



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**SIMULACE STÁRNUTÍ ASFALTOVÉ SMĚSI V
LABORATOŘI**

LABORATORY SIMULATION AGEING OF ASPHALT MIXTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michaela Staňková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

BRNO 2019



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	Michaela Staňková
Název	Simulace stárnutí asfaltové směsi v laboratoři
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

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

V rámci bakalářské práce bude v laboratorních podmínkách modelováno stárnutí asfaltové směsi ve formě Marshallových těles. Zestárnutí bude hodnoceno změnou hodnoty pevnosti v příčném tahu a změnou hodnoty ztráty částic Marshallových těles.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje problematice stárnutí asfaltového pojiva a asfaltové směsi. Pro účely práce byly odebrány asfaltové směsi typu asfaltový beton obsahující silniční asfalty třídy 50/70. Ze směsí byla vyrobena zkušební tělesa dle ČSN EN 12697-30-A1. Na zkušebních tělesech proběhlo umělé stárnutí v laboratorní sušárně. Změny vlastností způsobené stárnutím byly porovnány pomocí zkoušky ztráty částic asfaltového koberce drenážního dle ČSN EN 12697-17+A1 a zkoušky stanovení pevnosti v příčném tahu dle ČSN EN 12697-23.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stárnutí, Marshallova těleso, ztráta částic asfaltového koberce drenážního, PL, pevnost v příčném tahu, ITS

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the issue of ageing of asphalt binder and asphalt mixture. Asphalt mixtures of asphalt concrete type containing 50/70 paving bitumen were collected for the purposes of this thesis. Test specimens were prepared from the mixtures according to ČSN EN 12697-30+A1 standard. The test specimens were aged in a laboratory oven. Changes in properties caused by ageing were compared using particle loss of porous asphalt specimen according to ČSN EN 12697-17+A1 and the indirect tensile strength of bituminous specimens according to ČSN EN 12697-23 standard.

KEYWORDS

Ageing, Marshall specimen, particle loss of porous asphalt specimen, PL, indirect tensile strength, ITS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Michaela Staňková *Simulace stárnutí asfaltové směsi v laboratoři*. Brno, 2019. 39 s.,
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních
komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Simulace stárnutí asfaltové směsi v laboratoři* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2019

Michaela Staňková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych velmi ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. za jeho vstřícný přístup, čas a rady během konzultací a vypracování bakalářské práce. Také bych chtěla poděkovat Pavlovi Strakovi a Matěji Šafránkovi za jejich ochotu a pomoc při práci v laboratoři.

OBSAH

1	ÚVOD	1
2	REŠERŠE LITERATURY	3
2.1	STÁRNUTÍ ASFALTOVÉ SMĚSI.....	3
2.2	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ STÁRNUTÍ	3
2.3	MECHANISMY STÁRNUTÍ	4
2.4	SIMULACE STÁRNUTÍ V LABORATORÍCH PODMÍNKÁCH.....	5
2.4.1	<i>METODY STÁRNUTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA</i>	<i>6</i>
2.4.2	<i>METODY STÁRNUTÍ ASFALTOVÉ SMĚSI.....</i>	<i>8</i>
2.5	METODY STÁRNUTÍ, DLE PREN 12697-52	9
2.5.1	<i>STÁRNUTÍ VOLNĚ LOŽENÉ SMĚSI</i>	<i>9</i>
2.5.2	<i>STÁRNUTÍ ZHUTNĚNÉ SMĚSI</i>	<i>9</i>
3	CÍLE BP.....	10
4	POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	11
4.1	STÁRNUTÍ	11
4.2	PŘÍPRAVA TĚLES, DLE ČSN EN 12697-30+A1	12
4.2.1	<i>POSTUP VÝROBY.....</i>	<i>12</i>
4.3	ZTRÁTA ČÁSTIC ASFALTOVÉHO KOBERCE DRENÁŽNÍHO, DLE ČSN EN 12697-17+A1	14
4.3.1	<i>POSTUP ZKOUŠKY.....</i>	<i>14</i>
4.3.2	<i>VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY</i>	<i>14</i>
4.4	STANOVENÍ PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU, DLE ČSN EN 12697-23	15
4.4.1	<i>POSTUP ZKOUŠKY.....</i>	<i>16</i>
4.4.2	<i>VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY</i>	<i>17</i>
5	POUŽITÉ MATERIÁLY	18
5.1	KONTROLNÍ ZKOUŠKY PRO ASFALTOVOU SMĚS	18
5.2	KONTROLNÍ ZKOUŠKY POUŽITÝCH POJIV	21
6	VÝSLEDKY ZKOUŠEK	23
6.1	STANOVENÍ ZTRÁTY ČÁSTIC ASFALTOVÉHO KOBERCE DRENÁŽNÍHO	23
6.2	STANOVENÍ PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU	26
6.3	VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK ZTRÁTY ČÁSTIC A PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU	30
6.4	VZÁJEMNÁ KORELACE VLASTNOSTÍ	30
7	ZÁVĚR.....	34
9	SEZNAMY	36
9.1	SEZNAM TABULEK	36
9.2	SEZNAM GRAFŮ	36
9.3	SEZNAM OBRÁZKŮ	37
9.4	SEZNAM ROVNIC	37
9.6	SEZNAM POŽITÉ LITERATURY	38

1 ÚVOD

V současné době se doprava do zaměstnání, či do školy stala běžnou záležitostí. Nejrozšířenějším typem dopravy se stala doprava silniční a vzhledem ke stále zvyšujícímu se stupni automobilizace to vede ke zvýšení nároků na chování vozovek. Pro plynulost dopravy bez zdržení a komplikací je třeba navrhovat kvalitní pozemní komunikace s dostatečnou životností a odolností proti poškození a klimatickým vlivům. Toho lze docílit lepší skladbou a kvalitou použitých materiálů, které odolávají vnějším vlivům a dopravnímu zatížení silniční sítě České republiky.[12]

Jeden z hlavních materiálů, které ovlivňují kvalitu krytu pozemní komunikace, je asfaltové pojivo, které musí splňovat požadavky, jenž jsou dány technickými normami a předpisy. Asfalt je směs uhlovodíků, které jsou náchylné v průběhu technologických výrobních procesů hutněné asfaltové vrstvy ke komplexním změnám. Tyto modifikace vedou ke změně funkčních vlastností asfaltu i hutněné asfaltové směsi. To se projevuje na stavu vozovky vznikem trhlin a výtluků, což vede k celkovému porušení konstrukce vozovky. K eliminování poruch vozovky je třeba rozpoznat asfaltová pojiva, která jsou náchylná ke stárnutí. [15]

Stárnutí asfaltu je znehodnocení asfaltového pojiva v důsledku působení tepla, vzdušného kyslíku a ultrafialového elektromagnetického záření. Vlivem stárnutí dochází k úpravě fyzikálních a chemických vlastností, pojivo se stává tvrdší a křehčí. Významný účinek na zestárnutí má kromě druhu pojiva i použité kamenivo, obsah pojiva ve směsi a mezerovitost. [2], [10], [11]

Laboratorní stárnutí se snaží co nejvíce napodobit skutečný průběh stárnutí. Proces stárnutí můžeme nasimulovat dvěma způsoby. Prvním postupem je nechat zestárnout samotné pojivo. V druhém případě je pojivo součástí již hotové směsi. Druhá metoda je v laboratorní praxi méně zavedená. Dosavadní výzkumy se věnují posouzení vlivu účinku stárnutí ze zestárlého extrahovaného asfaltového pojiva. Dále stárnutí v laboratoři dělíme na krátkodobé a dlouhodobé stárnutí.[2], [11]

Pro laboratorní modelování stárnutí asfaltových směsí neexistuje v České republice žádný technický předpis. Existují pouze postupy hodnotící stárnutí asfaltových pojiv. Metodami stárnutí asfaltové směsi v laboratoři se věnuje návrh normy

PrEn 12697-52 Bituminous mixtures – test methods – Part 52: Conditioning address oxidative ageing.

V této bakalářské práci byl simulován proces stárnutí na Marshallových tělesech metodou dlouhodobého stárnutí v odvětrávané laboratorní sušárně s nuceným prouděním vzduchu. Pro zhodnocení míry stárnutí byla provedena zkouška ztráty částic dle ČSN EN 12697-17+A1 a pevnost v příčném tahu dle ČSN EN 12697-23.

2 REŠERŠE LITERATURY

2.1 STÁRNUTÍ ASFALTOVÉ SMĚSI

Stárnutí je děj, který ovlivňuje kvalitu a trvanlivost pozemních komunikací a v důsledku jeho působení dochází k předčasným poruchám vozovky. Během procesu stárnutí dochází nejdříve ke zvýšení tuhosti asfaltové směsi, což vede ke zpevnění a zlepšení odolnosti proti trvalým deformacím. Tato vlastnost se může zdát jako pozitivum, ale stárnutím se asfaltová směs stává křehčí a tím náchylnější k porušení při nízkých teplotách a k vzniku únavových trhlin. [10], [11]

Degradaci asfaltu nebo asfaltové směsi se označují nežádoucí změny vlastností, které negativně ovlivňují užité vlastnosti materiálů. Ke správnému hodnocení vlivů degradace asfaltového pojiva v asfaltové směsi je třeba laboratorně modelovat stárnutí asfaltového pojiva obsaženého přímo v asfaltové směsi. Mezi výhody hodnocení stárnutí asfaltového pojiva zabudovaného do asfaltové směsi je eventualita stanovit kvalitu, druh a obsah asfaltu v asfaltové směsi, tloušťku vrstvy pojiva na povrchu kameniva. [13]

Nejvýznamnější vliv na změnu vlastností asfaltového pojiva má termooxidační stárnutí. Termooxidační stárnutí je stárnutí způsobené vlivem tepla a vzdušného kyslíku.

Metodika, která by se věnovala simulaci termooxidačnímu stárnutí asfaltových směsí v laboratoři neexistuje. Existuje pouze evropská norma PrEN 12697-52, popsána v kapitole 2.5. [13], [15]

2.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ STÁRNUTÍ

Stárnutí je ovlivněno několika faktory, obecně je dělíme na vnitřní a vnější. Mezi vnitřní patří: množství asfaltového pojiva, kvalita použitého pojiva a kameniva, tloušťka asfaltové vrstvy, typ asfaltové vrstvy a procentuální obsah vzduchových mezer. Mezi vnější faktory jsou zahrnuty: působení vysokých teplot, ultrafialové záření, klimatické podmínky, dopravní zatížení. [11]

Jeden z nejvýznamnějších faktorů je obsah vzduchových mezer. Při vysoké hodnotě mezerovitosti asfaltové směsi může do filmu snáze vniknout vzdušný kyslík a ten je jedním z důsledků vyšší termooxidační zátěže (stárnutí) asfaltového pojiva. Zároveň platí, že pokud asfaltová vrstva na povrchu kameniva je příliš tenká, může dojít k

nadbytečnému stárnutí této tenké vrstvy. Naopak platí, že pokud tloušťka asfaltové vrstvy roste, vzrůstá také exponenciálně difúzní odpor této vrstvy a asfaltové pojivo, které se nachází pod touto vrstvou, je chráněno před vlivem stárnutí. [13]

2.3 MECHANISMY STÁRNUTÍ

Mechanismy stárnutí zahrnují: oxidaci, vypařování, strukturální stárnutí, fyzikální tvrdnutí. Nejzásadnější vliv na změnu vlastností asfaltového pojiva má stárnutí termooxidační. [2],[15]

Oxidace je chemický děj, při kterém reaguje asfaltové pojivo s kyslíkem. Proces stárnutí ovlivňuje teplota a platí, že pro každé navýšení teploty o 10 °C je rychlost termické oxidace, neboli rychlost termooxidačního stárnutí, asi dvojnásobná. Míra termooxidačního stárnutí závisí na složení a chemické povaze asfaltového pojiva. Tato vzájemná závislost se prokazuje pomocí indexu stárnutí asfaltové směsi, který vyjadřuje poměr viskozity před a po procesu stárnutí. [2], [15]

Vypařování neboli destilační procesy probíhají při zpracování silničních asphaltů za horka a často se vyskytují u typů asphaltů, které jsou za vyšších teplot náchylné ke zvýšené míře štěpení uhlovodíkových molekul za vzniku nízkomolekulárních sloučenin nebo obsahují olejovité podíly. Stárnutí vypařováním je závislé na teplotě a podmínkách okolí. Při dlouhodobém působení zvýšené teploty dochází k vydestilování. Vypařování lehkých frakcí se zvětšuje s vyšší teplotou, rostoucím povrchem a penetrací asfaltu. [15]

Strukturální nebo také migrační stárnutí je obdobou destilačních procesů. Na rozdíl od destilačních procesů probíhají za normálních teplot s menší rychlostí. Tento jev nastává, pokud je do asfaltového pojiva přimíchán malý podíl fluxačních olejů nebo se při výrobě nepoužívají dostatečně výkonné destilační kolony, což vede k vytvrzování asphaltů. Vlivem strukturálního stárnutí asfaltové pojivo ztrácí plasticitu, elasticitu a křehne, což se zhoršuje nárůstem velikostí koloidních částic. Při zvětšení rozměrů částic může vzniknout hrubá disperze a vícefázový systém. [15]

Fyzikální tvrdnutí je vratný děj, který mění bez zestárnutí jeho chemického složení a reologické vlastnosti. Vzniká, pokud je těleso vystaveno nízkým teplotám po delší časové období. [2]

2.4 SIMULACE STÁRNUTÍ V LABORATORÍCH PODMÍNKÁCH

Mezi metodami umělého stárnutí v laboratoři a skutečným degradačním procesem by měla existovat velice blízka vzájemná závislost. Modelovat stárnutí asfaltového pojiva a asfaltové směsi v laboratorních podmínkách můžeme:

- stárnutím samotného asfaltového pojiva;
- simulací stárnutí pojiva umístěného v asfaltové směsi;
 - stárnutím na volně ložené směsi;
 - stárnutím na zhutnělých zkušebních vzorcích. [2] [11]

Dále je možné simulaci stárnutí dělit na:

- krátkodobou simulaci stárnutí (krátkodobé stárnutí);
- dlouhodobou simulaci stárnutí (dlouhodobé stárnutí). [2]

Krátkodobé stárnutí pojiva simuluje stárnutí asfaltu na obalovně při obalování kameniva pojivem a při pokládce, hutnění vrstvy. Dlouhodobé stárnutí pojiva simuluje znehodnocení asfaltu zabudovaného ve vrstvě zhutněné asfaltové směsi.

