,3	331,0	380,8
Pyknometr + vzorek m_2 (g)	867,1	871,7	937,3	877,4
Pyknometr + vzorek + rozpouštědlo m_3 (g)	1617,3	1596,6	1673,8	1621,7
Objem pyknometru V_p (ml)	657,9	653,9	697,7	657,7
Hustota rozpouštědla ρ_w (kg/m ³)	1614,0	1614,0	1614,0	1614,0
Teplota temperování	25,0	25,0	25,0	25,0
Navážka asfaltové směsi (g)	75,3	75,3	64,7	64,7
Maximální objemová hmotnost ρ_{mw} (lg/m ³)	2500	2486	2512	2526
Průměrná objemová hmotnost	2493		2519	

Graf 3 Srovnání objemové hmotnosti stanovené pyknometricky



Objemová hmotnost stanovená pyknometricky vykázala stejný trend jako hodnoty objemové hmotnosti stanovené hydrostaticky a na základě rozměrů a hmotnosti Marshallových těles. Srovnání všech stanovených objemových hmotností uvádí následující Graf 4.

Graf 4 Objemové hmotnosti zkušebních těles



Nejvyšších hodnot bylo dosaženo dle předpokladu u stanovení provedeného pyknometricky, jelikož eliminuje otevřené póry materiálu. Rozdíly mezi hodnotami stanovenými hydrostatickým vážením a rozměrově se pohybovaly řádově v jednotkách procent i v rámci srovnání obou směsí.

5.2 Stanovení mezerovitosti

Mezerovitost testovaných asfaltobetonů byla stanovena na Marshallových tělesech na základě výpočtu z objemových hmotností stanovených v předchozí podkapitole dle vztahu:

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

přičemž V_m je mezerovitost stanovená výpočtem z objemové hmotnosti v %,

ρ_m je maximální objemová hmotnost (stanovená pyknometricky) v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,

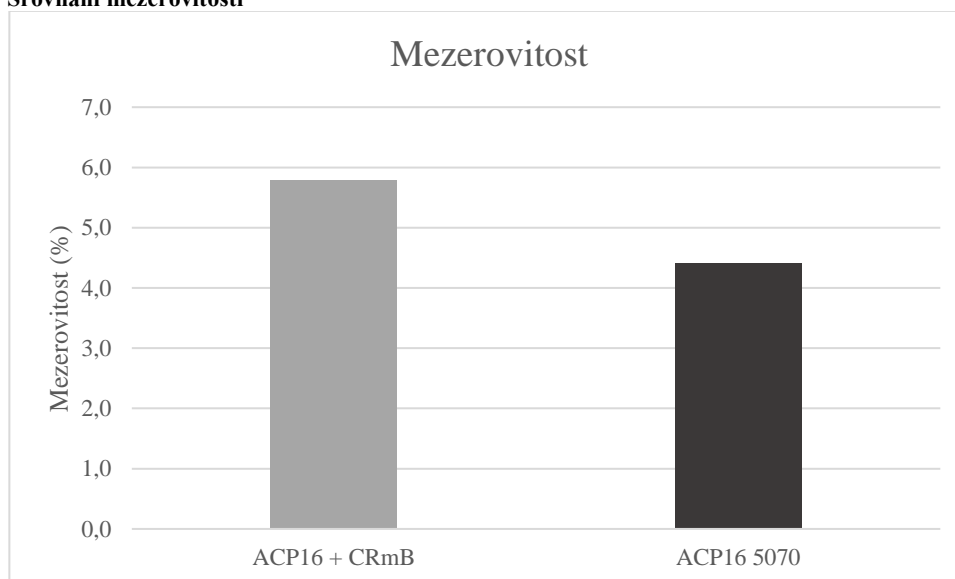
ρ_b je objemová hmotnost tělesa (stanovená hydrostaticky) v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Vyhodnocení mezerovitosti uvádí Tabulka 8 a Graf 5.

Tabulka 8 Stanovení mezerovitosti směsí

Charakteristika	ACP16 + CRMB	ACP16 50/70
Obsah pojiva (%)	6,8	5,3
Max. objemová hm. (kg/m^3)	2493	2519
Objemová hm. (kg/m^3)	2349	2408
Mezerovitost z hmotnosti V_m (%)	5,8	4,4

Graf 5 Srovnání mezerovitosti



Tento aspekt odpovídá rozdílům v objemových hmotnostech, vyšší mezerovitost směsi s aditivem se projevila na nižší objemové hmotnosti této směsi. Dosažené hodnoty poukazují na předpokládané rozdílné vlastnosti v návaznosti na propustnost. Dle ČSN EN 13108 se požadovaná hodnota mezerovitosti asfaltobetonu pohybuje v rozmezí 2-6 %. Oba typy směsí tedy požadavku normy vyhověly.

Dále byla stanovena mezerovitost směsi kameniva dle stejné normy směřující k ověření splnění podmínek při použití asfaltu modifikovaného pryžovým granulátem. Vyhodnocení zkoušky uvádí následující Tabulka 9. V návaznosti na uvedené stanovené hodnoty mezerovitosti směsi kameniva lze konstatovat, že zvolený typ asfaltobetonu s modifikovaným pojivem splnil minimální požadavek mezerovitosti směsi kameniva dán hodnotou 19 %. Mezerovitost směsi kameniva byla stanovena dle vzorce:

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

přičemž VMA je mezerovitost směsi kameniva v %,

V_m je mezerovitost stanovená výpočtem z objemové hmotnosti v %,

B je obsah pojiva ve směsi v %,

ρ_b je maximální objemová hmotnost tělesa (stanovená hydrostaticky) v kg.m^{-3} ,

ρ_B je objemová hmotnost pojiva v kg.m^{-3} .

Tabulka 9 Stanovení mezerovitosti směsi kameniva

Hodnota	ACP 16 + CRMB	ACP 16 50/70
Obsah pojiva (%)	6,8	5,3
Mezerovitost z hmotnosti V_m (%)	5,8	4,4
Objemová hm. (kg/m^3)	2349	2408
Obj. hm. pojiva (kg/m^3)	1040	1040
Obsah pojiva v tělese (%)	6,8	5,3
Mezerovitost směsi kameniva VMA (%)	21,2	16,7

Na základě stanovených hodnot byl rovněž vypočten stupeň vyplnění mezer kameniva pojivem. Výpočtový vztah pro tuto charakteristiku je následující:

$$VFB = \frac{B \cdot \rho_b}{WMA},$$

,přičemž VFB je stupeň vyplnění mezer kameniva pojivem v %,

B je obsah pojiva ve zkušebním tělese v %,

ρ_b je maximální objemová hmotnost tělesa (stanovená hydrostaticky) v kg.m^{-3} ,

ρ_B je objemová hmotnost pojiva v kg.m^{-3} ,

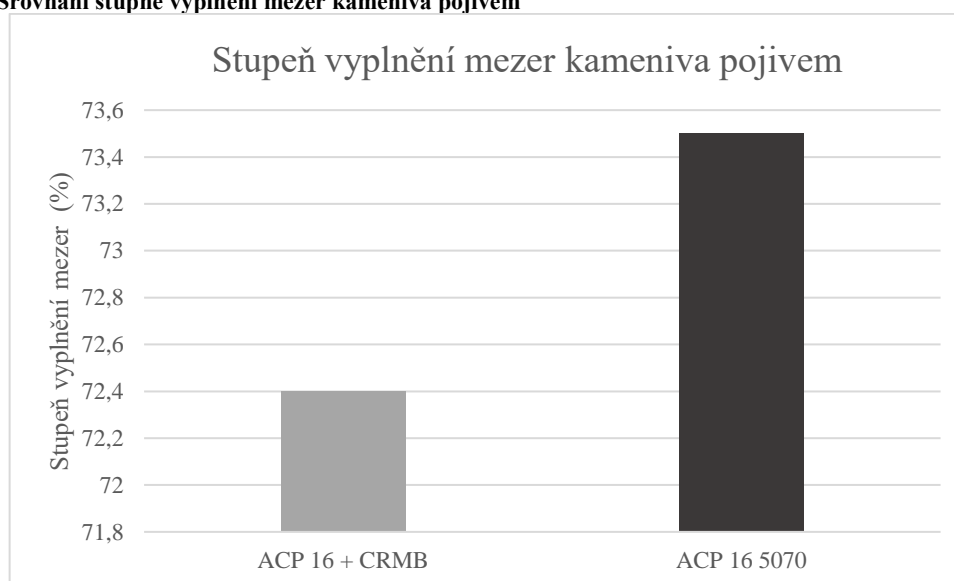
WMA je mezerovitost směsi kameniva v %.

Stanovené hodnoty Stupně vyplnění mezer kameniva pojivem jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 10) a zobrazeny v navazujícím grafu (Graf 6).

Tabulka 10 Stanovení mezerovitosti směsi kameniva

Hodnota	ACP 16 + CRMB	ACP 16 50/70
Mezerovitost směsi kameniva WMA (%)	21,2	16,7
Obsah pojiva ve zkušebním tělese (%)	6,8	5,3
Objemová hm. zk. tělesa (kg/m ³)	2349	2408
Obj. hm. pojiva (kg/m ³)	1040	1040
Stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva VFB (%)	72,4	73,5

Graf 6 Srovnání stupně vyplnění mezer kameniva pojivem



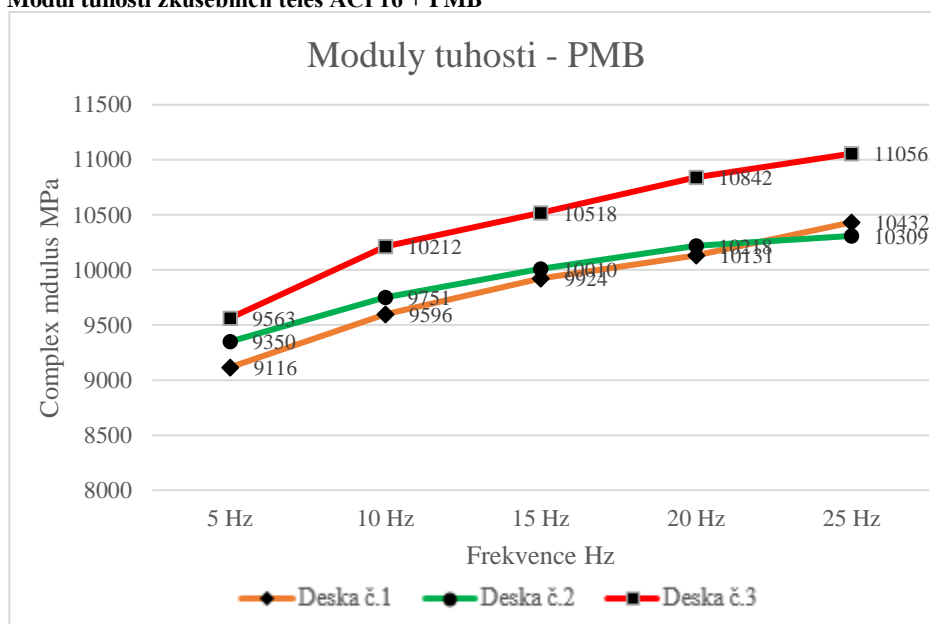
5.3 Stanovení modulu tuhosti

Modul tuhosti byl proveden dle ČSN EN 12697-26. Zkoušky byly prováděny na trapezoidech (komolý klín). Stanovení modulu tuhosti se provádí prostřednictvím zatěžovacího zařízení v lineárně-deformačním režimu, přičemž je odečítána amplituda napětí a poměrného přetvoření, a současně jejich fázový úhel při stanovených frekvencích 5, 10, 15, 20 a 25 Hz odpovídajících různým vibračním dynamického zatížení vozovky. Výsledky stanovených hodnot uvádí Tabulka 11 a grafy (Graf 7, Graf 8, Graf 9 a Graf 10).

