



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ
INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

ODOLNOST ASFALTOVÉHO POJIVA A
ASFALTOVÉ SMĚSI VŮČI DEFORMACI
RESISTANCE OF ASPHALT BINDER AND ASPHALT MIXTURE AGAINST
DEFORMATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

KAROLÍNA DUBŠÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Karolína Dubšíková
Název	Odolnost asfaltového pojiva a asfaltové směsi vůči deformaci
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2017
Datum odevzdání	25. 5. 2018

V Brně dne 30. 11. 2017

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky materiálů

Normy řady 12697

Literatura z internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem bakalářské práce bude zhodnotit pomocí vhodné zkoušky náchylnost vybraných asfaltových pojiv vůči deformaci. Tato pojiva budou použita pro výrobu asfaltových směsí, jejichž odolnost vůči vzniku trvalých deformací bude zjištěna zkouškou pojíždění kolem. Bude hledána závislost mezi náchylností k deformaci asfaltových pojiv a asfaltových směsí.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

ABSTRAKT

Předmětem bakalářské práce je popsání laboratorních vlastností asfaltových pojiv ve vztahu k trvalým deformacím. V teoretické části bude popsána podstata a postup empirických zkoušek penetrace jehlou a bod měknutí. Dále bude vysvětlen princip a postup zkoušky MSCR. V praktické části budou vyhodnoceny vlastnosti čtyř zkoušených asfaltových pojiv. Tato pojiva budou použita pro výrobu asfaltových směsí, na kterých budou provedeny zkoušky pojíždění kolem a jejich výsledky budou porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfalt, penetrace jehlou, bod měknutí, MSCR, dynamický smykový reometr (DSR), trvalé deformace.

ABSTRACT

Subject of this bachelor's thesis is to describe laboratory properties of asphalt binders in relation to permanent deformation. The principle and procedure of empirical tests needle penetration and softening point will be explained in the theoretical part. The principle and procedure of MSCR test will be also described. The properties of four asphalt binders will be evaluated in practical part. These binders will be used for production of asphalt mixtures, which will be subjected to wheel tracking test and their results will be compared.

KEYWORDS

Asphalt, needle penetration, softening point, MSCR, dynamic shear rheometer (DSR), permanent deformation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

DUBŠÍKOVÁ, Karolína. *Odolnost asfaltového pojiva a asfaltové směsi vůči deformaci.*

Brno, 2018. 86 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2018

Karolína Dubšíková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla velmi poděkovat panu Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné a cenné rady a připomínky, a především ochotu při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala panu Ing. Pavlu Coufalíkovi, Ph.D. za poskytnuté materiály a také všem pracovníkům silniční laboratoře ústavu pozemních komunikací VUT v Brně, především Matěji Šafránkovi a Pavlu Strakovi za pomoc při práci v laboratoři. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat mojí rodině a především rodičům za podporu a trpělivost během celého studia.

OBSAH

OBSAH.....	10
1 ÚVOD.....	19
2 REŠERŠE LITERATURY.....	21
2.1 ASFALTOVÁ POJIVA.....	23
2.1.1 Výroba asfaltů	23
2.1.2 Chování asfaltu v závislosti na teplotě.....	25
2.1.3 Trvalé deformace	25
2.1.4 MSCR.....	26
3 CÍLE PRÁCE	28
4 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	28
4.1 PENETRACE JEHLOU	28
4.1.1 Postup zkoušky.....	29
4.1.2 Vyhodnocení zkoušky.....	29
4.2 BOD MĚKNUTÍ METODOU KROUŽEK A KULIČKA	29
4.2.1 Postup zkoušky.....	30
4.2.2 Vyhodnocení zkoušky.....	31
4.3 MSCR	31
4.3.1 Podstata metody	31
4.3.2 Příprava reometru.....	32
4.3.3 Příprava vzorku	32
4.3.4 Postup zkoušky.....	32
4.3.5 Vyhodnocení zkoušky.....	33
4.4 SÍTOVÝ ROZBOR	36
4.4.1 Postup síťového rozboru.....	36
4.5 LABORATORNÍ VÝROBA SMĚSI.....	37
4.5.1 Postup výroby směsi ručním mícháním	38
4.5.2 Postup výroby směsi strojním mícháním	38
4.6 HUTNĚNÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES RÁZOVÝM ZHUTŇOVAČEM.....	39
4.6.1 Příprava před hutněním	39
4.6.2 Postup hutnění.....	40
4.7 HUTNĚNÍ DESEK ZHUTŇOVAČEM DESEK.....	40
4.7.1 Příprava před hutněním	41
4.7.2 Postup hutnění.....	41
4.8 STANOVENÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI NA ZKUŠEBNÍCH TĚLESECH.....	42

4.8.1	Postup zkoušky.....	43
4.8.2	Vyhodnocení zkoušky.....	43
4.9	STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI.....	43
4.9.1	Postup zkoušky.....	44
4.9.2	Vyhodnocení zkoušky.....	44
4.10	STANOVENÍ MEZEROVITOSTI.....	45
4.10.1	Vyhodnocení mezerovitosti.....	45
4.11	MÍRA ZHUTNĚNÍ.....	45
4.12	ZKOUŠKA POJÍŽDĚNÍ KOLEM.....	45
4.12.1	Postup zkoušky.....	46
4.12.2	Vyhodnocení zkoušky.....	47
4.13	POŽADAVKY NA ASFALTOVOU SMĚS ACO11+.....	47
5	POUŽITÉ MATERIÁLY.....	49
5.1	POUŽITÉ DRUHY ASFALTŮ.....	49
5.1.1	50/70.....	49
5.1.2	PmB 45/80-55.....	49
5.1.3	PmB 25/55-65.....	50
5.1.4	PmB 45/80-65.....	50
5.2	NÁVRH ASFALTOVÉ SMĚSI.....	50
5.2.1	Návrh č. 1.....	51
5.2.2	Návrh č. 2.....	53
5.3	MÍRA ZHUTNĚNÍ.....	54
6	VÝSLEDKY ZKOUŠEK.....	55
6.1	STANOVENÍ PENETRACE JEHLOU.....	55
6.2	STANOVENÍ BODU MĚKNUTÍ METODOU KROUŽEK A KULIČKA.....	56
6.3	VYHODNOCENÍ MSCR.....	57
6.3.1	Výsledné hodnoty MSCR.....	58
6.3.2	Průběhy zkoušek MSCR.....	63
6.4	VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY POJÍŽDĚNÍ KOLEM.....	64
6.5	KORELACE ZKOUŠEK.....	68
7	ZÁVĚR.....	78
8	SEZNAMY.....	80
8.1	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	80
8.2	SEZNAM TABULEK.....	83
8.3	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	84
8.4	SEZNAM GRAFŮ.....	85

1 ÚVOD

V České republice jsou pozemní komunikace nejrozšířenějším zdrojem dopravy. Vzhledem ke stále zvyšujícímu se dopravnímu zatížení silniční sítě České republiky roste i potřeba kvalitních pozemních komunikací s delší životností a menší potřebou oprav, které omezují plynulost dopravy a způsobují zdržení a další komplikace. Toho se dá docílit lepší skladbou a kvalitou použitých materiálů, které jsou schopny přenést požadované zatížení v požadované kvalitě.

Nejrozšířenějším typem pozemních komunikací u nás jsou konstrukce obsahující v krytových vrstvách asfaltové směsi. Jelikož asfalt v nich obsažený je termoplastický materiál a jeho chování a vlastnosti jsou tedy závislé na teplotě, musí být tyto směsi vzhledem ke klimatu, ve kterém leží Česká republika, navrženy tak, aby byl eliminován vznik jak mrazových trhlin, které vznikají při nízkých teplotách v zimních měsících, tak trvalé deformace, které hrozí v letních měsících při vysokých teplotách.

Ke vzniku trvalých deformací přispívají nejen vysoké teploty, ale i nízká rychlost vozidel, kdy větší deformace vznikají např. na autobusových zastávkách a křižovatkách, také jsou ovlivněny pomalou (resp. statickou) těžkou nákladní dopravou, která asfaltové vrstvy zatěžuje mnohem více než osobní automobily, dále složení směsi, vhodně zvolený typ kameniva a jeho čára zrnitosti a v neposlední řadě gradace a vlastnosti použitých asfaltových pojiv.

Gradace asfaltových pojiv je zjišťována empirickými zkouškami penetrace jehlou a bodu měknutí kroužek a kulička, které nám charakterizují jejich chování při jednotlivých teplotách, ale nemůžeme z nich přímo odvodit odolnost proti trvalým deformacím. Z tohoto důvodu vznikla v USA zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery), která byla v roce 2015 schválena a vydána také jako evropská norma. Tato zkouška by měla oproti dosavadním empirickým zkouškám lépe určit odolnost vůči trvalým deformacím asfaltových pojiv.

Běžné silniční asfalty nestačí na zvyšující se zatížení a je tedy potřeba je modifikovat aditivami (např. polymery, pryžový granulát, latexy apod.), které zvýší bod měknutí a zároveň příliš neovlivní penetraci, tudíž je asfalt při vysokých teplotách vůči trvalým deformacím odolnější. Vlastnosti modifikovaných asfaltů jsou ovlivněny výchozím pojivem a také druhem a množstvím modifikátoru.

Užití asfaltových pojiv s optimálně zvolenou gradací odpovídající teplotnímu zatížení konstrukce vozovky by mohlo zároveň s vhodně navrženou klostrou kameniva

a konstrukcí vozovky navrženou na dané dopravní zatížení výrazně pomoci k eliminaci trvalých deformací a tedy i snížení nákladů na následně vynucené opravy.

2 REŠERŠE LITERATURY

Problematikou souvislosti trvalých deformací asfaltových pojiv a asfaltových směsí se zabývali například Krzysztof Błażejowski, Marta Wójcik-Wisniewska a Wiktoria Baranowska z ORLEN Asphalt Sp. z o.o (Polsko) a jejich výsledky prezentovali na konferenci Asfaltové vozovky 2017 [1]. Jejich studie byla zaměřena na chování asfaltových pojiv a jejich vlastnostech při vysokých teplotách. Zkoušky byly založeny na metodách Superpave a MSCR na vzorcích zestárlých po RTFOT, jež se provádělo při nejvyšších teplotách, které je možno očekávat dle systému PG (Performance Grade). Hodnocení zkoušek se provádělo dle hodnoty nevratné smykové poddajnosti J_{nr} , jež popisuje vliv asfaltového pojiva na odolnost vůči vyjíždění kolejí a u polymerem modifikovaných asfaltových pojiv udává vliv a účinnost modifikace pojiva polymery. Srovnávací zkouškou bylo zvoleno vyjíždění kolejí na malém zkušebním zařízení. Vzorky byly pojížděny 20 000 pojezdy (10 000 cyklů) při teplotách 60 °C a 70 °C. Také byla na použitých pojivech provedena zkouška bodu měknutí kroužek a kulička.

Těmto zkouškám byly podrobeny vybraná silniční (20/30, 35/50 a 50/70), polymerem modifikovaná (25/50-60, 45/80-55 a 45/80-65) a vysoce modifikovaná asfaltová pojiva (25/55-80, 45/80-80 a 65/105-80). Navržené asfaltové směsi měly obsah asfaltu 5,6 %, stejnou směs kameniva (typ kameniva a zrnitost), mezerovitost 2,2 % a stupeň vyplnění mezer asfaltem 85,8 %.

Výsledné hodnoty bodu měknutí ukázaly, že standardní tvrdé asfalty (20/30 a 35/50) dosahují dobrých výsledků. U polymerem modifikovaných asfaltů je bod měknutí závislý na tvrdosti asfaltové báze a množství aditiv. Nejvyšších hodnot bodu měknutí bylo dosaženo u polymerem modifikovaných asfaltů s vysokým obsahem polymeru.

Výsledky MSCR ukázaly, že některé asfalty, které se běžně používají v obrusných vrstvách, nejsou schopny přenést zvýšení zatížení z teploty 64 °C na 70 °C. Standardní silniční asfalty mají větší citlivost vůči vyšším teplotám než modifikované asfalty a nejlepší hodnoty $J_{nr,3,2}$ měly asfalty vysoce modifikované.

Hodnoty vyjetých kolejí potvrdily dobrou odolnost vůči trvalým deformacím u tvrdých asfaltů (20/30, 35/50), které mají špatné elastické vlastnosti a při nízkých teplotách jsou náchylné ke smršťování, tudíž jsou vhodné jen do podkladních a ložních vrstev. U měkkých silničních asfaltů (50/70) při použití v obrusných vrstvách hrozí při vysokých teplotách a velkém dopravním zatížením. Modifikované asfalty se střední

penetrací mají značně lepší výsledky. Vysoce modifikované asfalty mají výborné výsledky, což se potvrdilo i zkouškou MSCR.

Při zjišťování závislostí daných zkoušek se ukázalo, že korelace mezi bodem měknutí a odolností vůči vyjíždění kolejí nejsou významné, tudíž požadavky dané EN normami nezohledňují provozní vlastnosti. Korelace mezi zkouškou MSCR a WTS_{AIR} a PRD_{AIR} zjištěné z vyjíždění kolejí vycházely mnohem lépe, při teplotě vyšší než 64 °C je $R^2 > 0,9$ a při teplotě zkoušky 70 °C je $R^2 > 0,8$, tudíž je zkouška MSCR spolehlivá pro odhad chování konstrukce vozovky při vysokých teplotách ale pouze z hlediska asfaltového pojiva a nezohledňují vliv kameniva.

Závěrem studie je, že polymerem modifikované asfalty vykazují lepší vlastnosti při vysokých teplotách ve srovnání s nemodifikovanými asfalty. Daleko nejlepší vlastnosti mají asfalty vysoce modifikované. Hodnoty zjištěné ze zkoušek MSCR a vyjíždění kolejí prováděných za různých teplot ukázaly, že extrémně vysoké teploty, kterým jsou v nedávné době konstrukce asfaltových vozovek vystaveny, mohou podstatně zvýšit tvorbu kolejí. Tyto výsledky mohou pomoci při návrhu nových silnic tak, aby byla záruka nevyjíždění kolejí [1].

Dále se tímto problémem zabývala Ing. Lucie Bambulová ve své bakalářské práci na téma Tvorba trvalých deformací u asfaltových směsí [18]. Tato práce se zabývala popisem vlastností asfaltových pojiv po zestárnutí ve vztahu k tvorbě trvalých deformací. Bylo použito patnácti druhů asfaltových pojiv a na základě výsledných hodnot empirických zkoušek penetrace jehlou, bodu měknutí a zkoušky MSCR se vyhotovily dvě desky, na kterých byla provedena zkouška pojezdu kolem.

Zvolená metoda pro stárnutí asfaltových pojiv byla Rolling Film Oven Test (RTFOT), ve volném překladu znamená tepelnou stálost v tenké pohybující se vrstvě. Provádí se dle normy ČSN EN 12607-1. Tato metoda simuluje stárnutí pojiva, které probíhá na obalovně během obalování kameniva a následné pokládce směsi vlivem působení kyslíku, UV záření a vysoké teploty, tudíž je vhodná k popisu chování asfaltu v asfaltové směsi během životnosti konstrukce. Vyhodnocení zkoušky probíhá pomocí úbytku hmotnosti a změny vlastností před a po stárnutí, které se měřily zkouškami penetrace jehlou, bodem měknutí, dynamické viskozity a MSCR.

Dle porovnání výsledků jednotlivých zkoušek před a po stárnutí se vybrala dvě pojiva na základě výsledků zkoušky MSCR a to Orlen 50/70 (Borohrádek), které sice nevykazovalo nejlepší výsledky, ale bylo nejbližší vzorku, které jich dosáhlo,

ale bohužel ho nebylo dostatečné množství pro výrobu desek asfaltové pojivo a očekávala se od něj vyšší odolnost vůči trvalým deformacím ze zkoušky vyjíždění kolejí a Total 50/70, které vykazovalo výsledky nejhorsí, tudíž by měl mít nižší odolnost vůči trvalým deformacím. Z takto vybraných pojiv byla vyrobena Masrhallova tělesa, na kterých byla zjištěná objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost a z nich určena mezerovitost, která se při prvním návrhu nevyhověla, po úpravě křivky zrnitosti a změně gradace vyhověla normovým požadavkům a byla 3,4 %.

Po zkoušce pojezdem kolem vyšly opačné výsledky než ze zkoušky MSCR po RTFOT a tedy u vzorku Total 50/70 vyšla hloubka koleje menší (1,08 mm), než u vzorku Orlen 50/70 s větší hloubkou vyjeté koleje (1,26 mm.)

Na závěr byly provedeny korelace, nejdříve výsledků zkoušek bodu měknutí a MSCR, obou zestárlých po metodě RTFOT. Při porovnání parametrů $J_{nr;0,1kPa}$, $J_{nr;3,2kPa}$, $J_{nr;diff}$, $R_{0,1kPa}$, $R_{3,2kPa}$ a R_{diff} a bodu měknutí vyšel nejvyšší korelační součinitel 0,481 s R_{diff} , tudíž na sobě zkoušky nebyly závislé. Jelikož u zkoušky pojezdu kolem vyšly opačné výsledky než u zkoušky MSCR, zkoušky měly nízký korelační součinitel a závěrem na sobě tedy nejsou závislé. Toto ale mohlo být způsobeno nepřesností měření u asfaltové směsi a tedy k potvrzení nebo vyvrácení této teorie by bylo potřeba provést více měření [18].

2.1 Asfaltová pojiva

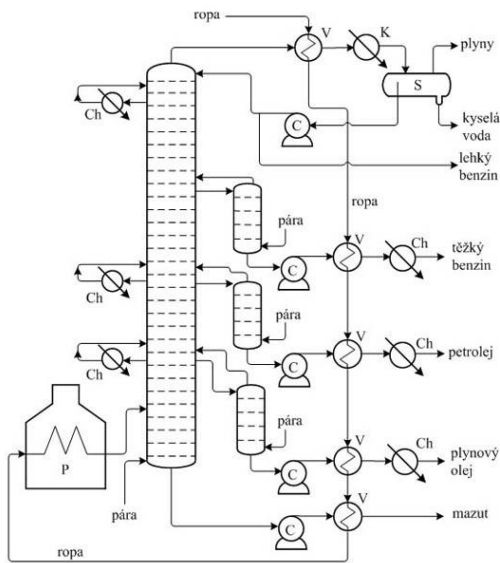
Asfaltové pojivo je koloidní směs vysoce molekulárních uhlovodíků se zastoupením kolem tisíce sloučenin. Tyto sloučeniny jsou běžně rozděleny na tekuté složky – maltény (pryskyřice, oleje) a částice pevné – asfaltény. Nejběžnější dělení asfaltů je dle původu – přírodní a ropné [2].

2.1.1 Výroba asfaltů

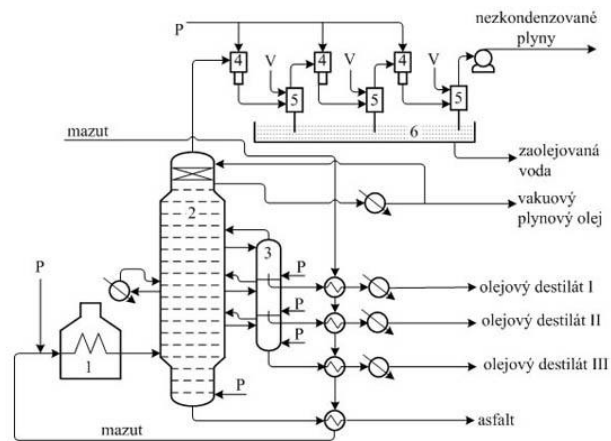
Přírodní asfalt pochází zejména z jezera Trinidad v Karibském moři o ploše 35 ha a hloubce 90 m. Pro získání asfaltu je potřeba jej zahřát na 160 °C a pomocí sít odstranit mechanické nečistoty. Asfalt získaný z tohoto jezera je velmi tvrdý. Dalším velkým zdrojem přírodního asfaltu je horninové ložisko v Albánii v regionu Selenica, kde se jej nalézá přibližně 520 tisíc tun [3], [4].

Ropný asfalt je vedlejší produkt destilace ropy. Z odsolené ropy se v atmosférické destilační koloně vyhání lehčí podíly (plyny, kyselá voda, lehký a těžký benzín, petrolej, plynový olej) a zbytkem je mazut. Ten se poté vede do vakuové kolony, kde

dochází k oddělení nezkondenzovaných plynů, zaolejované vody, vakuového plynového oleje a olejových destilátů a jeho zbytkem je asfalt [5], [6].



Obrázek 1 - Vakuová kolona



Obrázek 2 - Atmosférická kolona

Rozlišujeme asfalty:

- **destilační** – použitelné v silničním stavitelství po destilaci;
- **polofoukané** – vznikají umělým stárnutím, oxidací vakuového zbytku destilačních asfaltů;
- **foukané** – vznikají umělým stárnutím, oxidací destilačních asfaltů ke vzniku vysoce viskózních asfaltů do izolací proti vodě a vlhkosti;
- **modifikované** – destilační nebo polofoukané asfalty s aditivy do vysoce namáhaných asfaltových směsí nebo zálivek.

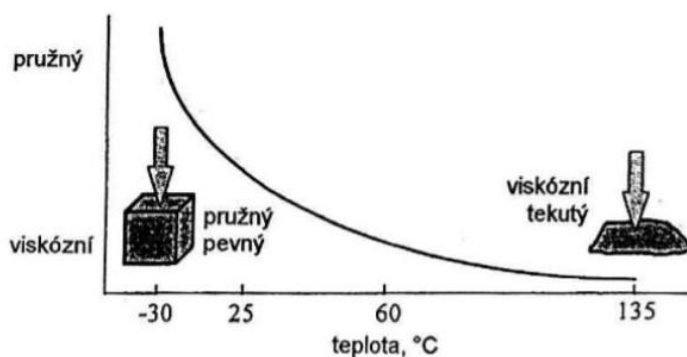
Běžné silniční asfalty nestačí na zvyšující se zatížení a je tedy potřeba je modifikovat aditivami. Pro modifikace se nejčastěji používají termoplastické polymery, které se po zahřání stanou reversibilně plastickými a po jejich vmíchání se směs stane vysoce viskózní.

Tyto polymery lze dále dělit na elastomery a plastomery, dále je možno použít např. pryžový granulát nebo latexy, přičemž v ČR mají největší zastoupení elastomery. Modifikátory zvýší bod měknutí a zároveň mírně sníží penetraci, tudíž je asfalt vůči trvalým deformacím odolnější. Vlastnosti modifikovaných asfaltů jsou ovlivněny výchozím pojivem, jeho množstvím a také druhem a množstvím modifikátoru [3].

2.1.2 Chování asfaltu v závislosti na teplotě

Asfalt je termoplastický, viskoelastický materiál, tudíž jeho vlastnosti a chování jsou závislé na teplotě. Při nízkých teplotách nebo velké rychlosti nákladních automobilů pojíždějících asfaltovou směs je asfalt pružný a tuhý. Do překročení meze únosnosti se asfalt vrací do své původní polohy, po jejímž překročení dojde k jeho porušení a vniku smršťovacích trhlin.

Naopak při působení vysokých teplot ale i vlivem nízké rychlosti těžkých nákladních vozidel se asfalt chová jako newtonovská viskózní kapalina a vyvozené triaxální napětí ve vrstvách může způsobit deformace kostry směsi [3],[7].



Obrázek 3 - Visko-elastické chování asfaltu

2.1.3 Trvalé deformace

Trvalé deformace vznikají kumulací nepružných přetvoření. V ČR vznikají nejvíce při teplotách nad 60 °C a na jejich vývoj má dále vliv:

- nízká rychlost nebo stání;
- soustředěné zatížení v jízdních stopách;
- velký počet zatížení.

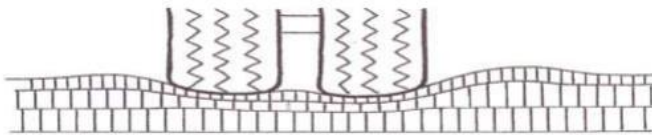
Dělení trvalých deformací z hlediska druhu zatížení:

- prohlubně v místech stání – autobusová zastávka, parkoviště;
- opakované prohlubně v podélném směru (roleta) po celé šířce jízdního pruhu z důvodu stání osobních vozidel – světelně řízená křižovatka;
- vyjeté koleje v místě jízdních stop těžkých nákladních vozidel;
- nepravidelné nerovnosti vlivem vodorovných sil v obloucích, brzděním nebo rozjížděním
- náhodné nerovnosti vlivem rozdílného složení směsi na dané trase – vyšší obsah asfaltu nebo vlivem nesprávné volby směsi ve vysprávce [8].

Nejvíce rozšířenou poruchou asfaltových vozovek v ČR jsou vyjeté koleje, vznikající z důvodu měknutí asfaltu a vlivem tepelné roztažnosti asfalt roztlačuje zrna kameniva od sebe. Vyjeté koleje mohou ohrozit bezpečnost silničního provozu z důvodu vzniku aquaplaningu, proto je potřeba zvolit asfaltovou směs tak, aby hloubka koleje byla co nejmenší, jelikož jejímu vzniku nedokážeme zabránit úplně.