[2]

2.4.1 METODY STÁRNUTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA

Asfalt se skládá s z rozmanitých uhlovodíkových sloučenin organického původu, které za určitých podmínek podléhají degradačním procesům vlivem působení tepla, vzdušného kyslíku, ultrafialového elektromagnetického záření nebo jejich kombinaci. [15]

2.4.1.1 KRÁTKODOBÉHO STÁRNUTÍ ASFALTOVÉ POJIVA

Pro metody simulování krátkodobého stárnutí asfaltového pojiva patří:

- zkouška tepelné stálosti v tenké pohybující se vrstvě „Rolling Thin Film Oven Test“ – RTFOT;
- zkouška tepelné stálosti tenkého filmu „Thin Film Oven Test“ – TFOT;
- zkouška krátkodobého stárnutí metodou RFT „Rotating Flask Test“. [2]

2.4.1.2 DLOUHODOBÉ STÁRNUTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA

Mezi metody modelování dlouhodobého stárnutí asfaltového pojiva se řadí:

- urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce „Rotating Cylinder Ageing Test“ – RCAT
- zkouška urychleného dlouhodobého stárnutí v tlakové nádobě „Pressure Ageing Vessel“ – PAV
- modifikovaná zkouška RTFOT (3krát RTFOT) [2]

Přehled metod pro stárnutí asfaltového pojiva můžeme naléznout v tabulce 1 spolu s názvy norem, pracovní teplotou, velikostí vzorku, časem a podmínkami expozice.

Metody urychleného stárnutí	Název metody (angl.)	Označení normy	Pracovní teplota [°C]	Velikost vzorku [g]	Čas expozice [min]	Podmínky expozice	Rozměr geometrie [mm]	Nucená cirkulace	Přívod vzduchu/kyslíku [ml/min]
RTFOT	Rotation Thin Film Oven Test	EN 12607-1	163	35 ± 0,5	75 ± 1	Rotující film	140 x Ø 64	Ano přerušovaná	Atm. vzduch 4,5
TFOT	Thin Film Oven Test	EN 12607-2	120 (163)	50 ± 0,5	300 (+ 15)	Statický film	9,5 x Ø 140	Ne	-
RTF	Rotating Flask Test	EN 12607-3	165	100 ± 1	150 ± 1	Rotující film	1000 ml Std. 29/32	Ano permanentní	Atm. vzduch 500
RCAT	Rotating Cylinder Ageing Test	EN 15323	163	525 ± 25	235 ± 5	Rotující film	300 x Ø 125	Ano permanentní	Kyslík 4,0
PAV	Pressure Ageing Vessel	EN 14769	100 (90/110)	50 ± 0,5	1200	Statický film	9,5 x Ø 140	Ne / Ano Nucený přetlak	Atm. vzduch 2,1 MPa

Tabulka 1: Přehled hodnot akcelerovaného stárnutí normovaných v Evropě [15]

2.4.2 METODY STÁRNUTÍ ASFALTOVÉ SMĚSI

V této kapitole budou popsány nejčastěji používané postupy pro stárnutí asfaltové směsi, které nejsou popsány v českých technických normách ani ve schválených harmonizovaných evropských normách.

2.4.2.1 KRÁTKODOBÉ STÁRNUTÍ ASFALTOVÉ SMĚSÍ

Mezi postupy umělého krátkodobého stárnutí asfaltové směsi přísluší:

- metody amerického programu SHRP – SHRP#1025.
- metody z normy prEN 12697-52 popsané v kapitole 2.5. [2], [13]

Během procesu krátkodobého stárnutí asfaltové směsi dle postupu SHRP#1025, popsané ve zprávě SHRP-A-383, je nezhotovená asfaltová směs podrobená teplotě 135 °C po dobu 4 hodin. [2]

2.4.2.2 DLOUHODOBÉ STÁRNUTÍ ASFALTOVÉ SMĚSI

Metody dlouhodobého stárnutí asfaltové směsi jsou:

- Braunschweigerská metoda stárnutí;
- metody amerického programu SHRP – SHRP#1030;
- metody z normy prEN 12697-52 popsané v kapitole 2.5. [2],[13]

Braunschweigerská metoda stárnutí, zkráceně BSA, je postup dlouhodobého stárnutí asfaltové směsi vytvořený na Technické univerzitě v Braunschweigu. Vrstva tloušťky přibližně 40 mm nezhotovené asfaltové směsi je vystavena teplotě 80 °C po dobu 96 hodin v laboratorní sušárně s nuceným oběhem vzduchu. Poté jsou provedeny zkoušky. Vyhodnocení stárnutí bude provedeno porovnáním výsledků zkoušek zestárlé a nezestárlé asfaltové směsi, která nebyla zhotovena. Termooxidační zátěž je mezi metodou RTFOT a PAV. [2], [13]

SHRP#1030 metoda dlouhodobého stárnutí asfaltové směsi, popsaná ve zprávě SHRP-A-383, kdy zhotovena asfaltová směs (zkušební těleso), u které se mezerovitost

pohybuje okolo $8 \% \pm 1 \%$ a má plynulou čarou zrnitosti, stárne v sušárně při teplotě $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 120 hodin. Nízkotlaká oxidace zhutnělých zkušebních těles v triaxiální komoře při teplotě $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 5 dnů je vhodná pro asfaltové směsi s vysokou mezerovitostí nebo s měkkým pojivem. Pojivo z asfaltových směsí je poté znovuzískáno a podrobena funkčním zkouškám. [2], [13]

2.5 METODY STÁRNUTÍ, dle PrEN 12697-52

PrEN 12697-52 je první verze evropské normy, která se bude zabývat simulací stárnutí asfaltové směsi v laboratoři. [13]

2.5.1 STÁRNUTÍ VOLNĚ LOŽENÉ SMĚSI

Do vhodné plechové nádoby se umístí volně ložená směs tloušťky zhruba $25 \pm 5\text{ mm}$. Přichystaná směs se umístí do vyhřívací komory s nucenou ventilací vzduchu. Ložená směs stárne při zvýšené teplotě, aby se proces stárnutí urychlil.

Metody stárnutí pro volně ložené směsi:

1. krátkodobé stárnutí volně ložené směsi
 - AASTHO R30/02 při teplotě $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 4 hodin.
2. dlouhodobé stárnutí volně ložené směsi
 - BRRC při teplotě $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 336 hodin;
 - komise RILEM při teplotě $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 216 hodin;
 - BSA při teplotě $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ s perforovanou deskou po dobu 96 hodin. [6], [11]

2.5.2 STÁRNUTÍ ZHUTNĚNÉ SMĚSI

Stárnutí se odehrává v ohřívací komoře, kde jsou zhutněná tělesa nejčastěji válcového tvaru podrobena teplotě $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 5 dnů nebo mohou zestárnout nízkotlakou oxidací, kdy se tělesa usadí do triaxiální komory za nuceného proudění ozonu obohaceného o stačený vzduch. [6] [11]

3 CÍLE BP

Hlavním cílem bakalářské práce je:

- zpracování poznatků věnujících se stárnutí asfaltového pojiva v asfaltové směsi;
- popis metod stárnutí;
- simulace zestárnutí asfaltové směsi ve formě Marshallových těles;
- porovnání změn vlastností asfaltové směsi před a po zestárnutí.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou hlavních částí: teoretické a praktické.

Teoretická část je věnována popisu jednotlivých zkoušek a jejich postupu a hlavním myšlenkám zkoušek. Dále charakterizuje použité materiály a jejich vlastnosti.

V praktické části jsou vyhodnoceny zkoušky:

- Ztráta částic asfaltového koberce drenážního, dle ČSN EN 12697-17+A1
- Stanovení pevnosti v příčném tahu, dle ČSN EN 12697-23

Dále je stanovena míra zestárnutí Marshallových těles.

4 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

V této části budou popsány výrobní procesy zkušebních vzorků, použité zkoušky, jejich pracovní postupy, základní myšlenky a zkušební metody, které byly potřebné ke zpracování a k vyhodnocení praktické části bakalářské práce.

4.1 STÁRNUTÍ

V bakalářské práci byl simulován proces dlouhodobého stárnutí asfaltové směsi na Marshallových tělesech, vyrobených dle kapitoly 4.2, v odvětrávané laboratorní sušárně s nuceným oběhem vzduchu (obrázek 1). Válcová tělesa budou vystavena teplotě 85 °C po dobu 5 dnů. Před uložením těles do sušárny je nutné válcová tělesa chránit před rozpadem. Těleso bylo chráněno pružným obinadlem (obrázek 2). Míra stárnutí byla zhodnocena pomocí zkoušky ztráty částic a pevnosti v příčném tahu dle kapitoly 4.3 a 4.4.



Obrázek 1: Laboratorní sušárna



Obrázek 2: Marshallova tělesa určena k simulování laboratornímu stárnutí

4.2 PŘÍPRAVA TĚLES, dle ČSN EN 12697-30+A1

Příprava zkušebních těles (tzv. Marshallových těles) je popsána v normě ČSN EN 12697-30+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Takto vyrobená tělesa se uplatňují pro určení objemové hmotnosti a jiných charakteristik. [7]

4.2.1 POSTUP VÝROBY

Pro výrobu válcových zkušebních těles, tzv. Marshallových těles, se asfaltová směs zahřeje na určitou teplotu. V této práci byla asfaltová směs zahřáta na teplotu hutnění 155 °C (obrázek 4). Hotová asfaltová směs byla nasypána do ocelové formy pro hutnění (obrázek 6). Poté byla asfaltová směs zhutněna pomocí rázového zhutňovače (obrázek 7). Hutnící beranový pěch rázového zhutňovače byl spouštěn z předepsané výšky a požadovaným počtem rázů na asfaltovou směs. Od jednoho vzorku směsi byly 4 tělesa zhutněny 2 x 50 úderů a 6 těles bylo zhutněno 2 x 25 úderů. Poté byla válcová tělesa zchlazena na laboratorní teplotu a byla vyjmuta z formy. [7]



Obrázek 3: Laboratorní sušárna



Obrázek 4: Teploměr s teplotou hutnění



Obrázek 5: Forma pro rozehtání směsi na teplotu hutnění



Obrázek 6: Forma pro hutnění



Obrázek 7: Rázový zhutňovač [14]

4.3 ZTRÁTA ČÁSTIC ASFALTOVÉHO KOBERCE DRENÁŽNÍHO, dle ČSN EN 12697-17+A1

Tato zkouška byla provedena dle v normy ČSN EN 12697-17+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Ztráta částic zkušebního tělesa asfaltového koberce drenážního. Ztráta částic zkušebního tělesa, které bylo ohřáto na požadovanou teplotu 23 °C, byla posuzována porovnáním hmotnosti před započítáním zkoušky a hmotnosti konečné po otáčení v otlukovém bubnu Los Angeles (obrázek 8), který vykonal 300 otáček. Pomocí zkoušky byla stanovena odolnost proti opotřebení. Zkouška se běžně používá pro směsi typu asfaltový koberec drenážní, ale zde z čistě výzkumných důvodů byla zkouška aplikována i na směsi typu asfaltový beton. [8]

4.3.1 POSTUP ZKOUŠKY

Válcová tělesa vyrobená dle kap. 4.1, která byla hutněna 2 x 50 údery hutnícího beranového pěstku z obou horních ploch tělesa. Tělesa byla před zkoušku uložena v komoře, v které byla udržována zkušební teplota 23 °C s tolerancí ± 2 °C, nejméně 4 hodiny před započítáním zkoušky. Nejdříve byla stanovena počáteční hmotnost vzorku W_1 . Poté bylo těleso vloženo do otlukového bubnu, který se otáčel rychlostí 30 až 33 otáček za minutu a to celkem 300krát. Po skončení bylo těleso vyjmuto a očištěno, poté byla stanovena hmotnost W_2 . Zkouška byla uskutečněna pro každé těleso. [8]

4.3.2 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Ztráta částic byla vypočtena pro všechna zkušební tělesa dle vzorce (Rovnice 1):

$$PL = 100 \cdot \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \quad \text{Rovnice 1}$$

kde: PL je hodnota ztráty částic [%];

W_1 je počáteční hmotnost zkušebního tělesa [g];

W_2 je konečná hmotnost zkušebního tělesa [g].