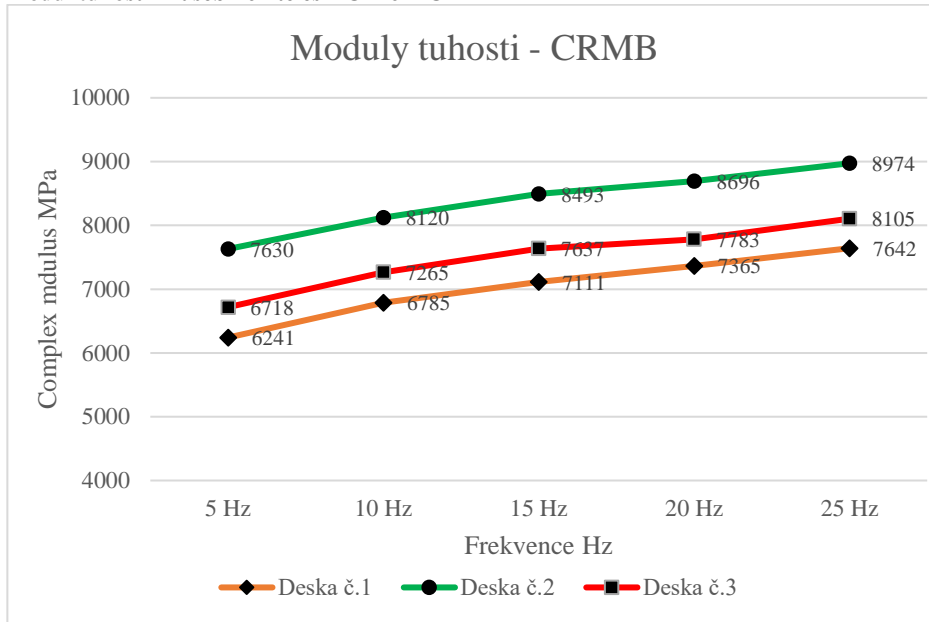
Tabulka 11 Stanovení modulu tuhosti

Směs	Číslo desky	Modul tuhosti (MPa)				
		Teplota °C 25				
		5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
ACP16 + PMB	1	9116	9596	9924	10131	10432
	2	9350	9751	10010	10218	10309
	3	9563	10212	10518	10842	11056
	4	9024	9488	9853	9979	10279
ACP16 + CRMB	1	6241	6785	7111	7365	7642
	2	7630	8120	8493	8696	8974
	3	6718	7265	7637	7783	8105
	4	7528	8147	8560	8817	9118
ACP16 50/70	1	9751	10462	10888	11157	11469
	2	8595	9165	9536	9720	10001
	3	9340	10008	10446	10742	11141
	4	9471	10119	10485	10740	11054

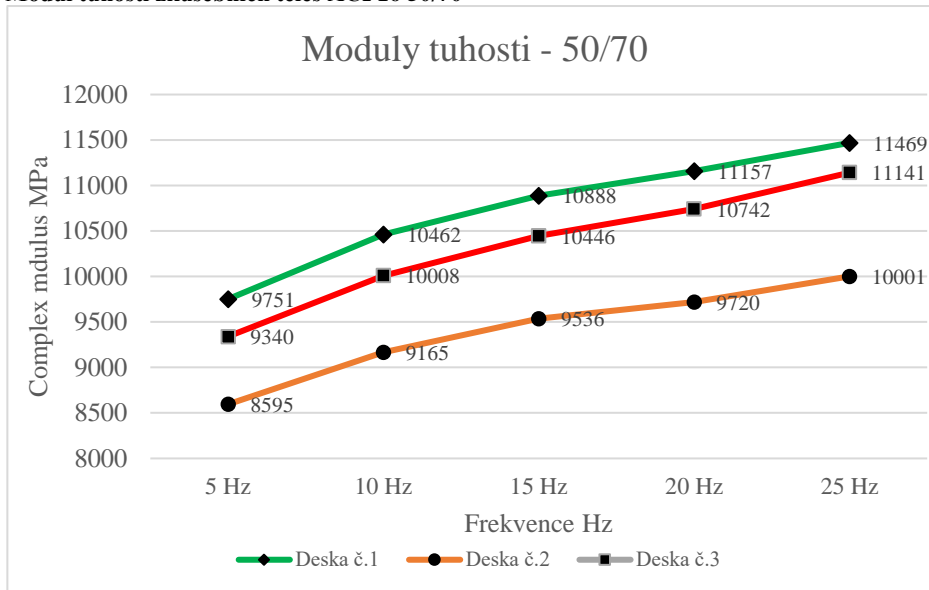
Graf 7 Modul tuhosti zkušebních těles ACP16 + PMB



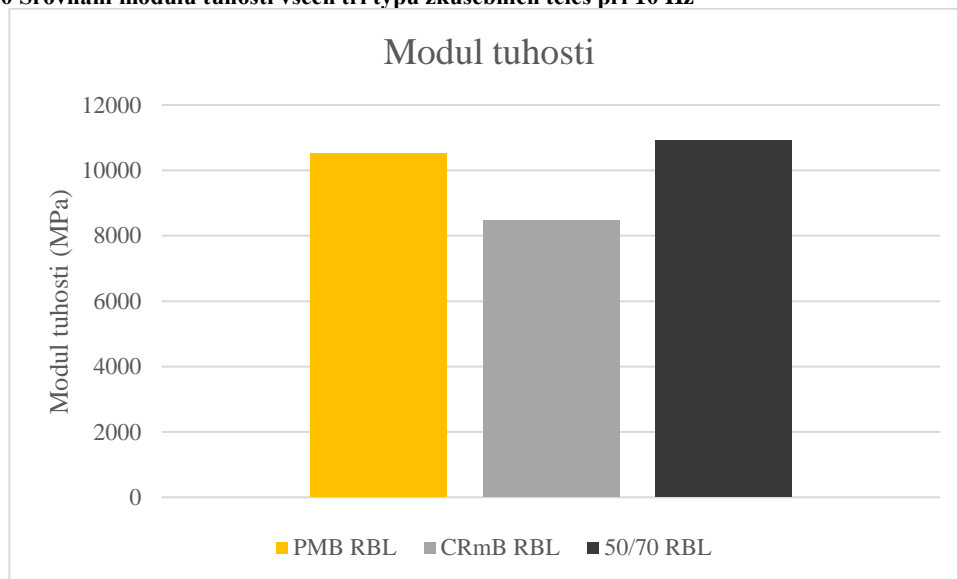
Graf 8 Modul tuhosti zkušebních těles ACP16 + CRMB



Graf 9 Modul tuhosti zkušebních těles ACP16 50/70



Graf 10 Srovnání modulů tuhosti všech tří typů zkušebních těles při 10 Hz



Stanovené moduly tuhosti u všech tří typů zkušebních těles dosáhly obdobných trendů, co se týká průběhu při různých frekvencích. Nejnižších hodnot bylo dosaženo u zkušebních těles s aditivem, modul pružnosti zkušebních těles bez aditiva byl srovnatelný s referenčním vzorkem. Rozdíl hodnot modulů tuhosti zkušebních těles s a bez aditiva činil řádově 20 %.

5.4 Stanovení únavových charakteristik

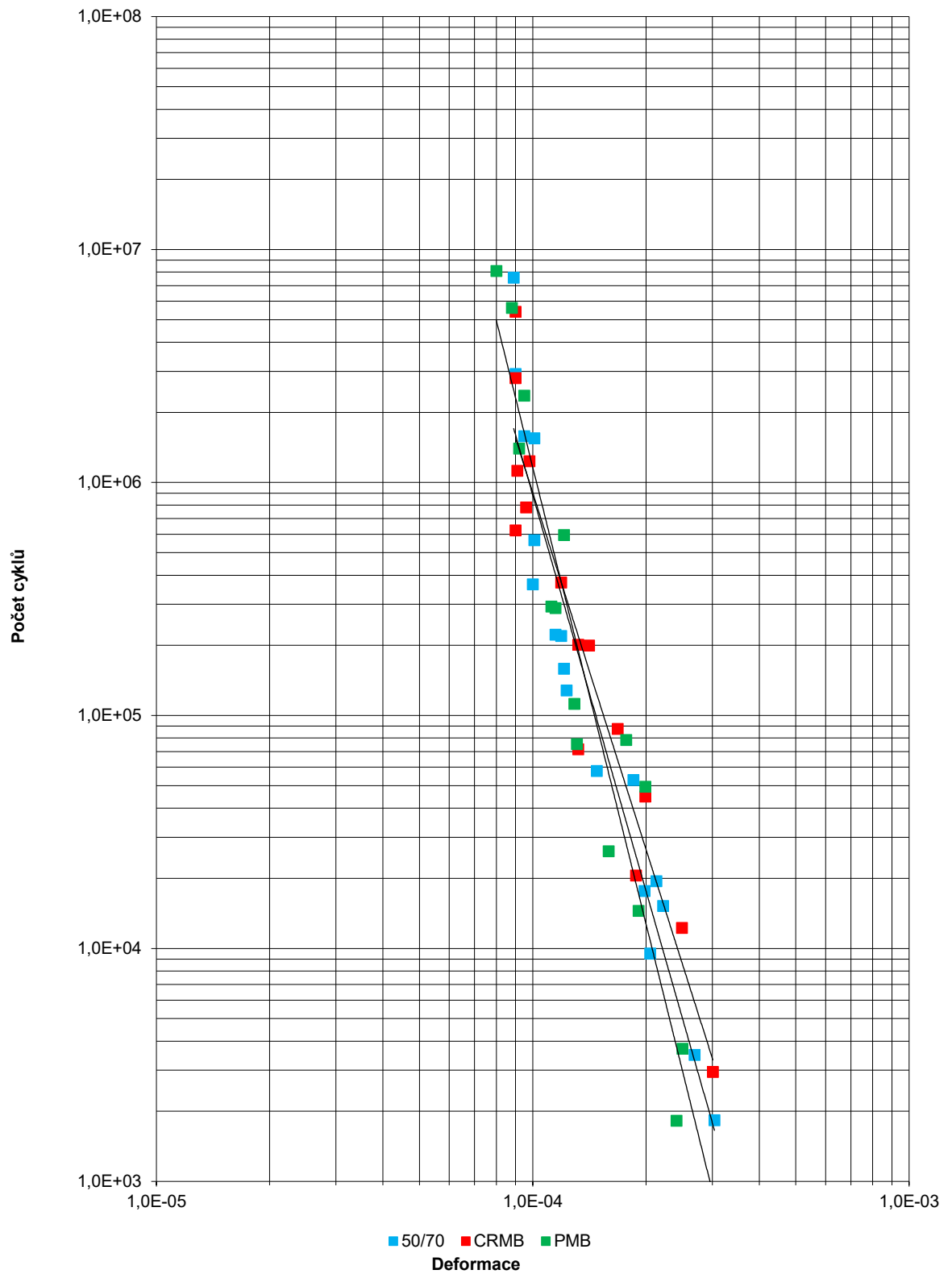
Únavové charakteristiky popisují odolnost materiálu vůči cyklickému dynamickému zatížení jako funkce změny komplexního modulu tuhosti v závislosti na počtu opakovaných cyklů harmonickým lineárně-deformačním zatěžováním při frekvenci 25 Hz. Jejich stanovení je prováděno na komolých klínech obdobným postupem jako při zkoušce stanovení modulu tuhosti s tím rozdílem, že se vzájemně střídají periody zatížení a odtížení při stejné hodnotě napětí. Vyhodnocením zkoušky je Wöhlerův diagram. Zkouška byla provedena pro všechny tři typy směsi. Výsledky uvádí následující Tabulka 12 a Graf 11.