Správně navržená asfaltová směs sestává z vhodně zvoleného typu kameniva a jeho čáry zrnitosti, zvolené gradace asfaltového pojiva odpovídající očekávaným teplotám s co největším oborem použitelnosti a v neposlední řadě určit obsah asfaltu tak, aby nebyl zbytečně vysoký a asfaltová směs měla optimální mezerovitost pro dané použití.

Během prvního teplého období probíhá nárůst hloubky koleje nejvíce, poté se výrazně zpomalí a většinou na konci životnosti nepřesáhne 20 mm. Také záleží, která vrstva se navrhuje, jelikož nejvyšší teplotu má vrstva obrusná a s hloubkou se snižuje, tudíž pro ložní a podkladní vrstvy mají příznivější podmínky [9].



Obrázek 4 - Vyjeté koleje

2.1.4 MSCR

Zkouška Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) je popsána v normě ČSN EN 16659. Tato norma popisuje stanovení procentuálního zotavení a nevratné smykové poddajnosti asfaltů a asfaltových pojiv. Provádí se v dynamickém smykovém reometru (DSR) při nastavení na měření smykového dotvarování v oblasti pomalého toku (creep) při dané teplotě.

Tato metoda byla vyvinuta v USA (popsána normou AASHTO T 350-14) a nahradila zkoušky na dynamickém smykovém reometru (DSR), na němž se zjišťovaly pomocí opakované oscilace parametry komplexní smykový modul G^* a jemu odpovídající fázový úhel posunutí δ u originálních vzorků asfaltu a vzorků zestárlých po RTFOT. Dřívější klasifikační hodnocení asfaltových pojiv v USA Performance Grade (PG), které zohledňuje výběr vhodného asfaltu pro klimatické podmínky a dopravní charakteristiky namísto penetrace a viskozity, bylo založeno na poměru $G^*/\sin \delta$. Jelikož byly zjištěné korelace mezi výsledky zkoušek vyjíždění kolejí a parametrem $G^*/\sin \delta$ velmi nízké, hlavně u polymerem modifikovaných asfaltů, bylo

potřeba vyvinutí nové metody. Tou metodou je MSCR, která vykazuje dobrou nebo dokonce velmi dobrou korelaci se zkouškou vyjíždění kolejí. Napětí, při kterém se MSCR zkouší, jsou 0,1 kPa a 3,2 kPa. Jelikož je potřeba zjistit při jakém zatížení dochází k přechodu z lineárně viskoelastické oblasti do oblasti nelineární, kde dochází k vývoji plastických deformací a například u modifikovaných asfaltů se tato oblast nachází při vyšším napětí než 3,2 kPa, došlo v rámci této práce k přidání dalšího zkušebního napětí 10 kPa. Toto napětí může přidat vyšší přesnost výsledků, a přestože se přidá dalších 10 cyklů, sama zkouška je delší pouze o 100 s.

Teplota zkoušky by se měla volit 50 °C z důvodu stejné zkušební teploty u vyjíždění kolejí. Jsou zde ale názory odborníků, že teplota by měla být vyšší, jelikož pro posouzení náchylnosti k tvorbě trvalých deformací není přesvědčivá. Z tohoto důvodu probíhá diskuze o tom, že by teplota pro zkoušky zjištění odolnosti proti tvorbě trvalých deformací měla být 60 °C [1], [10].

3 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem mé práce je porovnat výsledky zkoušky MSCR asfaltových pojiv různé gradace a stupně modifikace s odpovídajícími výsledky vyjíždění kolejí asfaltových směsí, které budou obsahovat stejná pojiva. Pro zkoušky asfaltových pojiv a směsí bude využit jeden silniční asfalt a tři polymerem modifikované asfalty. Práce bude složena ze dvou hlavních částí: teoretické a praktické.

V teoretické části bude cílem popsat použité materiály a jejich vlastnosti. Poté popsat jednotlivé zkoušky a jejich postupy.

V praktické části bude cílem porovnat výsledky trvalých deformací asfaltů a asfaltových směsí obsahujících zvolené druhy asfaltů různé gradace a stupně modifikace při stejné teplotě 60 °C. Použité asfalty byly: silniční asfalt gradace 50/70, polymerem modifikovaný asfalt 45/80-55, polymerem modifikovaný asfalt 25/55-65 a polymerem modifikovaný asfalt 45/80-65. Na těchto asfaltech budou dále provedeny zkoušky penetrace jehlou dle ČSN EN 1426, stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička dle ČSN EN 1427a zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery) v dynamickém smykovém reometru dle ČSN EN 16659. Jako asfaltová směs pro porovnání výsledků bude zvolen asfaltový beton pro obrusné vrstvy ACO 11+, navržený dle ČSN EN 13108-1 [11], [12], [13], [14].

4 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

V této části budou popsány všechny použité zkoušky, jejich principy, postupy a zkušební metody, které byly potřebné ke zpracování a zhodnocení praktické části.

4.1 Penetrace jehlou

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. Její podstatou je stanovení hloubky průniku hrotu jehly do vzorku asfaltu s přesností na 0,1 mm.

4.1.1 Postup zkoušky

Nejprve je potřeba nalít vzorek do nádoby, hmotnost by měl mít minimálně 100 g. Následně se vzorek nechá zchladnout na laboratorní teplotu a poté se temperuje na teplotu 25 °C, která je zjišťována teploměrem, ve vodní lázni. Po vytemperování se usadí do penetrometru, který se vynuluje a nastaví se doba zatížení. Penetrační jehla se očistí toluenem a utěrkou a osadí a nastaví tak, aby její hrot byl těsně u povrchu vzorku



Obrázek 5 - Penetrometr

asfaltového pojiva. Poté je při teplotě 25 °C jehla zatížena závažím o hmotnosti 100 g po dobu 5 s a nechá se volně vpenetrovat se do vzorku asfaltového pojiva. Je potřeba získat alespoň 3 platná měření a přitom dodržet vzdálenosti vpichů 10 mm od sebe i od okraje nádoby.

4.1.2 Vyhodnocení zkoušky

Penetrace se určí jako aritmetický průměr platných stanovení s přesností na 0,1 mm zaokrouhlených na nejbližší celé číslo, přičemž 1 mm = 10 penetračních jednotek.

Platné stanovení se určí podle tabulky 1 [2], [11], [15].

Tabulka 1 - Hodnoty pro platné stanovení penetrace jehlou

Penetrace	Do 49	50 až 149	150 až 249	250 a více
Max. rozdíl mezi stanoveními	2	4	6	8

4.2 Bod měknutí metodou kroužek a kulička

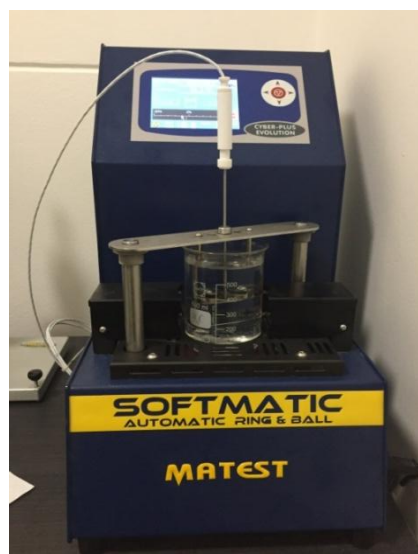
Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička. Její podstatou je stanovit teplotu, při které dojde k protažení vrstvy asfaltu, jež má tloušťku 6,4 mm a je zatížena ocelovou

kuličkou, na délku 25 mm. Jedná se tedy o určení horní meze oboru plasticity asfaltového pojiva ve °C.

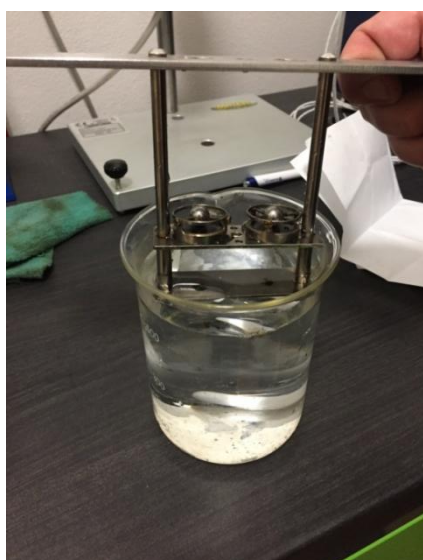
4.2.1 Postup zkoušky

Nejprve se musí zkoušený asfalt odebrat a nahřát. Nahřát se musí i oba mosazné kroužky o vnitřním průměru $15,9 \pm 0,1$ mm, které se poté položí na odlévací destičku, což je plech s rovným a hladkým povrchem a ohnutými hranami směrem dolů o rozměrech cca $50 \times 75 \times 2$ mm potřený glycerinem.

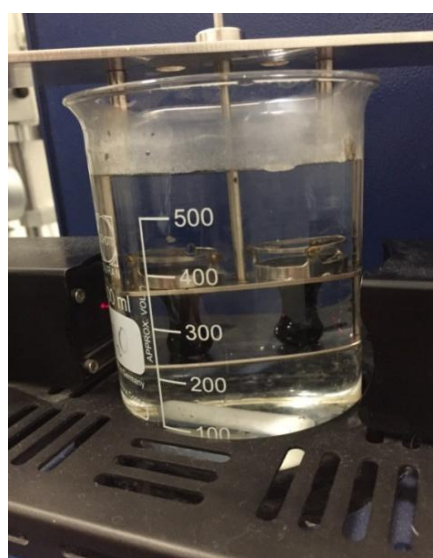
Nahřátý asfalt se nalije do kroužků s mírným přebytkem a dá se vychladnout na 30 minut a poté se nadbytečné pojivo seřízne. Následuje sestavení přístroje a teploty kroužků s asfaltem ve vodní lázni sestávající ze skleněné kádinky o vnitřním průměru alespoň 85 mm a výškou alespoň 120 mm a je možno ji zahřívát, naplněna je odvodněnou vodou při teplotě 5 °C. Do vodní lázně se taktéž umístí míchadlo, které slouží k rovnoměrnému rozdělení tepla ve vodní lázni, je magnetické nebo vrtulové s topnou plotýnkou a obalené míchací tyčinkou o délce 40 mm a průměru 8 mm, o 100 ot/min. Na netemperované kroužky s asfaltem se umístí do středících prstenců korozivzdorné kuličky, o průměru $9,5 \pm 0,05$ mm a hmotnosti $3,5 \pm 0,05$ g, vloží se teploměr obsahující senzor a odečítací jednotku a začne se s ohřevem vody při rychlosti 5°C/min. Při propadu kuliček na 25 mm přístroj zaznamená teplotu pro obě kuličky zvlášť.



Obrázek 6 - Zkušební zařízení pro bod měknutí kroužek a kulička



Obrázek 7 - Přístroj pro zkoušku bodu měknutí kroužek a kulička



Obrázek 8 - Ukončení zkoušky bodu měknutí kroužek a kulička

4.2.2 Vyhodnocení zkoušky

Výsledkem měření je průměr z naměřených teplot ve °C zaokrouhlený na 0,2 °C.

Nutnost opakování zkoušky při rozdílu teplot:

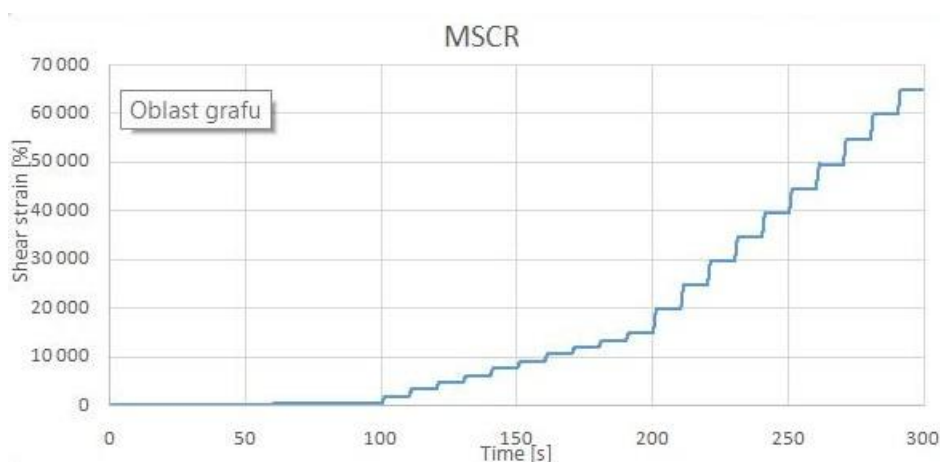
- větším jak 1 °C u nemodifikovaných asfaltů;
- větším jak 2°C u modifikovaných asfaltů;
- nebo při porušení vrstvy [2], [12], [16].

4.3 MSCR

Zkouška Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) je popsána v normě ČSN EN 16659. Tato norma popisuje stanovení procentuálního zotavení a nevratné smykové poddajnosti asfaltů a asfaltových pojiv. Provádí se v dynamickém smykovém reometru (DSR) při nastavení na měření smykového dotvarování v oblasti pomalého toku (creep) při dané teplotě.

4.3.1 Podstata metody

Zkouška probíhá při třech různých hodnotách smykového napětí a každé z nich sestává z deseti cyklů s fází dotvarování a zotavení. Jeden cyklus probíhá tak, že je vzorek zatížen 1 sekundu a poté 9 sekund odlehčen. Během první části se vzorek zatěžuje napětím 0,1 kPa, během druhé 3,2 kPa a během třetí 10kPa. Zkoušky mohou být prováděny při teplotách 50, 60, 70 a 80 °C, přičemž se mohou použít i jiné teploty, pokud zkouška slouží pro srovnávací účely.



Obrázek 9 - Průběh zkoušky MSCR



Obrázek 10 - Dynamický smykový reometr

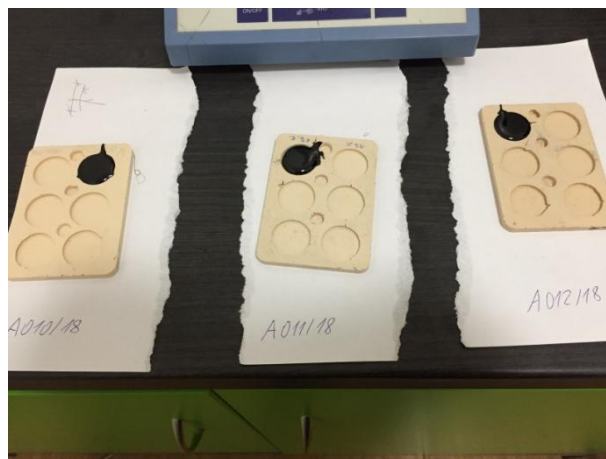
4.3.2 Příprava reometru

Nastavení reometru pro použití geometrie typu deska-deska o rozměrech 25 mm je mezera 1 mm. Než se do reometru vloží zkušební vzorek, je potřeba měřící destičky co nejopatrněji očistit rozpouštědlem. Je také potřeba kalibrovat reometr a systém regulující teplotu měřidly a také v pravidelných intervalech ověřovat

přesnost regulace teploty certifikovaným zařízením

4.3.3 Příprava vzorku

Asfaltové pojivo se nechá temperovat v laboratorní sušárně na teplotu 85 ± 5 °C nad bodem měknutí nebo na teplotu 180 °C, a to na tu z nich, která je nižší. Pro asfaltová pojiva polymerem modifikovaná je tato teplota mezi 180 až 200 °C.



Obrázek 11 - Připravené zkušební vzorky

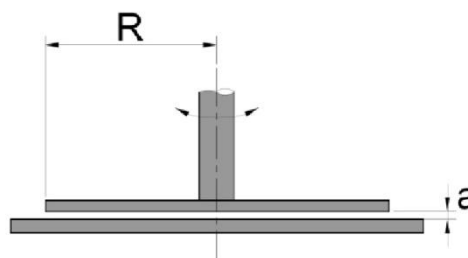
4.3.4 Postup zkoušky

- Umístění vzorku do reometru

Po odlití vzorků do forem, které jsou vyrobené ze silikonu nebo obdobného materiálu nevykazujícího přilnavost ke vzorku, se mohou dát do ledničky a temperovat na 5 °C po dobu nejvýše 30 minut. Po jejich vyjmutí z ledničky následuje umístění vzorků z forem do reometru, což musí proběhnout ihned. Přístroj obsahuje buď integrální systém regulace teploty, nebo přídavnou externí teplotní jednotku, které řídí teplotu mezi 5 a 85 °C na $\pm 0,1$ °C po celou dobu zkoušky. Měřící destičky jsou přehřívány na teplotu zkoušky.

- Nastavení mezery

Mezera se nastavuje mezi 1,025 mm až 1,050 mm a při teplotě zkoušky se speciálním nástrojem na ořezávání odstraní přebytečné pojivo, které bylo vytlačeno.

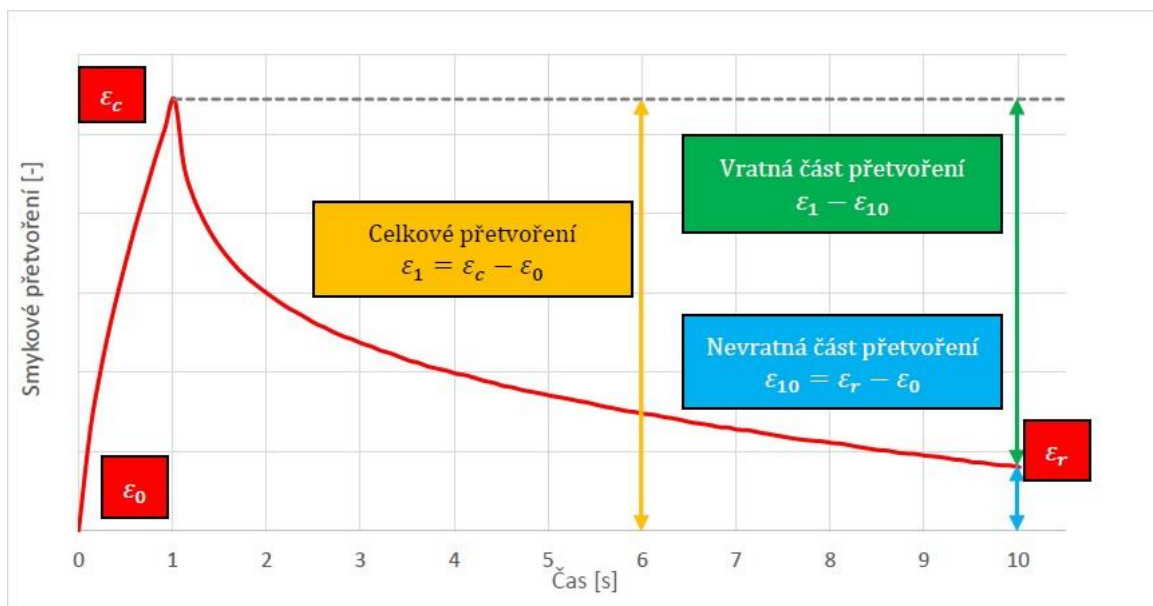


Obrázek 12 - Schéma nastavené mezery typu deska-deska při MSCR

Jakmile je pojivo oříznuto, destičky se stačí na mezeru $1 \pm 0,01$ mm. Pokud vzorek není po celé ploše destičky, je potřeba jej odstranit a opakovat postup. Nemůže-li být vzorek více stlačen na danou velikost mezery, je potřeba zahřát destičky na vyšší teplotu.

- Měření

Destičky reometru jsou nahřáty na zvolenou teplotu s přesností na $0,1$ °C, a aby bylo dosaženo teplotní rovnováhy, vzorek je v nich ponechán alespoň 15 minut. Před počátkem zkoušky je potřeba zajistit nulové přetvoření vzorku. Průběh zkoušky je zaznamenáván každou 0,1 sekundu. Poté dochází k zatížení vzorku konstantním smykovým napětím $0,1$ kPa na 1 sekundu, což je fáze dotvarování a poté při nulovém smykovém napětí po dobu 9 sekund probíhá fáze zotavení.



Obrázek 13 - Průběh přetvoření

4.3.5 Vyhodnocení zkoušky

Data zaznamenaná programem rSpace jsou převedena do MS Excel, kde se vyhodnotí a vykreslí grafy průběhů napětí.

Pomocí výsledků ze zkoušky MSCR se vypočítávají jednotlivé hodnoty:

- **Průměrné elastické zotavení R_N :** určuje se pro všechny tři zatěžovací napětí (0,1 kPa; 3,2 kPa a 10 kPa) po deseti cyklech. N značí zatěžovací napětí, pro které se počítá. Popisuje, jak moc se asfaltové pojivo vrátí do původního stavu. Čím je vyšší jeho hodnota, tím je jeho elastické zotavení lepší a tedy schopnost odolávat vůči trvalým deformacím vyšší. Zaokrouhlení je na 0,1 %. Průměrné elastické zotavení se určí dle následujících vzorců:

$$R_N(0,1kPa, N) = \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}}{\varepsilon_1} \right) \times 100$$

$$R_N(3,2kPa, N) = \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}}{\varepsilon_1} \right) \times 100$$

$$R_N(10kPa, N) = \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}}{\varepsilon_1} \right) \times 100$$

kde:

R_N je elastické zotavení v %;

ε_1 je celkové přetvoření v %;

ε_{10} je nevratná část přetvoření v %.

$$R_{0,1kPa} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (R_N(0,1kPa, N)) \times 100$$

$$R_{3,2kPa} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (R_N(3,2kPa, N)) \times 100$$

$$R_{10kPa} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (R_N(10kPa, N)) \times 100$$

kde:

$R_{0,1(3,2;10)kPa}$ je průměrné elastické zotavení v %.

- **Rozdíl v průměrném zotavení R_{diff} :** Je počítán v procentech a udává rozdíl mezi hodnotami, které byly naměřeny při jednotlivých zatěžovacích napětích (0,1 kPa; 3,2 kPa a 10 kPa). Zaokrouhlení je na 0,1 %. Rozdíl v průměrném zotavení je stanoven následujícími vzorci:

$$R_{diff;3,2-0,1kPa} = \frac{R_{0,1kPa} - R_{3,2kPa}}{R_{0,1kPa}} \times 100[\%]$$

$$R_{diff;10-0,1kPa} = \frac{R_{0,1kPa} - R_{10kPa}}{R_{0,1kPa}} \times 100[\%]$$

$$R_{diff;10-3,2kPa} = \frac{R_{3,2kPa} - R_{10kPa}}{R_{3,2kPa}} \times 100[\%]$$

kde:

R_{diff} je rozdíl v průměrném elastickém zotavení v %.

- **Průměrná nevratná smyková poddajnost J_{nr} :** je počítána pro všechna tři zatěžovací napětí (0,1 kPa; 3,2 kPa a 10 kPa) po deseti cyklech. Udává odolnost asfaltového pojiva vůči trvalým deformacím, čím je nižší jeho hodnota, tím je odolnost vyšší. Její velikost závisí na velikosti smykového napětí a teplotě. Hodnota J_{nr} je konstantní do doby, než překročí limitní napětí a tedy přejde do nelineární viskoelastické oblasti. To doprovází strmý nárůst její velikosti. Zaokrouhlení probíhá na tři platné číslice. Jednotkou jsou kPa^{-1} . Průměrná nevratná smyková poddajnost se vypočítá dle následujících vzorců:

$$J_{nr}(0,1kPa, N) = \left(\frac{\varepsilon_{10}}{0,1}\right)$$

$$J_{nr}(3,2kPa, N) = \left(\frac{\varepsilon_{10}}{3,2}\right)$$

$$J_{nr}(10kPa, N) = \left(\frac{\varepsilon_{10}}{10}\right)$$

kde:

J_{nr} je nevratná smyková poddajnost v kPa^{-1} ;

ε_{10} je nevratná část přetvoření v %.

$$J_{nr;0,1kPa} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (J_{nr}(0,1kPa, N))$$

$$J_{nr;3,2kPa} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (J_{nr}(3,2kPa, N))$$

$$J_{nr;10kPa} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} (J_{nr}(10kPa, N))$$

kde:

$J_{nr;0,1(3,2;10)kPa}$ je průměrná nevratná smyková poddajnost v kPa^{-1} .

- **Rozdíl nevratné smykové poddajnosti $J_{nr,diff}$:** Je počítán v procentech a udává rozdíl mezi hodnotami, které byly naměřeny při jednotlivých zatěžovacích napětích (0,1 kPa; 3,2 kPa a 10 kPa). Zaokrouhlení je na 0,1 %. Rozdíl nevratné smykové poddajnosti se určí následujícími vzorci:

$$J_{nr,diff;3,2-0,1kPa} = \frac{J_{nr;3,2kPa} - J_{nr;0,1kPa}}{J_{nr;0,1kPa}} \times 100$$

$$J_{nr,diff;10-0,1kPa} = \frac{J_{nr;10kPa} - J_{nr;0,1kPa}}{J_{nr;0,1kPa}} \times 100$$

$$J_{nr,diff;10-3,2kPa} = \frac{J_{nr;10kPa} - J_{nr;3,2kPa}}{J_{nr;3,2kPa}} \times 100$$

kde:

$J_{nr,diff;0,1(3,2;10)kPa}$ je rozdíl nevratné smykové poddajnosti v % [10], [13], [17].