Výsledek zkoušky je aritmetický průměr z pěti jednotlivých hodnot. Zaokrouhlení je na nejbližší 1 %. [8]



Obrázek 8: Otlukový buben Los Angeles

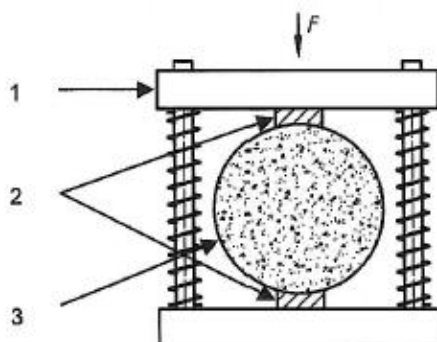


Obrázek 9: Tělesa před a po provedení zkoušky

4.4 STANOVENÍ PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU, dle ČSN EN 12697-23

Pevnost v příčném tahu můžeme najít v normě ČSN EN 12697-23 – Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Stanovení pevnosti v příčném tahu.

Marshallovo těleso o průměru (100 ± 3) mm, zhutněno 2 x 25 úderů, bylo osazeno do zkušebního lisu mezi zatěžovací pásy $(12,7 \pm 0,2)$ mm (obrázek 10).



Legenda

1 Tlačná čelist

2 Zatěžovací pásy

3 Zkušební těleso

Obrázek 10: Tlačná čelist se zatěžovacími pásy a zkušební těleso [9]

Těleso bylo zatěžováno podél středové osy při konstantní rychlosti zatěžování, až se prvek porušil.

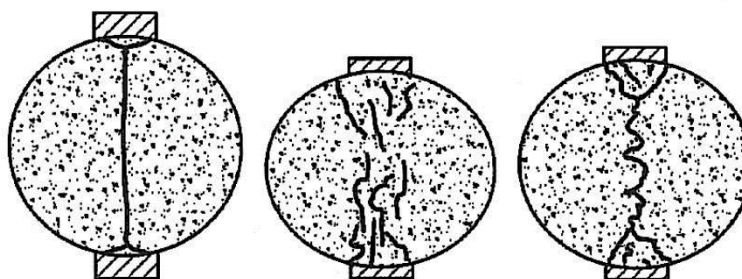
Pevnost v příčném tahu byla vypočtena z největší hodnoty tahového napětí při porušení vzorku a z rozměru válcového zkušebního tělesa. Válcový zkušební vzorek, který bude podroben zkoušce, musí mít předepsanou teplotu. [9]

4.4.1 POSTUP ZKOUŠKY

Marshallova válcová tělesa byla zhotovena dle kap. 4.2. Zhutněna byla pomocí pěchu z obou stran podstav válce 25 údery. Zkušební tělesa byla zahřáta v termostaticky regulované vzduchové komoře, která má schopnost udržovat teplotu s přesností $\pm 0,5$ °C, na teplotu 15 °C. Ve vzduchové komoře se vzorky musí ponechat nejméně 2 hodiny temperovat. Poté byla tělesa upnuta do zatěžovacího lisu, tak aby byl zatěžován jeho průměr. Těleso bylo namáháno až do dosažení největší hodnoty zatížení při konstantní rychlosti zatížení (50 ± 2 mm za minutu). Bylo stanoveno maximální zatížení P. Zkušební válec byl namáhán až do doby, kdy se porušil. [9]

Pokud si všimneme typu porušení, který klasifikujeme takto:

- „rovná podélná prasklina“ – vzorek je porušen podél osy průměru, mimo eventuality drobných trojúhelníkových prasklin v blízkosti zatěžovacích pásů;
- „deformace“ – vzorek bez viditelné praskliny
- nebo „kombinace“ – vzorek s malou rovnou prasklinou a místa v blízkosti zatěžovacích pásů s poruchami obrovské velikosti. [9]



Obrázek 11: typy porušení [9]

Ukončení zkoušky musí být minimálně 2 minuty poté, co vzorky vytáhneme ze vzduchové komory. [9]

4.4.2 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY

Pevnost v příčném tahu ITS pro všechny zkušební vzorky stanovujeme dle vzorce (Rovnice 2):

$$ITS = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot H} \quad \text{Rovnice 2}$$

- kde: ITS je pevnost v příčném tahu, zaokrouhlená na tři platné číslice [MPa];
 P je největší dosažená hodnota zatížení, s přesností na jedno desetinné číslo [N]
 D je průměr zkušebního vzorku, s přesností na jedno desetinné číslo [mm]
 H je výška zkušebního vzorku, s přesností na jedno desetinné číslo [mm]
 [9]



Obrázek 12: Zkušební zařízení



Obrázek 13: Upevnění tělesa v lisu

5 POUŽITÉ MATERIÁLY

Některé zkoušky vybraných směsí byly již popsány v jiné práci Daška a kol. [2] a jejich výsledky jsou zde převzaty. Pro účely zhodnocení odolnosti asfaltových pojiv ke stárnutí bylo odebráno na obalovnách asfaltových směsí čtyři silniční asfalty o stejné třídě 50/70 od různých výrobců pojiva. Pojiva byla použita pro výrobu asfaltových směsí typu asfaltový beton (AC) se zrnitostí kameniva do 11 mm. Soupis takto vyrobených směsí můžeme nalézt v tabulce 2 s typem směsi, místem provedení, s datem provedení, výrobcem pojiva, třídou. Pro ověření vlastností asfaltové směsi a asfaltů byly provedeny kontrolní zkoušky, které byly použity pro nalezení vzájemných závislostí. [2] [11]

Asfaltová směs				
označení v BP	Směs 1	Směs 2	Směs 3	Směs 4
typ směsi	ACO 11S	ACO 11S	ACO 11S	ACO 11S
místo provedení	úsek Polička A	úsek Polička B	úsek Polička C	úsek Lukavice
provedeno	14.11.2013	15.11.2013	12.11.2013	01.08.2013
Výrobce pojiva	Litvínov	Orlen	Lotos	Orlen
třída	50/70	50/70	50/70	50/70

Tabulka 2: Použité asfaltové směsi

5.1 KONTROLNÍ ZKOUŠKY PRO ASFALTOVOU SMĚS

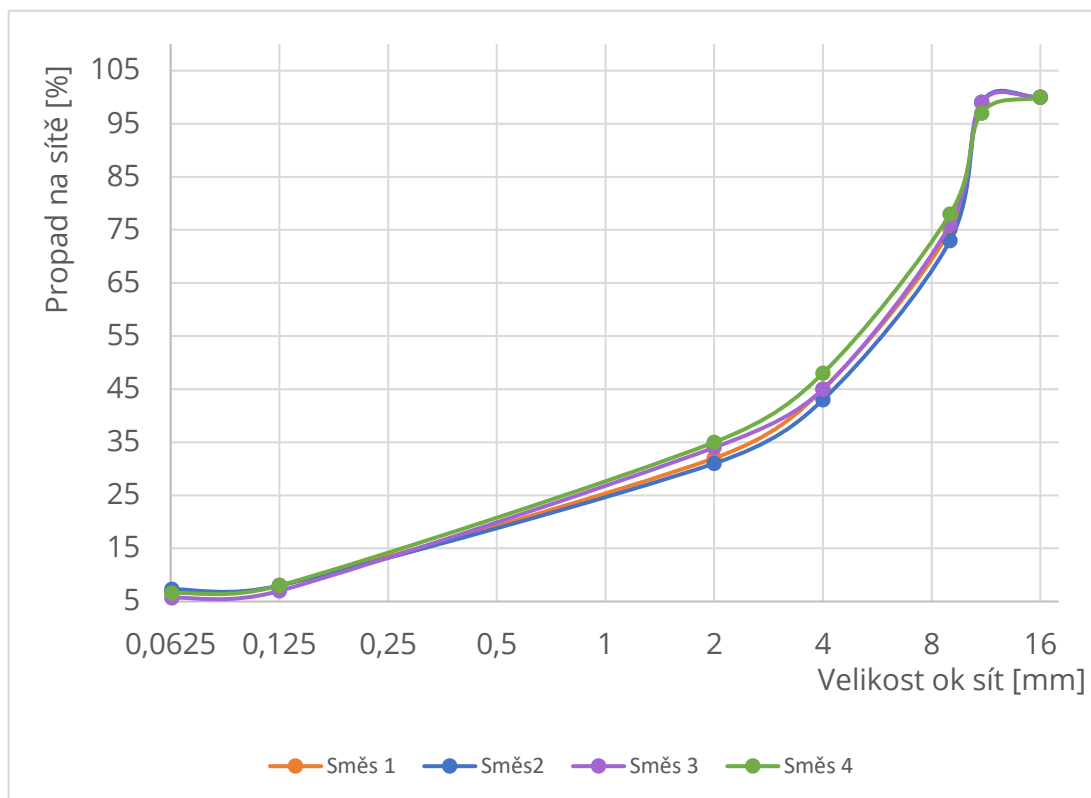
Pro vyhodnocení kvality směsi jsou zde uvedeny ověřovací zkoušky: zrnitost v grafu 1, obsah pojiva ve směsi v grafu 2 a mezerovitost v grafu 3. Podrobný přehled dat ke zkouškám nalezneme v tabulce 3.

Asfaltová směs typu ACO 11		Směs 1	Směs 2	Směs 3	Směs 4
Zrnitost [mm]	16	100	100	100	100
	11	99	99	99	97
	9	75	73	76	78
	4	45	43	45	48
	2	32	31	34	35
	0,125	8	8	7	8
	0,063	6,8	7,3	5,7	6,6

Tabulka 3: Vlastnosti asfaltové směsi – zrnitost [2]

Z grafu 1 je zřejmé, že všechny směsi mají velice podobnou křivku zrnitosti s plynulou čarou zrnitostí, což je typické pro asfaltové směsi typu asfaltový beton (AC). Vhodným návrhem křivky zrnitosti můžeme dosáhnout zlepšení protismykových vlastností a zpracovatelnosti. [1]

Graf 1: Křivka zrnitosti pro jednotlivé směsi

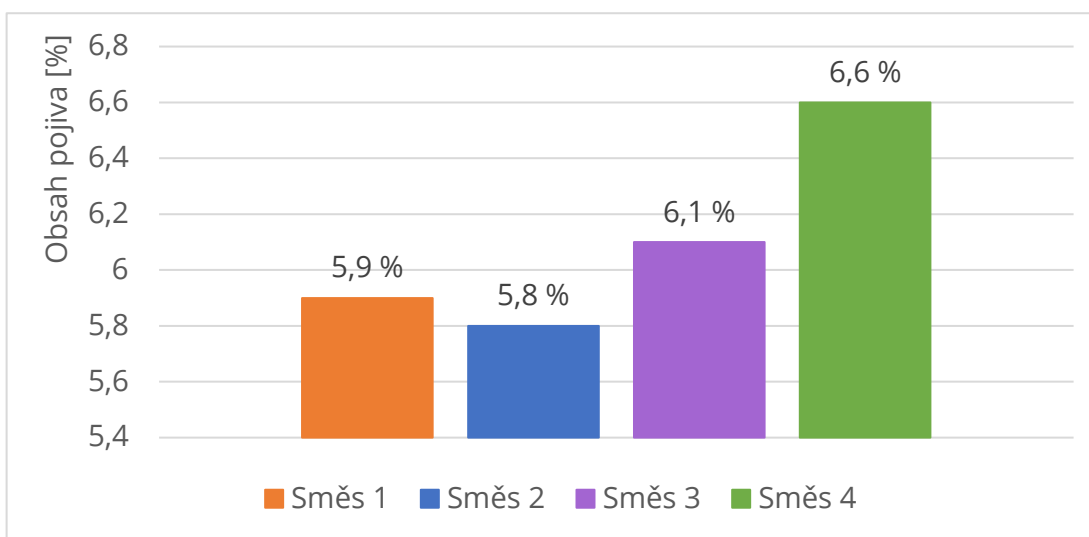


Asfaltová směs typu ACO 11	Směs 1	Směs 2	Směs 3	Směs 4
Obsah pojiva [%]	5,9	5,8	6,1	6,6
Mezerovitost [%]	2	2,3	1,4	2,2

Tabulka 4: Vlastnosti asfaltové směsi – obsah pojiva, mezerovitost [2]