Tabulka 12 Únavové charakteristiky zkoušených směsí

Zkušební těleso	PMB RBL				CRMB RBL				50/70 RBL						
	Poměrné přetvoření	Počet cyklů	Únavové charakteristiky			Poměrné přetvoření	Počet cyklů	Únavové charakteristiky			Poměrné přetvoření	Počet cyklů	Únavové charakteristiky		
			$\epsilon \cdot 10^{-6}$	B	R ²			$\epsilon \cdot 10^{-6}$	B	R ²			$\epsilon \cdot 10^{-6}$	B	R ²
1	0,000177	78482	102,3	6,51	0,933	0,00017	87580	98,1	5,086	0,918	0,000185	52800	97,8	5,64	0,923
2	0,000129	112124				0,00025	12250				0,000148	57754			
3	0,000159	26122				9,8E-05	1233346				0,000115	222127			
4	0,000115	289127				9,6E-05	781713				0,0001	365725			
5	0,000112	293355				9,1E-05	1123570				0,000095	1581052			
6	0,000092	1400100				0,00009	5404202				0,00009	2921584			
7	0,00008	8090000				0,00013	71500				0,000089	7562100			
8	0,000088	5620000				0,0002	44927				0,000205	9512			
9	0,000095	2358998				0,00009	623587				0,000269	3488			
10	0,000191	14501				0,00009	2802840				0,000101	565217			
11	0,00025	3710				0,00013	201300				0,000121	158800			
12	0,000299	995				0,0003	2950				0,000119	219659			
13	0,000199	49400				0,00014	199800				0,000222	15220			
14	0,000121	595600				0,00019	20560				0,000101	1550200			
15	0,000241	1820				0,00012	372500				0,000213	19450			
16	0,000131	75250				chybné měření					0,000304	1830			
17	chybné měření					chybné měření					0,000198	17650			
18	chybné měření					chybné měření					0,000123	128200			

Graf 11 Wöhlerův diagram zkoušených směsí

Wöhlerův diagram



Celková minimální odolnosti proti únavě dána normou ČSN EN 13108-1 pro zvolený typ vrstvy asfaltobetonu je $115 \cdot 10^{-6}$. Ani jedna ze zkoušených směsí požadované hodnotě nevyhověla, což bylo pravděpodobně způsobeno nízkým obsahem pojiva u směsi CRMB, nebo nedostatečným zpracováním, hutněním, případně změnou podmínek v průběhu tvrdnutí směsi způsobující nedostatečné obalení zrn kameniva a v konečném důsledku nižší interakci na fázovém rozhraní struktury kompozitu. Nicméně, vzhledem k totožnému způsobu zpracování a vytvrzování lze v tomto případě vyhodnotit trend u všech tří směsí, který odpovídá předpokladu, tedy že pryžový granulát modifikující matici asfaltobetonu zvyšuje jeho odolnosti proti únavě. Toto zlepšení bylo ovšem vzhledem odchylkám průměrné hodnoty v porovnání se směsí 50/70 RBL minimální.

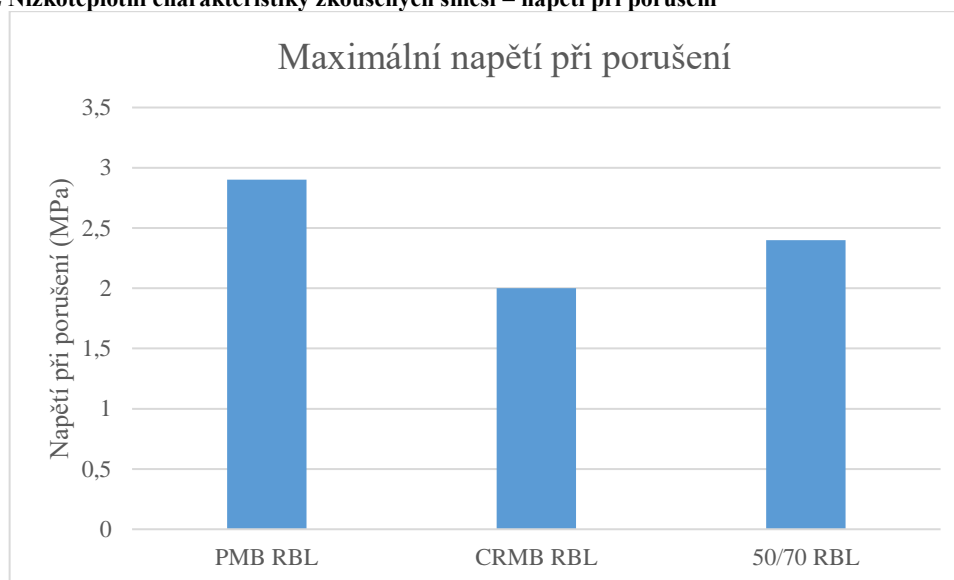
5.5 Stanovení nízkoteplotních vlastností

Stanovení nízkoteplotních charakteristik asfaltobetonu se užívá především s cílem posoudit chování materiálu při působení mrazu. Ten ovlivňuje zejména soudržnost matrice a může postupně vést ke vzniku trhlin. Nízkoteplotní charakteristiky jsou stanovovány na trámečcích cyklickým zatěžováním střídáním nízkých a běžných teplot. Cílem zkoušky je stanovit hodnotu teploty a napětí, při kterých dojde ke vzniku mrazové trhliny. Zkouška byla provedena vždy na třech trámečcích z jedné směsi. Vyhodnocení zkoušky uvádí následující Tabulka 13 a grafy (Graf 12 a Graf 13). Porušení vzorku vznikem trhliny zobrazuje Obrázek 12.

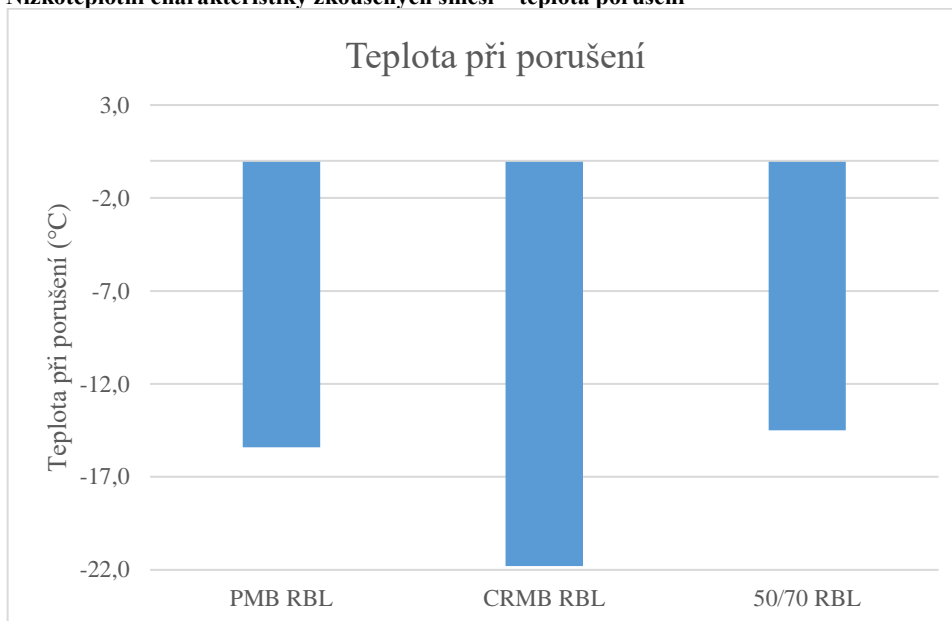
Tabulka 13 Hodnoty nízkoteplotních charakteristik

Zkušební těleso	Max. síla při porušení [kN]	Max. napětí při porušení [MPa]	Max. napětí při porušení Ø [MPa]	Teplota vzorku při porušení [°C]	Teplota vzorku při porušení Ø [°C]
ACP 16 + PMB RBL					
1.	4,33	1,73	2,9	-9,8	-15,4
2.	7,10	2,84		-14,5	
3.	7,57	3,03		-16,3	
ACP 16 + CRMB RBL					
1.	3,01	1,20	2,0	-19,5	-21,8
2.	4,92	1,97		-21,8	
3.	5,18	2,07		-21,8	
ACP 16 50/70 RBL					
1.	6,23	2,49	2,4	-13,4	-14,5
2.	4,72	1,89		-14,6	
3.	7,13	2,85		-14,4	

Graf 12 Nízkoteplotní charakteristiky zkoušených směsí – napětí při porušení



Graf 13 Nízkoteplotní charakteristiky zkoušených směsí – teplota porušení



Obrázek 12 Porušení zkušebního trámečku při zatížení mrazem



Nejvyšší maximální napětí porušení bylo dosaženo u referenční směsi PMB, mrazová trhlinka však u této směsi vznikla již při 15,4°C. Nejlepších nízkoteplotních charakteristik tak bylo dosaženo u směsi s matricí modifikovanou pryžovým granulátem. Přestože k porušení (vzniku mrazové trhliny) u této směsi – CRMB došlo už při napětí 2,0 MPa, destrukce zkušebního trámečku byla zaznamenána až při průměrné teplotě 21,8°C. Životnost směsi v nepříznivých podmínkách tak lze považovat za nejvyšší. Směs bez modifikace, tedy se silničním asfaltem 50/70 dosáhla nejnižších hodnot nízkoteplotních vlastností – k porušení došlo v průměru již při 14,5°C a při zatížení

2,4 MPa. Tato skutečnost je dána především pórovitostí materiálu (mezerovitostí) a vyšší citlivostí nemodifikovaného pojiva k mrazu.

5.6 Diskuze výsledků

V rámci provedených zkoušek byly srovnány tři směsi silničního asfaltobetonu pro podkladní vrstvy, primární porovnání bylo provedeno pro asfaltobeton ACP 16 50/70 a ACP 16 + CRMB, tedy asfaltobeton s matricí modifikovanou pryžovým granulátem a dodatečně ACP 16 + PMB. Souhrn vyhodnocení jednotlivých zkoušek uvádí následující Tabulka 14.

Tabulka 14 Shrnutí dosažených výsledků

Charakteristika	PMB	50/70	CRMB
Objemová hmotnost hydrostaticky (kg/m^3)	-	2408	2349
Objemová hmotnost rozměrově (kg/m^3)	-	2358	2340
Objemová hmotnost pyknometricky (kg/m^3)	-	2519	2493
Mezerovitost směsi (%)	-	4,4	5,8
Mezerovitost směsi kameniva (%)	-	16,7	21,2
Stupeň vyplnění mezer pojivem (%)	-	73,5	72,4
Modul tuhosti při teplotě 15 °C a 10 Hz (MPa)	10519	10916	8460
Odolnost proti únavě (10-6)	102,3	98,1	97,8
Maximální napětí při porušení za mrazu (MPa)	2,9	2,4	2,0
Teplota porušení (°C)	-15,4	-14,5	-21,8

Z uvedených hodnot vyplývá několik specifických skutečností, které lze charakterizovat takto:

1. Směs s pojivem CRMB modifikovanou pryžovým granulátem dosahuje obecně nižších hodnot objemových hmotností vzhledem k přidavku pryžového granulátu nižší hustoty v porovnání s asfaltovým pojivem a vyšší mezerovitosti.
2. Dané skutečnosti odpovídá i vyšší mezerovitost směsi kameniva a nižší stupeň vyplnění mezer kameniva pojivem.
3. Vyšší mezerovitost směsi s modifikovaným pryžovým granulátem se dále negativně projevuje na modulu tuhosti i odolnost proti únavě, který je ještě snížen působením pryžového granulátu.
4. Směs pryžového granulátu pozitivně ovlivňuje nízkoteplotní vlastnosti.