4.4 Síťový rozbor

Síťový rozbor je dán normou ČSN EN 993-1. Její podstatou je roztržení materiálu do frakcí díky sadě sít se sestupnou velikostí ok otvorů. Počet a typ otvorů sít je zvolen dle druhu vzorku a požadavků na přesnost.

4.4.1 Postup síťového rozboru

Nejprve se zkušební navážka vysuší v sušárně při teplotě 110 ± 5 °C na ustálenou hmotnost, což znamená, že se navážka zvaží, poté se opět dá na 15 minut do sušárny, následně se opět zvaží a pokud rozdíl hmotností je menší jako 0,1 %, hmotnost je ustálena. Vychladlý materiál se zvaží na laboratorních váhách s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti zkušební navážky a zapíše se hmotnost (M_I). Poté je provedeno tzv. praní vzorku, při kterém se materiál promíchává s vodou



Obrázek 14 - Praní vzorku

tak, aby nedošlo k oddělení jemných částic menších než 63 μm. Navážka se pere, dokud přes síto 63 μm neodtéká pouze čirá voda. Přes síto 63 μm se z důvodu jeho ochrany používá síto o větším otvoru ok, například 1 mm. Zůstatek na síti 63 μm se znovu vysuší a zváží a zapíše se hmotnost (M_2).

Vysušená navážka se nasype na sadu sít, kde jsou síta poskládána sestupně podle velikosti otvoru ok. Vespod je dno sady sít, na které propadávají částice menší než 63 μm. Na síta se položí pevně lícující víko.

Poté se nastaví na třesacím zařízení intenzita vibrace, čímž se zařízení zapne a zkouška je ukončena po několika minutách. Síta jsou postupně odebírána, pomocí kartáčů a štětců přesypána do misek a zapisuje se hmotnost zůstatku na každém z nich (R_1, R_2, R_3, \dots). I přes praní vzorku se nejjemnější částice nevyplaví všechny, tudíž jsou zapsány i hmotnosti propadu částic přes síto 63 μm (P).

Ze zapsaných hmotností zůstatků na jednotlivých sítích vyjádřených procentuálně k hmotnosti původní navážky (M_1) se vypočítají propady na jednotlivých sítích a z těchto hodnot se vynese tzv. křivka zrnitosti. Křivka zrnitosti je součtová čára, jejíž každý bod udává, kolik procent z celkové hmotnosti vzorku činí hmotnost všech zrn menších než určitý průměr zrna d v milimetrech. Výpočet procenta jemných částic propadlých sítím 63 μm je dán vztahem:

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

kde:

M_1 je hmotnost vysušené zkušební navážky, v kg;

M_2 je hmotnost vysušeného zůstatku na síti 0,063 mm, v kg;

P je hmotnost propadu jemných částic na dně, v kg [18], [19], [20].



Obrázek 15 - Třesací zařízení pro síťový rozbor

4.5 Laboratorní výroba směsi

Výroba asfaltové směsi v laboratoři se řídí normou ČSN EN 12697-35+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní

výroba směsi. Tato norma obsahuje postup jak pro ruční tak strojní míchání směsi v laboratoři. Ruční míchání bylo použito pro výrobu Marshallových těles a strojní míchání pro výrobu desek.

4.5.1 Postup výroby směsi ručním mícháním

Nejprve bylo potřeba vysušit jednotlivé frakce kameniva 0/4; 4/8 a 8/11 (Luleč) a filer (Mokrá) v laboratorní sušárně na teplotu 110 ± 5 °C. To, jestli kamenivo je vysušené se zjistí tak, když při dvou po sobě následujících váženích po nejméně jedné hodině se jejich hmotnosti neliší o více než 0,1 % hmotnosti zkušební navážky.

Poté se vysušené a vychladlé frakce kameniva a filer za studena naváží na laboratorní váze dle návrhu s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti navážky. Následně se začne nahřívat kamenivo a asfalt umístěný v plechovce (silniční 50/70 a tři polymerem modifikované 45/80-55; 25/55-65; 45/80-65) na požadovanou teplotu pro mísení 170 °C. Současně se také nahřeje špachtle.

Po nahřátí všech surovin a pomůcek na požadované teploty se nádoba s kamenivem umístí na laboratorní váhu, kamenivo s filerem se promíchá a přilije se promíchaný silniční asfalt resp. polymerem modifikovaný asfalt, který se dávkuje s přesností ± 1 % hmotnosti dávkovaného pojiva. Poté se směs míchá na vařiči, dokud není kamenivo dostatečně obaleno pojivem, což se vizuálně posoudí. Maximální doba míchání je 5 minut. Vyrobená směs se následně použije pro výrobu Marshallových zkušebních těles.

4.5.2 Postup výroby směsi strojním mícháním

Nejprve bylo potřeba vysušit jednotlivé frakce kameniva 0/4; 4/8 a 8/11 (Luleč) a filer (Mokrá) v laboratorní sušárně na teplotu 110 ± 5 °C. To, jestli kamenivo je vysušené se zjistí tak, když při dvou po sobě následujících váženích po nejméně jedné hodině se jejich hmotnosti neliší o více než 0,1 % hmotnosti zkušební navážky.

Poté se vysušené a vychladlé frakce kameniva a filer za studena naváží na laboratorní váze dle návrhu s přesností $\pm 0,1$ % hmotnosti navážky. Následně se začne nahřívat kamenivo i asfalt umístěný v plechovce (silniční 50/70 a tři polymerem modifikované 45/80-55; 25/55-65; 45/80-65) na požadovanou teplotu pro mísení, 170 °C. Současně se také nahřeje špachtle a nádoba laboratorní míchačky.

Po nahřátí všech surovin a pomůcek na požadované teploty se nádoba míchačky umístí na laboratorní váhu, vsype se kamenivo s filerem, které se promíchá a přilije se

promíchaný silniční asfalt resp. polymerem modifikovaný asfalt, který se dávkuje s přesností $\pm 1\%$ hmotnosti dávkovaného pojiva.

Poté se navážený asfalt přidá do míchačky. Směs se míchá, dokud není kamenivo dostatečně obaleno pojivem, což se vizuálně posoudí. Vyrobená směs se následně použije pro výrobu desek [20], [21].



Obrázek 16 - Míhací zařízení pro strojní míchání směsi

4.6 Hutnění zkušebních těles rázovým zhutňovačem

Tato metoda je se řídí normou ČSN EN 12697-30+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Pro přípravu zkušebních těles se asfaltová směs nahřátá na teplotu $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ nasype do hutnicí formy, kde se zhutní v rázovém zhutňovači pomocí hutnicího berana pěchu, který na směs dopadá z předepsané výšky předepsaným počtem úderů (2 x 50 úderů). Po zhutnění se dá těleso vychladnout na laboratorní teplotu a poté se vysune z formy.

4.6.1 Příprava před hutněním

Nejprve je potřeba určit množství směsi na výrobu jednoho zkušebního tělesa. Toto zkušební těleso má tvar válce kruhového průřezu o průměru $(101,5 \pm 0,1)$ mm a výšku $(63,5 \pm 2,5)$ mm. Navážka má hmotnost mezi 1050 g a 1400 g. Pro tuto navážku se provede tzv. pokusné hutnění. Pokud má těleso po tomto hutnění předepsanou výšku $(63,5 \pm 2,5)$ mm, hmotnost je ponechána a vyrábí se další tělesa. V případě rozdílu mezi předepsanou a změřenou výškou po pokusném hutnění se hmotnost navážky upraví tak, aby zbylá tělesa měla danou předepsanou výšku.

Tyto navážky se ohřejí v sušárně na požadovanou teplotu hutnění po dobu 3 h. Na tuto teplotu se nahřeje i hutnicí forma a podložka bicí hlavy hutnicího pěchu a před provedením hutnění první navážky je potřeba nahřát i podložku formy a bicí hlavy. Teploty jsou kontrolovány teploměrem.

4.6.2 Postup hutnění

Po nahřátí všech materiálů a pomůcek se na podložku dá kolečko ze separačního papíru. Ohřátá směs se následně přes plechovou násypku plní do formy pro hutnění po třetinách a po každé třetině se srovná a jemně zhutní špachtlí. Musí se dbát na to, aby nedocházelo k segregaci směsi. Na naplněnou a urovnanou směs se opět umístí kolečko ze separačního papíru. Poté se nasadí na formu nástavec pro hutnění a vše se umístí do rázového zhutňovače. Zkušební těleso se ihned hutní 50 údery z jedné strany, po dokončení je forma otočena a těleso je hutněno 50 údery i z druhé strany. Hutnicí beran pěchu dopadá na formu z výšky (460 ± 3) mm. Hutnění musí být dokončeno maximálně po 4 minutách. Poté je forma i se zkušebním tělesem vyjmuta ze zhutňovače, sundají se separační papíry z obou stran a těleso se chladí na laboratorní teplotu. Nakonec se zkušební těleso (Marshallovo těleso) vytlačí z formy [20], [22].



Obrázek 17 - Hutnicí zařízení pro výrobu Marshallových těles

4.7 Hutnění desek zhutňovačem desek

Tato metoda je popsána normou ČSN EN 12697-33+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. Její podstatou je zhutňování asfaltové směsi ve formě tvaru rovnoběžnostěnu pomocí zhutňovače desek metodou hutnění ocelovými lamelami.



Obrázek 18 - Chlazení Marshallových těles ve formě



Obrázek 19 - Vytlačená Marshallova tělesa

4.7.1 Příprava před hutněním

Hmotnost navážky na jednu desku se zjistí z rozměrů desky a objemové hmotnosti, která byla zjištěna z Marshallových těles dle následujícího vztahu:

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

kde:

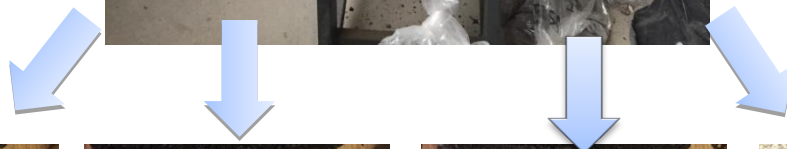
- M je hmotnost potřebné navážky desky asfaltové směsi v kg;
- L je vnitřní délka formy v mm;
- l je vnitřní šířka formy v mm;
- e je tloušťka desky snižená o tloušťku plechu v mm;
- ρ je zhutněná objemová hmotnost zjištěná z Marshallových těles.

Navážka se poté dá do sušárny a nahřeje se na teplotu hutnění 155 °C. Hutnicí forma se následně upne a pomocí separačního prostředku promaže.

4.7.2 Postup hutnění

Jako metoda hutnění byla zvolena metoda s ocelovými lamelami. Po nahřátí navážky v sušárně na teplotu hutnění (155 °C) se asfaltová směs vsype do formy potřené separačním prostředkem nerozpouštějícím asfaltové pojivo (aviváž) přišroubované do stolu, kde se špachtlí rozprostře a podél formy propichuje tak, aby směsí byly rohy dostatečně vyplněny. Na urovnanou směs se položí krycí plech taktéž potřené separačním prostředkem a na něj ocelové lamely. Poté se nechá ocelový válec sjet k povrchu lamel a nastavený na tloušťku desky se zapne. Zhutněná deska se ponechá vychladnout ve formě a po jejím vychladnutí se odepne forma a vyjme se zhutněná deska [20], [23].

Obrázek 20 - Hutnící zařízení pro výrobu zkušebních desek



Obrázek 21 - Zkušební deska s pojivem 50/70



Obrázek 22 - Zkušební deska s pojivem 45/80-55



Obrázek 23 - Zkušební deska s pojivem 25/55-65



Obrázek 24 - Zkušební deska s pojivem 45/80-65

4.8 Stanovení objemové hmotnosti na zkušebních tělesech

Tato metoda je popsána v normě ČSN EN 12697-6+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro provádění asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa. Objemová hmotnost je hmotnost při dané zkušební teplotě, připadající na jednotku objemu zkušební tělesa včetně mezer. Norma uvádí čtyři postupy v závislosti na obsahu a přístupnosti dutin, pro tuto práci byl použit postup b) objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD) (pro tělesa s uzavřeným povrchem).

4.8.1 Postup zkoušky

Nejprve se stanoví hmotnost suchého tělesa (m_1) na laboratorních váhách s přesností $\pm 0,1$ g vhodné k vážení na vzduchu i ve vodě. Poté se stanoví hustota vody (ρ_w) v závislosti na teplotě, která se zjistí teploměrem s přesností $\pm 1,0$ °C. Následně, je těleso ponořeno do vodní lázně udržující teplotu s přesností $\pm 1,0$ °C položené do drátěného košíku, která je temperována na známé teplotě. Těleso je celé ponořeno do ustálení hmotnosti (30 minut) tak, aby z tělesa neodcházely žádné vzduchové bubliny. Tato hmotnost se odečte a zaznamená jako hmotnost tělesa pod vodou (m_2). Dalším krokem je vyjmutí tělesa z vodní lázně a povrchové osušení ručníkem tak, aby se odstranily kapky z povrchu. Ihned po osušení se stanoví hmotnost osušeného nasyceného tělesa (m_3)

4.8.2 Vyhodnocení zkoušky

Objemová hmotnost se vypočte dle následujícího vzorce:

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

kde:

ρ_{bssd} je objemová hmotnost zkušební tělesa (SSD) v kg/m^3 ;

m_1 je hmotnost suchého tělesa v g;

m_2 je hmotnost tělesa ponořeného ve vodní lázni v g;

m_3 je hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově očištěného v g;

ρ_w je hustota vody při zkušební teplotě s přesností na $0,1 \text{ kg/m}^3$ [24].

4.9 Stanovení maximální objemové hmotnosti

Tato metoda je popsána v normě ČSN EN 12697-5+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. Maximální objemová hmotnost je hmotnost při dané zkušební teplotě, která připadá na jednotku objemu asfaltové směsi bez mezer. V normě jsou popsány 3 druhy postupů, pro tuto práci byl použit volumetrický postup.

4.9.1 Postup zkoušky

Aby bylo možné naplnit pyknometr asfaltovou směsí, bylo potřeba vzorek nejdříve zahřát v sušárně na teplotu $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ zjištěnou teploměrem tak, aby změknl a poté se ručně nebo pomocí špachtle rozdobil s tím, aby nejmenší shluk zrn měl maximálně 6 mm. Mezitím se stanoví hmotnost



Obrázek 25 - Pyknometry

prázdného pyknometru s nástavcem (m_1) na laboratorních váhách s přesností nejméně 0,1 g o známém objemu (V_p). Poté se pyknometr naplní zkušebním vzorkem a nechá se temperovat na okolní teplotu. Vytemperovaný pyknometr s nástavcem a vzorkem se opět zváží (m_2). Následuje naplnění odvzdušněnou vodou maximálně 30 mm pod okraj. Pomocí vakua se odstraní zachycený vzduch a poté se nástavec po opatrném naplnění odvzdušněnou vodou nasadí po referenční značku tak, aby do něj nevnikl vzduch. Následuje temperování pyknometru ve vodní lázni o rovnoměrné teplotě $\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ na nejméně 30 a nejvíce 180 minut tak, aby se vyrovnaly teploty v lázni a v pyknometru. Po vytemperování se nalije odvzdušněná voda, která je taktéž temperována ve vodní lázni, až po značku na nástavci. Nakonec se pyknometr z vodní lázně vyjme, osuší a zváží (m_3).

4.9.2 Vyhodnocení zkoušky

Maximální objemová hmotnost je dána následujícím vztahem:

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

kde:

ρ_{bmv} je maximální objemová hmotnost asfaltové směsi v kg/m^3 ;

m_1 je hmotnost prázdného pyknometru včetně nástavce v kg;

m_2 je hmotnost pyknometru včetně nástavce a zkušebního vzorku v kg;

m_3 je hmotnost pyknometru včetně nástavce, zkušebního vzorku a vody v kg;

ρ_w je hustota vody při zkušební teplotě s přesností na $0,1 \text{ kg/m}^3$ [25].

4.10 Stanovení mezerovitosti

Výpočet mezerovitosti asfaltové směsi je popsán v normě ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi za horka – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Mezerovitost je objem mezer zkušebního tělesa vztážený procentuálně k jeho celkovému objemu

4.10.1 Vyhodnocení mezerovitosti

Výpočet mezerovitosti se určí pomocí vztahu:

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

kde:

V_m je mezerovitost zkušebního tělesa s přesností na 0,1 %;

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

ρ_b je objemová hmotnost zkušebního tělesa v kg/m^3 [26].

4.11 Míra zhutnění

Míra zhutnění udává jak dobře je deska zhutněna ve srovnání s Marshallovými tělesy. Její hodnota musí být v rozmezí 99 – 101 %. Stanoví se dle vztahu:

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

kde:

c je míra zhutnění desky v %;

$\rho_{bssd,1}$ je objemová hmotnost desky v kg/m^3 ;

$\rho_{bssd,2}$ je objemová hmotnost Marshallových těles v kg/m^3 [20].

4.12 Zkouška pojíždění kolem

Tato zkouška je popsána normou ČSN EN 12697-22+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška pojíždění kolem. Cílem této zkoušky je se co nejvíce přiblížit skutečnému chování asfaltové směsi ve vozovce a určuje náchylnost směsi k trvalým deformacím vlivem působícího zatížení.

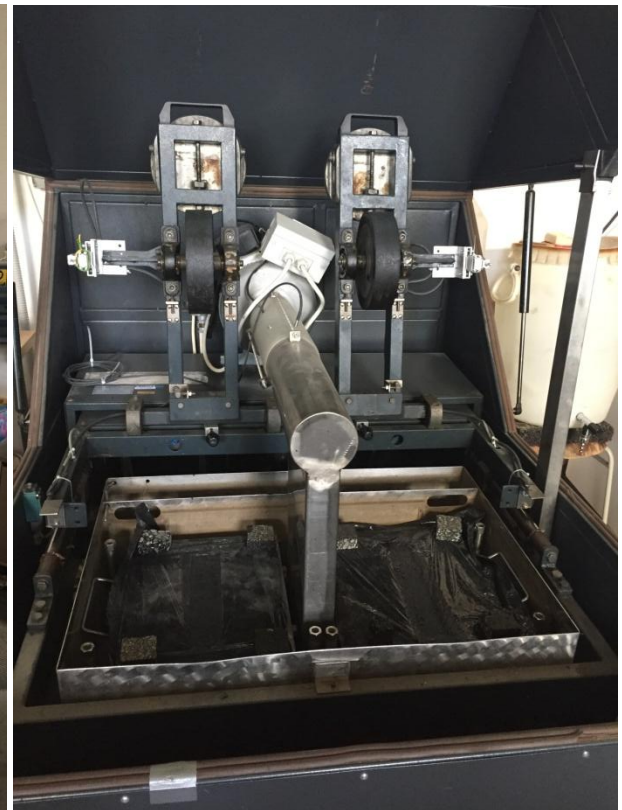
4.12.1 Postup zkoušky

Zkušební vzorek je deska vyrobená v laboratoři, jejíž výroba je popsána v kapitole 4.7, nebo je to vzorek odebraný z vozovky. Vzorek je upnut do rozebíratelné formy potřené nepřilnavou chemikálií, která se vkládá do zařízení. Upnutá deska se temperuje na teplotu zkoušky 60 °C. Doba temperování při tloušťce desky 40 mm je maximálně 24 hodin. Zároveň je potřeba temperovat i zkušební zařízení na stejnou teplotu tak, aby byla na začátku zkoušky stejná.

Jakmile je deska vytemperována, vloží se do zkušebního zařízení a připevní se šrouby. Zkušební zařízení se poté zapne a zkouška pokračuje automaticky. Zatížení na desku je 10 000 cyklů za celou zkoušku, což odpovídá 20 000 pojezdů. Jakmile dosáhne tohoto počtu cyklů, zkouška se automaticky ukončí. Během zkoušky snímač teploty zaznamenává teplotu během daných cyklů.



Obrázek 26 - Vyjížděč kolejí pohled z boku



Obrázek 27 - Vyjížděč kolejí pohled zepředu

4.12.2 Vyhodnocení zkoušky

Vyhodnocení zkoušky probíhá pomocí grafu, který znázorňuje závislost hloubky vyjeté koleje a počet cyklů.

Základní zjišťované charakteristiky jsou:

- **Přírůstek hloubky vyjeté koleje**

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

kde:

WTS_{AIR} je přírůstek vyjeté koleje v mm na 10^3 zatěžovacích cyklů

$d_{10\,000}$, $d_{5\,000}$ je hloubka vyjeté koleje po 10 000, resp. 5 000 cyklech v mm.

- **Poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu**

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

kde:

PRD_{AIR} je poměrná hloubka vyjeté koleje v %;

$d_{10\,000}$ je hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech v mm;

t je tloušťka desky v mm [27], [28].

4.13 Požadavky na asfaltovou směs ACO11+

Požadavky na návrh a složení asfaltového betonu ACO11+ jsou dány normou ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton.

ACO 11+ je asfaltový beton pro obrusné vrstvy, kde nejhrubší použitá frakce kameniva je omezena horním sítem velikosti 11,2 mm o kvalitativní třídě směsi I, která se hutní 2×50 údery Marshallova pěchu, jedná se o střednězrnnou směs [14].

Obrusné vrstvy				
Typ	S		+	
Označení směsi ACO	11 S, 16 S		11 +, 16 +	
Počet úderů Marshallova pěchu	2 x 75		2 x 50	
Všeobecné požadavky				
Zrnitost / síto (mm) ¹⁾	ACO 11 S	ACO 16 S	ACO 11 +	ACO 16 +
22,4	–	100	–	100
16	100	90–100	100	90–100
11,2	90–100	–	90–100	–
8	68–80	60–75	70–90	52–80
4	40–56	38–55	42–68	31–61
2	29–42	26–40	24–49	20–45
0,125	6–13	5–12	4–14	4–12
0,063	5–10	4–9	3–11	3–10
Minimální mezerovitost V_{\min} (%) ²⁾	2,5 (2,0)		2,5 (2,0)	
Maximální mezerovitost V_{\max} (%) ²⁾	4,0 (5,5)		4,5 (6,0)	
Minimální poměr pevnosti v příčném tahu $ITSR$ (%) ³⁾	80		70	
Maximální poměrná hloubka koleje PRD_{AIR} (%) ⁴⁾ po 5 000 cyklech	5,0		$PRD_{\text{deklarovaná}}^9)$	
Maximální přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR} (mm/10 ³ cyklů) ⁴⁾	0,07		$WTS_{\text{deklarovaná}}^9)$	
Mezní hodnoty teploty asfaltové směsi pro silniční asfalty (°C) ⁵⁾	30/45 = 155 °C – 195 °C, 35/50 a 50/70 a 70/100 = 140 °C – 180 °C,			
Maximální podíl DTK nebo STK ve směsi kameniva (%)	10 %		15 %	
Empirické požadavky				
Minimální obsah rozpustného pojiva B_{\min} (% hm.) ⁶⁾⁸⁾	5,4	5,0	5,6	5,2
Minimální obsah rozpustného pojiva B_{vol} (% obj.) ⁷⁾	12,5	11,8	13,0	12,2
Minimální stupeň vyplnění mezer VFB_{\min} (%) ²⁾⁸⁾	–		75	
Maximální stupeň vyplnění mezer VFB_{\max} (%) ²⁾⁸⁾	–		83	

Obrázek 28 - Požadavky na asfaltovou směs ACO 11+

5 POUŽITÉ MATERIÁLY

5.1 Použité druhy asfaltů

Pro účely provedení laboratorních zkoušek v rámci mé bakalářské práce bylo použito následujících asfaltových pojiv uvedených v tabulce 2. Na vzorcích těchto asfaltových pojiv byly provedeny zkoušky bodu měknutí metodou kroužek kulička dle ČSN EN 1427, penetrace jehlou dle ČSN EN 1426 a zkouška MSCR dle ČSN EN 16659. Minimální a maximální hodnoty penetrace a bodu měknutí jsou dané normami ČSN 65 7204 a ČSN 65 7222-1.