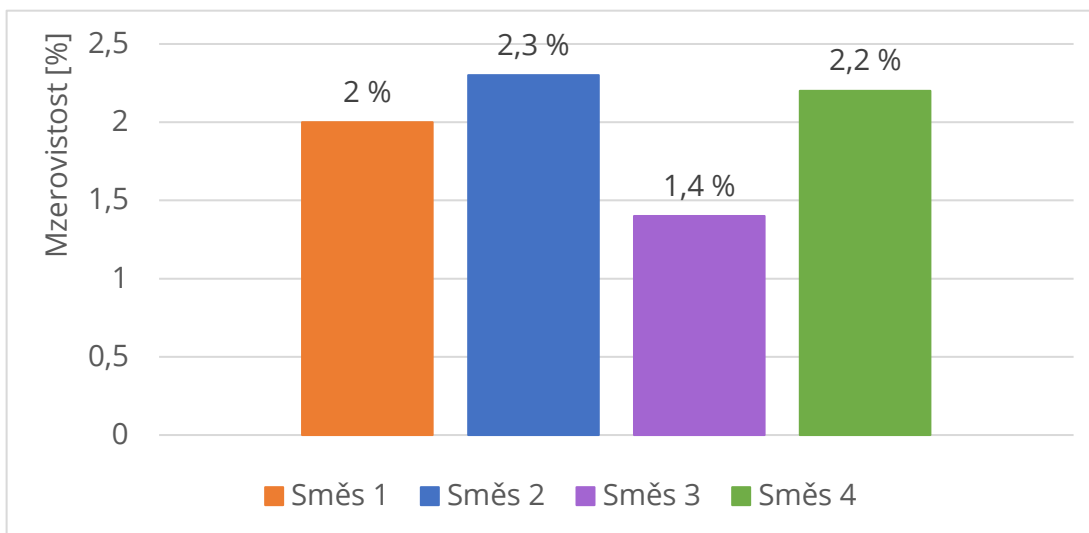
Množství asfaltového pojiva ovlivňuje zpracovatelnost asfaltové směsi a má velký vliv na její kvalitu. Obsah pojiva v jednotlivých směsích můžeme naléznout v grafu 2. [1]

Graf 2: Obsah pojiva pro jednotlivé směsi



Mezerovitost asfaltové směsi je definována jako množství mezer ve zkušebním tělese asfaltové směsi v procentech vztažených k celkovému objemu zkušebního tělesa. Mezerovitost ovlivňuje vodopropustnost. [4] [5]

Graf 3: Mezerovitost pro jednotlivé směsi



5.2 KONTROLNÍ ZKOUŠKY POUŽITÝCH POJIV

	pojivo pro směs 1	pojivo pro směs 2	pojivo pro směs 3	pojivo pro směs 4
Penetrace jehlou [0,1 mm]	52	56	57	52
Bod měknutí [°C]	50,8	48,7	47,5	49,1

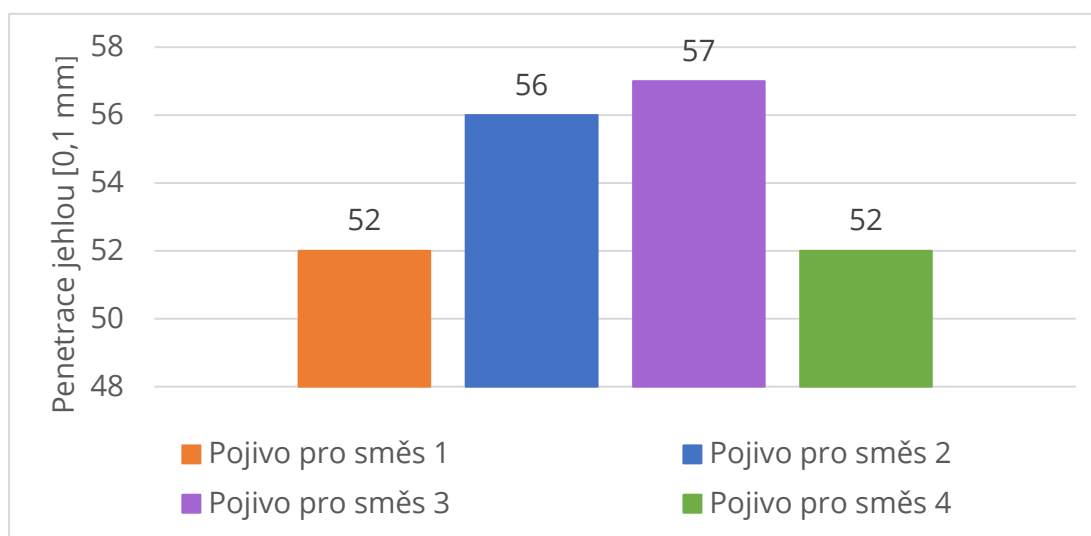
Tabulka 5 Vlastnosti asfaltů [2]

V této kapitole jsou uvedeny vlastnosti asfaltových pojiv použitých pro výrobu hodnocených asfaltových směsí. Penetrace jehlou (graf 4) je klíčový znak popisující asfaltová pojiva, podle kterého můžeme pojiva rozřadit do mnoha kategorií. Tato zkouška udává tvrdost asfaltu při teplotě 25 °C a patří do tzv. konvenčních zkoušek.

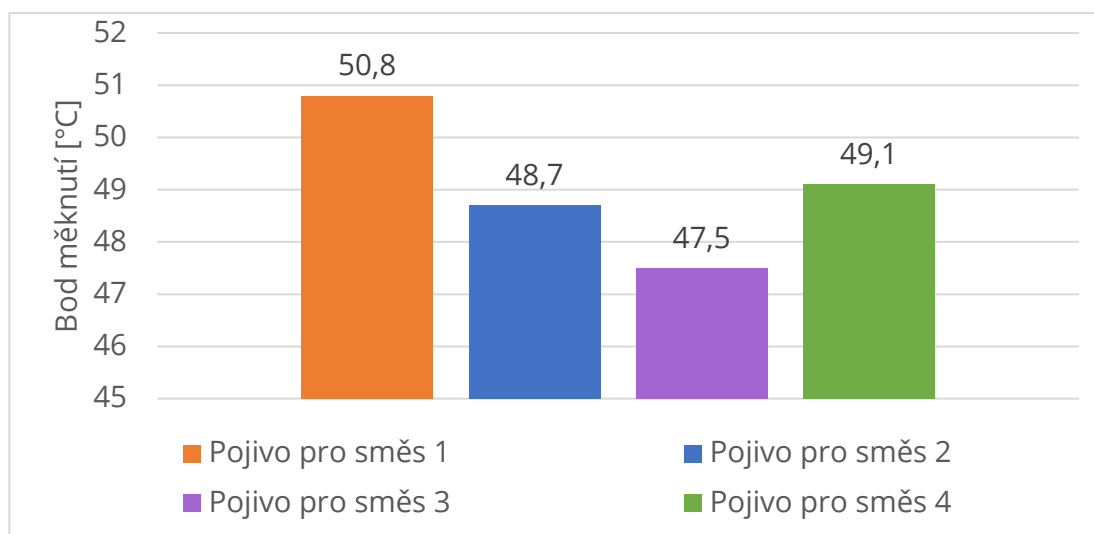
[1] [3]

Další konvenční zkouškou je bod měknutí (graf 5), který udává meze oboru plasticity a uvádí se v °C. [3]

Graf 4: Penetrace jehlou pojiva pro jednotlivé směsi



Graf 5: Bod měknutí pojiv pro jednotlivé směsi

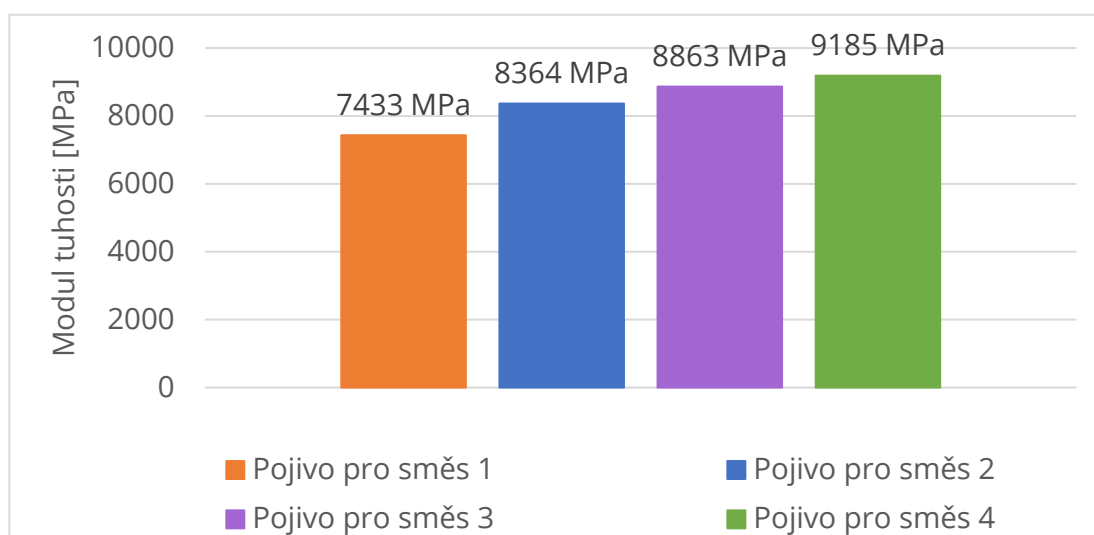


Tuhost asfaltových směsí je vyjádřena modulem tuhosti, který byl určen při teplotě 15 °C při frekvenci 10 Hz. [2]

	pojivo pro směs 1	pojivo pro směs 2	pojivo pro směs 3	pojivo pro směs 4
Modul tuhosti [MPa]	7433	8364	8863	9185

Tabulka 6: Tuhost asfaltových směsí

Graf 6 Modul tuhosti jednotlivých asfaltových směsí



6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Tato kapitola bude věnována vyhodnocení všech provedených zkoušek a hledání jejich vzájemných závislostí mezi provedenými zkouškami a vlastnostmi asfaltové směsi nebo pojiva. Jak již bylo zmíněno, zkušební tělesa byla vyrobena dle kap. 5.2 a stárnutí těles proběhlo v sušárně po dobu 5 dní při teplotě 85 °C.

6.1 STANOVENÍ ZTRÁTY ČÁSTIC ASFALTOVÉHO KOBERCE DRENÁŽNÍHO

Zkouška ztráta částic v otlukovém bubnu Los Angeles je podrobně popsána v kap. 4.2. Zkušební tělesa byla hutněna 2 x 50 údery Marshallova zhutňovače. Zkouška byla vykonána při teplotě 23 °C a otlukový buben se otáčel 300krát bez ocelových koulí. Ztráta částic byla vypočítána dle rovnice 1 a výsledky jsou souhrnně popsány v tabulce 7.

	nezestárlé	zestárlé
Směs 1	8,8 %	9,3 %
Směs 2	10,1 %	11,3 %
Směs 3	10,4 %	11,9 %
Směs 4	11,7 %	10,7 %

Tabulka 7: Stanovení ztráty částic pro jednotlivé směsi

U vzorků zestárlých směsí 1 až 3 byla ztráta částic větší než ztráta částic nezestárlých vzorků směsí. ($PL_{\text{zestárlé}} > PL_{\text{nezestárlé}}$), což je graficky znázorněno v grafu 7. Výjimku tvoří směs 4, která má hodnotu ztráty částic nezestárlých těles vyšší. Rozdíly hodnot ztráty částic zestárlých a nezestárlých vzorků se pohybují od 0,5 % do 1,5 %, nejmenší rozdíl hodnotou ztráty částic zestárlé a nezestárlé směsi má směs 1 ($PL = 0,5 \%$) a největší směs 3 ($PL = 1,5 \%$). Z grafu 8 je patrné, že výsledky ztrát částic nezestárlých vzorků směsi rostou vzestupně jako čísla označení směsí, a proto lze očekávat tuhle

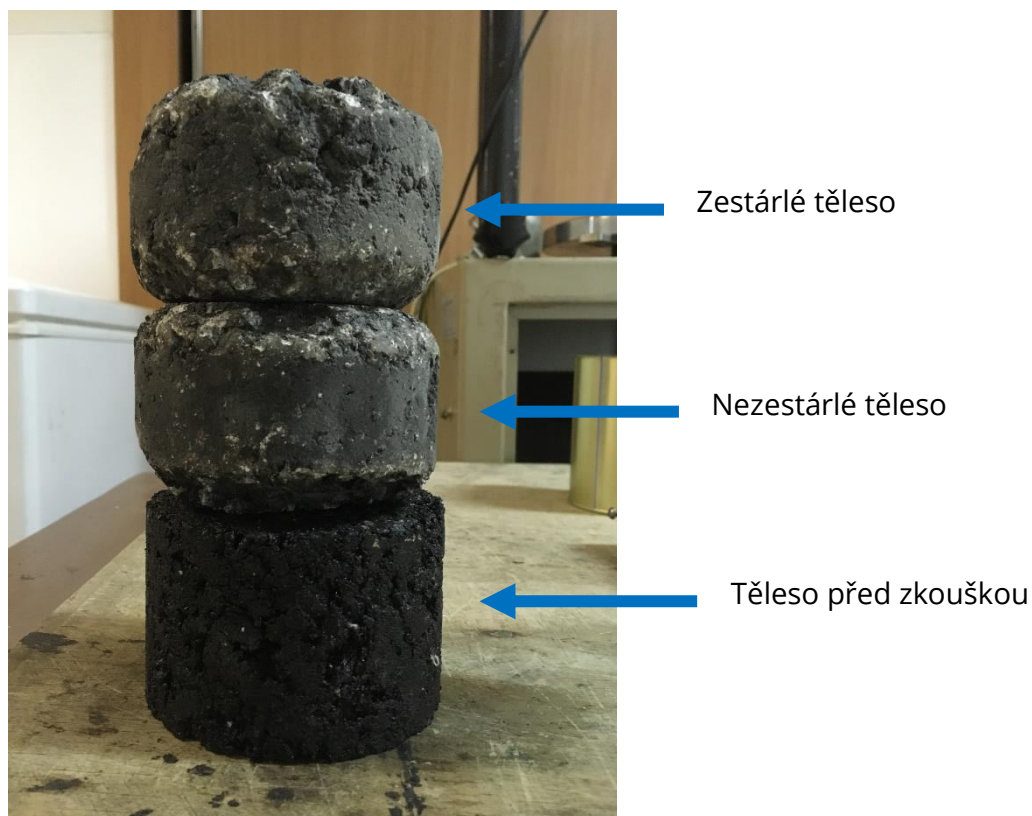
vzestupnost hodnot PL i u vzorků zestárých směsí, ale byl zde zaznamenán pokles hodnoty ztráty částic vzorku směsi 4.