ZÁVĚR

Řešení systémů pro realizaci vozovek prochází kontinuálním vývojem zaměřeným především na vylepšování parametrů používaných materiálů a kompozitů v návaznosti na jejich odolnost vůči vnějšímu dynamickému zatížení a vystavení exteriérovým podmínkám. Horní vrstvy vozovek jsou v současné době navrhovány především ve skladbě tzv. „perpetual pavement“ systému, který se zakládá na účinném rozvrstvení skladby se specifickým působením, která je nesena vrstvou označovanou jako RBL, tedy „rich bottom layer“. Tato vrstva musí splňovat veškeré normové požadavky, jelikož roznáší zatížení do podkladních vrstev spodní části vozovky.

Cílem studia problematiky navrhování podkladní RBL vrstvy byla identifikace a posouzení důležitých vlastností materiálů užívaných pro její provedení, jež byly realizovány na teoretické i praktické úrovni. V rámci teoretické části byla provedena rešerše zaměřená na charakteristiku materiálů na bázi asfaltového pojiva, které jsou v této oblasti primárně užívány. Z tohoto důvodu se teoretická část zaměřovala na obecnou charakterizaci asfaltu jako pojiva pro stavební prvky asfaltových směsí, jeho výrobu, vlastnosti a způsob zkoušení v návaznosti na normativní požadavky.

V návaznosti na charakterizaci asfaltu jako pojiva byla dále rozvedena problematika asfaltových směsí zahrnující především jejich běžnou klasifikaci a způsoby návrhu složení s ohledem na předpokládanou praktickou aplikaci. V této oblasti byly rovněž identifikovány klíčové zkušební postupy využívané pro ověření dosažení normovaných požadavků této aplikace. Třetí oblast zaměření teoretické části se soustředila na charakteristiku perpetual pavement systémů, popis jejich běžné skladby, výhod a nevýhod v rámci užití a funkčních zkoušek nezbytných pro posouzení složení a účinku.

Na základě teoretické rešerše bylo následně provedeno praktické posouzení tří asfaltových směsí s cílem srovnat vliv typu pojiva na konečné vlastnosti podkladního asfaltobetonu. Jako referenční v tomto případě sloužila asfaltová směs s nemodifikovaným pojivem, která byla srovnávána se směsmi obsahujícími asfalt modifikovaný polymerem a s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem. Vyrobená zkušební tělesa byla posuzována z hlediska objemové hmotnosti, vlastnosti

pro zpracování a pokládku, a dále z hlediska modulu tuhosti, únavových a nízkoteplotních vlastností.

V rámci zkoušení byly stanoveny pouze mírné odchylky v objemových hmotnostech zkoušených směsí (rozdíl mezi referenční směsí a CRMB směsí nečinil obecně více než 2,5 %). Směs s modifikovaným asfaltovým pojivem se obecně vyznačovala vyšší mezerovitostí, což se projevilo na nižších hodnotách únavových vlastností a modulů tuhosti, příznivý vliv však tato skutečnost měla na odolnosti vůči nízkým teplotám. Kromě mezerovitosti tuto skutečnost zapříčinila také přítomnost modifikující příměsi, která má v daných podmínkách lepší vlastnosti. Všechny tři zkoušené směsi nevyhověly požadavku na celkovou minimální odolnost proti únavě, což bylo pravděpodobně zapříčiněno především nízkým obsahem pojiva především u směsi CRMB.

SEZNAM LITERATURY A ZDROJŮ

Knižní publikace

- ASSOCIATION OF ASPHALT PAVING TECHNOLOGISTS. *Asphalt Paving Technology 2011 Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Lancaster, Penn: Destech Pubns Inc, 2011. ISBN 9781605950686.
- CHEN, W.F. and J.Y. RICHARD LIEW. *The Civil Engineering Handbook*. 2nd ed. Hoboken: CRC Press, 2002. ISBN 9781420041217.
- GRÜNNER, Karol. *Asfalt v cestnom staviteľstve: história a súčasnosť*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. Edícia monografií. ISBN 80-227-2483-1.
- JEŽKOVÁ, Jaromíra, Petr MONDSCHHEIN a Eva DLOUHÁ. *Dopravní stavby*. Vyd. 1. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2006, 151 s. ISBN 80-01-03393-7.
- HANZÍK, Václav, Pavel KLAPKA, Petr MONDSCHHEIN, František LUXEMBURK, Martin OTTA a Daniel SOVA. *Pokládka hutněných asfaltových směsí: revidované a rozšířené vydání s počítačovým programem*. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic Praha, 2015. ISBN 978-80-903925-6-4.
- KOLÁŘ, Karel a Pavel REITERMAN. *Stavební materiály: pro SPŠ stavební*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 208 s. Studium (Grada). ISBN 978-80-247-4070-6.
- MANOHARAN, Selvendran. *Development of Hot Mix Asphalt Mixtures for Truckee Meadows Area*. Reno, 2006.
- SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1.
- VARAUS, Michal. *Funkční způsob navrhování asfaltových směsí podle evropských norem: Functional design of asphalt mixtures according to the European standards : teze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3950-4.
- WANG, Linbing. *Mechanics of asphalt: microstructure and micromechanics*. New York: McGraw-Hill, c2011. ISBN 978-0-07-149854-8.

Články

HÝZL, Petr. Funkční zkoušky asfaltových směsí. *Stavebnictví*. 2007(6-7). ISSN 1802 - 2030.

MONDSHEIN, Petr, Jan VALENTIN, Martin KÜHNL a Petr HÝZL. ÚNAVOVÉ CHARAKTERISTIKY ASFALTOVÝCH SMĚSÍ TYPU VMT A RBL. In: *Sborník technických listů CESTI 2015*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015, s. 8-9.

Periodika

Transportation Research Circular: Perpetual Bituminous Pavements. 2001, 2001(503). ISSN 0097-8515. Dostupné z:
[http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/TRB%20circular%20on%20Perpetual%20Pavements%20_503_974913343_112006174022\(1\).pdf](http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/TRB%20circular%20on%20Perpetual%20Pavements%20_503_974913343_112006174022(1).pdf)

Webové odkazy

HÝZL, Petr. *BM 52 Praktické aplikace pozemních komunikací*. Brno: 2006. Dostupné z:
<http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20%28semester%201%20-%2010%29%20-%20-%20-6-semester/-%20BM02%20-%20Pozemni%20komunikace%20II/Prednasky/T%C3%A9ma%207%20text%20-%20Asfaltov%C3%A9%20sm%C4%9Bsi.pdf>

LENZ, Russel W. Pavement Design Guide. In: *Onlinemanuals.txdot.gov* [online]. 2011 [cit. 2016-07-10]. Dostupné z:
http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/manual_notice.htm

Generalized Perpetual Pavement Design Construction Considerations. In: *Ftp.dot.state.tx.us* [online]. 2011 [cit. 2016-07-10]. Dostupné z:
ftp://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/cst/pdm/perppavdes_cstcons.pdf

Perpetual pavement: A Synthesis. In: *The University of Memphis* [online]. Lanham: Asphalt Pavement Alliance, 2002 [cit. 2016-06-25]. Dostupné z:
<http://www.ce.memphis.edu/7166/Documents/Perpetual%20Pavement%20Synthesis.pdf>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Základní skladba vozovky PP systému	31
Obrázek 2 Metodika provedených zkoušek	38
Obrázek 3 Jednotlivé frakce použitého kameniva z lomu Zárubka	40
Obrázek 4 Příprava Marshallových těles: vlevo odformovaná tělesa připravená ze směsi ACP16 50/70, vpravo zhutňovač Marshallových těles	42
Obrázek 5 Odformovaná a vytvrzená Marshallova tělesa	42
Obrázek 6 Pyknometrická zkouška: vlevo směs CRMB připravená pro vložení do pyknometru, vpravo pyknometry se směsí	43
Obrázek 7 Výroba asfaltobetonových desek na lamelovém zhutňovači (vlevo) a zhutněná deska (vpravo)	44
Obrázek 8 Desky pro výrobu trámečků a trapezoidů	44
Obrázek 9 Trámečky pro zkoušení nízkoteplotních charakteristik	45
Obrázek 10 Zkušební tělesa pro stanovení modulu tuhosti a únavové odolnosti (trapezoidy)	45
Obrázek 11 Trapezoid (komolý klín) připravený ke zkoušení únavových charakteristik	46
Obrázek 12 Porušení zkušebního trámečku při zatížení mrazem	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Sítový rozbor jednotlivých frakcí kameniva.....	39
Tabulka 2 Granulometrie kameniva pro jednotlivé směsi	39
Tabulka 3 Poměr složek navržených směsí	41
Tabulka 4 Materiálové charakteristiky použitých asfaltových pojiv	41
Tabulka 5 Objemová hmotnost stanovená hydrostatickým vážením	48
Tabulka 6 Objemová hmotnost stanovená rozměrově.....	49
Tabulka 7 Objemová hmotnost stanovená pyknometricky.....	50
Tabulka 8 Stanovení mezerovitosti směsí	52
Tabulka 9 Stanovení mezerovitosti směsi kameniva	53
Tabulka 10 Stanovení mezerovitosti směsi kameniva	54
Tabulka 11 Stanovení modulu tuhosti	55
Tabulka 12 Únavové charakteristiky zkoušených směsí	58
Tabulka 13 Hodnoty nízkoteplotních charakteristiky.....	61
Tabulka 14 Shrnutí dosažených výsledků	63

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Srovnání objemové hmotnosti stanovené hydrostatickým vážením	48
Graf 2 Srovnání objemové hmotnosti stanovené rozměrově.....	49
Graf 3 Srovnání objemové hmotnosti stanovené pyknometricky.....	51
Graf 4 Objemové hmotností zkušebních těles	51
Graf 5 Srovnání mezerovitosti.....	52
Graf 6 Srovnání stupně vyplnění mezer kameniva pojivem.....	54
Graf 7 Modul tuhosti zkušebních těles ACP16 + PMB.....	55
Graf 8 Modul tuhosti zkušebních těles ACP16 + CRMB.....	56
Graf 9 Modul tuhosti zkušebních těles ACP16 50/70	56
Graf 10 Srovnání modulů tuhosti všech tří typů zkušebních těles při 10 Hz	57
Graf 11 Wöhlerův diagram zkoušených směsí	59
Graf 12 Nízkoteplotní charakteristiky zkoušených směsí – napětí při porušení	61
Graf 13 Nízkoteplotní charakteristiky zkoušených směsí – teplota porušení.....	62

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ACP – asfaltový beton pro podkladní vrstvy

CRMB – crumb rubber modified bitumen (asfalt modifikovaný pryžovým granulátem)

PMB – polymer modified bitumen (asfalt modifikovaný polymerem)