Tabulka 2 - Seznam použitých asfaltových pojiv

Asfalt	50/70	45/80-55	25/55-65	45/80-65
Č. vzorku	1	2	3	4
Výrobce	Total	Eurovia	Eurovia	Eurovia

5.1.1 50/70

Vzorek č. 1 gradace 50/70 od výrobce Total je jediný nemodifikovaný silniční asfalt. Požadavky na jeho vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3 - Požadované vlastnosti 50/70 dle ČSN 65 7204

Zkouška	Požadavek		Jednotka	Norma
	min	max		
Penetrace jehlou	50	70	0,1 mm	ČSN EN 1426
Bod měknutí KK	46	54	°C	ČSN EN 1427

5.1.2 PmB 45/80-55

Vzorek č. 2 gradace 45/80-55 od výrobce Eurovia je polymerem modifikovaný asfalt. Požadavky na jeho vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4 - Požadované vlastnosti 45/80-55 dle ČSN 65 7222-1

Zkouška	Požadavek		Jednotka	Norma
	min	max		
Penetrace jehlou	45	80	0,1 mm	ČSN EN 1426
Bod měknutí KK	55		°C	ČSN EN 1427

5.1.3 PmB 25/55-65

Vzorek č. 3 gradace 25/55-65 od výrobce Eurovia je polymerem modifikovaný asfalt. Požadavky na jeho vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5 - Požadované vlastnosti na 25/55-65 dle ČSN 65 7222-1

Zkouška	Požadavek		Jednotka	Norma
	min	max		
Penetrace jehlou	25	55	0,1 mm	ČSN EN 1426
Bod měknutí KK	65		°C	ČSN EN 1427

5.1.4 PmB 45/80-65

Vzorek č. 4 gradace 45/80-65 od výrobce Eurovia je polymerem modifikovaný asfalt. Požadavky na jeho vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 6 [11], [12], [13], [29], [30].

Tabulka 6 - Požadované vlastnosti na 45/80-65 dle ČSN 65 7222-1

Zkouška	Požadavek		Jednotka	Norma
	min	max		
Penetrace jehlou	45	80	0,1 mm	ČSN EN 1426
Bod měknutí KK	65		°C	ČSN EN 1427

5.2 Návrh asfaltové směsi

Pro návrh směsi byla nejdříve zjištěna zrnitost pomocí síťového rozboru dle ČSN EN 993-1. Dále byla navržena čára zrnitosti podle Fullerovy paraboly a oboru zrnitosti dle ČSN EN 13108-1. Následoval výpočet mezerovitosti směsi dle ČSN EN 12697-8, který musel odpovídat hodnotám pro směs ACO 11+. Výpočet sestával ze zjištění objemové hmotnosti dle ČSN EN 12697-6 na Marshallových tělesech vyrobených dle ČSN EN 12697-35 a zhutněny rázovým zhutňovačem dle ČSN EN 12697-30 a maximální objemové hmotnosti v pyknometrech dle ČSN EN 12697-5. Z navržené směsi byly zhutněny desky zhutňovačem desek dle ČSN EN 12697-33. Na zhutněných deskách byla provedena zkouška pojíždění kolem dle ČSN EN 12697-22 [14], [19], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [28].

Navrhovaná a zkoušená směs je konvenční směs asfaltového betonu pro obrusné vrstvy ACO 11+. Při návrhu byly vytvořeny tři sady Marshallových těles

s odstupňovaným dávkováním asfaltového pojiva po 0,5 %. Návrh byl prováděn se silničním asfaltem 50/70. Nejprve byl proveden počáteční návrh asfaltové směsi (Návrh č. 1), přičemž byla zjištěna vyšší mezerovitost, než požaduje národní příloha normy ČSN EN 13108-1. Proto byla upravena čára zrnitosti, čímž byl proveden druhý návrh asfaltové směsi (Návrh č.2), který již vyhovoval požadavkům národní přílohy normy ČSN EN 13108-1. Oba návrhy složení asfaltové směsi ACO 11+ jsou uvedeny níže. Pro vytvoření asfaltové směsi bylo použito kamenivo frakcí 0-4 mm, 4-8 mm a 8-11 mm z lomu Luleč a vápencová moučka Mokrá [14].

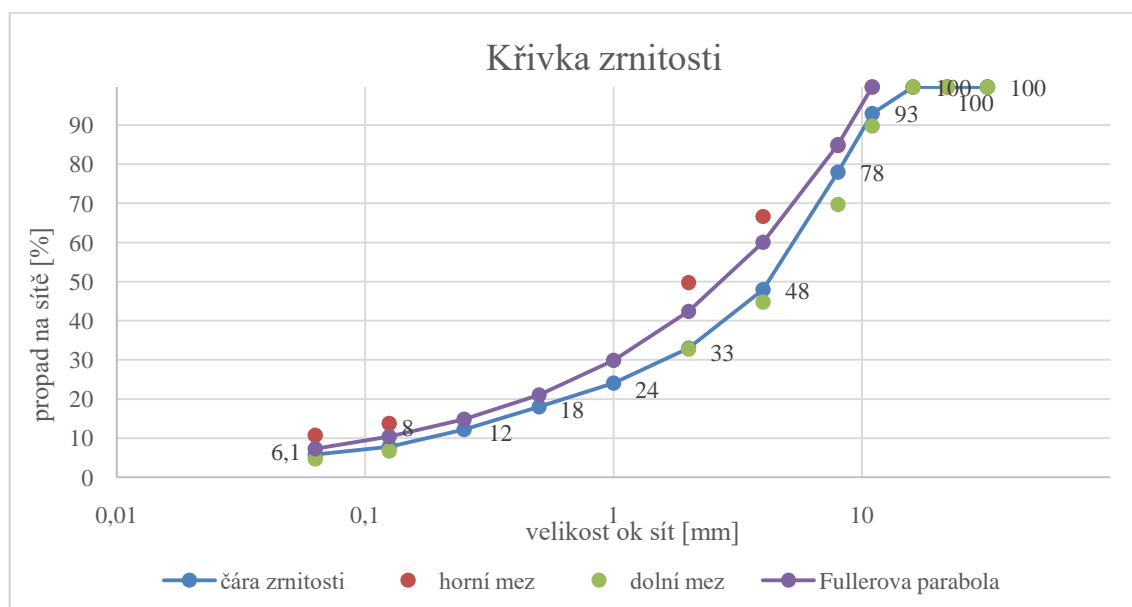
5.2.1 Návrh č. 1

- Křivka zrnitosti

Tabulka 7 - Výpočet křivky zrnitosti pro návrh č. 1

Frakce kameniva	Propady na sítích [%]									
	16	11	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
8-11	100.0	70.6	11.5	2.2	1.9	1.8	1.7	1.4	1.2	0.9
4-8	100.0	100.0	95.9	20.9	2.1	1.5	1.3	1.2	1.0	0.9
0-4	100.0	100.0	100.0	95.5	72.4	48.3	31.8	16.0	5.8	3.8
filer	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	89.3	70.7
horní mez	100.0	100.0	85.0	67.0	50.0				14.0	11.0
dolní mez	100.0	90.0	70.0	45.0	33.0				7.0	5.0
Fullerova parabola		100.0	85.3	60.3	42.6	30.2	21.3	15.1	10.7	7.6
Frakce kameniva	100.0	93.2	78.2	48.2	33.2	24.3	18.3	12.5	8.1	6.1

Graf 1 - Průběh křivky zrnitosti pro návrh č. 1



V tabulce 7 jsou uvedeny výsledky síťového rozboru a *horní a dolní mez*, což je interval, ve kterém se musí pohybovat navržená čára zrnitosti dle normy ČSN EN 13108-1. V grafu 1 je navržená křivka zrnitosti a také *Fullerova parabola*, která reprezentuje nejtěsnější uspořádání kamenné kostry [14].

- Výpočet mezerovitosti

Mezerovitost byla vypočítána dle kapitoly 4.10 a její výsledky jsou uvedeny v tabulce 10. Sestává z výpočtu objemové hmotnosti dle kapitoly 4.8, jejíž výsledky jsou uvedeny v tabulce 8 a výpočtu maximální objemové hmotnosti dle kapitoly 4.9 a její výsledky jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 8 - Výpočet objemové hmotnosti pro návrh č. 1

Obsah pojiva	Vzorek č.	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	ρ_{bssd} [kg/m^3]	ρ_{bssd} [kg/m^3]
5,4	1	1239,50	696,40	1245,00	2259	2264
	2	1187,30	667,30	1190,50	2269	
5,9	1	1193,50	676,90	1195,30	2302	2295
	2	1212,60	684,60	1214,70	2287	
6,4	1	1209,40	682,50	1209,80	2294	2287
	2	1206,50	679,40	1208,50	2280	

Tabulka 9 - Výpočet maximální objemové hmotnosti pro návrh č. 1

Obsah pojiva	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	V [m^3]	ρ_{mv} [kg/m^3]
5,4	685,31	1697,61	2590,80	0,001308164	2439
5,9	703,30	1719,20	2621,90	0,001320600	2431
6,4	688,02	1741,80	2605,20	0,001298616	2421

Tabulka 10 - Výpočet mezerovitosti pro návrh č. 1

Obsah pojiva	ρ_{bssd} [kg/m^3]	ρ_{mv} [kg/m^3]	V_m [%]
5,4	2264	2439	7,2
5,9	2295	2431	5,6
6,4	2287	2421	5,5

Dle normy ČSN EN 13108-1 je dána požadovaná mezerovitost pro konvenční asfaltovou směs ACO 11+ mezi 2,5 – 4,5 %. V této navržené směsi ani jedna sada nevykazovala požadovanou mezerovitost, jelikož nejmenší z nich měla mezerovitost 5,5 % a bylo tudíž nutné provést nový návrh směsi, kde došlo k posunutí křivky zrnitosti a zvýšení obsahu jemných částic a poté pro tuto směs byla vytvořena opět Marshallova tělesa pro zjištění objemové hmotnosti a následně mezerovitosti. Při tomto

opakovaném návrhu asfaltové směsi byly vytvořeny pouze dvě sady Marshallových těles s obsahem pojiva 5,9 % a 6,4 %. Maximální objemová hmotnost se nezjišťovala znovu, neboť se neměnil obsah asfaltového pojiva, takže se předpokládalo, že se maximální objemová hmotnost pro jednotlivé sady těles nezměnila [14], [24], [25], [26].

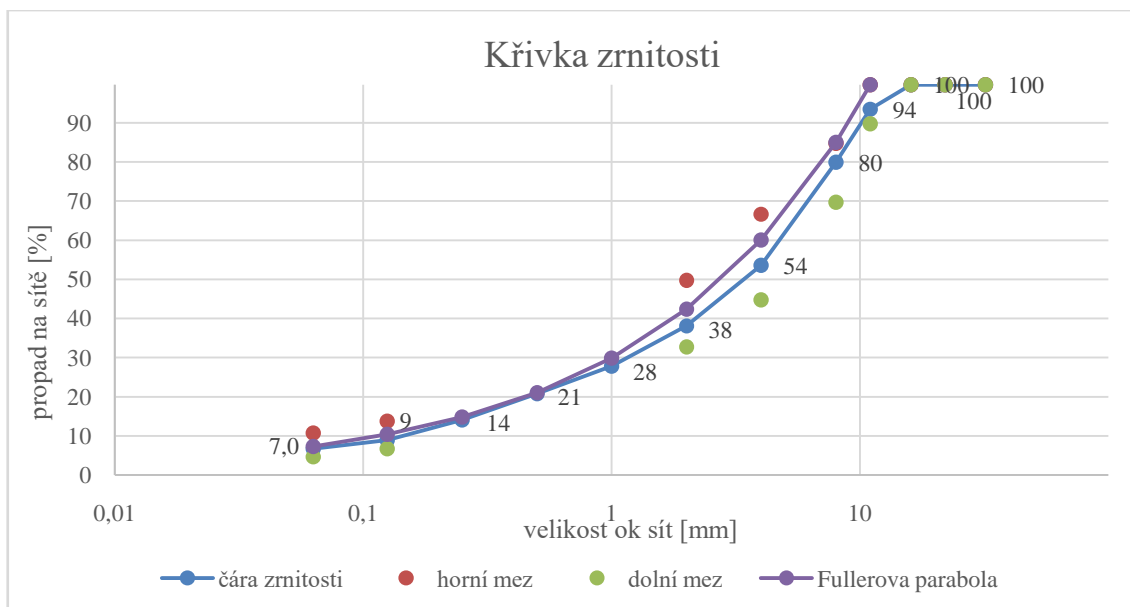
5.2.2 Návrh č. 2

- Křivka zrnitosti

Tabulka 11 - Výpočet křivky zrnitosti pro návrh č. 2

Frakce kameniva	Propady na sítích [%]									
	16	11	8	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063
8-11	100.0	70.6	11.5	2.2	1.9	1.8	1.7	1.4	1.2	0.9
4-8	100.0	100.0	95.9	20.9	2.1	1.5	1.3	1.2	1.0	0.9
0-4	100.0	100.0	100.0	95.5	72.4	48.3	31.8	16.0	5.8	3.8
filer	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	89.3	70.7
horní mez	100.0	100.0	85.0	67.0	50.0				14.0	11.0
dolní mez	100.0	90.0	70.0	45.0	33.0				7.0	5.0
Fullerova parabola		100.0	85.3	60.3	42.6	30.2	21.3	15.1	10.7	7.6
Frakce kameniva	100.0	93.8	80.2	53.9	38.4	28.1	21.1	14.4	9.2	7.0

Graf 2 - Průběh křivky zrnitosti pro návrh č. 2



V tabulce 11 jsou uvedeny výsledky síťového rozboru a *horní* a *dolní mez*, což je interval, ve kterém se musí pohybovat navržená čára zrnitosti dle normy

ČSN EN 13108-1. V grafu 2 je navržena křivka zrnitosti a také *Fullerova parabola*, která reprezentuje nejtěsnější uspořádání kamenné kostry [14].

- Výpočet mezerovitosti

Mezerovitost byla vypočítána dle kapitoly 4.10 a její výsledky jsou uvedeny v tabulce 14. Sestává z výpočtu objemové hmotnosti dle kapitoly 4.8, jejíž výsledky jsou uvedeny v tabulce 12 a výpočtu maximální objemové hmotnosti dle kapitoly 4.9 a její výsledky jsou uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 12 - Výpočet objemové hmotnosti pro návrh č. 2

Obsah pojiva	Vzorek č.	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	ρ_{bssd} [kg/m^3]	ρ_{bssd} [kg/m^3]
5,9	1	1187,60	682,50	1187,90	2350	2352
	2	1195,20	688,00	1195,60	2355	
6,4	1	1195,50	685,70	1196,00	2343	2344
	2	1192,70	684,40	1193,10	2345	

Tabulka 13 - Výpočet maximální objemové hmotnosti pro návrh č. 2

Obsah pojiva	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	V [m^3]	ρ_{mv} [kg/m^3]
5,9	703,30	1719,20	2621,90	0,001320600	2431
6,4	688,02	1741,80	2605,20	0,001298616	2421

Tabulka 14 - Výpočet mezerovitosti pro návrh č. 2

Obsah pojiva	ρ_{bssd} [kg/m^3]	ρ_{mv} [kg/m^3]	V_m [%]
5,9	2352	2431	3,2
6,4	2344	2421	3,2

Z tabulky 14 je patrné, že při dávkování 5,9 % pojiva bylo dosaženo mezerovitosti 3,2 %, což je údaj, který vyhovuje požadavkům národní přílohy normy ČSN EN 13108-1 na mezerovitost asfaltové směsi ACO 11+. Proto bylo jako výsledné dávkování pojiva zvoleno 5,9 % [14], [24], [25], [26].

5.3 Míra zhutnění

Dále byly podle kapitoly 4.7 vyrobeny v lamelovém zhutňovači zkušební desky s rozměry 260 mm x 320 mm x 40 mm pro provedení zkoušky odolnosti vůči trvalým deformacím. Byly vyrobeny čtyři desky s pojivy podle tabulky 2. Pro každou vyrobenou desku dle návrhu byla stanovena objemová hmotnost a míra zhutnění.

Objemová hmotnost byla stanovena postupem uvedeným v kapitole 4.8. Hodnoty míry zhutnění pro všechny čtyři desky jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15 - Výpočet míry zhutnění pro zkušební desky

Asfaltové pojivo	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	$\rho_{\text{bssd},1}$ [kg/m ³]	$\rho_{\text{bssd},2}$ [kg/m ³]	C[%]
50/70	7656	4409	7669	2348	2352	99,8
45/80-55	7688	4455	7693	2374	2352	100,9
25/55-65	7653	4409	7664	2351	2352	100,0
45/80-65	7662	4414	7675	2350	2352	99,9

Míry zhutnění pro všechny desky s pojivy 50/70, 45/80-55, 25/55-65 a 45/80-65 vyšly mezi 99 – 101 % [20].

6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

V této kapitole budou popsány výsledky všech provedených zkoušek a jejich vzájemné korelace.

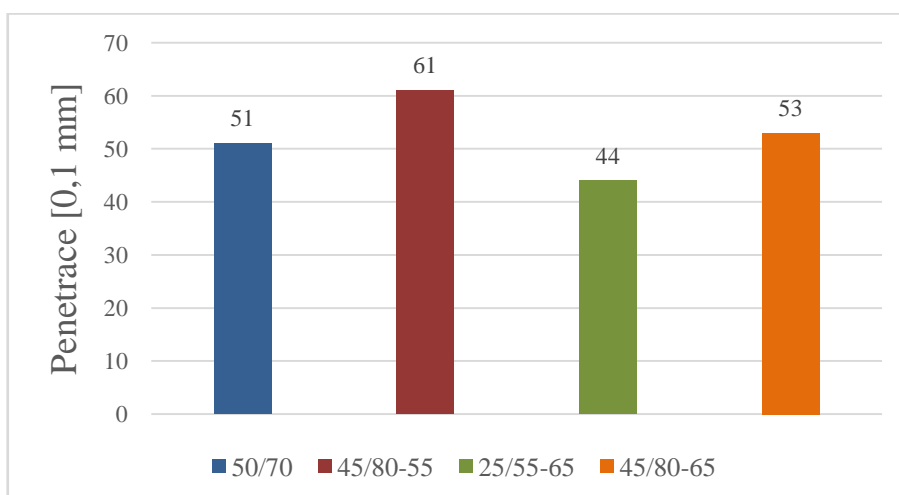
6.1 Stanovení penetrace jehlou

Tato zkouška je podrobně popsána v kapitole 4.1. Na každém vzorku se provedla čtyři platná měření při předepsaných podmínkách, jejichž hodnoty se následně zprůměrovaly a jsou uvedeny v tabulce 16 a grafu 3. Hodnoty penetrace všech pojiv vyhovují mezím pro hodnoty penetrace danými normami ČSN 65 7204 a ČSN 65 7222-1 [11], [29], [30].

Tabulka 16 - Výsledky penetrace jehlou

Asfaltové pojivo	50/70	45/80-55	25/55-65	45/80-65
Penetrace[0,1mm]	51	61	44	53

Graf 3 - Porovnání výsledků penetrace jehlou



Z grafu 3 je patrné, že hodnoty penetrace jehlou závisí na druhu použitého pojiva. Všechna pojiva splnila požadavky na hodnoty penetrace v mezích daných normami. Nejvyšší hodnota penetrace byla naměřena u polymerem modifikovaného asfaltu 45/80-55 a nejnižší hodnota byla zjištěna u polymerem modifikovaného asfaltu 25/55-65.

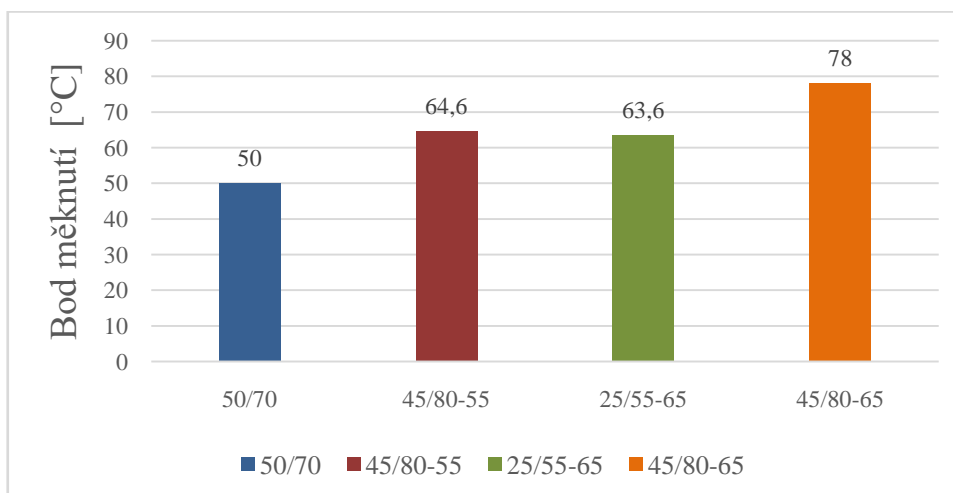
6.2 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička

Tato zkouška je podrobně popsána v kapitole 4.2. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 17 a grafu 4 a vyhovují mezím pro hodnoty bodu měknutí danými normami ČSN 65 7204 a ČSN 65 7222-1 kromě asfaltového pojiva 25/55-65, kde bod měknutí vyšel 1,5 °C pod garantovanou minimální hodnotou výrobcem [12], [29], [30].

Tabulka 17 - Výsledky bodu měknutí

Asfaltové pojivo	50/70	45/80-55	25/55-65	45/80-65
Bod měknutí[°C]	50	64,6	63,6	78,0
Rezerva[°C]	2,9	9,5	-1,5	13

Graf 4 - Porovnání výsledků bodu měknutí



Z grafu 4 je patrné, že naměřené hodnoty bodu měknutí jsou závislé na druhu použitého pojiva. Všechna pojiva kromě polymerem modifikovaného asfaltu 25/55-65 splnila minimální garantované teploty bodu měknutí. Z asfaltů které splnily požadavky na minimální teplotu, má nejmenší rezervu silniční asfalt 50/70 a největší polymerem modifikovaný asfalt 45/80-65. V případě pojiv 45/80-55 a 45/80-65 je hodnota bodu měknutí značně vyšší, než je pro dané kategorie požadováno (pro 45/80-55 o 9,5 °C a v případě 45/80-65 dokonce o 13,0 °C). Podle výsledků bodu měknutí by pojivo 45/80-55 mohlo být kategorizováno jako 45/80-60 a pojivo 45/80-65 dokonce jako pojivo 45/80-75. Důvodem vyšších hodnot bodu měknutí může být pravděpodobně zvýšený obsah polymerní přísady.

6.3 Vyhodnocení MSCR

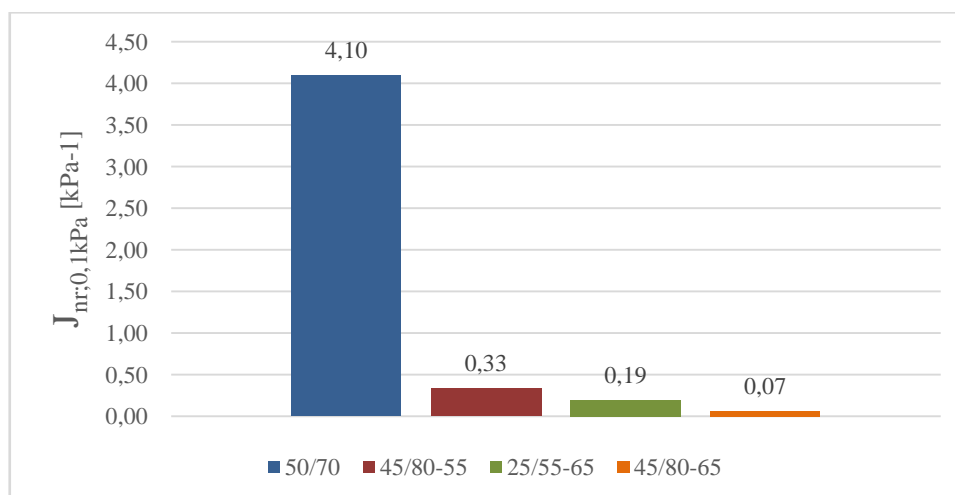
V této části jsou uvedeny výsledky zkoušky MSCR při teplotě 60 °C dle kapitoly 4.3. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 18 a grafech 5 – 16 a průběhy zkoušek v grafech 17 – 20.