Ze zkoušky bylo stanoveno, že směs 1 je nejodolnější proti opotřebení, protože má nejmenší výsledky nezestárlé i zestárlé ztráty částic směsi. Naopak největší hodnotu ztráty částic zestárlé a nezestárlé směsi má směs 3 a nezestárlá směs 4. Tyto směsi budou nejméně odolné proti opotřebení. Dále bylo stanoveno, že na směs 4 má nejmenší vliv stárnutí a naproti tomu směs, která nejvíce podléhá vlivu stárnutí, je směs 3.

Jako nejkvalitnější směs jsem určila směs 1 ($PL_{\text{nezestárlé}} = 8,8 \%$, $PL_{\text{zestárlé}} = 9,3 \%$, $PL_{\text{zestárlé}} - PL_{\text{nezestárlé}} = 0,5 \%$), nejméně kvalitní směs 3 ($PL_{\text{nezestárlé}} = 10,4 \%$, $PL_{\text{zestárlé}} = 11,9 \%$, $PL_{\text{zestárlé}} - PL_{\text{nezestárlé}} = 1,5 \%$).

Dále jsem hodnoty ztráty částic porovnávala s požadavky na ztrátu částic asfaltového koberce drenážního dle tabulky 8, kdy všechny vzorky směsi musí hodnotu PL menší než 30 %.

Po vizuální stránce dle obrázku 14 nejsou patrné žádné viditelné změny ztráty na zestárlém a nezestárlém tělese.

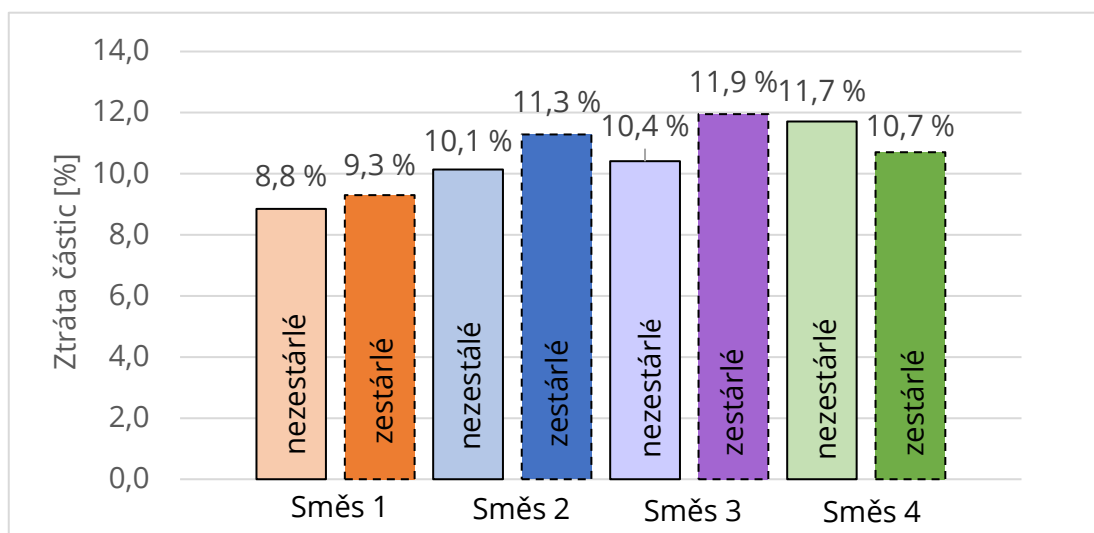


Obrázek 14: Vizuální hodnocení tělesa před a po zkoušce ztráty částic

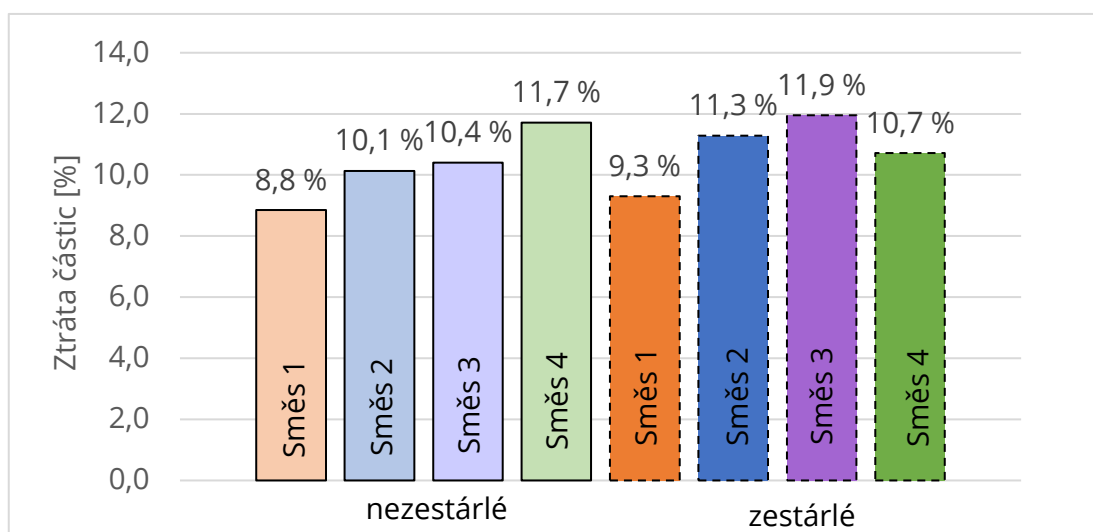
Článek, tabulka ČSN EN 13108-7 ed. 2:2017	Název článku	Parametr	Požadovaná hodnota ²⁾
5.3.2.2, tabulka 3	Mezerovitost ³⁾	Minimální mezerovitost $V_{\min}$ (%)	$V_{\min 16,0}$
5.3.2.2, tabulka 3		Maximální mezerovitost $V_{\max}$ (%)	$V_{\max 30,0}$
5.3.2.3, tabulka 4	Propustnost ⁴⁾	Minimální horizontální propustnost $K_{h\min}$	$K_{h\min 1,0^{5)}$
5.3.2.3, tabulka 5		Minimální vertikální propustnost $K_{v\min}$	$K_{v\min 1,0^{5)}$
5.3.4, tabulka 10	Odolnost vůči působení vody ⁶⁾	Minimální poměr pevnosti v příčném tahu $ITSR_{\min}$ (%)	$ITSR_{\min 70^{7)}$
5.3.5, tabulka 11	Ztráta částic ⁸⁾	Maximální ztráta částic $PL_{\max}$ (%)	$PL_{\max 30^{9)}$

Tabulka 8: Požadavky na směsi asfaltového koberce drenážního PA [17]

Graf 7: Stanovení ztráty částic v procentech pro porovnání jednotlivých vzorků asfaltových směsí



Graf 8: Stanovení ztráty částic v procentech pro porovnání zestárlých a nezestárlých asfaltových směsí



6.2 STANOVENÍ PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU

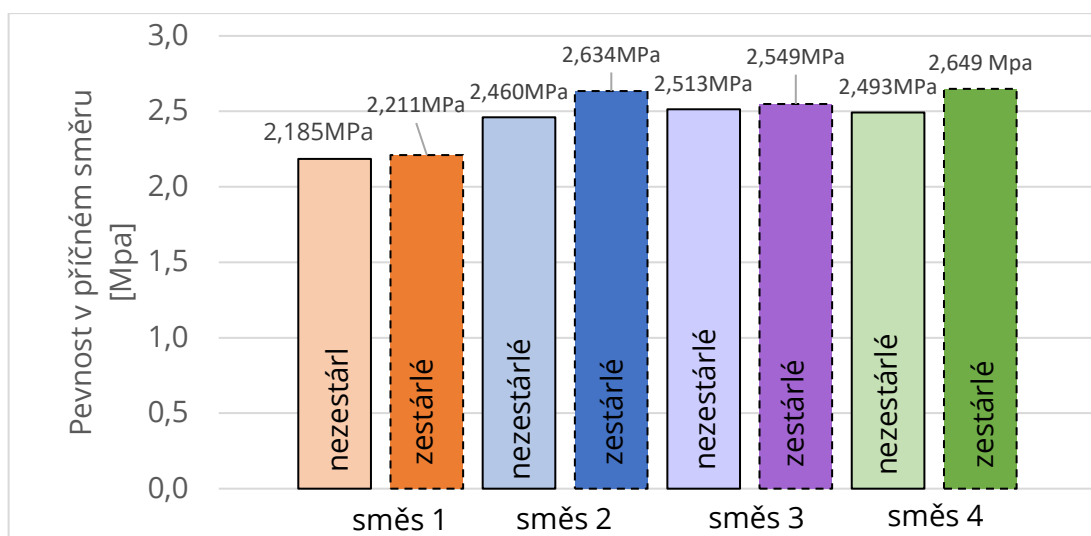
Postup zkoušky je podrobně vysvětlen v kapitole 4.4. Marshallova tělesa byla hutněna 2 x 50 úderů a temperována na teplotu 15 °C. Tělesa byla stlačována rychlostí 50 mm/min v termostaticky regulované vzduchové komoře. Zjištěné pevnosti v příčném tahu vypočítané podle rovnice 2 se nachází v tabulce 9.

	nezestárlé	zestárlé
Směs 1	2,185MPa	2,211MPa
Směs 2	2,460MPa	2,634MPa
Směs 3	2,513MPa	2,549MPa
Směs 4	2,493MPa	2,649MPa

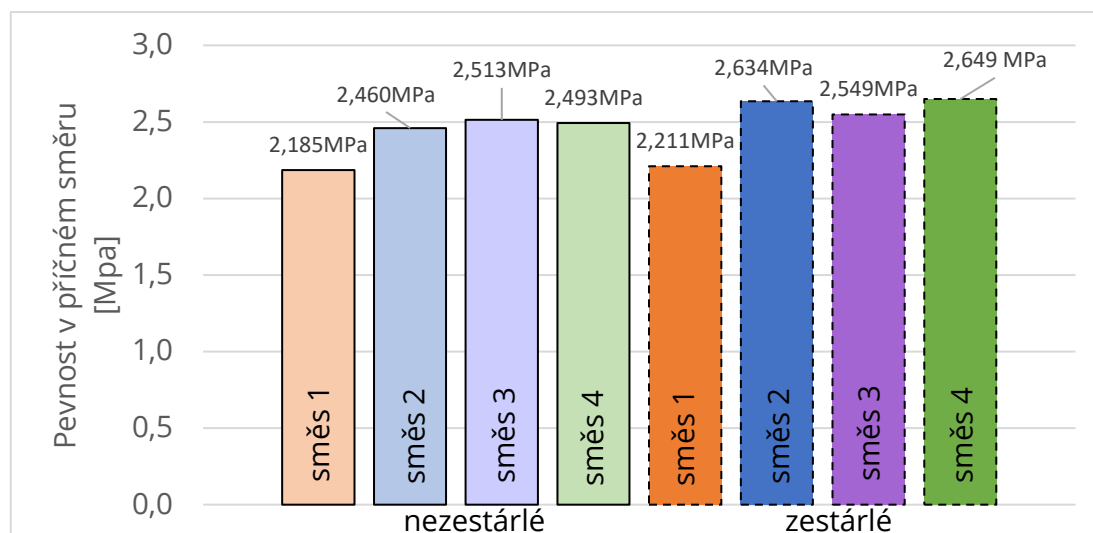
Tabulka 9: Pevnosti směsi v příčném tahu

Pro všechny vzorky testovaných asfaltových směsí byla naměřena větší hodnota pevnosti v příčném tahu zestárlých těles, tuto skutečnost znázorňuje graf 9. ($ITS_{zestárlé} > ITS_{nezestárlé}$). To je logické, protože je možné v průběhu stárnutí předpokládat zvýšení tuhosti pojiva obsaženého ve směsi. Pokud jsme hodnotu pevnosti v příčném tahu nezestárlých těles odečetli od pevnosti v příčném tahu zestárlých těles, došli jsme k hodnotám, které se pohybovaly mezi 25 až 174 kPa. Z grafu 10 si můžeme všimnout, že nezestárlé směsi 2, 3 a 4 dosahují podobných pevností v příčném tahu, nezestárlá směs 1 má významně nižší hodnotu pevnosti v příčném tahu. Po porovnání vzorků zestárlých směsí v grafu 10 hodnota pevnosti v příčném tahu zestárlé směsi 3 nápadně klesla. Pro vyhodnocení míry stárnutí byl stanoven procentuální nárůst pevnosti. Dle zkoušky pevnosti v příčném tahu má největší vliv stárnutí na směs 2 (nárůst 17,4 %) a nejmenší vliv na směs 1 (nárůst 2,5 %).