RBL – rich bottom layer

VELIČINY A JEDNOTKY

°C – stupně Celsia

B – obsah pojiva ve zkušebním tělese

Hz – Herz

kg/m³ (kg.m⁻³) – kilogram na metr krychlový

kN – kilonewtony

MPa – megapascal

VFB – stupeň vyplnění mezer kameniva pojivem

V_m – mezerovitost stanovená z hmotnosti

WMA – mezerovitost směsi kameniva

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Čára zrnitosti kameniva a návrhy směsí zkušebních těles

Příloha 2 – Únavové charakteristiky

Příloha 3 – Nízkoteplotní charakteristiky jednotlivých trámečků

Příloha 1 – Čára zrnitosti kameniva a návrhy směsí zkušebních těles

Kamenivo - frakce	%	32	22	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
8 / 16 Zárubka	38	100,0	100,0	98,2	25,9	2,8	1,3	1,3	1,2	1,1	0,9	0,6	0,1
4 / 8 Zárubka	15	100,0	100,0	100,0	100,0	94,8	9,7	2,7	2,1	1,9	1,6	1,1	0,1
0 / 4 (drcené) Zárubka	45	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,5	73,7	51,1	35,9	24,3	15,5	9,2
filr (JMV) Prachovice	2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,2	87,0	71,7
suma	100												

Návrh směsi ACP 16 50/70

Čára zrnitosti:

Kamenivo - frakce	%	32	22	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
11 - 22													
8 - 16	42	100,0	100,0	98,2	25,9	2,8	1,3	1,3	1,2	1,1	0,9	0,6	0,1
8 - 11		100,0	100,0	100,0	94,7	23,8	2,6	2,2	2,0	1,8	1,5	0,8	0,2
4 - 8	18	100,0	100,0	100,0	100,0	94,8	9,7	2,7	2,1	1,9	1,6	1,1	0,1
0 - 4 (drcené)	41	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,5	73,7	51,1	35,9	24,3	15,5	9,2
0 - 4 (těžené)		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	96,6	82,4	67,9	44,5	9,6	2,0	1,3
filr	1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,2	87,0	71,7
SUMA	100												
horní mez			100	100		76		44				14	10
dolní mez			100	90		54		28				5	4
Fuller		117,3	100,0	82,9	70,7	50,0	35,4	25,0	17,7	12,5	8,8	6,3	
Návrh		100,0	99,2	68,9	58,3	43,1	32,2	22,8	16,5	11,6	7,7	4,5	
Rozdíl				14,0	12,4	6,9	3,2	2,2	1,2	0,9	1,2	1,7	
Původní návrh		100,0	99,0		62,0		33,0				7,0	5,0	

Dávkování přetříděných frakcí:

Přetříděné frakce	filr	0 - 4	4 - 8	8-11	11-16	16-22
% zastoupení	1	42,1	15,3	10,5	30,4	0,8
Navážka na x g kameniva	12	496	180	124	358	9

agg. = 1180 g

bit. = 64,7 g

Stanovení teoretického optimálního množství pojiva

ϵ	měrný povrch kameniva m^2/kg	
G	podíl kameniva v %hmotnosti, které zadrží síto 8 mm	41,7
g	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 8 mm a zadrží síto 4 mm	15,3
S	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 4 mm a zadrží síto 0,25 mm	31,5
s	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 0,25 mm a zadrží síto 0,063 mm	7,0
f	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 0,063 mm	4,5

$$\epsilon = 0,01 \cdot (0,174G + 0,4g + 2,3S + 15,33s + 140f)$$

$$\epsilon = 8,302 \text{ m}^2/kg$$

p	teoretické optimální množství pojiva kg asf./100 kg kameniva	
n	součinitel sytosti (n=3,4 pro obrusné vrstvy; n=3,1 pro ostatní vrstvy)	3,3

$$p = n^5 \cdot \epsilon$$

$$p = 5,04 \text{ kg asf./100kg kameniva}$$

$$p' = 4,80 \%$$

Navržené množství pojiva	5,2 %	Dávkované množství
--------------------------	-------	--------------------

Návrh směsi ACP 16 + PMB

Čára zrnitosti:

Kamenivo - frakce	%	32	22	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
11 - 22													
8 - 16	32	100,0	100,0	98,2	25,9	2,8	1,3	1,3	1,2	1,1	0,9	0,6	0,1
4 - 8	24	100,0	100,0	100,0	100,0	94,8	9,7	2,7	2,1	1,9	1,6	1,1	0,1
0 - 4 (droené)	41	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,5	73,7	51,1	35,9	24,3	15,5	9,2
0 - 4 (těžené)													
filer	3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,2	87,0	71,7
SUMA	100												
horní mez			100	100		76		44				14	10
dolní mez			100	90		54		28				5	4
Fuller			117,3	100,0	82,9	70,7	50,0	35,4	25,0	17,7	12,5	8,8	6,3
Návrh			100,0	99,4	76,3	67,6	45,7	34,3	24,8	18,5	13,6	9,4	6,0
Rozdíl					6,8	3,1	4,3	1,1	0,2	-0,8	-1,1	-0,6	0,3

Dávkování přetříděných frakcí:

Přetříděné frakce	filer	0 - 4	4 - 8	8-11	11-16	16-22
% zastoupení	3	42,7	21,9	8,6	23,1	0,6
Navážka na x g kameniva	35	504	259	102	273	7

agg. = 1180 g

bit. = 66,0 g

Stanovení teoretického optimálního množství pojiva

ε	měrný povrch kameniva m ² /kg	
G	podíl kameniva v %hmotnosti, které zadrží síto 8 mm	32,4
g	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 8 mm a zadrží síto 4 mm	21,9
S	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 4 mm a zadrží síto 0,25 mm	32,1
s	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 0,25 mm a zadrží síto 0,063 mm	7,8
f	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 0,063 mm	6,0

$$\epsilon = 0,01 \cdot (0,174G + 0,4g + 2,3S + 15,33s + 140f)$$

$$\epsilon = 10,419 \text{ m}^2/\text{kg}$$

p	teoretické optimální množství pojiva kg asf./100 kg kameniva	
n	součinitel sytosti (n=3,4 pro obrusné vrstvy; n=3,1 pro ostatní vrstvy)	3,3

$$p = n^{\epsilon} \cdot \epsilon$$

$$p = 5,27 \text{ kg asf./100kg kameniva}$$

$$p^* = 5,01 \%$$

Navržené množství pojiva	5,3 %	Dávkované množství
--------------------------	-------	--------------------

Návrh směsi ACP 16 + CRMB

Čára zrnitosti:

Kamenivo - frakce	%	32	22	16	11	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
11 - 22													
8 - 16	34,5	100,0	100,0	98,2	25,9	2,8	1,3	1,3	1,2	1,1	0,9	0,6	0,1
4 - 8	26	100,0	100,0	100,0	100,0	94,8	9,7	2,7	2,1	1,9	1,6	1,1	0,1
0 - 4 (droené)	38	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,5	73,7	51,1	35,9	24,3	15,5	9,2
0 - 4 (těžené)													
filer	1,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,2	87,0	71,7
SUMA	100												
horní mez			100	100		70	52	38				9	7
dolní mez			100	90		54	36	26				4	3
Fuller			117,3	100,0	82,9	70,7	50,0	35,4	25,0	17,7	12,5	8,8	6,3
Návrh			100,0	99,4	74,4	65,1	41,5	30,7	21,9	16,0	11,4	7,7	4,6
Rozdíl					8,5	5,6	8,5	4,7	3,1	1,7	1,1	1,2	1,6

Dávkování přetříděných frakcí:

Průtříděné frakce	řlter	0 - 4	4 - 8	8-11	11-16	16-22	
% zastoupení	1,5	40,0	23,6	9,3	24,9	0,6	agg. = 1180 g
Navážka na x g kameniva	18	472	278	110	294	7	bit. = 75,3 g

Stanovení teoretického optimálního množství pojiva

ϵ	měrný povrch kameniva m^2/kg	
G	podíl kameniva v %hmotnosti, které zadržel síto 8 mm	34,9
g	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 8 mm a zadržel síto 4 mm	23,6
S	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 4 mm a zadržel síto 0,25 mm	30,1
s	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 0,25 mm a zadržel síto 0,063 mm	6,8
f	podíl kameniva v %hmotnosti, které propadne sítem 0,063 mm	4,6

$$\epsilon = 0,01 \cdot (0,174G + 0,4g + 2,3S + 15,33s + 140f)$$

$$\epsilon = 8,375 \text{ m}^2/kg$$

p	teoretické optimální množství pojiva kg asf./100 kg kameniva	
n	součinitel sytosti (n=3,4 pro obrusné vrstvy; n=3,1 pro ostatní vrstvy)	n 3,3

$$p = n^{-5} \cdot \epsilon$$

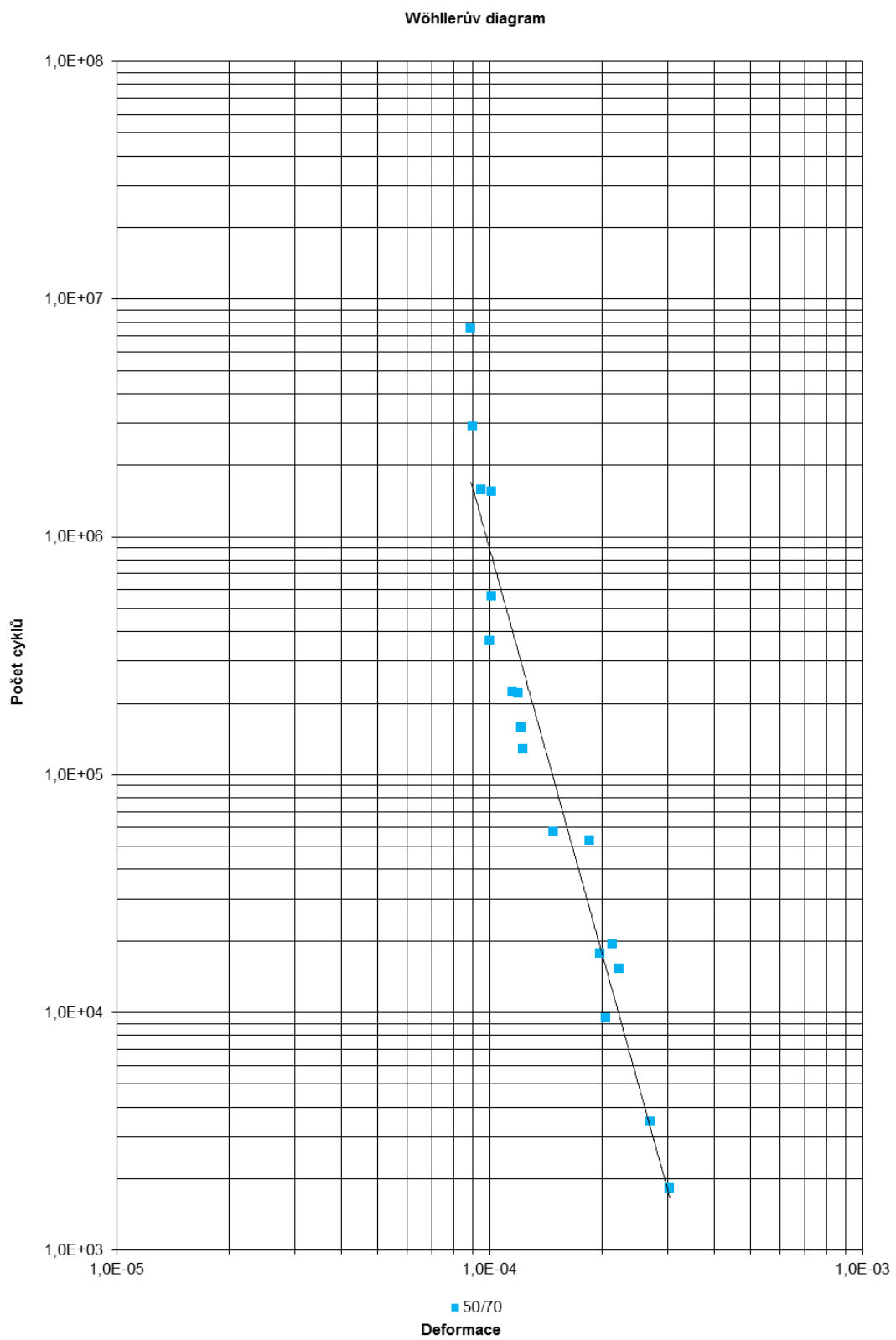
$$p = 5,05 \text{ kg asf./100kg kameniva}$$

$$p^* = 4,81 \%$$

Navržené množství pojiva	6,0 %	Dávkované množství
--------------------------	-------	--------------------