6.3.1 Výsledné hodnoty MSCR

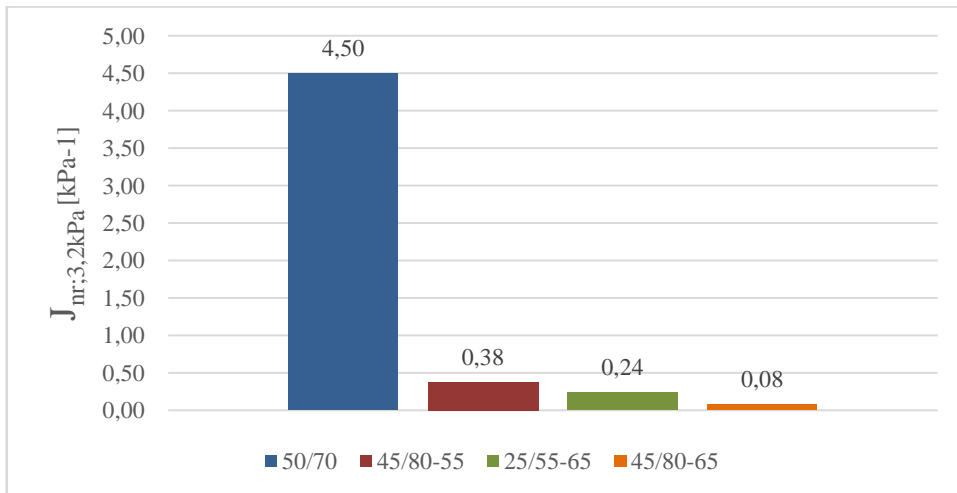
Tabulka 18 - Výsledné hodnoty zkoušky MSCR

	50/70	45/80-55	25/55-65	45/80-65
$J_{nr;0,1kPa}$ [kPa^{-1}]	4,10	0,33	0,19	0,07
$J_{nr;3,2kPa}$ [kPa^{-1}]	4,50	0,38	0,24	0,08
$J_{nr;10kPa}$ [kPa^{-1}]	5,01	1,94	0,49	0,13
$J_{nr,diff;3,2-0,1kPa}$ [%]	9,80	13,90	23,00	20,00
$J_{nr,diff;10-0,1kPa}$ [%]	22,34	482,65	153,28	105,63
$J_{nr,diff;10-3,2kPa}$ [%]	11,44	411,75	105,87	71,36
$R_{0,1kPa}$ [%]	1,45	85,69	80,56	93,24
$R_{3,2kPa}$ [%]	0,24	83,80	77,03	92,68
R_{10kPa} [%]	0,07	30,71	55,51	85,88
$R_{diff;3,2-0,1kPa}$ [%]	83,35	2,20	4,38	0,60
$R_{diff;10-0,1kPa}$ [%]	94,88	64,16	31,10	7,90
$R_{diff;10-3,2kPa}$ [%]	69,21	63,36	27,94	7,34

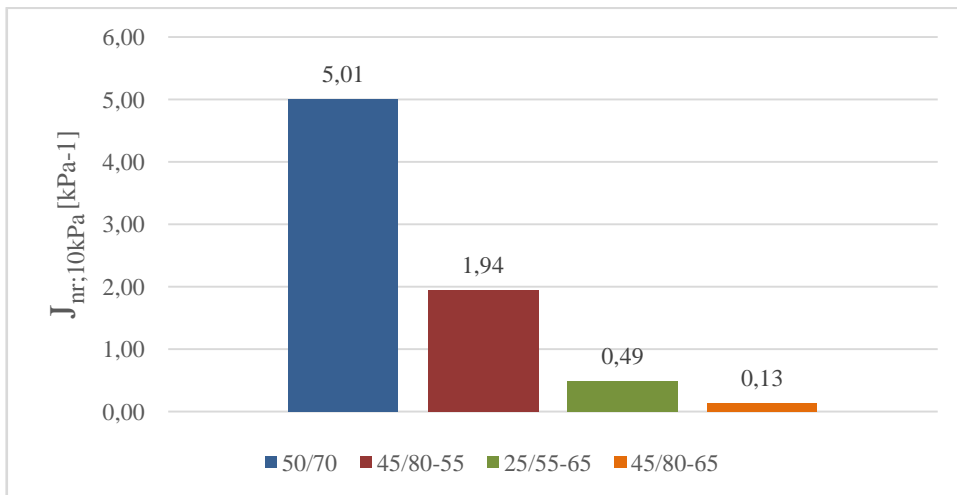
Graf 5 - Nevratná smyková poddajnost $J_{nr;0,1kPa}$



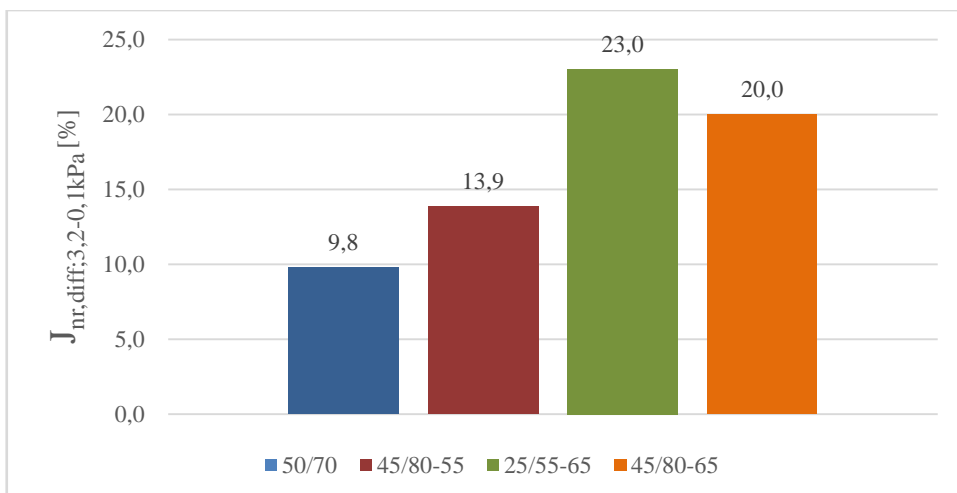
Graf 6 - Nevratná smyková poddajnosť $J_{nr;3,2kPa}$



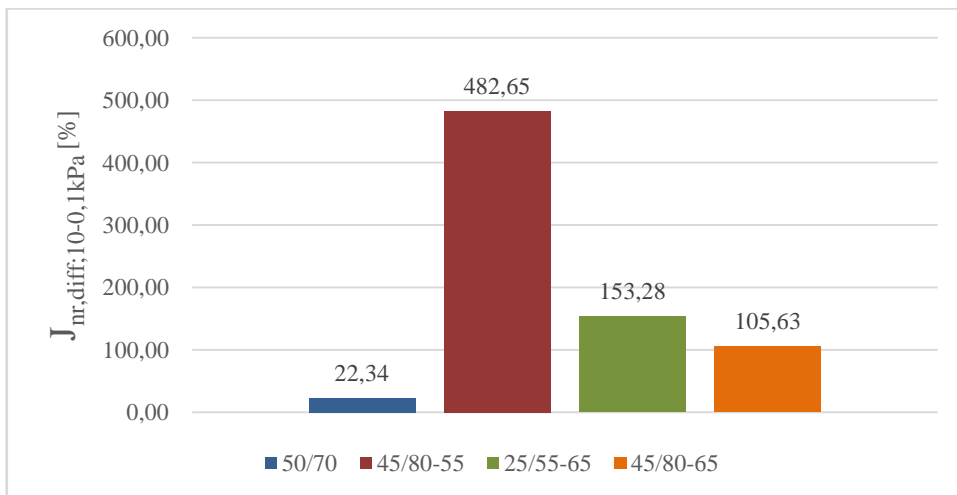
Graf 7 - Nevratná smyková poddajnosť $J_{nr;10kPa}$



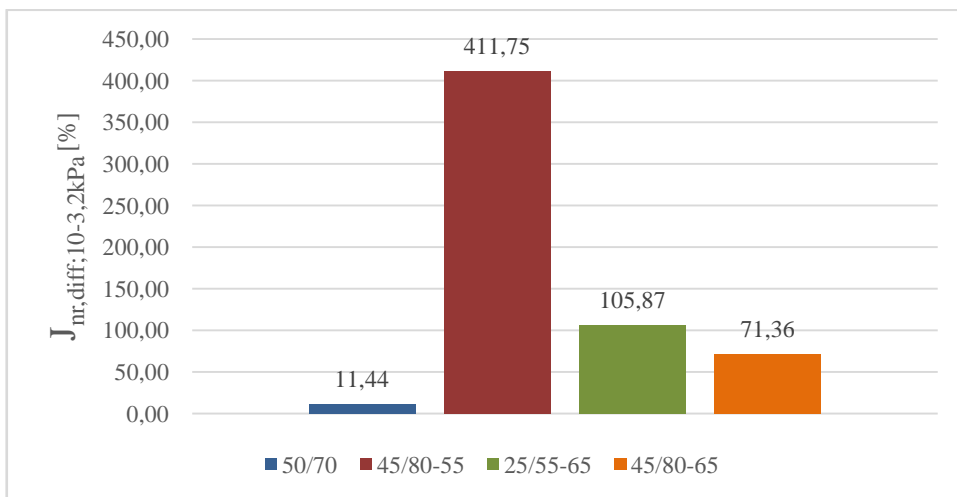
Graf 8 - Rozdíl v nevratné smykové poddajnosti $J_{nr,diff;3,2-0,1kPa}$



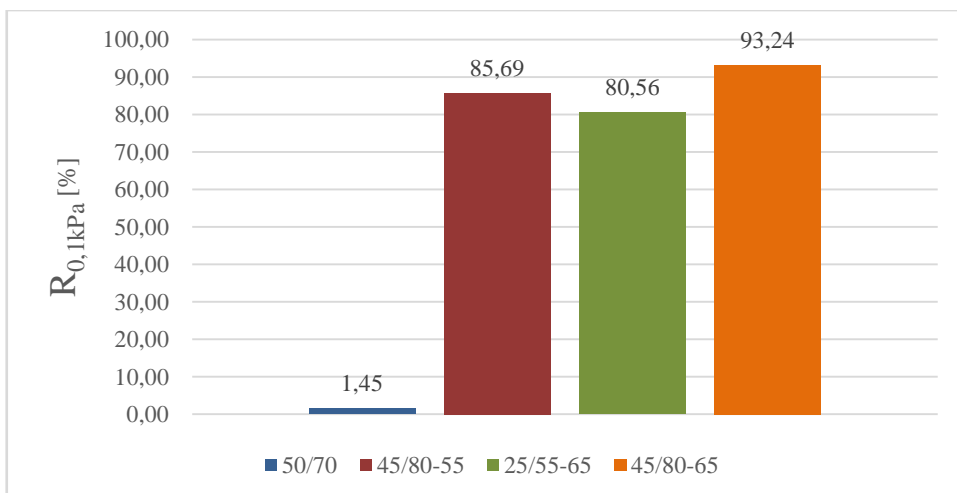
Graf 9 - Rozdíl v nevratné smykové poddajnosti $J_{nr,diff;10-0,1kPa}$



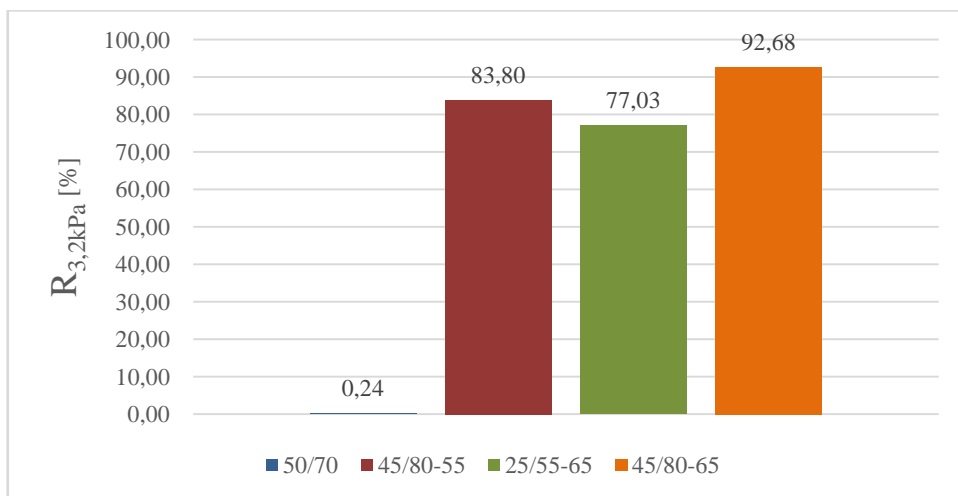
Graf 10 - Rozdíl v nevratné smykové poddajnosti $J_{nr,diff;10-3,2kPa}$



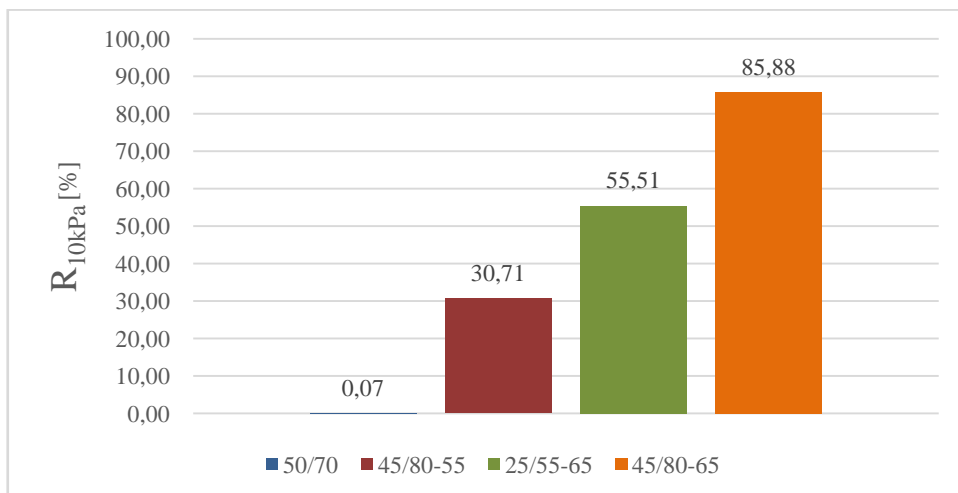
Graf 11 - Průměrné elastické zotavení $R_{0,1kPa}$



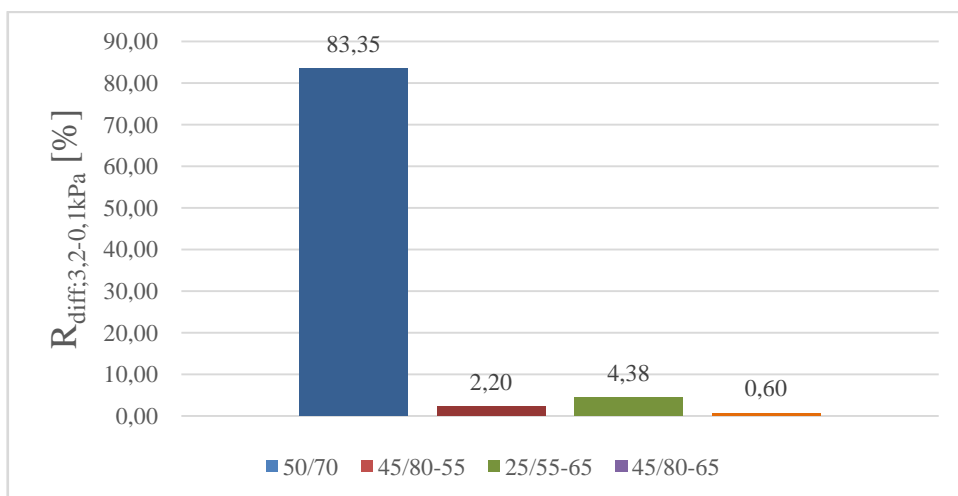
Graf 12 - Průměrné elastické zotavení $R_{3,2kPa}$



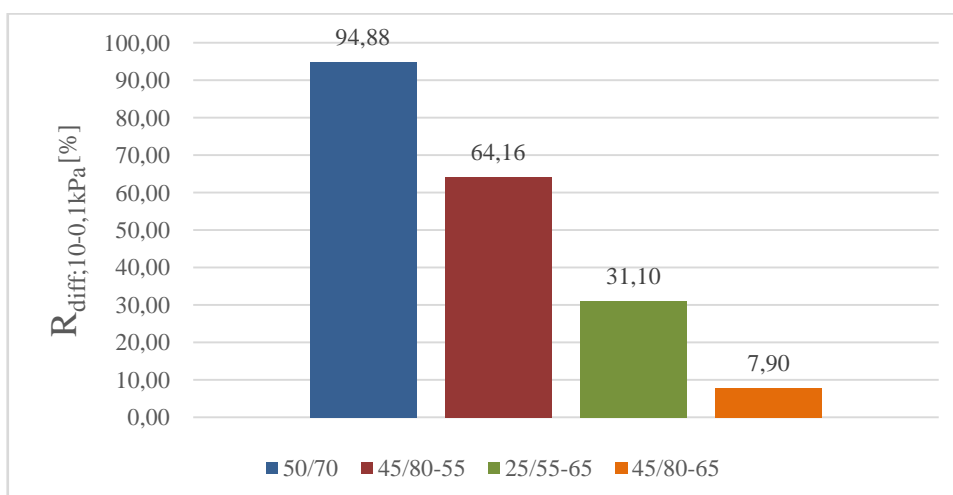
Graf 13 - Průměrné elastické zotavení R_{10kPa}



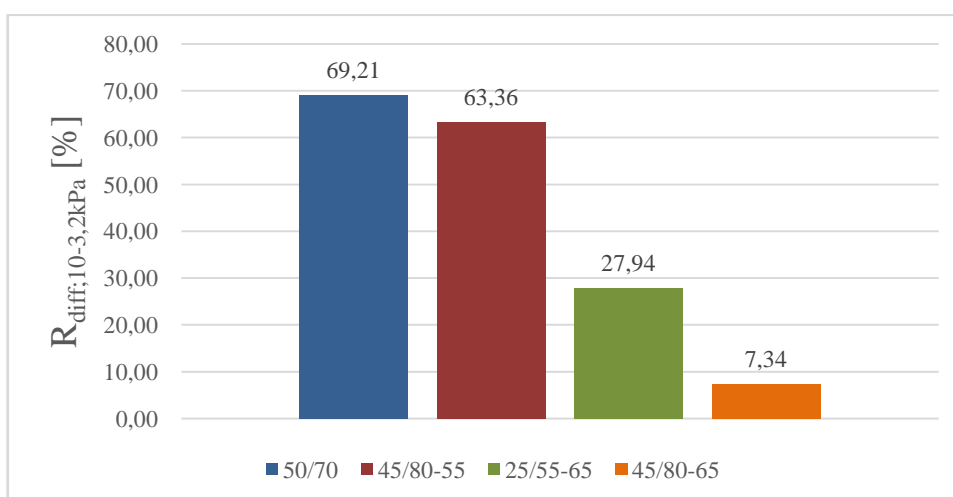
Graf 14 - Rozdíl v průměrném zotavení $R_{diff;3,2-0,1kPa}$



Graf 15 - Rozdíl v průměrném zotavení $R_{diff;10-0,1kPa}$



Graf 16 - Rozdíl v průměrném zotavení $R_{diff;10-3,2kPa}$



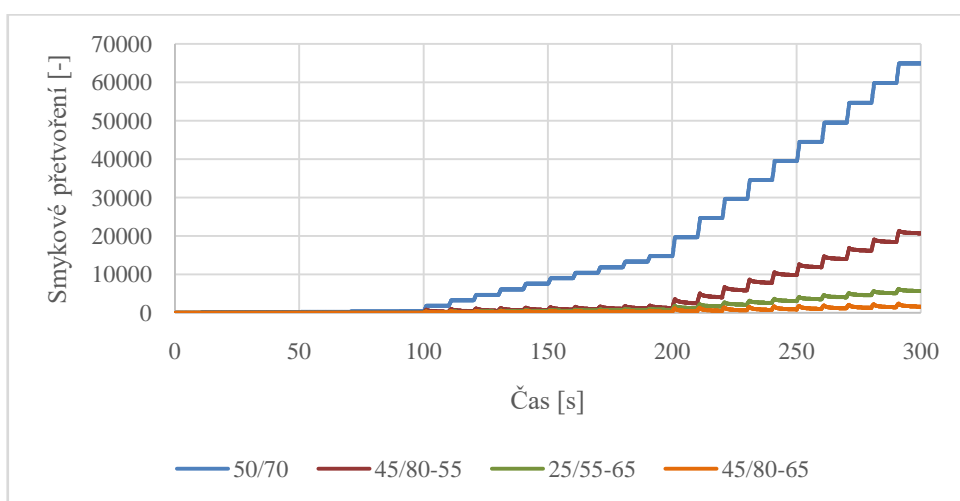
Z grafů 5 – 16 je patrné, že největší elastické zotavení při všech zatěžovacích cyklech je u polymerem modifikovaného asfaltu 45/80-65, tudíž je nejvíce elastické a schopné odolávat trvalým deformacím nejvíce. Výrazně nejmenší hodnoty byly dosaženy u silničního asfaltu 50/70 oproti všem ostatním polymerem modifikovaných asfaltům. Při vyhodnocení parametru nevratné smykové poddajnosti, kde čím menší hodnota, tím větší odolnost vůči trvalým deformacím se tyto hodnoty potvrdily, nejmenší hodnoty byly zjištěny u polymerem modifikovaného asfaltu 45/80-65 a největší u silničního asfaltu 50/70, který má opět mnohem horší výsledky než všechny polymerem modifikované asfalty. Při vyhodnocení rozdílu v průměrném zotavení vychází jednoznačně nejhůře silniční asfalt 50/70, který dokonce mezi napětími 3,2 – 0,1 kPa a 10 – 0,1 kPa dosahuje hodnot vyšších než 75 %, tedy je nejméně pružný. Hodnoty rozdílu nevratné smykové poddajnosti již tak jednoznačné nejsou. Mezi

napětími 3,2 – 0,1 kPa vychází nejhůře polymerem modifikovaný asfalt 25/55-65 a mezi napětími 10 – 0,1 kPa a 10 – 3,2 kPa dosahuje nejhorších hodnot polymerem modifikovaný asfalt 45/80-55, dokonce přes 400 %, což může nasvědčovat značné překročení oblasti linearity.

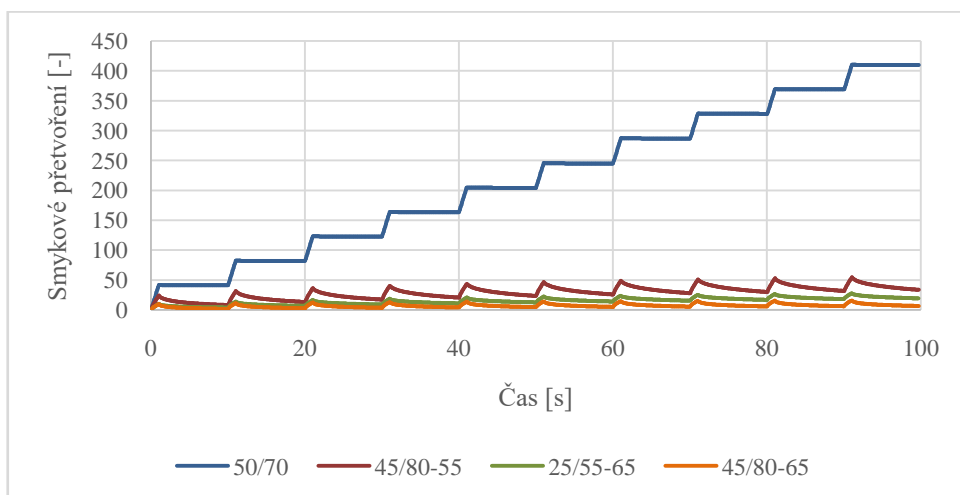
6.3.2 Průběhy zkoušek MSCR

V této části jsou uvedeny grafy 17 – 20 průběhu napětí zkoušky MSCR vždy pro všechny druhy použitých asfaltů.