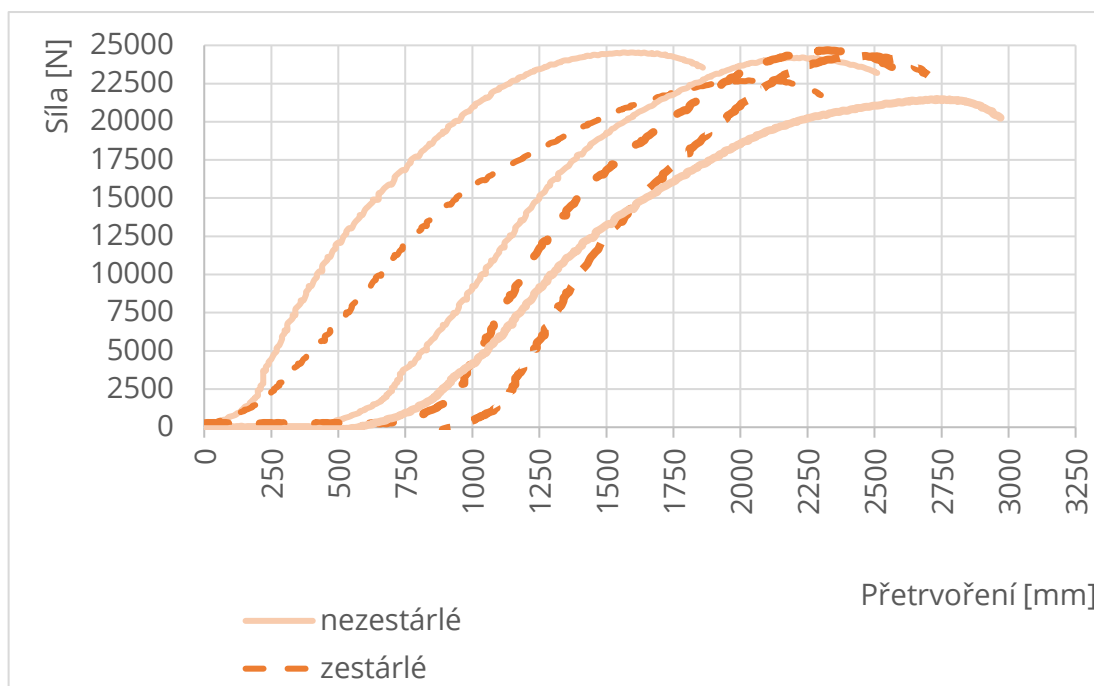
Graf 9: Pevnost v příčném tahu pro porovnání jednotlivých vzorku asfaltových směsí.



Graf 10: Pevnosti v příčném tahu pro porovnání zestárlých a nezestárlých asfaltových směsí

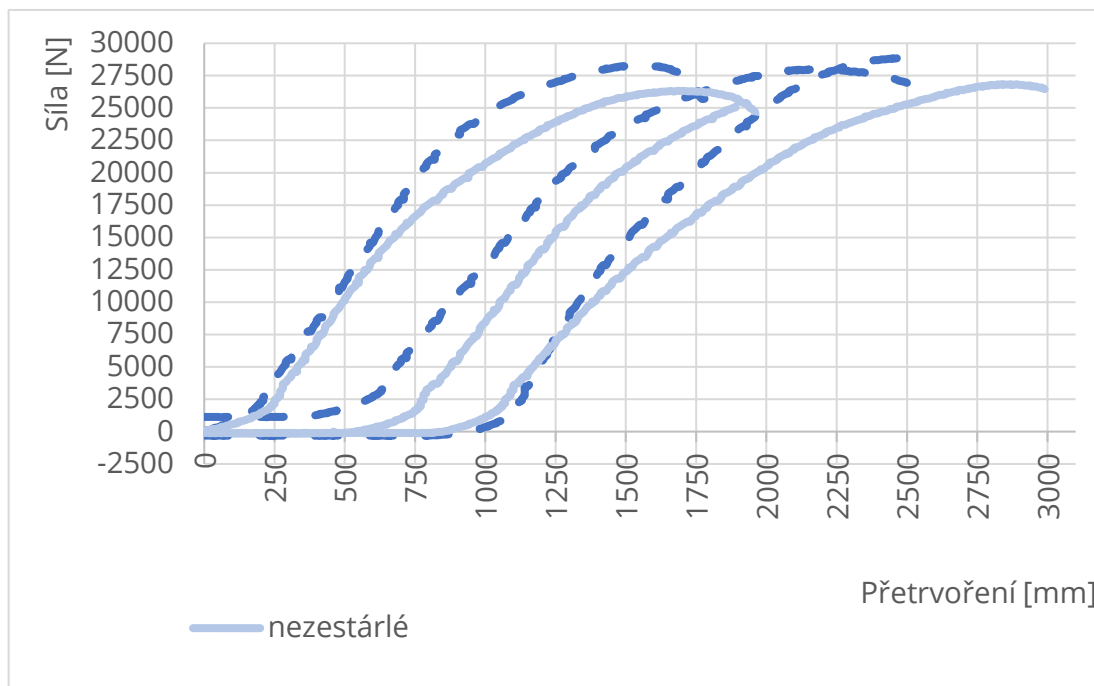


Graf 11: Diagram pevnosti a přetrvoření zkoušených těles směsi 1



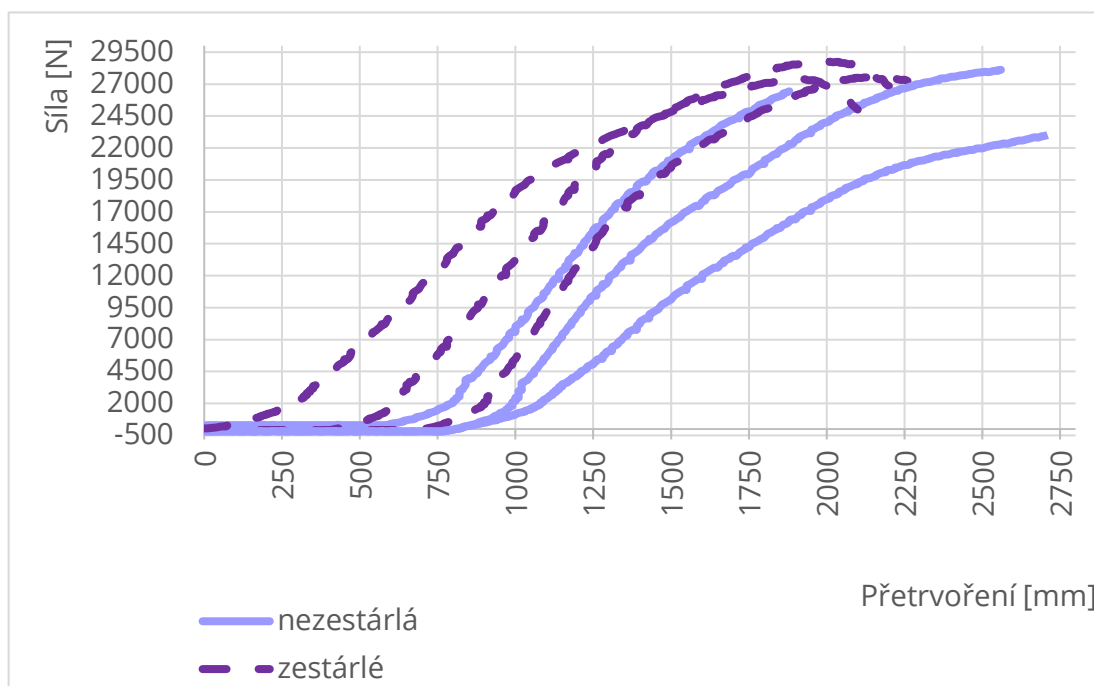
Z grafu 11 je vidět, že hodnoty pevnosti v příčném tahu zestárlých a nezestárlých těles jsou velice podobné. Rozdíl vidíme v průběhu zatížení, kdy zestárlá tělesa mají velké přetrvoření při malé zatěžovací síle.

Graf 12: Diagram pevnosti a přetrvoření zkoušených těles směsi 2



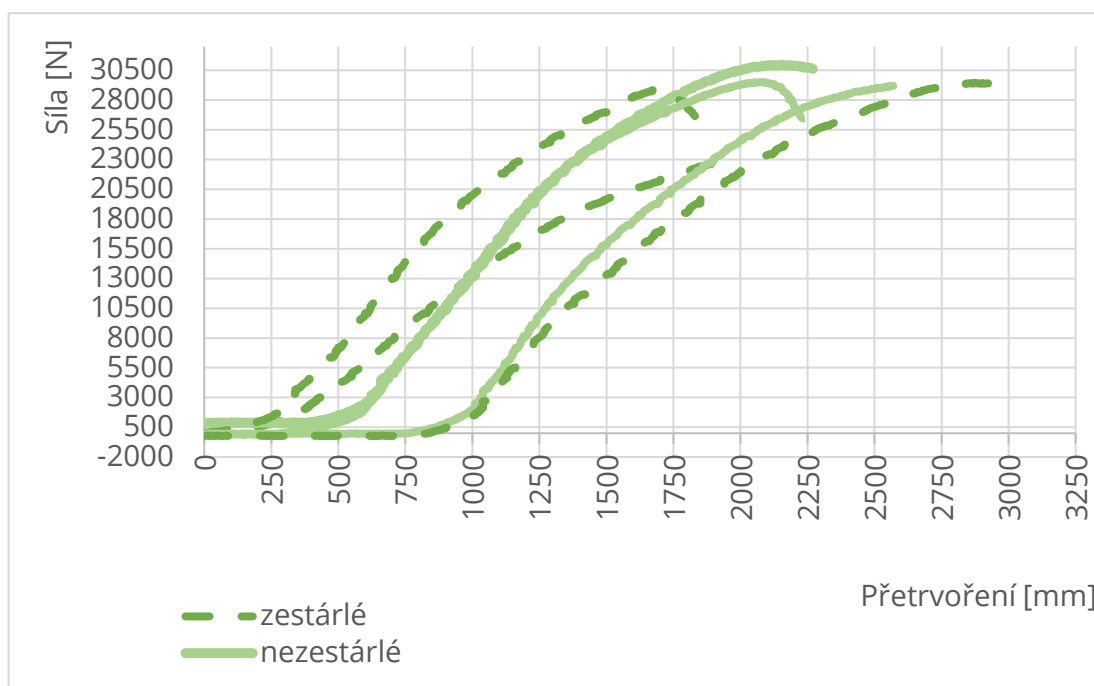
Z grafu 12 je patrné tzv. tvrdnutí po procesu stárnutí, kdy pevnost v příčném tahu zestárých těles je vyšší než u nezestárých těles. Velké deformace na začátku procesu zatěžování jsou u nezestárých i zestárých těles.

Graf 13: Diagram pevnosti a přetvoření zkoušených těles směsi 3



Z grafu 13 nezestárlé tělesa mají mnohem větší přetvoření při stejné síle přitížení než tělesa zestárlá.

Graf 14: Diagram pevnosti a přetvoření zkoušených těles směsi 4



Z grafu 14 nezestárlé tělesa dosahují větší hodnoty pevnosti v příčném tahu než zestárlé tělesa.

6.3 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK ZTRÁTY ČÁSTIC A PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU

Dle zkoušky ztráty částic jsem vyhodnotila, že směs 1 je nejodolnější proti opotřebení, má nejvyšší hodnoty PL. Směs 4 podléhá nejméně procesu stárnutí, PL po zestárnutí těles je menší u nezestárnutých těles, a směs 3 podléhá nejvíce procesu stárnutí.

Dále jsem zkoumala pevnost v příčném tahu, která byla u všech zestárlých směsí větší než hodnota pevnosti v příčném tahu nezestárlých těles. Míru zestárnutí těles jsem posuzovala dle procentuálního nárůstu pevnosti, kdy je nejméně ovlivněna projevy stárnutí směs 1 a nejvíce směs 2.