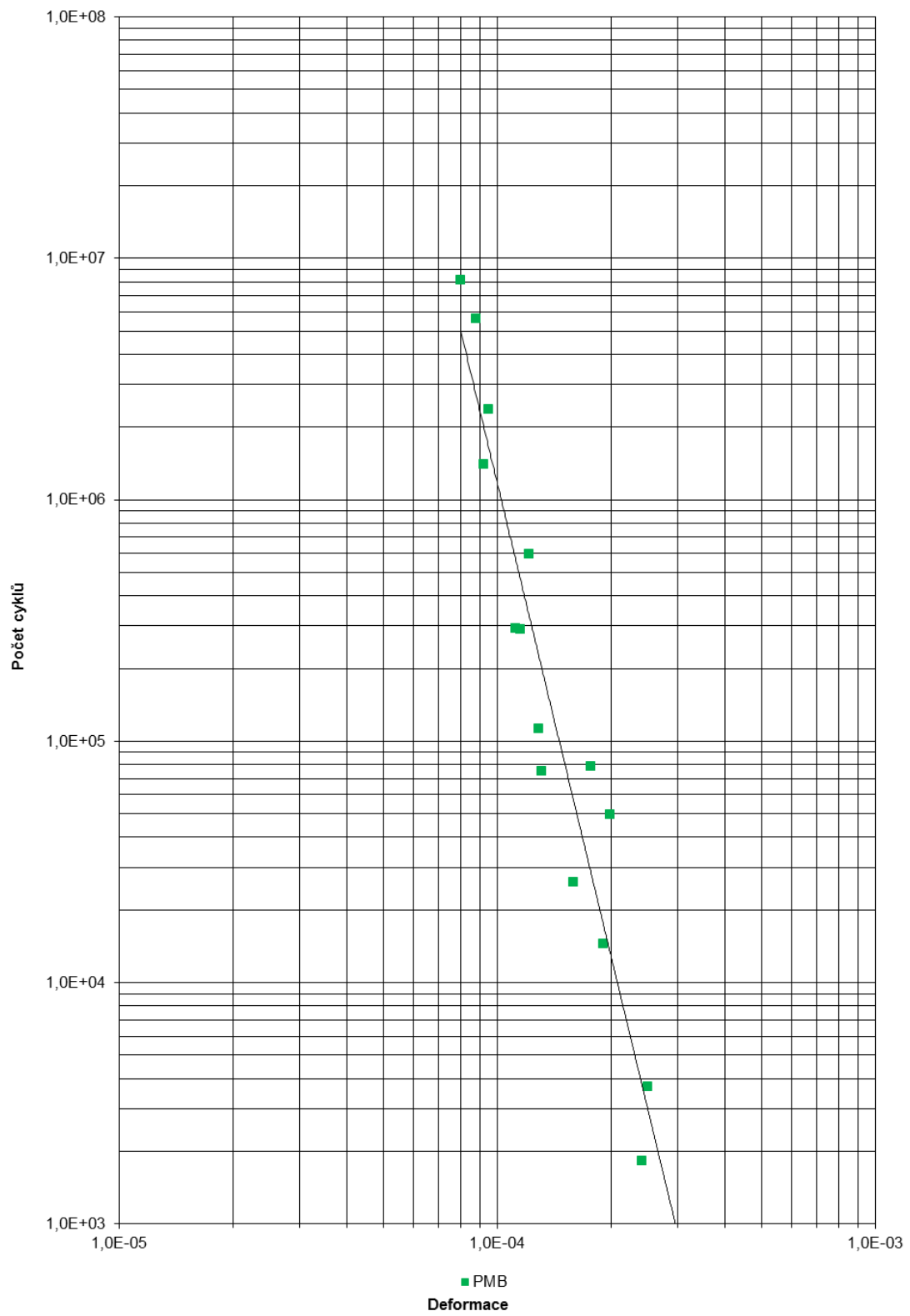
Příloha 2 – Únavové charakteristiky

ACP 16 50/70



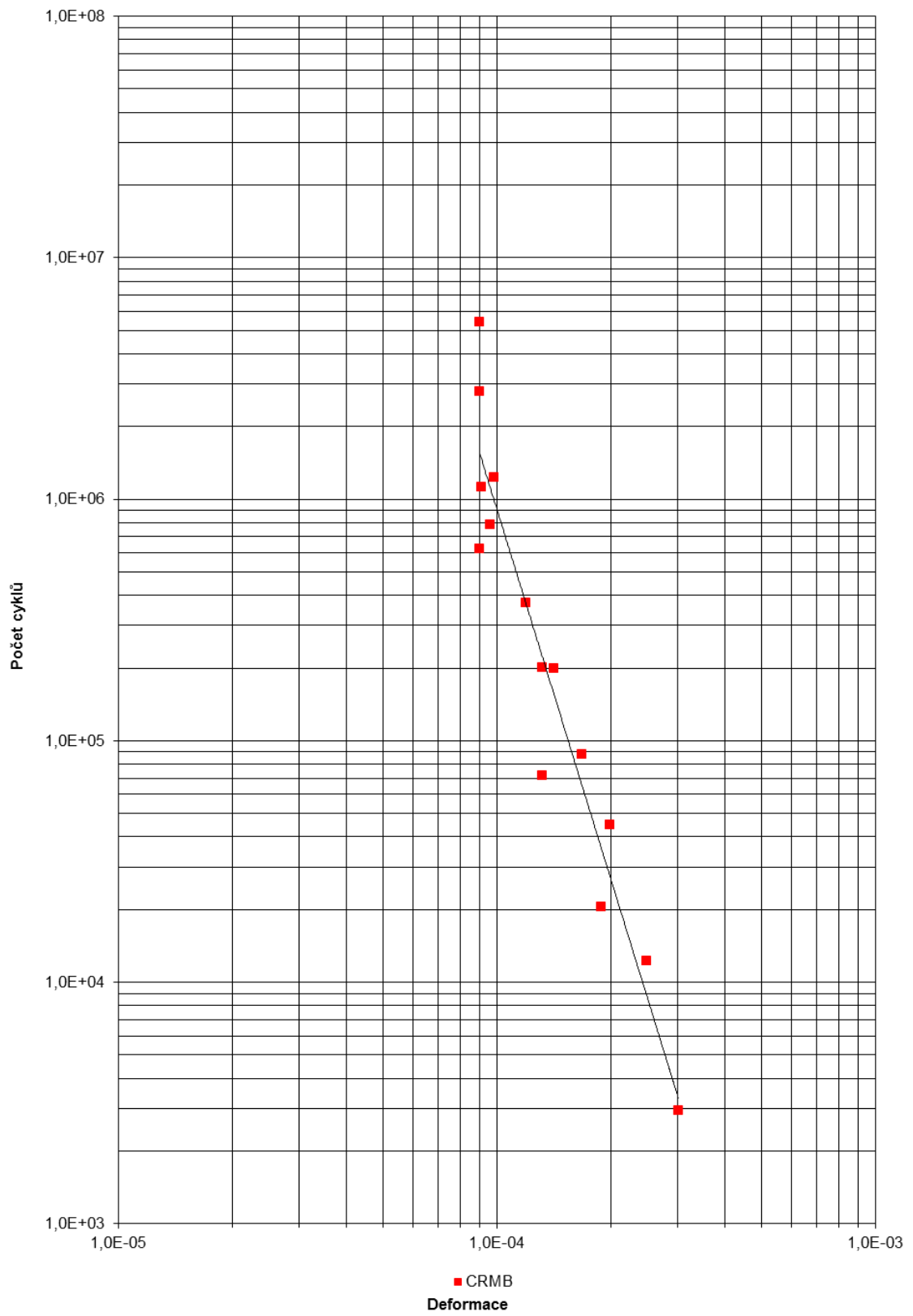
ACP 16 + PMB

Wöhlerův diagram



ACP 16 + CRMB

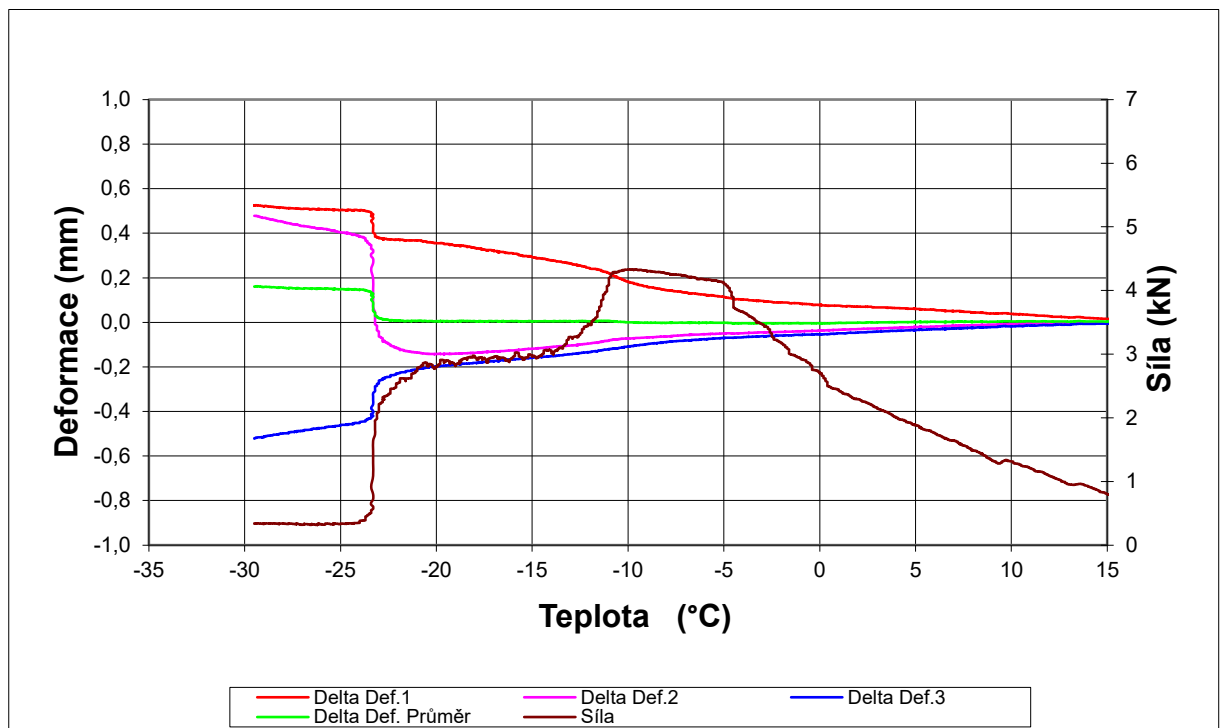
Wöhlerův diagram



Příloha 3 – Nízkoteplotní charakteristiky jednotlivých trámečků

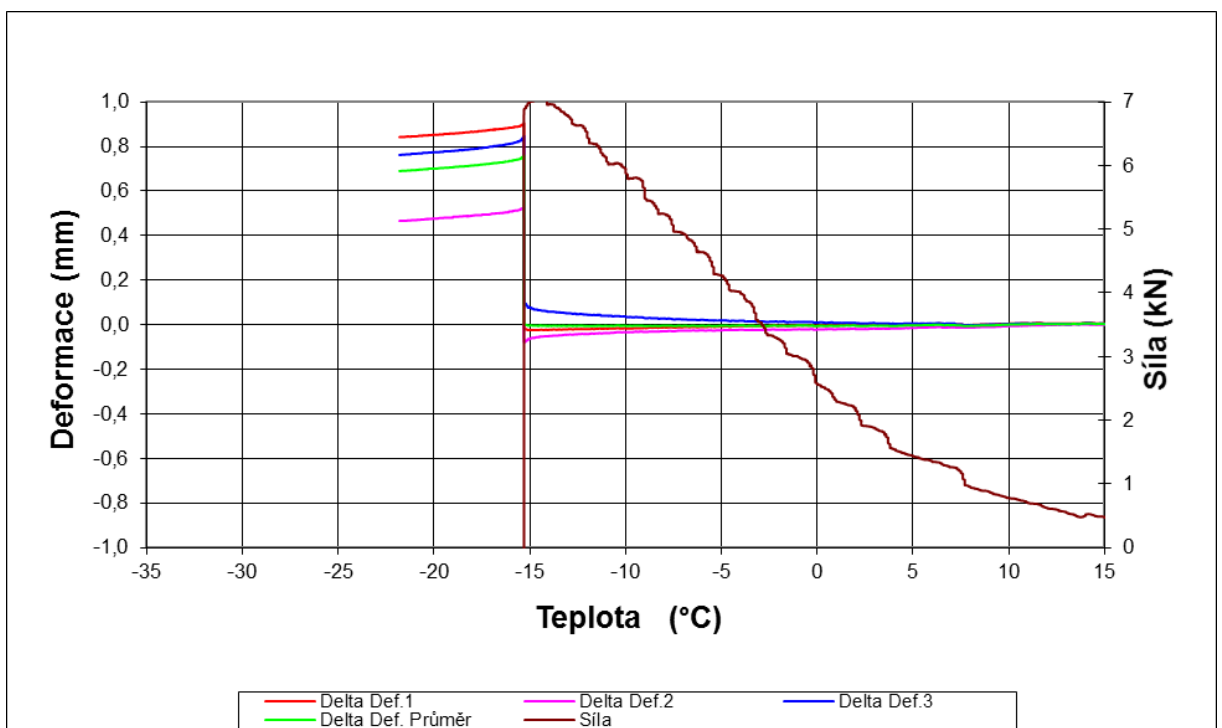
PMB 1

Akce :	
Asfaltová směs :	PMB RBL – 1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	1.9.2017
Zkoušku provedl :	Lukáš Simkovič
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	4,33
Max. napětí při porušení - MPa :	1,73
Teplota v komoře při porušení - °C :	-14,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-9,8



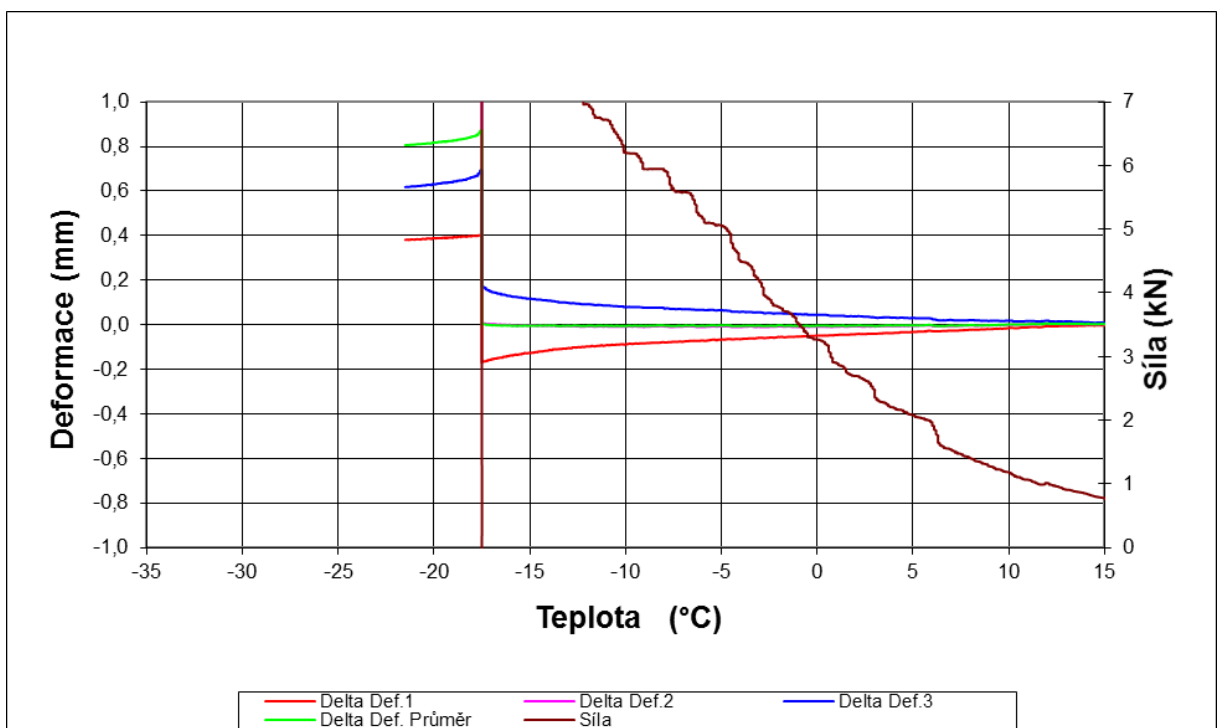
PMB 2

Akce :	
Asfaltová směs :	PMB RBL – 2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	5.9.2017
Zkoušku provedl :	Lukáš Simkovič