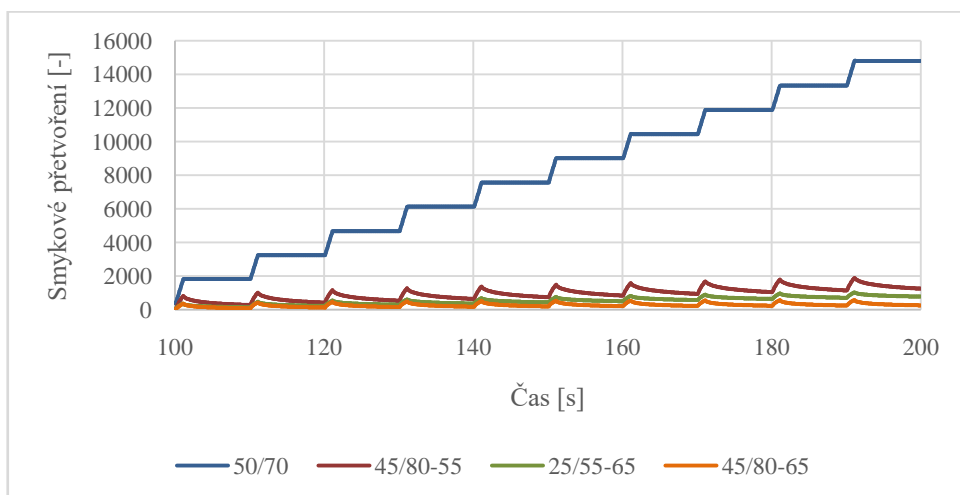
Graf 17 - Průběh zkoušky MSCR



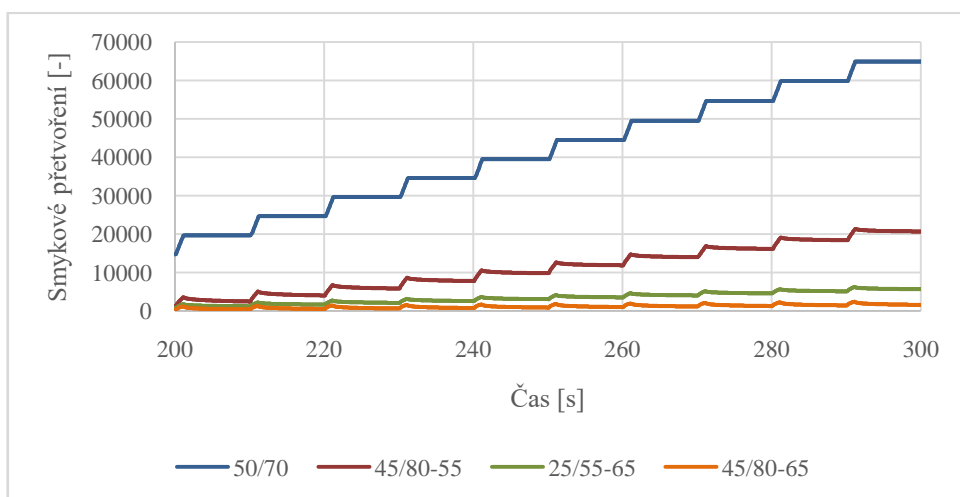
Graf 18 - Průběh zkoušky MSCR - výřez 0,1 kPa



Graf 19 - Průběh zkoušky MSCR - výřez 3,2 kPa



Graf 20 - Průběh zkoušky MSCR - výřez 10 kPa



Z grafů 17 – 20 je viditelný odlišný průběh zkoušky silničního asfaltu a modifikovaných asfaltů. Průběh grafu silničního asfaltu má schodovitý tvar oproti tvaru grafu připomínající obrácenou hokejku u polymerem modifikovaných asfaltů 45/80-55, 25/55-65 a 45/80-65. Z toho vyplývá, že u silničního asfaltu vzniká velmi malé vratné přetvoření při působení smykového napětí a tedy výsledné smykové přetvoření silničního asfaltu dosahuje vyšších hodnot než u polymerem modifikovaných asfaltů [13].

6.4 Vyhodnocení zkoušky poježdění kolem

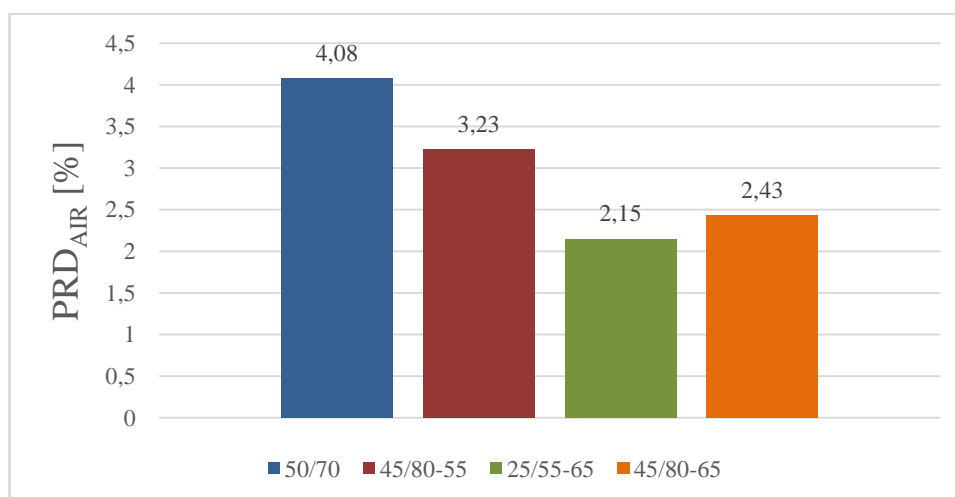
V této části jsou uvedeny výsledky zkoušky poježdění kolem, která byla provedena dle kapitoly 4.12. V tabulce 19 jsou uvedeny výsledné hodnoty všech desek

s danými asfaltovými pojivy. V grafech 21 – 24 jsou zaznamenány průběhy zkoušek všech čtyř desek pro poměrnou hloubku vyjetých kolejí na počet cyklů a závislost hloubky vyjetých kolejí na počtu cyklů.

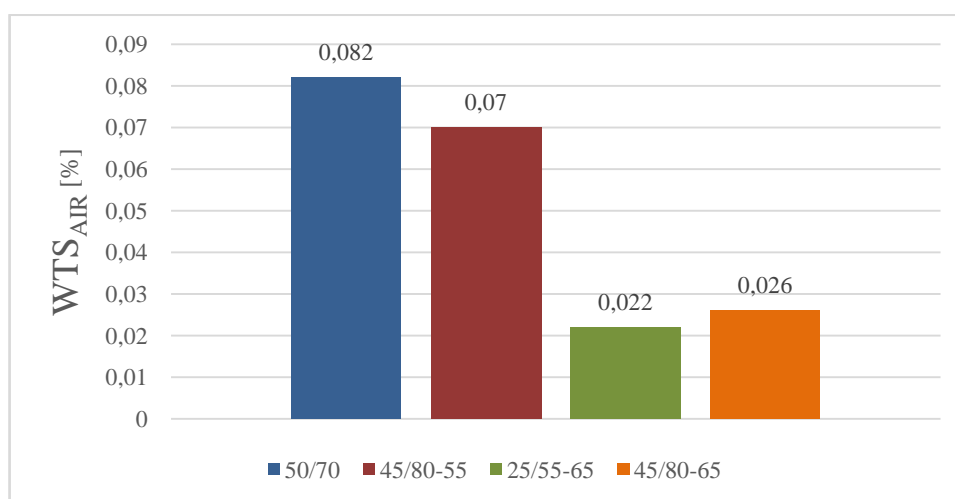
Tabulka 19 - Výsledné hodnoty zkoušky poježdění kolem

Asfaltové pojivo	50/70	45/80-55	25/55-65	45/80-65
Tloušťka[mm]	40	40	40	40
$Y_{s,20}$ [mm]	1,63	1,29	0,86	0,97
PRD_{AIR} [%]	4,08	3,23	2,15	2,43
WTS_{AIR} [mm/10 ³ cyklů]	0,082	0,07	0,022	0,026

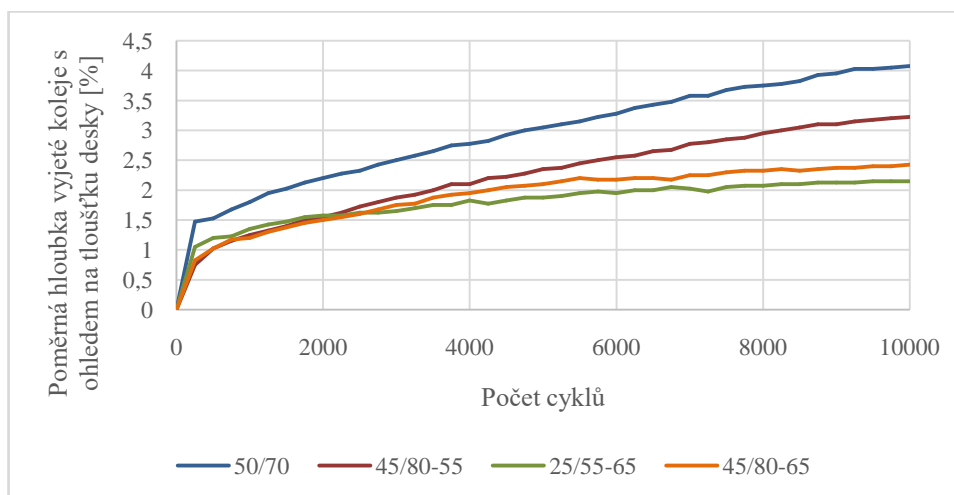
Graf 21– Porovnání hodnot PRD_{AIR}



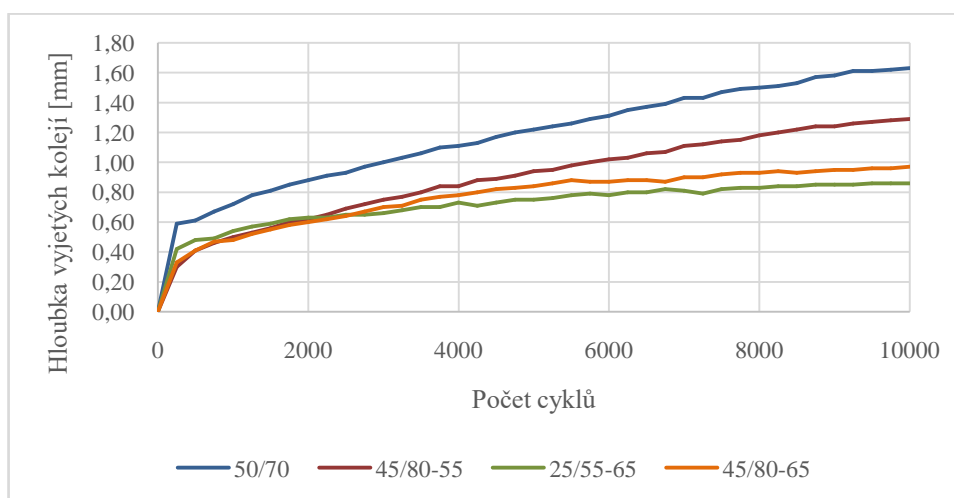
Graf 22 - Porovnání hodnot WTS_{AIR}



Graf 23 - Poměrná hloubka vyjetých kolejí na počtu cyklů



Graf 24 - Závislost hloubky kolejí na počtu cyklů

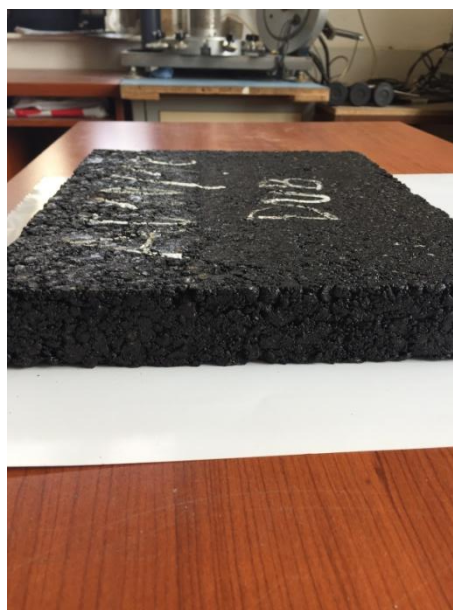


Po vyhodnocení zkoušky pojezdu kolem byly zjištěny hloubky vyjetých kolejí všech čtyř zkušebních desek. Z grafů 23 a 24 lze odvodit, že nejmenší hloubka koleje byla u směsi s polymerem modifikovaným asfaltem 25/55-65, naopak největší hloubka se naměřila u směsi se silničním asfaltem 50/70. Nejvyšší poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu PRD_{AIR} vyšla u silničního asfaltu 50/70 o 0,85 % až 1,93 % více v porovnání s polymerem modifikovanými asfalty 45/80-55, 25/55-65, 45/80-65. Při porovnání hodnot přírůstku hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} byla nejvyšší naměřená hodnota opět u silničního asfaltu 50/70 a to o 0,012 mm/10³ cyklů až 0,06 mm/10³ cyklů více než u polymerem modifikovaných asfaltů 45/80-55, 25/55-65, 45/80-65. I přesto, že zkouška odolnosti vůči deformaci byla provedena při teplotě 60 °C (o 10 °C vyšší teplota než požadují specifikační normy pro asfaltové směsi), bylo

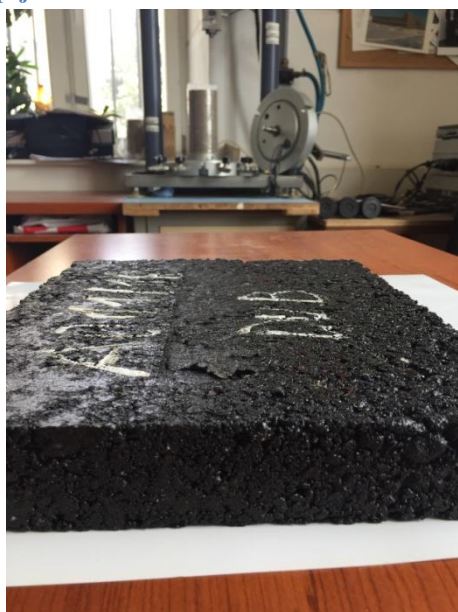
dosaženo velice dobrých odolností vůči deformaci všech asfaltových směsí. Zejména je překvapivý kvalitní výsledek zkoušky u asfaltové směsi obsahující nemoifikovaný silniční asfalt. Pro směsi ACO 11 + se výsledky zkoušky pojíždění kolem deklarují, ovšem pro směsi ACO 11 S jsou stanoveny požadavky na $WTS_{AIR} 0,07\text{mm}/10^3$ cyklů a $PRD_{AIR} 5 \%$. Je zřejmé, že asfaltové směsi s polymerem modifikovaným asfaltem těmto požadavkům vyhovovaly, i když zkouška proběhla při zvýšené zkušební teplotě a asfaltová směs se silničním asfaltem nesplnila požadavek na hodnotu WTS_{AIR} jen o málo [28].



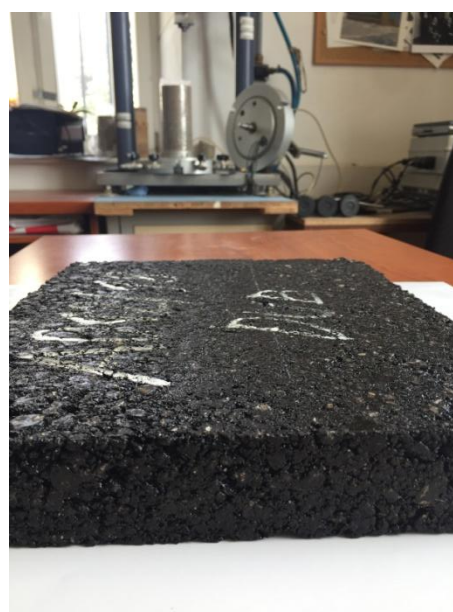
Obrázek 29 - Vyjetá kolej na desce s pojivem 50/70



Obrázek 30 - Vyjetá kolej na desce s pojivem 45/80-55



Obrázek 31 - Vyjetá kolej na desce s pojivem 25/55-65

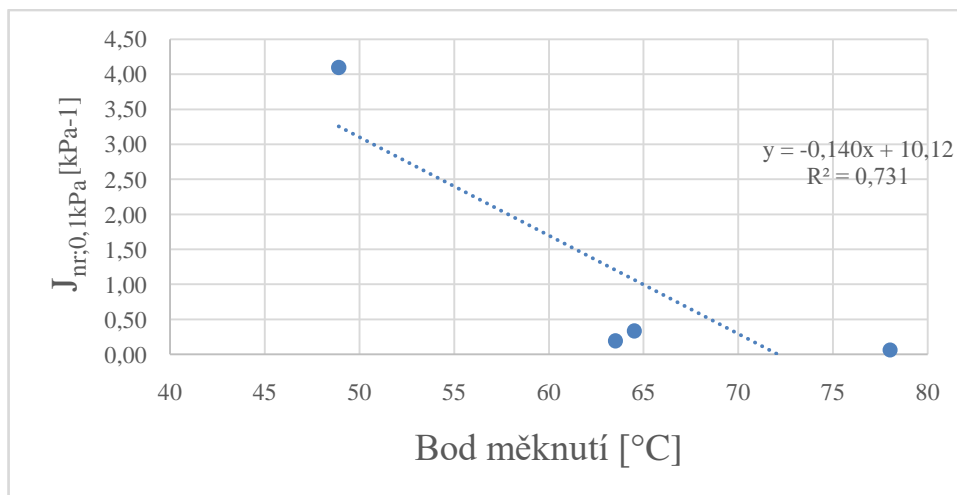


Obrázek 32 - Vyjetá kolej na desce s pojivem 45/80-65

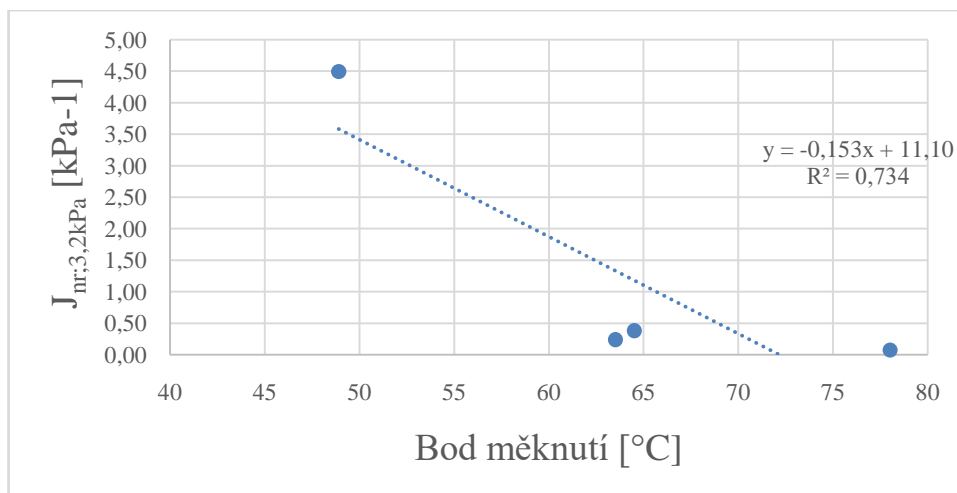
6.5 Korelace zkoušek

V této kapitole bude zobrazena závislost všech zkoušek a hodnot z nich zjišťovaných na asfaltových pojivech (penetrace, bod měknutí a MSCR) s parametry ze zkoušky vyjíždění kolejí na asfaltových směsích. Jejich závislosti budou popsány grafy. V těchto grafech budou jednotlivé korelační funkce a rovnice regresní funkce y s koeficientem determinace R^2 . Čím blíže je koeficient determinace k 1, tím vyšší závislost mezi jednotlivými hodnotami je. Naopak při hodnotě koeficientu determinace blížící se 0 se o žádnou závislost nejedná. V následujících grafech 25 – 48 jsou uvedeny zkoušky, u kterých byla zjištěna silnější korelace. V tabulce 20 jsou uvedeny všechny hodnocené koeficienty determinace.

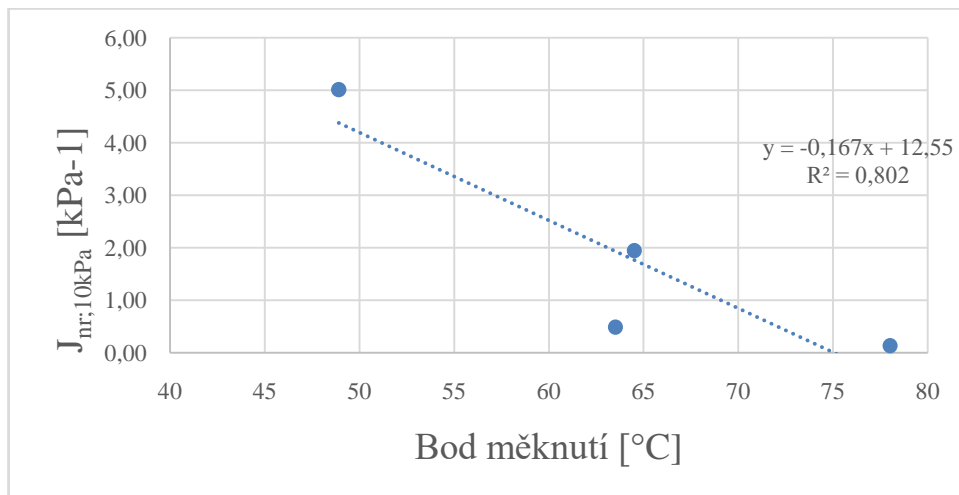
Graf 25 - Korelace bodu měknutí s $J_{nr;0,1kPa}$



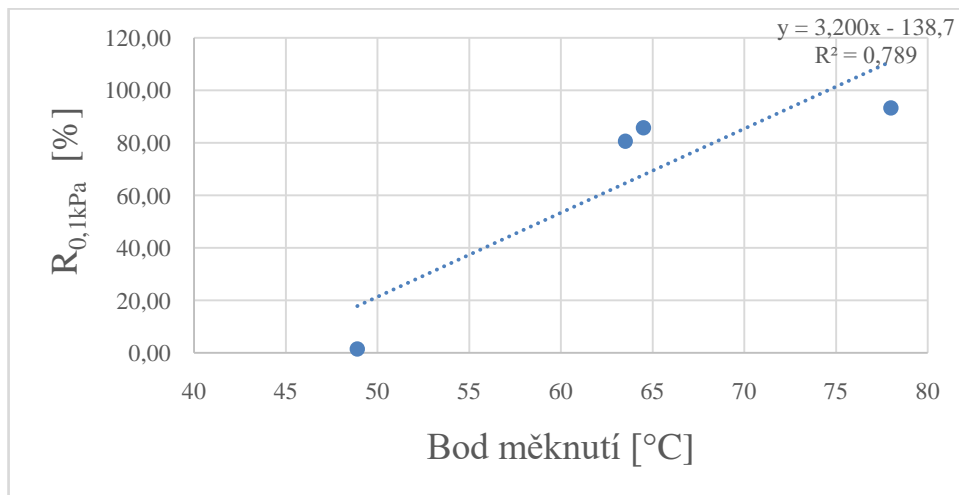
Graf 26 - Korelace bodu měknutí s $J_{nr;3,2kPa}$



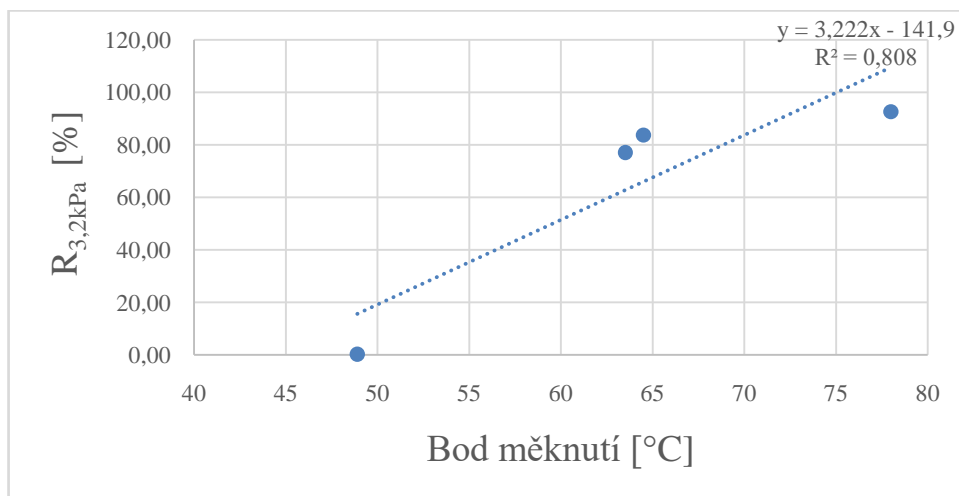
Graf 27 - Korelace bodu měknutí s $J_{nr;10kPa}$



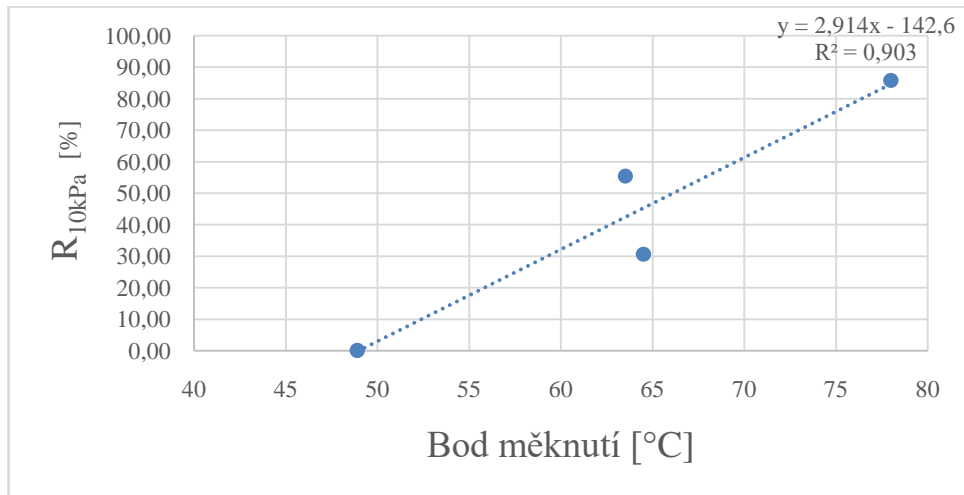
Graf 28 - Korelace bodu měknutí s $R_{0,1kPa}$