6.4 VZÁJEMNÁ KORELACE VLASTNOSTÍ

Porovnáním výsledků z provedených zkoušek a vlastností se budeme snažit zjistit, zda se nevyskytují mezi nimi vzájemné závislosti. Zjištění korelací mezi vlastnostmi může být přínosem při dalším zkoumání, protože díky této skutečnosti můžeme z jedné zkoušky s vysokou pravděpodobností odvodit výsledky zkoušky druhé. [17] Závislost je definována rovnicí křivky y a koeficientem determinace R^2 .

Pokud se hodnota parametru R^2 pohybuje:

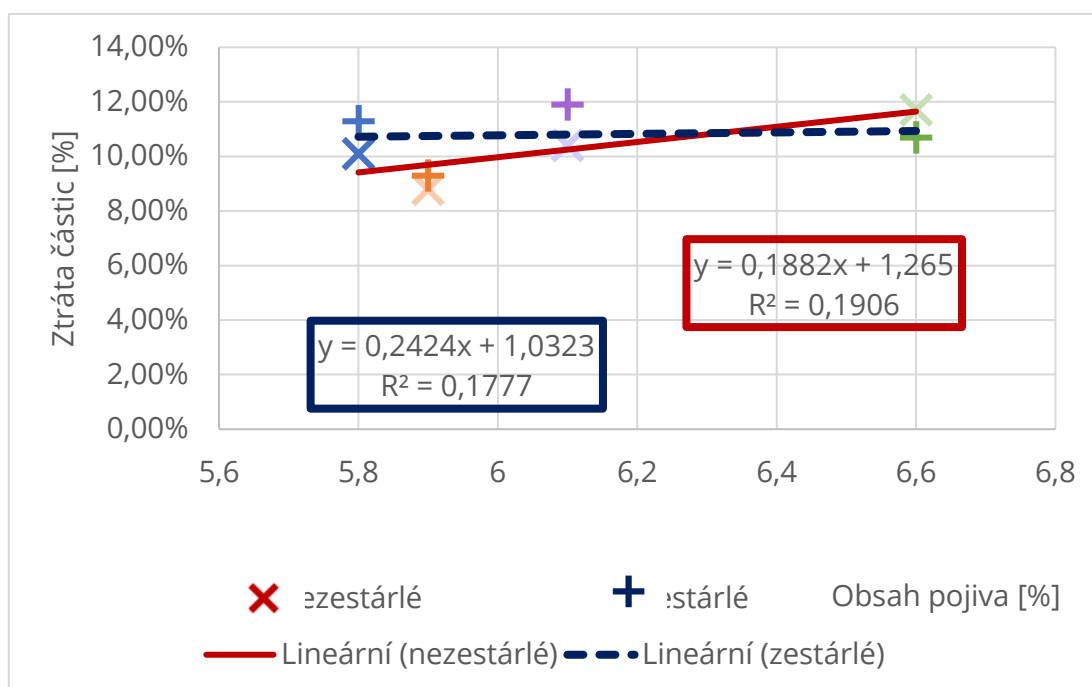
- pod 0,5 (50 %), jedná se o slabou závislost;
- v rozmezí 0,5 až 0,7 (50 % - 70 %), lze mezi zkouškami nalézt určitý vztah;
- větší než 0,8 (80 %), mezi zkouškami je silná závislost. [17], [18]

Hodnoty pro vytvoření grafů závislostí jsou výsledky provedených zkoušek a výsledků silničních asphaltů. Přehledné vyhodnocení korelací nalezneme v tabulce 10. Největší závislosti dle parametru R^2 se pohybují mezi hodnotami 62,3 % až 68,9 %, pro které můžeme nalézt určitý vztah. Vždy je větší závislost mezi výsledky provedených zkoušek a hodnot silničních asphaltů nezestárlých směsí.

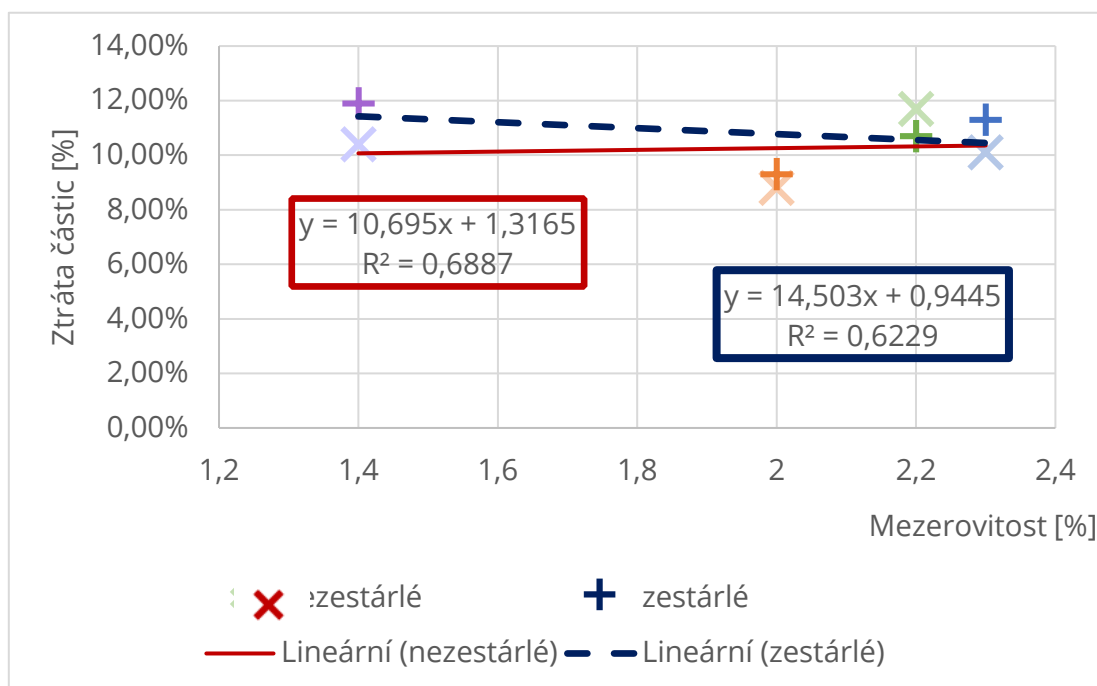
	korelace x	korelace y	$Y=a+bx$	R^2	%	závislost
nezestárlé	Obsah pojiva	Ztráta částic	$y = 0,1882x + 1,265$	0,1906	19,1	slabá
zestárlé			$y = 0,2424x + 1,0323$	0,1777	17,8	slabá
nezestárlé	Mezerovitost	Ztráta částic	$y = 10,695x + 1,3165$	0,6887	68,9	určitý vztah
zestárlé			$y = 14,503x + 0,9445$	0,6229	62,3	určitý vztah
nezestárlé	Obsah pojiva	Pevnost v příčném tahu	$y = 0,1882x + 1,265$	0,1906	19,1	slabá
zestárlé			$y = 0,2424x + 1,0323$	0,1777	17,8	slabá
nezestárlé	Mezerovitost	Pevnost v příčném tahu	$y = 10,695x + 1,3165$	0,6887	68,9	určitý vztah
zestárlé			$y = 14,503x + 0,9445$	0,6229	62,3	určitý vztah
nezestárlé	Ztráta částic	Pevnost v příčném tahu	$y = 10,695x + 1,3165$	0,6887	68,9	určitý vztah
zestárlé			$y = 14,503x + 0,9445$	0,6229	62,3	určitý vztah

Tabulka 10: Výsledky korelací

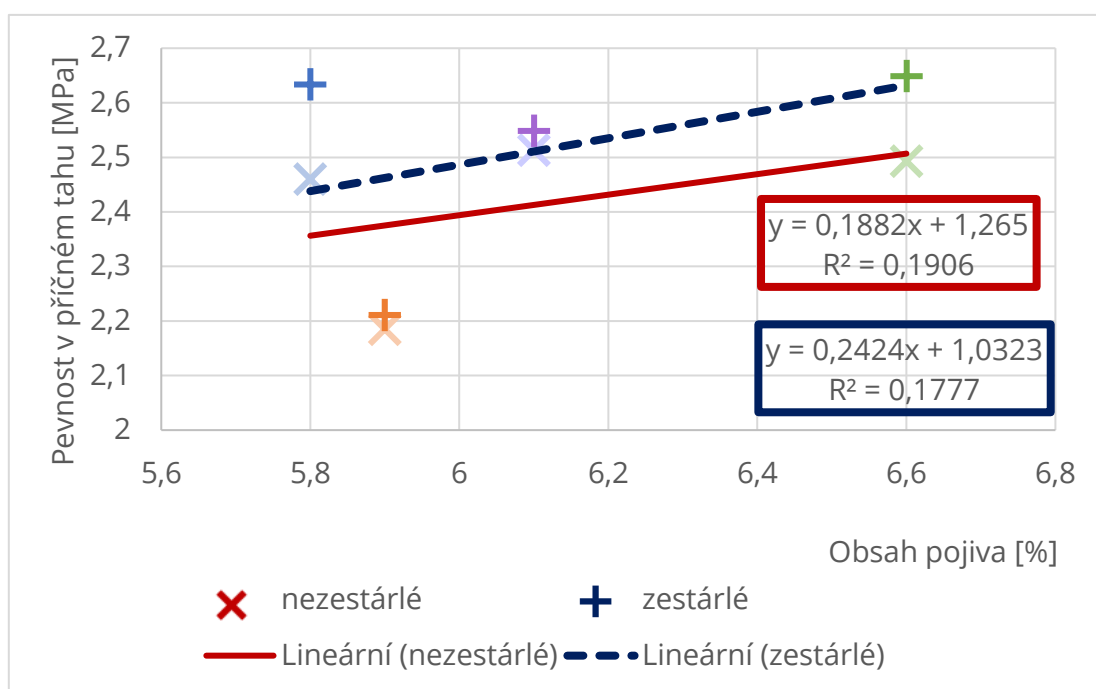
Graf 15: Závislost ztráty částic a obsah pojiva



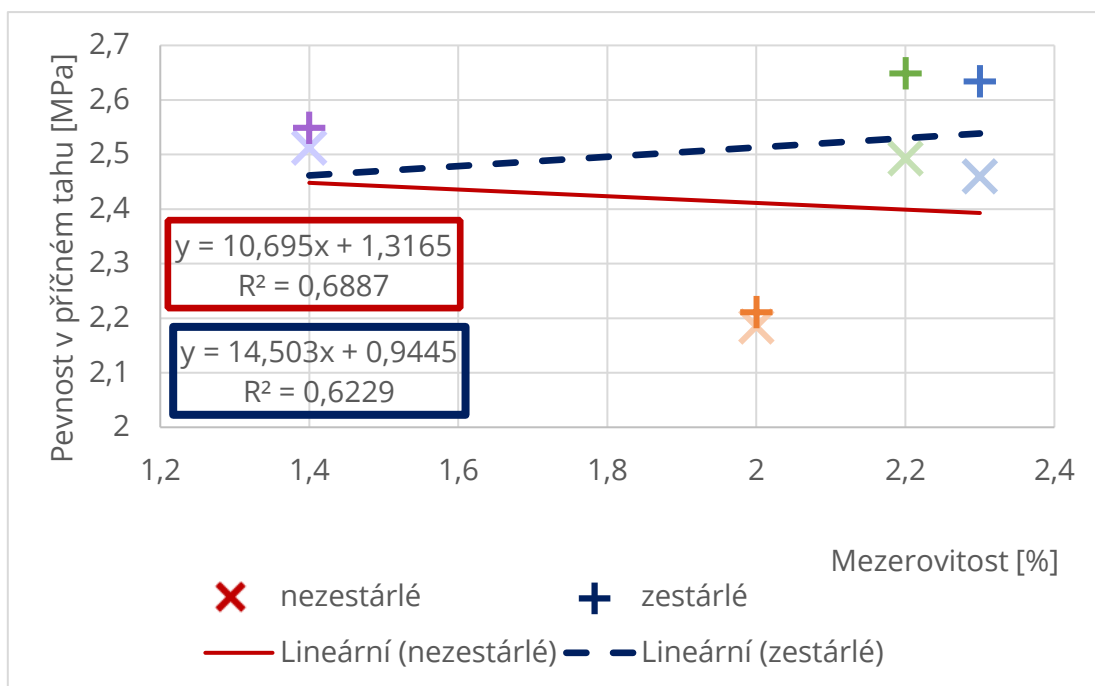
Graf 16: Závislost ztráty částic a mezerovitosti