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	7,10
Max. napětí při porušení - MPa :	2,84
Teplota v komoře při porušení - °C :	-18,5
Teplota vzorku při porušení - °C :	-14,5



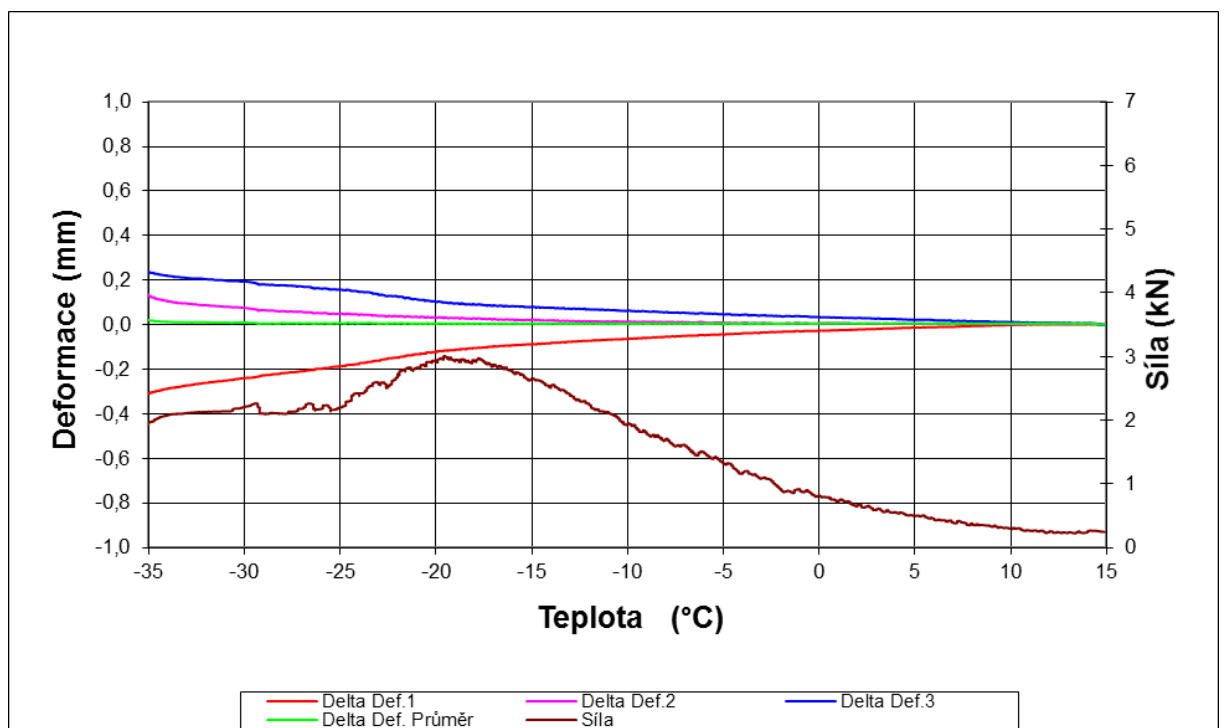
PMB 3

Akce :	
Asfaltová směs :	PMB RBL – 3
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	6.9.2017
Zkoušku provedl :	Lukáš Simkovič
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	7,57
Max. napětí při porušení - MPa :	3,03
Teplota v komoře při porušení - °C :	-20,5
Teplota vzorku při porušení - °C :	-16,3



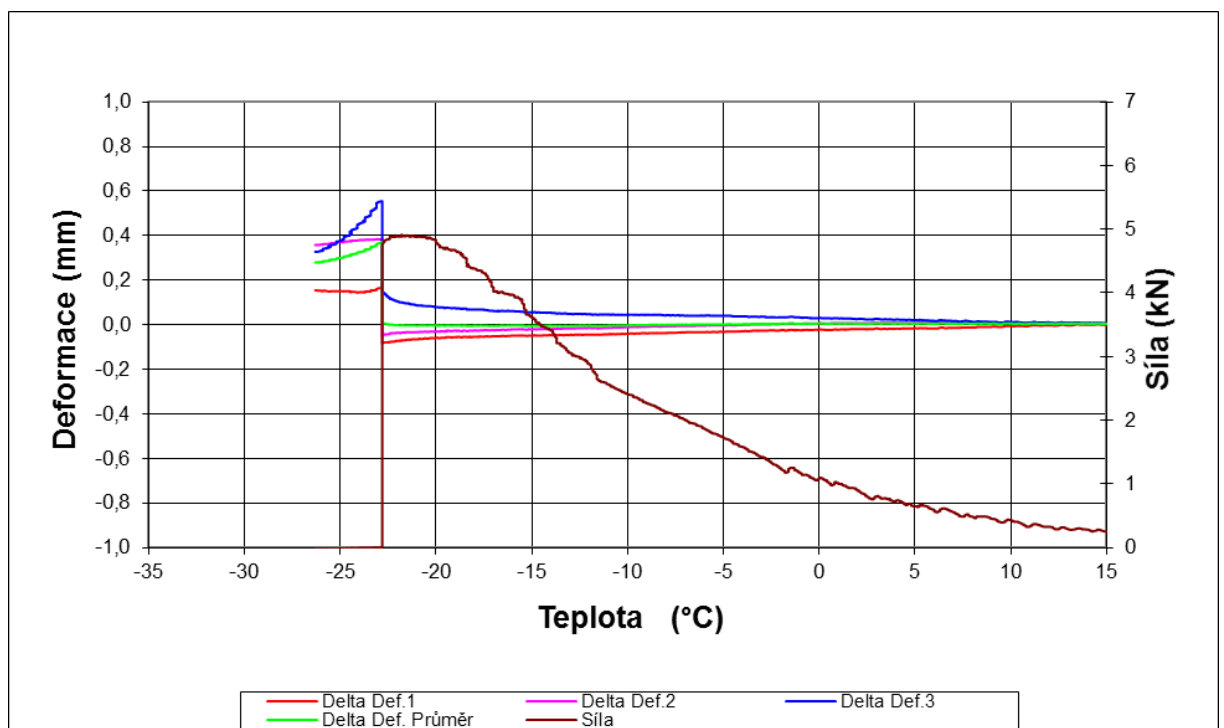
CRMB 1

Akce :	
Asfaltová směs :	CRMB RBL – 1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	25.8.2017
Zkoušku provedl :	Lukáš Simkovič
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	3,01
Max. napětí při porušení - MPa :	1,20
Teplota v komoře při porušení - °C :	-23,7
Teplota vzorku při porušení - °C :	-19,5