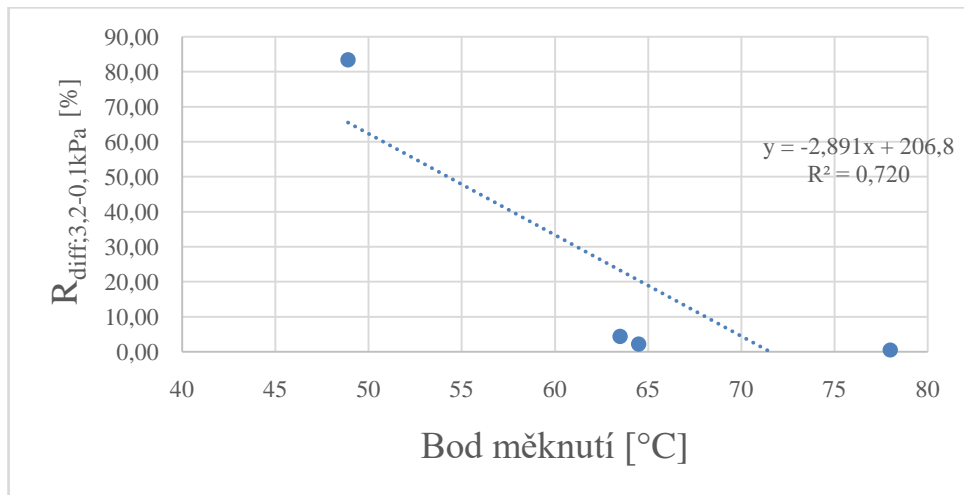
Graf 29 - Korelace bodu měknutí s $R_{3,2kPa}$



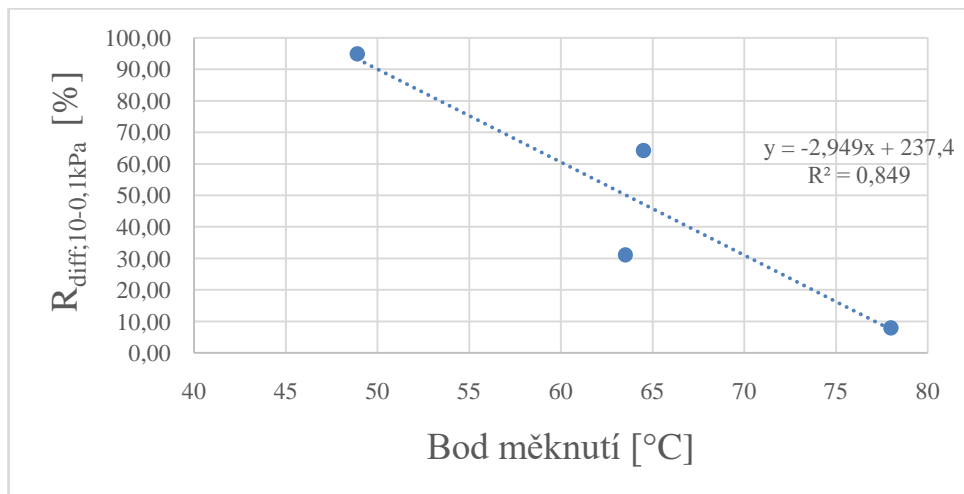
Graf 30 - Korelace bodu měknutí s R_{10kPa}



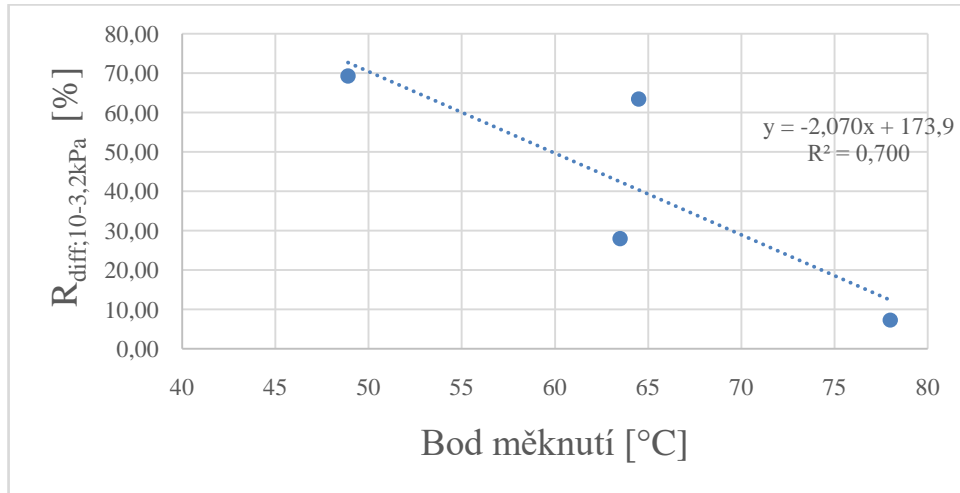
Graf 31 - Korelace bodu měknutí s $R_{diff;3,2-0,1kPa}$



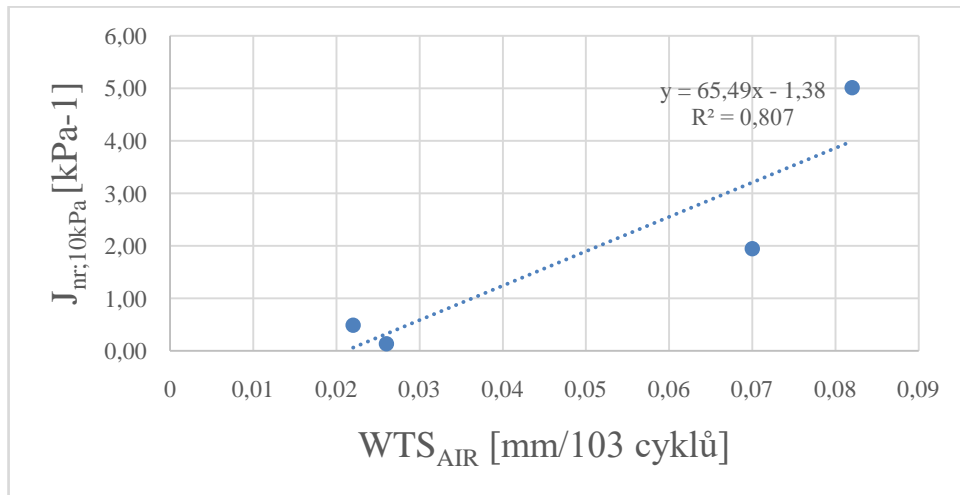
Graf 32 - Korelace bodu měknutí s $R_{diff;10-0,1kPa}$



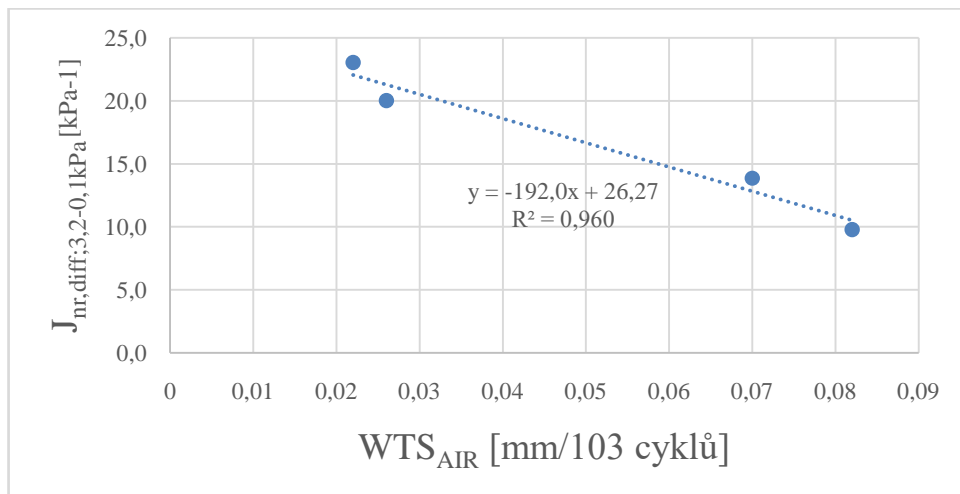
Graf 33 - Korelace bodu měknutí s $R_{\text{diff};10-3,2\text{kPa}}$



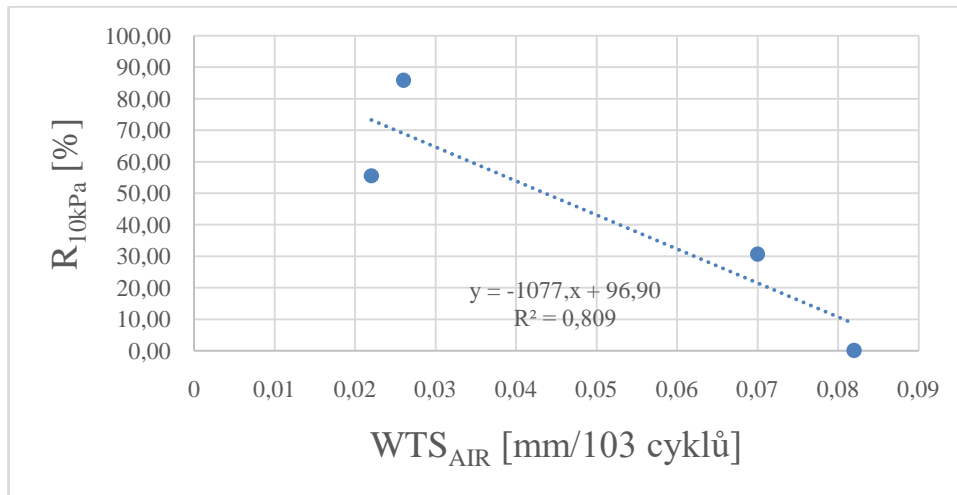
Graf 34 - Korelace WTS_{AIR} s $J_{\text{nr};10\text{kPa}}$



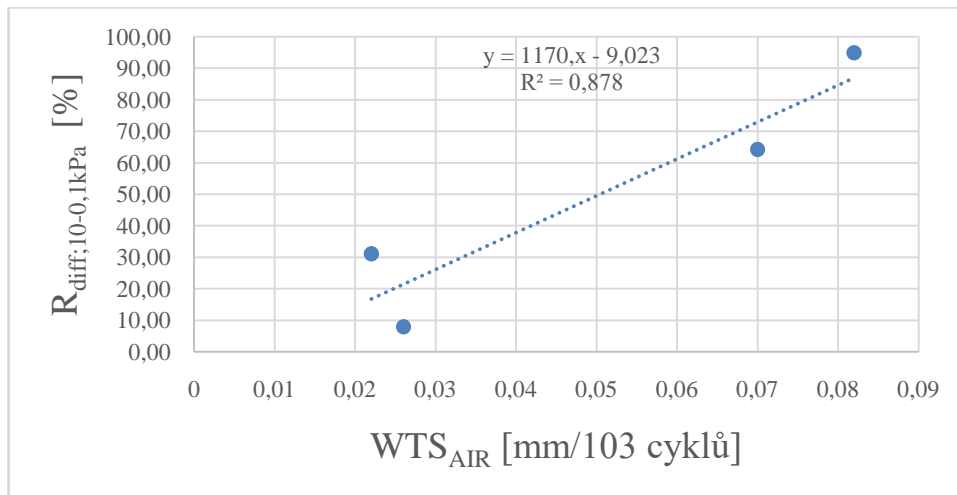
Graf 35 - Korelace WTS_{AIR} s $J_{\text{nr,diff};3,2-0,1\text{kPa}}$



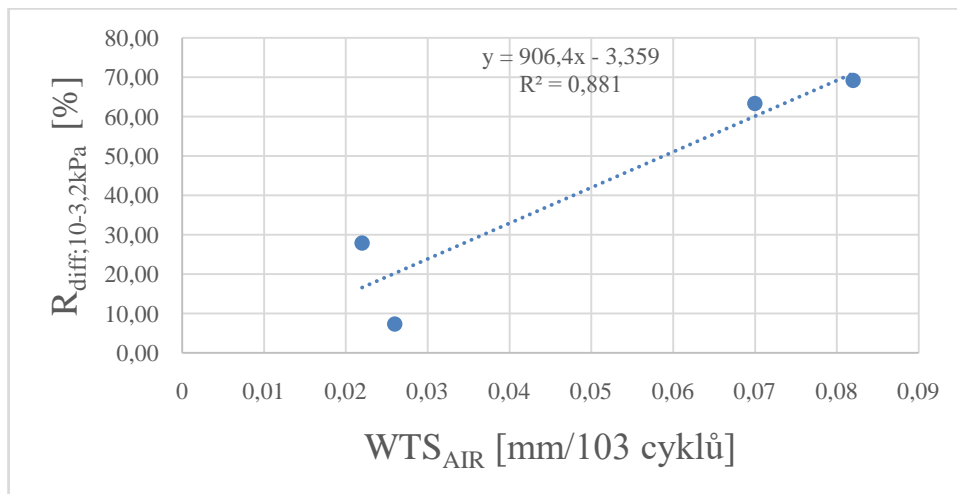
Graf 36 - Korelace WTS_{AIR} s R_{10kPa}



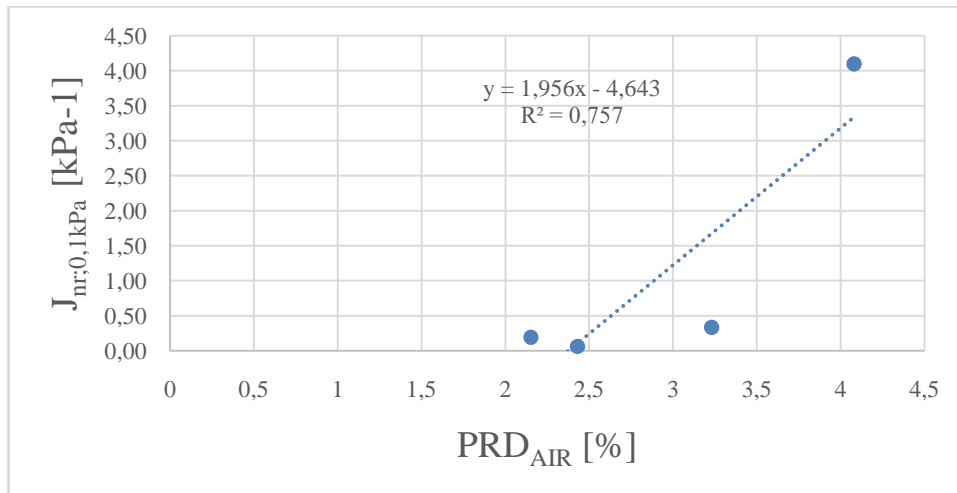
Graf 37 - Korelace WTS_{AIR} s $R_{diff;10-0,1kPa}$



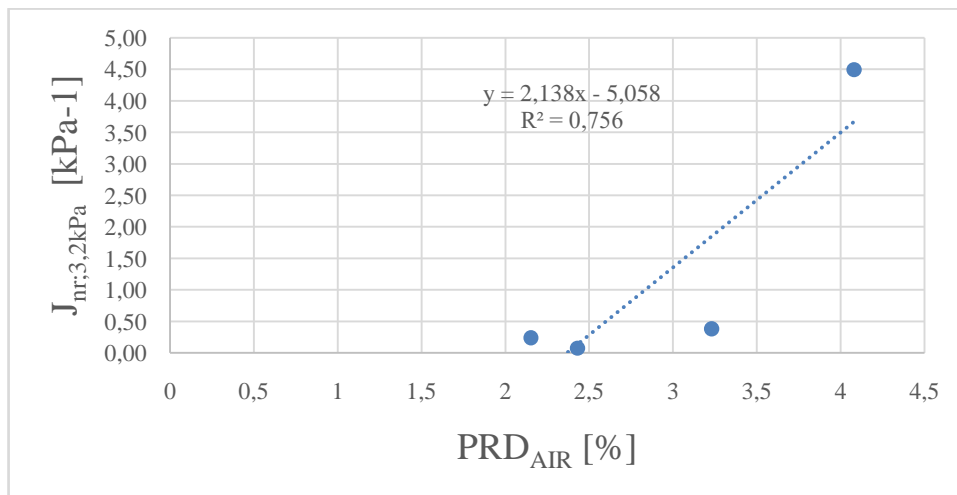
Graf 38 - Korelace WTS_{AIR} s $R_{diff;10-3,2kPa}$



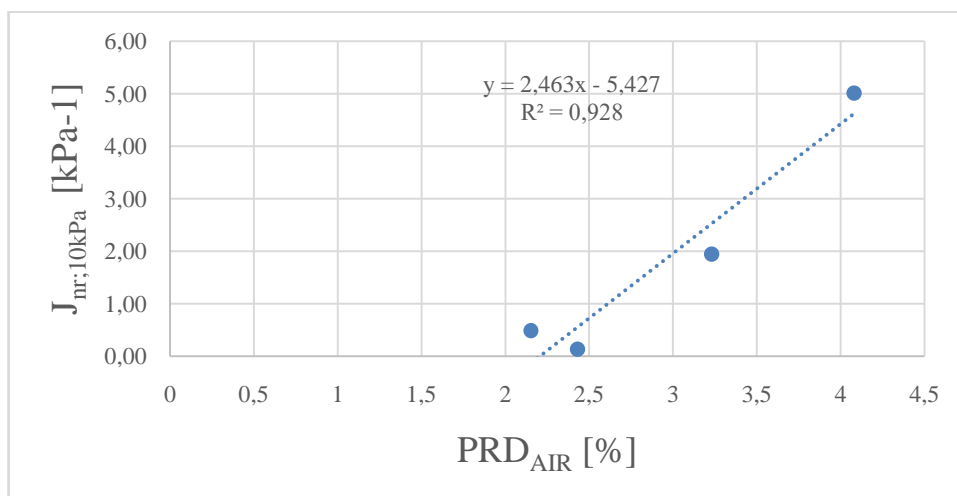
Graf 39 - Korelace PRD_{AIR} s $J_{nr;0,1kPa}$



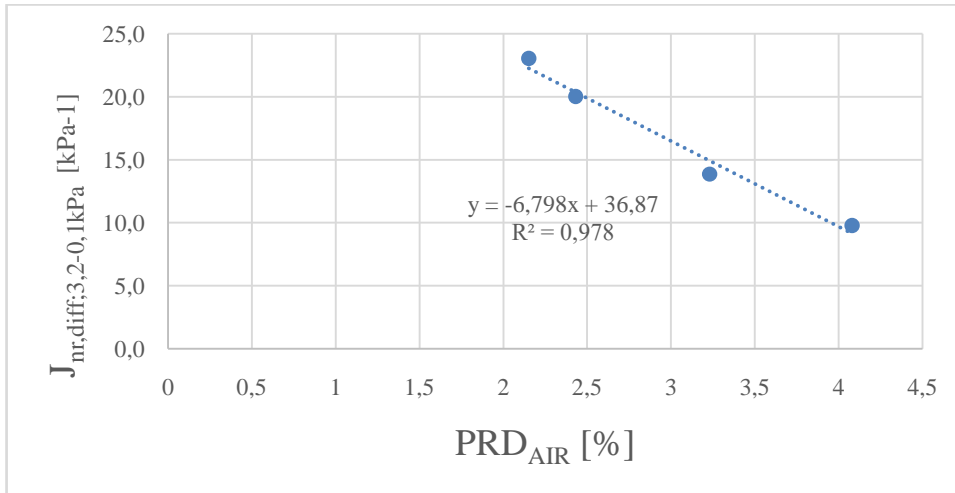
Graf 40 - Korelace PRD_{AIR} s $J_{nr;3,2kPa}$



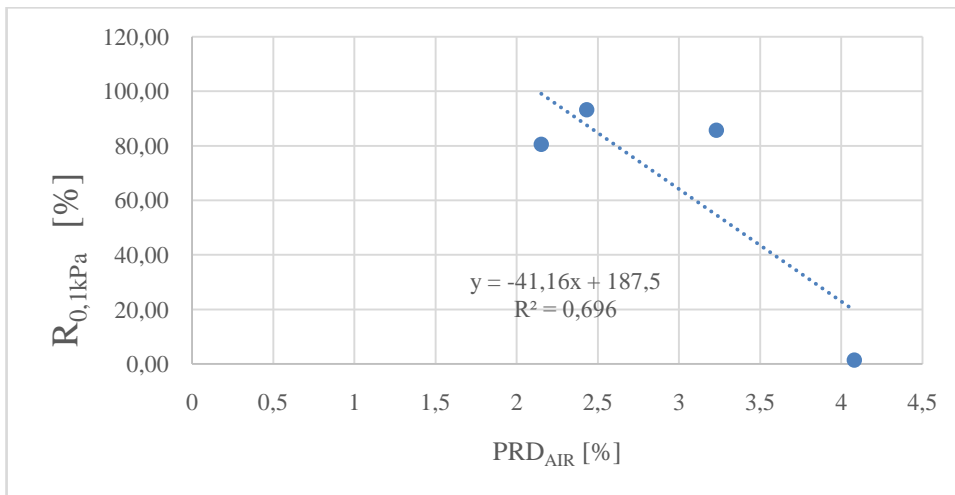
Graf 41 - Korelace PRD_{AIR} s $J_{nr;10kPa}$



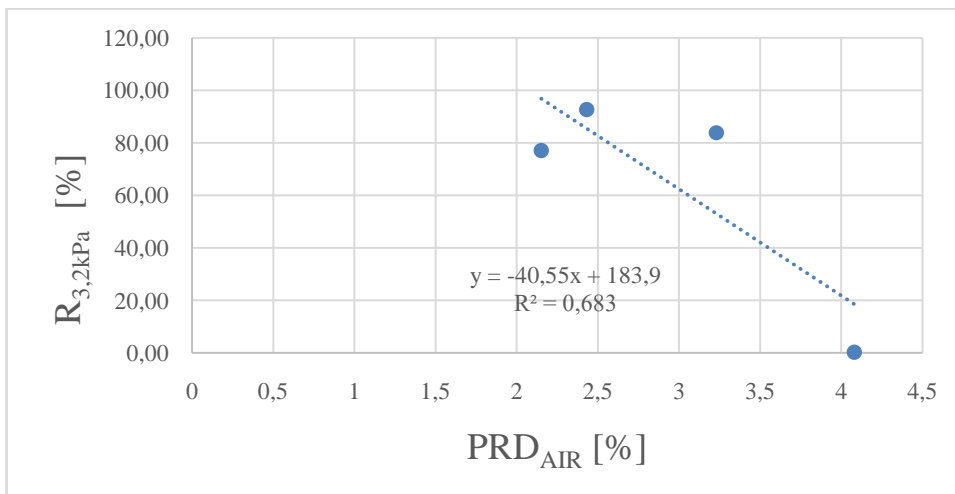
Graf 42 - Korelace PRD_{AIR} s $J_{nr,diff;3,2-0,1kPa}$



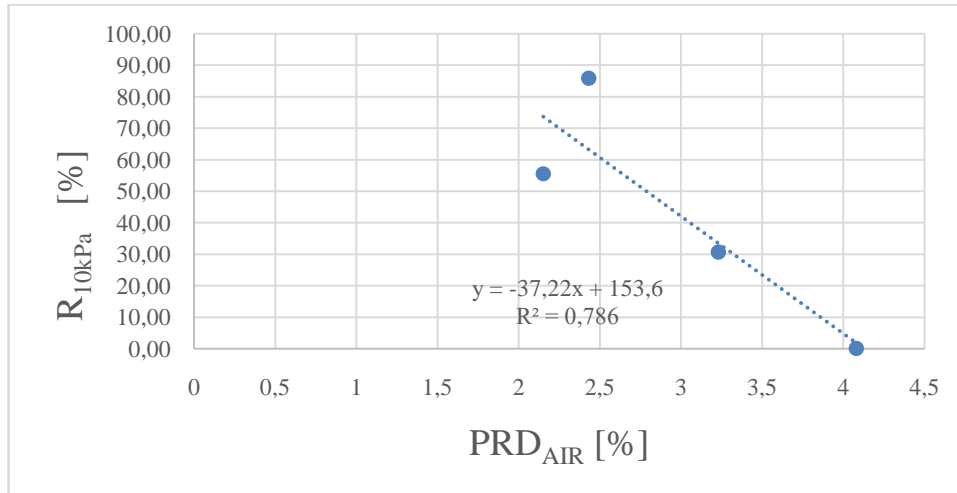
Graf 43 - Korelace PRD_{AIR} s $R_{0,1kPa}$



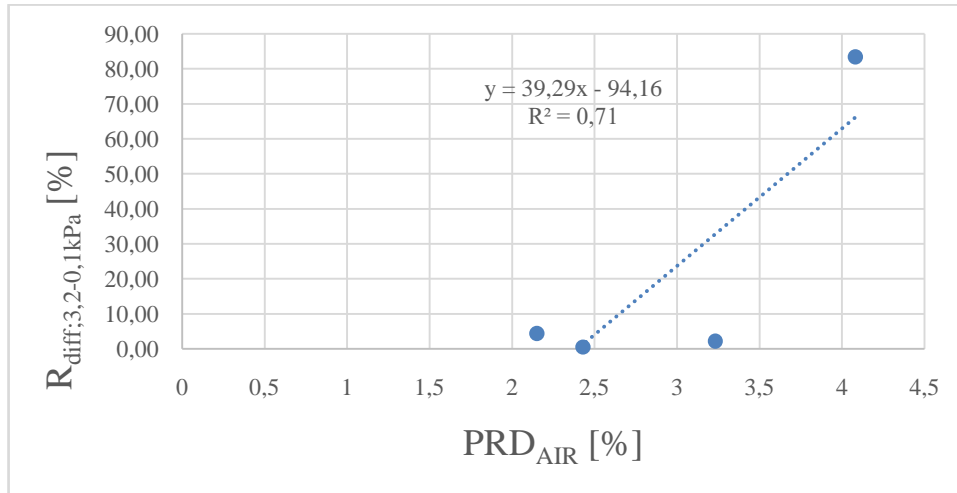
Graf 44 - Korelace PRD_{AIR} s $R_{3,2kPa}$