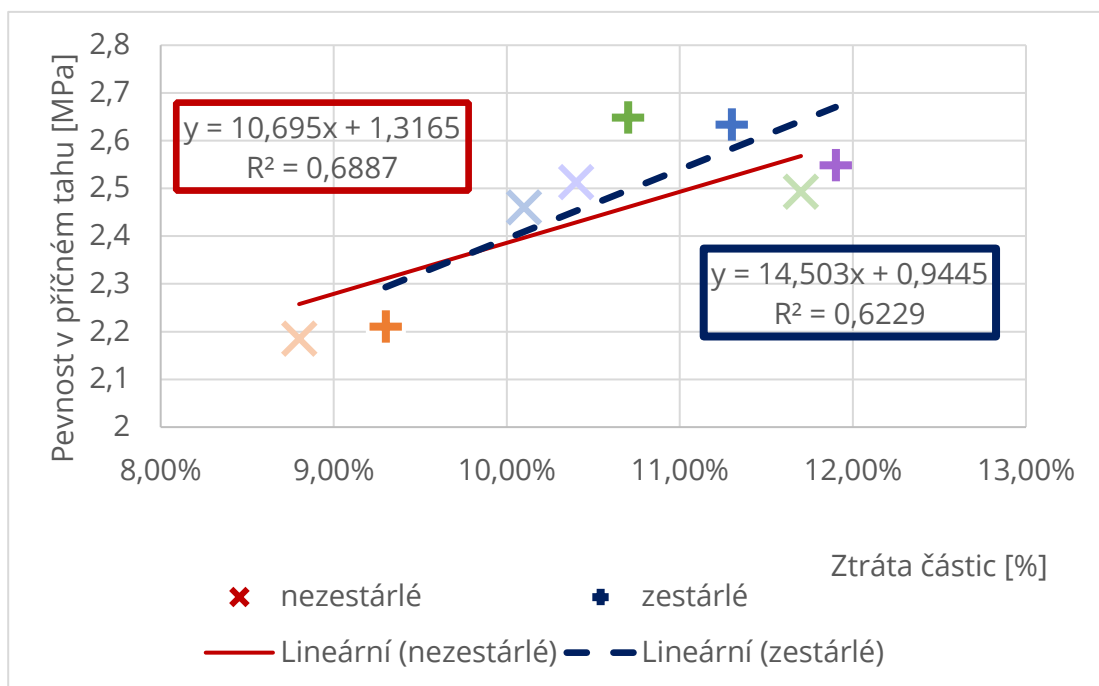
Graf 17: Závislost pevnosti v příčném tahu a obsahu pojiva



Graf 18: Závislost pevnosti v příčném tahu a mezerovitosti



Graf 19: Závislost ztráty částic a pevnosti v příčném tahu



7 ZÁVĚR

Stárnutí je proces, který zhoršuje vlastnosti asfaltového pojiva, ovlivňuje životnost i kvalitu pozemních komunikací. V důsledku jeho působení vznikají předčasné poruchy vozovek, jako například tvorba trhlin, výtluků, a díky nim dojde k předčasnému vyčerpání životnosti vozovky.

V České republice neexistuje žádná metodika o postupech modelování stárnutí asfaltové směsi, existuje pouze návrh evropské normy PrEN 12697-52 Bituminous mixtures – test methods – Part 52: Conditioning address oxidative ageing.

V rámci bakalářské práce bylo simulováno dlouhodobé stárnutí asfaltové směsi ve formě Marshallových těles a zhodnocení míry zestárnutí změnou hodnot pevnosti v příčném tahu a změnou hodnoty ztráty částic Marshallových těles.

Celkem bylo vyrobeno 40 zkušebních válcových těles 4 vzorků asfaltových směsí o stejné třídě 50/70 od různých výrobců pojiv.

Laboratorní simulace stárnutí ztuhlé asfaltové směsi (Marshallova tělesa) proběhlo po dobu 5 dní v odvětrávané laboratorní sušárně s nuceným oběhem vzduchu o teplotě 85 °C.

Teoretická část bakalářské práce byla věnována popisu znalostí o stárnutí, metodách stárnutí asfaltového pojiva a výzkumných postupů stárnutí asfaltové směsi. Dále jsem se věnovala popisu použitých materiálů a jejich vlastností a postupů provedených zkoušek.

Hlavní cíl praktické části bakalářské práce je vyhodnotit stárnutí z provedených zkoušek a hledat vzájemné závislosti mezi zkouškami.

Ze zkoušky ztráty částic dle ČSN EN 12697-17+A1 bylo vypořádkováno, že směs 4 je nejméně náchylná na projevy stárnutí, protože ztráta částic před stárnutím je větší než ztráta po něm. Směs nejvíce ovlivněna stárnutím je směs 3, která měla největší rozdíl mezi hodnotou ztráty částic před a po stárnutí.

Dle zkoušky pevnosti v příčném tahu z normy ČSN EN 12697-23 bylo stanoveno, že pevnosti v příčném tahu všech zestárých těles jsou větší než těles nezestárých. To vyplývá z poznatku, že asfaltová směs po stárnutí zvětší svoji tuhost. Ovlivnění vzorků směsi stárnutím jsem stanovila z procentuálního nárůstu pevnosti po stárnutí. Nejmenší vliv stárnutí byl pro směs 1 a největší pro směs 2.

Poté byly hledány vzájemné závislosti pomocí koeficientu determinace R^2 . U žádných z hodnot provedených zkoušek a vlastností nebyla nalezena velmi silná závislost. R^2 se pohybovalo v rozmezí 0,5 až 0,7, což znamená, že mezi zkouškami lze nalézt určitý vztah. Jednalo se o závislost mezi hodnotou před a po procesu stárnutí: ztráty částic a pevnosti v příčném tahu; mezerovitostí a ztrátou částic, mezerovitostí a pevnosti v příčném tahu.

9 SEZNAMY

9.1 SEZNAM TABULEK

TABULKA 1: PŘEHLED HODNOT AKCELEROVANÉHO STÁRNUTÍ NORMOVANÝCH V EVROPĚ	7
TABULKA 2: POUŽITÉ ASFALTOVÉ SMĚSI	18
TABULKA 3: VLASTNOSTI ASFALTOVÉ SMĚSI – ZRNITOST	18
TABULKA 4: VLASTNOSTI ASFALTOVÉ SMĚSI – OBSAH POJIVA, MEZEROVITOST	19
TABULKA 5: VLASTNOSTI ASFALTŮ	21
TABULKA 6: TUHOST ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	22
TABULKA 7: STANOVENÍ ZTRÁTY ČÁSTIC PRO JEDNOTLIVÉ SMĚSI	23
TABULKA 8: POŽADAVKY NA SMĚSI ASFALTOVÉHO KOBERCE DRENÁŽNÍHO	25
TABULKA 9: PEVNOSTI SMĚSI V PŘÍČNÉM TAHU	26
TABULKA 10: VÝSLEDKY KORELACÍ	23

9.2 SEZNAM GRAFŮ

GRAF 1: KŘIVKA ZRNITOSTI PRO JEDNOTLIVÉ SMĚSI	19
GRAF 2: OBSAH POJIVA PRO JEDNOTLIVÉ SMĚSI	20
GRAF 3: MEZEROVITOST PRO JEDNOTLIVÉ SMĚSI	20
GRAF 4: PENETRACE JEHLOU POJIVA PRO JEDNOTLIVÉ SMĚSI	21
GRAF 5: BOD MĚKNUTÍ POJIV PRO JEDNOTLIVÉ SMĚSI	22
GRAF 6: MODUL TUHOSTI JEDNOTLIVÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	22
GRAF 7: STANOVENÍ ZTRÁTY ČÁSTIC V PROCENTECH PRO POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VZORKU ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	25
GRAF 8: STANOVENÍ ZTRÁTY ČÁSTIC V PROCENTECH PRO POROVNÁNÍ ZESTÁRLÝCH A NEZESTÁRLÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	25
GRAF 9: PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU PRO POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VZORKU ASFALTOVÝCH SMĚSÍ.	27
GRAF 10: PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU PRO POROVNÁNÍ ZESTÁRLÝCH A NEZESTÁRLÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	27
GRAF 11: DIAGRAM PEVNOSTI A PŘETVOŘENÍ ZKOUŠENÝCH TĚLES SMĚSI 1	28
GRAF 12: DIAGRAM PEVNOSTI A PŘETVOŘENÍ ZKOUŠENÝCH TĚLES SMĚSI 2	28

GRAF 13: DIAGRAM PEVNOSTI A PŘETVOŘENÍ ZKOUŠENÝCH TĚLES SMĚSI 3.....	29
GRAF 14: DIAGRAM PEVNOSTI A PŘETVOŘENÍ ZKOUŠENÝCH TĚLES SMĚSI 4.....	29
GRAF 15: ZÁVISLOST ZTRÁTY ČÁSTIC A OBSAH POJIVA	31
GRAF 16: ZÁVISLOST ZTRÁTY ČÁSTIC A MEZEROVITOSTI.....	32
GRAF 17: ZÁVISLOST PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU A OBSAHU POJIVA	32
GRAF 18: ZÁVISLOST PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU A MEZEROVITOSTI.....	33
GRAF 19: ZÁVISLOST ZTRÁTY ČÁSTIC A PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU	33

9.3 SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1 LABORATORNÍ SUŠÁRNA	11
OBRÁZEK 2: MARSHALLOVA TĚLSA URČENA K SIMULOVÁNÍ LABORATORNÍHO STÁRNUTÍ.....	11
OBRÁZEK 3: LABORATORNÍ SUŠÁRNA.....	12
OBRÁZEK 4: TEPLOMĚR S TEPLOTOU HUTNĚNÍ	13
OBRÁZEK 5: FORMA PRO ROZEHŘÁTÍ SMĚSI NA TEPLOTU HUTNĚNÍ	13
OBRÁZEK 6: FORMA PRO HUTNĚNÍ.....	13
OBRÁZEK 7: RÁZOVÝ ZHUTŇOVAČ.....	13
OBRÁZEK 8: OTLUKOVÝ BUBEN LOS ANGELES.....	15
OBRÁZEK 9: TĚLESO PŘED A PO PROVEDNÍ ZKOUŠKY.....	15
OBRÁZEK 10: TLAČNÁ ČELIST SE ZATĚŽOVACÍMI PÁSY.....	15
OBRÁZEK 11: TYPY PORUŠENÍ.....	16
OBRÁZEK 12: ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ	17
OBRÁZEK 13: UPEVNĚNÍ TĚLESA V LISU	17
OBRÁZEK 14: VIZUÁLNÍ HODNOCENÍ TĚLESA PŘED A PO ZKOUŠCE ZTRÁTY ČÁSTIC.....	24

9.4 SEZNAM ROVNIC

$PL = 100 \cdot (W1 - W2)W1$ ROVNICE 1.....	14
$ITS = 2P\pi \cdot D \cdot H$ ROVNICE 2	17

9.6 SEZNAM POŽITÉ LITERATURY

- [1] KRÁL, Tomáš. *Kryty asfaltových vozovek s dlouhou životností a s využitím tenkých obrusných vrstev. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta stavební, katedra silničních staveb. Vedoucí práce Ing. Jan Valentin, Ph.D.*
- [2] DAŠEK, Ondřej, Pavel COUFALÍK, Petr HÝZL, Petr ŠPAČEK a David MATOUŠEK. *Změny vlastností silničních asfaltů způsobené stárnutím. Brno, 2013.*
- [3] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II: Asfaltová pojiva. Brno. 2005.*
- [4] ČSN EN 12697-8. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Praha: Český normalizační institut, 2004.*
- [5] *Hutnění asfaltových směsí v laboratoři: vliv hutnění na chování asfaltových směsí [online]. Praha, 2014 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/hutneni-asfaltovych-smesi-v-laboratori-vliv-hutneni-na-chovani-asfaltovych-smesi/>*
- [6] PrEN 12697-52:2013: *Bituminous mixtures – test methods – Part 52: Conditioning address oxidative ageing. 2014 [Cit. 2019-5-19]*
- [7] ČSN EN 12697-30+A1 – *Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka– Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Praha: Český normalizační institut, 2007.*
- [8] ČSN EN 12697-17+A1 – *Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka– Část 17: Ztráta částic zkušebního tělesa asfaltového koberce drenážního. Praha: Český normalizační institut, 2007.*
- [9] ČSN EN 12697-23 – *Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka– Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu. Praha: Český normalizační institut, 2005.*
- [10] Plitz J. *Stárnutí silničních pojiv. Asfaltové vozovky 1997. 1997.*
- [11] KOTOUŠOVÁ, Adriana. *Laboratorní simulace stárnutí asfaltové směsi a vliv na vybrané funkční charakteristiky. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, fakulta stavební, katedra silničních staveb. Vedoucí práce Ing. Jan Valentin, Ph.D.*

- [12] DUBŠÍKOVÁ, Karolína. *Odolnost asfaltového pojiva a asfaltové směsi vůči deformaci*. Brno, 2018. *Bakalářská práce*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [13] DAŠEK, Ondřej, Petr HÝZL, Pavel COUFALÍK, et al. *Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí*. Brno, 2015.
- [14] KLIMEŠ, Petr. *Dvouvrstvý koberec drenážní s asfaltem modifikovaným pryžovým granulátem*. Brno, 2012. *Diplomová práce*. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan Kudrna, CSc.
- [15] DAŠEK, Ondřej, Petr HÝZL, Pavel COUFALÍK, et al. *Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačním stárnutím*. Brno, 2015.
- [16] THESIS, M. Sc.: *Development of a laboratory ageing method for bitumen in porous asphalt* [online]. Delft, 2010 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1009.5520&rep=rep1&type=pdf>
- [17] ČSN 73 6121 *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.