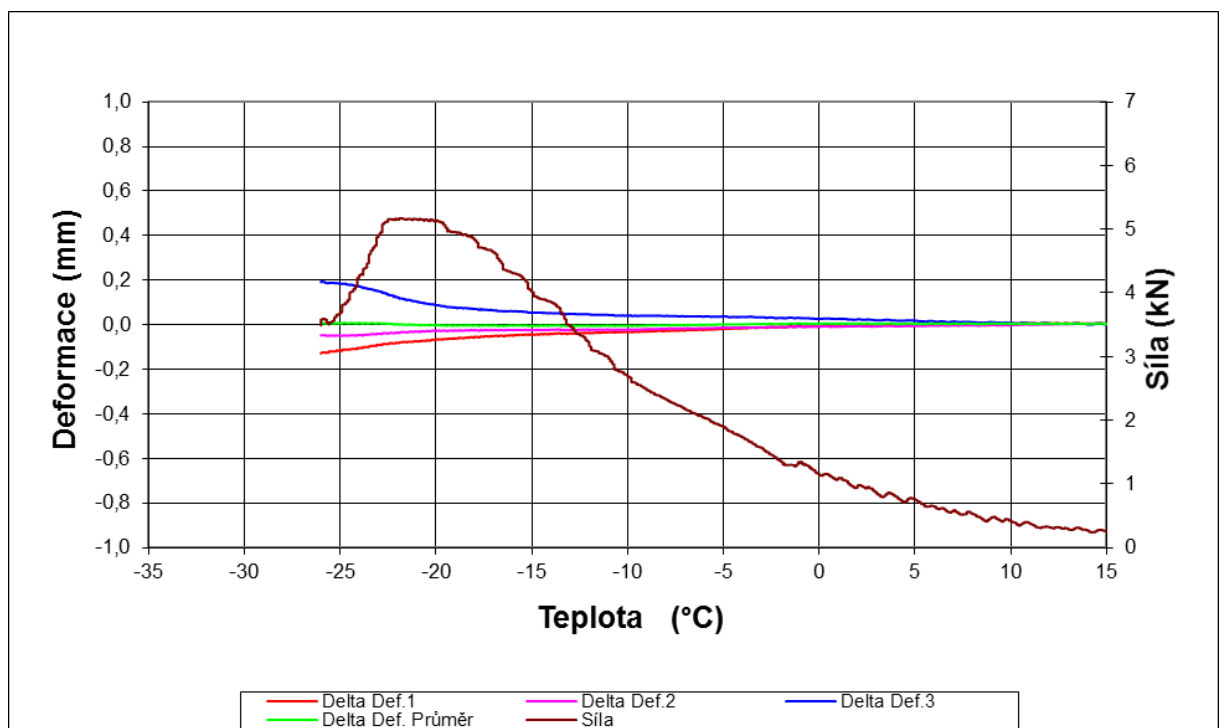
CRMB 2

Akce :	
Asfaltová směs :	CRMB RBL – 2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	28.8.2017
Zkoušku provedl :	Lukáš Simkovič
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	4,92
Max. napětí při porušení - MPa :	1,97
Teplota v komoře při porušení - °C :	-26,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-21,8



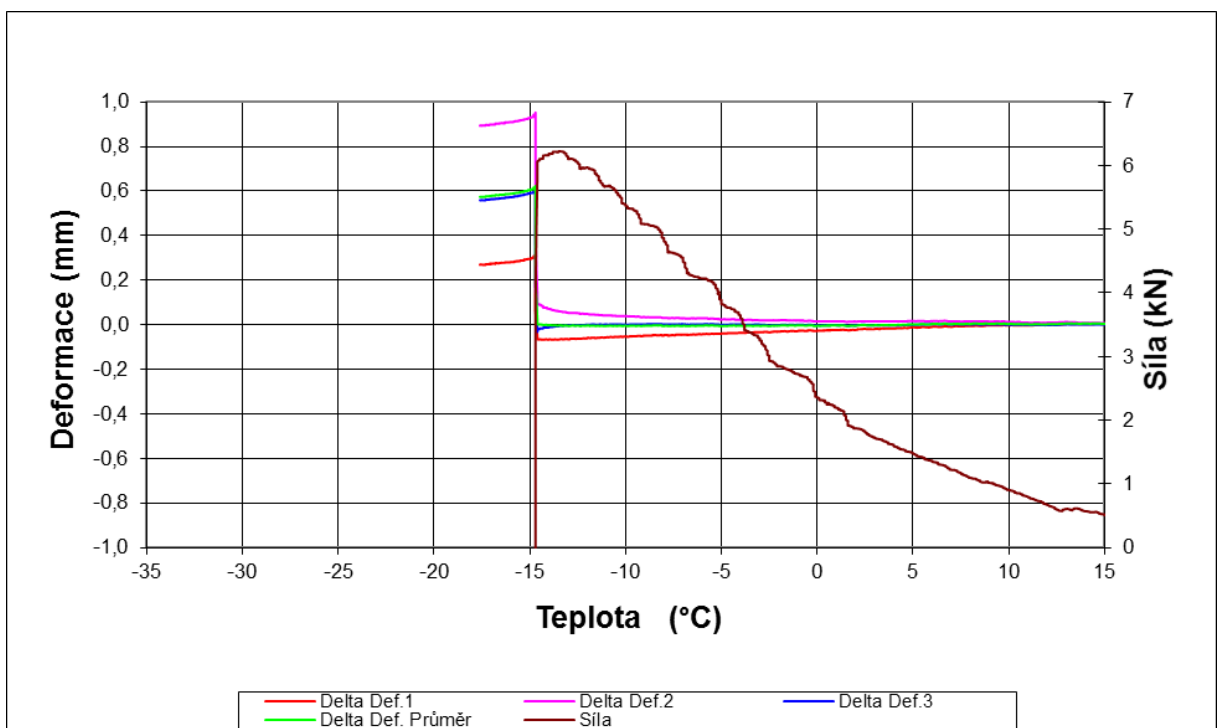
CRMB 3

Akce :	
Asfaltová směs :	CRMB RBL – 3
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	29.8.2017
Zkoušku provedl :	Lukáš Simkovič
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	5,18
Max. napětí při porušení - MPa :	2,07
Teplota v komoře při porušení - °C :	-26,2
Teplota vzorku při porušení - °C :	-21,8



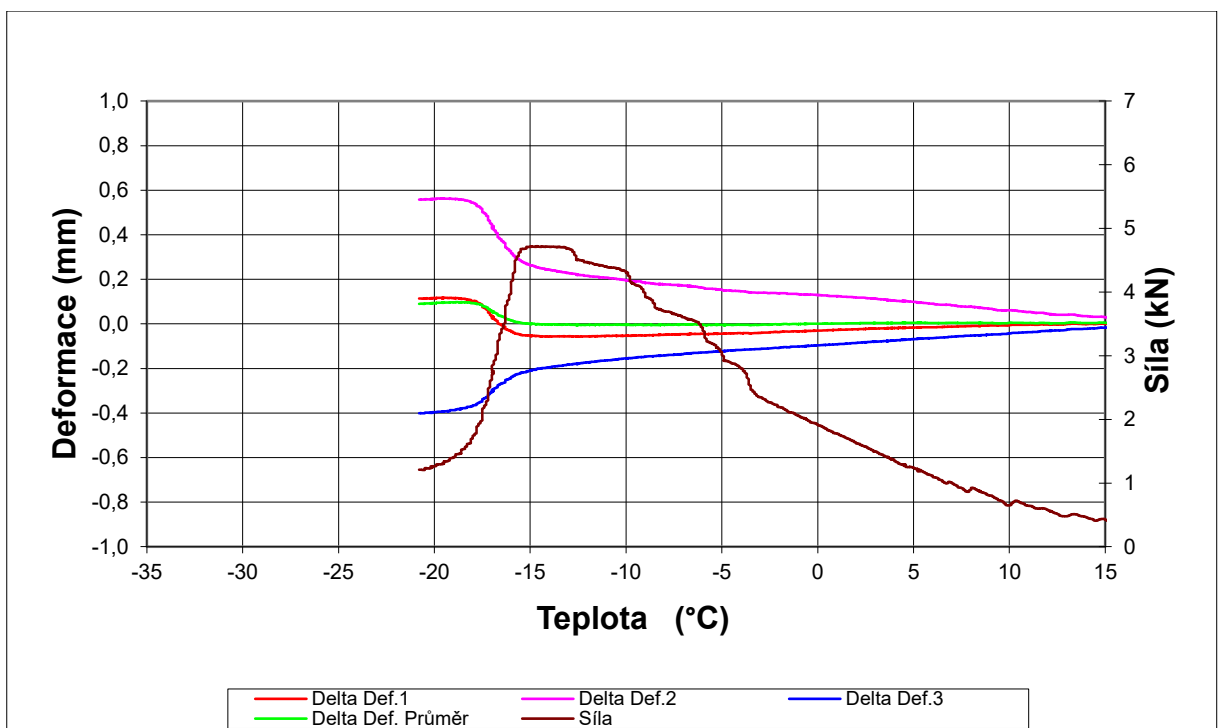
50/70 1

Akce :	
Asfaltová směs :	50/70 RBL – 1
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	30.8.2017
Zkoušku provedl :	Lukáš Simkovič
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	6,23
Max. napětí při porušení - MPa :	2,49
Teplota v komoře při porušení - °C :	-17,2
Teplota vzorku při porušení - °C :	-13,4



50/70 2

Akce :	
Asfaltová směs :	50/70 RBL – 2
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	31.8.2017
Zkoušku provedl :	Lukáš Simkovič
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	4,72
Max. napětí při porušení - MPa :	1,89
Teplota v komoře při porušení - °C :	-18,8
Teplota vzorku při porušení - °C :	-14,6



50/70 3

Akce :	
Asfaltová směs :	50/70 RBL – 3
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	4.9.2017
Zkoušku provedl :	Lukáš Simkovič
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	7,13
Max. napětí při porušení - MPa :	2,85
Teplota v komoře při porušení - °C :	-18,3
Teplota vzorku při porušení - °C :	-14,4