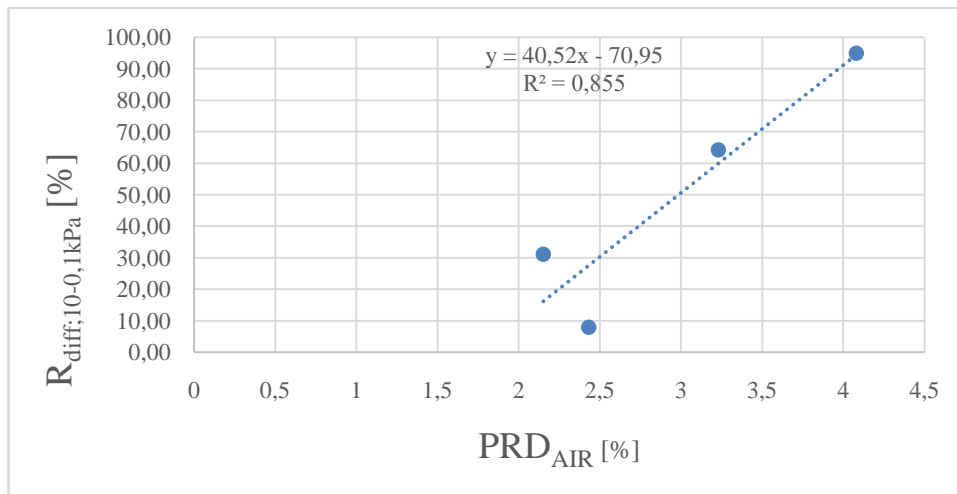
Graf 45 - Korelace PRD_{AIR} s R_{10kPa}



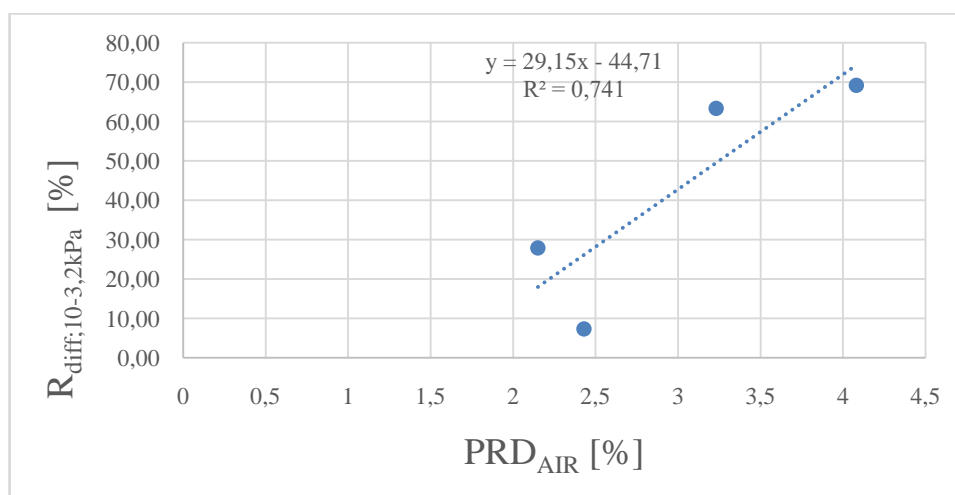
Graf 46 - Korelace PRD_{AIR} s R_{diff;3,2-0,1kPa}



Graf 47 - Korelace PRD_{AIR} s R_{diff;10-0,1kPa}



Graf 48 - Korelace PRD_{AIR} s $R_{diff;10-3,2kPa}$



Tabulka 20 - Výsledné koeficienty determinace

R^2	Penetrace	Bod měknutí	WTS_{AIR}	PRD_{AIR}
Penetrace				
Bod měknutí	0,0230			
WTS_{AIR}	0,2964	0,5354		
PRD_{AIR}	0,1581	0,5888		
$J_{nr;0,1kPa}$	0,0083	0,7316	0,5372	0,7574
$J_{nr;3,2kPa}$	0,0088	0,7344	0,5364	0,7561
$J_{nr;10kPa}$	0,0214	0,8028	0,8073	0,9285
$J_{nr,diff;3,2-0,1kPa}$	0,2776	0,4703	0,9607	0,9788
$J_{nr,diff;10-0,1kPa}$	0,5051	0,0443	0,0368	0,0043
$J_{nr,diff;10-3,2kPa}$	0,5450	0,0322	0,0577	0,0002
$R_{0,1kPa}$	0,0291	0,7893	0,4874	0,6965
$R_{3,2kPa}$	0,0349	0,8086	0,4794	0,6832
R_{10kPa}	0,0267	0,9030	0,8098	0,7862
$R_{diff;3,2-0,1kPa}$	0,0201	0,7202	0,4835	0,7100
$R_{diff;10-0,1kPa}$	0,0580	0,8495	0,8784	0,8559
$R_{diff;10-3,2kPa}$	0,1548	0,7009	0,8812	0,7415

Z hodnot koeficientů determinace je patrné, že ne všechny zkoušky mají mezi sebou nějakou závislost. Zkouška penetrace neprokázala žádnou významnou korelaci s ostatními provedenými zkouškami, tudíž na sobě nejsou nijak závislé. Zkouška bodu měknutí ukázala větší korelace, hlavně se zkouškou MSCR, kde se většina součinitelů pohybovala kolem hodnoty 0,8. Nejvyšší závislost byla zjištěna s parametrem průměrného elastického zotavení R_{10kPa} , kde součinitel dosáhl hodnoty 0,903, také s rozdílem v průměrném zotavení $R_{diff;10-0,1kPa}$ s hodnotou součinitele 0,8495 a také s nevratnou smykovou poddajností $J_{nr;10kPa}$ a součinitelem 0,8028.

U parametru z vyjždění kolejí WTS_{AIR} bylo dosaženo také vcelku vysokých korelací s hodnotami ze zkoušky MSCR, zejména s rozdílem smykové poddajnosti $J_{nr,diff;3,2-0,1kPa}$ o součiniteli 0,9607, také s rozdílem v průměrném zotavení $R_{diff;10-3,2kPa}$

s hodnotou součinitele 0,8812 a také s rozdílem v průměrném zotavení $R_{\text{diff};10-0,1\text{kPa}}$, kde součinitel má hodnotu 0,8784. Při zjišťování korelací parametru PRD_{AIR} s výsledky zkoušky MSCR vycházely také vysoké hodnoty koeficientu determinace kromě porovnání s rozdíly smykové poddajnosti $J_{\text{nr,diff};10-0,1\text{kPa}}$ a $J_{\text{nr,diff};10-3,2\text{kPa}}$, kde jsou součinitele v podstatě nulové. Nejvyšších korelace byly zjištěny s parametry rozdílu smykové poddajnosti $J_{\text{nr,diff};3,2-0,1\text{kPa}}$ s hodnotou součinitele 0,9788, také se smykovou poddajností $J_{\text{nr};10\text{kPa}}$, kde byla hodnota součinitele 0,9285 a i s rozdílem v průměrném zotavení $R_{\text{diff};10-0,1\text{kPa}}$ o hodnotě součinitele 0,8559 byla zjištěna vysoká korelace.

7 ZÁVĚR

V bakalářské práci byla použita 4 asfaltová pojiva, na kterých byly provedeny zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí a zkouška MSCR, která by měla vypovídat o náchylnosti pojiva k tvorbě trvalých deformací. Jedno pojivo bylo nemodifikovaný silniční asfalt gradace 50/70 od výrobce Total a další tři byly polymerem modifikované asfalty gradace 45/80-55, 25/55-65 a 45/80-65 od výrobce Eurovia.

Při vyhodnocení zkoušky penetrace jehlou bylo zjištěno, že hodnota penetrace není příliš ovlivněna stupněm modifikace, jelikož penetrace silničního asfaltu nebyla ani nejnižší, ani nejvyšší ze všech čtyř druhů asfaltů. To může být pravděpodobně způsobeno kombinací různých vstupních asfaltů, které se používají pro výrobu polymerem modifikovaných asfaltů a rozdílných obsahů polymerní přísady. Všechny hodnoty penetrace vyhověly daným požadavkům odpovídající výrobní normy.

Kromě jednoho asfaltového pojiva 25/55-65, u kterého vyšel bod měknutí o 1,5 °C nižší, než bylo garantováno výrobcem, splnila ostatní pojiva normové požadavky na minimální hodnotu bodu měknutí. Hodnoty bodu měknutí byly silně závislé na druhu (gradaci) pojiva. Značně nejnižší hodnoty bodu měknutí dosahoval nemodifikovaný silniční asfalt 50/70. V případě pojiv 45/80-55 a 45/80-65 je hodnota bodu měknutí značně vyšší, než je pro dané kategorie požadováno (pro 45/80-55 o 9,5 °C a v případě 45/80-65 dokonce o 13,0 °C). Důvodem vyšších hodnot bodu měknutí může být pravděpodobně zvýšený obsah polymerní přísady.

Dále byla na srovnávaných pojivech provedena zkouška MSCR v DSR při teplotě 60 °C. Z výsledků zkoušky MSCR vyplynulo, že nejmenší odolnost proti trvalým deformacím dosahuje silniční asfalt a to velmi výrazně v porovnání s ostatními polymerem modifikovanými asfalty. Naopak nejmenší přetvoření, hodnocené hodnotou nevratné smykové poddajnosti, bylo dosaženo u polymerem modifikovaného asfaltu 45/80-65.

Na závěr byla provedena zkouška pojíždění kolem na asfaltové směsi typu asfaltový beton pro obrusné vrstvy ACO 11+, která obsahovala srovnávaná pojiva, přičemž ostatní parametry asfaltové směsi zůstaly neměnné. Opět nejvyšších hodnot deformací bylo dosaženo u asfaltové směsi obsahující silniční asfalt, naopak nejmenší trvalé deformace byly zjištěny u směsi stmelené polymerem modifikovaným asfaltem 25/55-65, což ne zcela koresponduje s výsledky zkoušky MSCR, protože toto pojivo bylo hodnoceno jednotlivými parametry zkoušky MSCR většinou jako druhé nejlepší.

Obecně se dá ale říci, že u silničního asfaltu a z něho vytvořené asfaltové směsi bylo dosaženo výrazně větších trvalých deformací při obou zkouškách (MSCR i zkouška pojíždění kolem) než v případě všech ostatních polymerem modifikovaných asfaltů a z nich vyrobených asfaltových směsí.

Po korelaci jednotlivých zkoušek se ukázala jistá závislost mezi výsledky zkoušky bodu měknutí a MSCR. Také vcelku vysoká korelace byla zjištěna mezi zkouškami MSCR a vyjížděním kolejí na asfaltové směsi, kde ale v experimentální části odpovídaly pouze výsledky pro některé asfalty. Získané výsledky by bylo vhodné potvrdit na větším souboru asfaltových pojiv a asfaltových směsí pro eliminaci případných nepřesností měření a následné potvrzení či vyvrácení vzájemných závislostí výsledků.

8 SEZNAMY

8.1 Seznam použitých zdrojů

- [1] BŁAŻEJOWSKI, Krzysztof; WÓJCIK-WIŚNIEWSKA, Marta; BARANOWSKA, Wiktoria. *High temperature properties of bitumen and bituminous mixtures*. ORLEN Asphalt Sp. z o.o. Poland. 2017.
- [2] DAŠEK, Ondřej; HÝZL, Petr. *Zkoušení asfaltových pojiv*. [online]. 2017. [citováno 2018-05-19]. Dostupné z: https://lms.fce.vutbr.cz/pluginfile.php/25513/mod_resource/content/1/T%C3%A9ma%206%20prezentace%20-%20Asfaltov%C3%A1%20pojiva.pdf
- [3] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II: Asfaltová pojiva*. Brno. 2005.
- [4] *Nerostné suroviny Albánie*. [online]. 2013. [citováno 2018-05-11]. Enviweb s. r. o. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/97443>
- [5] *Atmosférická destilace ropy*. [online]. 2018. [citováno 2018-05-12]. Petroleum.cz. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-05.aspx>
- [6] *Vakuová destilace mazutu*. [online]. 2018. [citováno 2018-05-12]. Petroleum.cz. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-06.aspx>
- [7] HOTAŘ, Petr. *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Brno, 2014. 73 str., 19 str. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
- [8] TP 82 – Katalog poruch netuhých vozovek Brno: Ministerstvo dopravy ČR. 2010.
- [9] HÝZL, Petr. *Poruchy vozovek a jejich příčiny*. [online]. [citováno 2018-05-13]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Dostupné z: <http://www.sdruzeni->

silnice.cz/Download.aspx?param=jx3godhnp7M1LWTdfUhReCx1DocnVJtuHgpaL2xS txRmKZUOx9xdYIvpgU9l6QdYWai%2BcCliwso7hlZ3h6vt9WIJZb7xiCysiv%2B2P8 mEz2Y87YtWnIrdj%2FOT15WUpW%2FgeN7IKuFpVCeIVMfpDXhTj1reGAXfsFG1 jjeunl0mQHqkRXfK%2FDcctU5muv9bcjIIB3OzinA3b0D9PDdAEANdRP6w62ILcK Clpw3mkyr3gTdxLl3BIw8thLMG8HsdMGIyxJ6hPVmUrKygyFYfV7CuHZFMLoCvX 80W3mjVtyjHU9kD4AxV%2FoPvZaM28W2BiQKwq7RLfmyV4JOmee0ccOoJRtiYg GJVrnYmi1blSsj39Hlr8cYyxmw0NNzey3Tps8T6IbdqRJjG2RSpqoUJVxXvBvE9CQ KK6mzA0x85uQMJ2zFmt9M9G55qOKzmlxpk%2FfpMZ32ZvnWp1etittGELLgvNrhJ fwYJgrSTNR%2FTfpiqOGOpB%2F0jLY1GneIyzhg7AZN9BPxD17NnstStt7CkUrume AA%3D%3D&tname=SiteContent.aspx

[10] COUFALÍK, Pavel. *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Brno, 2017. 213 s., 28 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

[11] ČSN EN 1426. *Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení penetrace jehlou*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[12] ČSN EN 1427. *Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení bodu měknutí*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

[13] ČSN EN 16659. *Asfalty a asfaltová pojiva: Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

[14] ČSN EN 13108-1. *Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

[15] STRAŠÁKOVÁ, Monika. *Zkouška MSCR v dynamickém smykovém reometru*. Brno, 2014. 50 stran. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.

- [16] BRODÁK, Marek. *Dynamická viskozita asfaltových pojiv*. Brno, 2017. 53 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [17] BAMBULOVÁ, Lucie. *Tvorba trvalých deformací u asfaltových směsí*. Brno, 2016. 73 s., 13 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl Ph.D.
- [18] STEHLÍK, Dušan; ŠPERKA, Pavel; PUDA, Adam. *Klasifikace a charakteristiky stavu zemin podle ČSN 73 6133*. [online]. 2017. [citováno 2018-05-08]
- [19] ČSN EN 993-1+A1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [20] STROMECKÝ, Roman. *Asfaltové směsi se zvýšenou odolností vůči vzniku trhlin*. Brno, 2017. 65 s., 4 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [21] ČSN EN 12697-35+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsí*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [22] ČSN EN 12697-30+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázových zhutňovačem*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [23] ČSN EN 12697-33+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [24] ČSN EN 12697-6+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[25] ČSN EN 12697-5+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[26] ČSN EN 12697-8. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Praha: Český normalizační institut, 2004.

[27] COUFALÍK, Pavel. *Návrh a posouzení směsi pro asfaltové vrstvy se zvýšenou odolností proti šíření trhlin (SAL)*. Brno, 2012. 155s., 67 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.

[28] ČSN EN 12697-22+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška pojiždění kolem*. Praha: Český normalizační institut, 2007.

[29] ČSN EN 65 7204. *Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční asfalty*. 2016.

[30] ČSN EN 65 7222-1. *Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční modifikované asfalty – Část 1: Polymerem modifikované asfalty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví. 2017.

8.2 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Hodnoty pro platné stanovení penetrace jehlou	29
Tabulka 2 - Seznam použitých asfaltových pojiv	49
Tabulka 3 - Požadované vlastnosti 50/70 dle ČSN 65 7204.....	49
Tabulka 4 - Požadované vlastnosti 45/80-55 dle ČSN 65 7222-1	49
Tabulka 5 - Požadované vlastnosti na 25/55-65 dle ČSN 65 7222-1	50
Tabulka 6 - Požadované vlastnosti na 45/80-65 dle ČSN 65 7222-1	50
Tabulka 7 - Výpočet křivky zrnitosti pro návrh č. 1	51
Tabulka 8 - Výpočet objemové hmotnosti pro návrh č. 1	52
Tabulka 9 - Výpočet maximální objemové hmotnosti pro návrh č. 1	52

Tabulka 10 - Výpočet mezerovitosti pro návrh č. 1	52
Tabulka 11 - Výpočet křivky zrnitosti pro návrh č. 2.....	53
Tabulka 12 - Výpočet objemové hmotnosti pro návrh č. 2	54
Tabulka 13 - Výpočet maximální objemové hmotnosti pro návrh č. 2	54
Tabulka 14 - Výpočet mezerovitosti pro návrh č. 2	54
Tabulka 15 - Výpočet míry zhutnění pro zkušební desky	55
Tabulka 16 - Výsledky penetrace jehlou	55
Tabulka 17 - Výsledky bodu měknutí.....	56
Tabulka 18 - Výsledné hodnoty zkoušky MSCR	58
Tabulka 19 - Výsledné hodnoty zkoušky pojíždění kolem.....	65
Tabulka 20 - Výsledné koeficienty determinace	76

8.3 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Vakuová kolona	24
Obrázek 2 - Atmosférická kolona	24
Obrázek 3 - Visko-elastické chování asfaltu	25
Obrázek 4 - Vyjeté koleje	26
Obrázek 5 - Penetrometr	29
Obrázek 6 - Zkušební zařízení pro bod měknutí kroužek a kulička	30
Obrázek 7 - Přístroj pro zkoušku bodu měknutí kroužek a kulička.....	30
Obrázek 8 – Ukončení zkoušky bodu měknutí kroužek a kulička	30
Obrázek 9 - Průběh zkoušky MSCR.....	31
Obrázek 10 - Dynamický smykový reometr	32
Obrázek 11 - Připravené zkušební vzorky	32
Obrázek 12 - Schéma nastavené mezery typu deska-deska při MSCR	33
Obrázek 13 - Průběh přetvoření.....	33
Obrázek 14 - Praní vzorku	36
Obrázek 15 - Třesací zařízení pro síťový rozbor.....	37
Obrázek 16 - Míchací zařízení pro strojní míchání směsi	39
Obrázek 17 - Hutnicí zařízení pro výrobu Marshallových těles.....	40
Obrázek 18 - Chládnutí Marshallových těles ve formě	40
Obrázek 19 - Vytlačená Marshallova tělesa	40
Obrázek 20 - Hutnicí zařízení pro výrobu zkušebních desek	42

Obrázek 21 - Zkušební deska s pojivem 50/70.....	42
Obrázek 22 - Zkušební deska s pojivem 45/80-55	42
Obrázek 23 - Zkušební deska s pojivem 25/55-65	42
Obrázek 24 - Zkušební deska s pojivem 45/80-65	42
Obrázek 25 - Pyknometry	44
Obrázek 26 - Vyjížděč kolejí pohled z boku	46
Obrázek 27 - Vyjížděč kolejí pohled zepředu	46
Obrázek 28 - Požadavky pro asfaltovou směs ACO 11+	48
Obrázek 29 - Vyjetá kolej na desce s asfaltovým pojivem 50/70.....	67
Obrázek 30 - Vyjetá kolej na desce s asfaltovým pojivem 45/80-55.....	67
Obrázek 31 - Vyjetá kolej na desce s asfaltovým pojivem 25/55-65	67
Obrázek 32 - Vyjetá kolej na desce s asfaltovým pojivem 45/80-65.....	67

8.4 Seznam grafů

Graf 1 - Průběh křivky zrnitosti pro návrh č. 1	51
Graf 2 - Průběh křivky zrnitosti pro návrh č. 2.....	53
Graf 3 - Porovnání výsledků penetrace jehlou.....	56
Graf 4 - Porovnání výsledků bodu měknutí.....	57
Graf 5 - Nevratná smyková poddajnost $J_{nr;0,1kPa}$	58
Graf 6 - Nevratná smyková poddajnost $J_{nr;3,2kPa}$	59
Graf 7 - Nevratná smyková poddajnost $J_{nr;10kPa}$	59
Graf 8 - Rozdíl v nevratné smykové poddajnosti $J_{nr,diff;3,2-0,1kPa}$	59
Graf 9 - Rozdíl v nevratné smykové poddajnosti $J_{nr,diff;10-0,1kPa}$	60
Graf 10 - Rozdíl v nevratné smykové poddajnosti $J_{nr,diff;10-3,2kPa}$	60
Graf 11 - Průměrné elastické zotavení $R_{0,1kPa}$	60
Graf 12 - Průměrné elastické zotavení $R_{3,2kPa}$	61
Graf 13 - Průměrné elastické zotavení R_{10kPa}	61
Graf 14 - Rozdíl v průměrném zotavení $R_{diff;3,2-0,1kPa}$	61
Graf 15 - Rozdíl v průměrném zotavení $R_{diff;10-0,1kPa}$	62
Graf 16 - Rozdíl v průměrném zotavení $R_{diff;10-3,2kPa}$	62
Graf 17 - Průběh zkoušky MSCR	63
Graf 18 - Průběh zkoušky MSCR - výřez 0,1 kPa.....	63
Graf 19 - Průběh zkoušky MSCR - výřez 3,2 kPa.....	64

Graf 20 - Průběh zkoušky MSCR - výřez 10 kPa.....	64
Graf 21– Porovnání hodnot PRD_{AIR}	65
Graf 22 - Porovnání hodnot WTS_{AIR}	65
Graf 23 - Poměrná hloubka vyjetých kolejí na počtu cyklů	66
Graf 24 - Závislost hloubky kolejí na počtu cyklů	66
Graf 25 - Korelace bodu měknutí s $J_{nr;0,1kPa}$	68
Graf 26 - Korelace bodu měknutí s $J_{nr;3,2kPa}$	68
Graf 27 - Korelace bodu měknutí s $J_{nr;10kPa}$	69
Graf 28 - Korelace bodu měknutí s $R_{0,1kPa}$	69
Graf 29 - Korelace bodu měknutí s $R_{3,2kPa}$	69
Graf 30 - Korelace bodu měknutí s R_{10kPa}	70
Graf 31 - Korelace bodu měknutí s $R_{diff;3,2-0,1kPa}$	70
Graf 32 - Korelace bodu měknutí s $R_{diff;10-0,1kPa}$	70
Graf 33 - Korelace bodu měknutí s $R_{diff;10-3,2kPa}$	71
Graf 34 - Korelace WTS_{AIR} s $J_{nr;10kPa}$	71
Graf 35 - Korelace WTS_{AIR} s $J_{nr,diff;3,2-0,1kPa}$	71
Graf 36 - Korelace WTS_{AIR} s R_{10kPa}	72
Graf 37 - Korelace WTS_{AIR} s $R_{diff;10-0,1kPa}$	72
Graf 38 - Korelace WTS_{AIR} s $R_{diff;10-3,2kPa}$	72
Graf 39 - Korelace PRD_{AIR} s $J_{nr;0,1kPa}$	73
Graf 40 - Korelace PRD_{AIR} s $J_{nr;3,2kPa}$	73
Graf 41 - Korelace PRD_{AIR} s $J_{nr;10kPa}$	73
Graf 42 - Korelace PRD_{AIR} s $J_{nr,diff;3,2-0,1kPa}$	74
Graf 43 - Korelace PRD_{AIR} s $R_{0,1kPa}$	74
Graf 44 - Korelace PRD_{AIR} s $R_{3,2kPa}$	74
Graf 45 - Korelace PRD_{AIR} s R_{10kPa}	75
Graf 46 - Korelace PRD_{AIR} s $R_{diff;3,2-0,1kPa}$	75
Graf 47 - Korelace PRD_{AIR} s $R_{diff;10-0,1kPa}$	75
Graf 48 - Korelace PRD_{AIR} s $R_{diff;10-3,2kPa}$	76