



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ ASFALTOVÉ SMĚSI S PŘÍSAĐOU NA BÁZI SMĚSI RECYKLOVANÝCH PLASTŮ

EVALUATION OF PROPERTIES OF ASPHALT MIXTURE WITH ADDITIVE BASED
ON MIXTURE OF RECYCLED PLASTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Sára Machová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

BRNO 2020



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	Sára Machová
Název	Hodnocení vlastností asfaltové směsi s přísadou na bázi směsi recyklovaných plastů
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

Podklady a literatura

Předané vzorky asfaltových směsí

Normy řady 12697

Normy ČSN 65 7222-1, ČSN 65 7204, ČSN EN 1426, ČSN EN 1427, ČSN EN 16659, ČSN EN 14770, ČSN EN 12593

Literatura z internetu

Zásady pro vypracování

Cílem bakalářské práce bude zhodnotit vliv obsahu přísady na bázi směsi recyklovaných plastů na vybrané vlastnosti asfaltové směsi ve srovnání s odpovídající asfaltovou směsí neobsahující uvedenou přísadu. Vlastnosti směsí budou popsány zkouškou pojíždění kolem a jednoosou zkouškou tahem. Z asfaltových směsí budou znovuzískána pojiva, na kterých budou provedeny zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí a zkoušky v dynamickém smykovém reometru.

Struktura bakalářské práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá posouzením vlivu modifikační přísady na bázi recyklovaných plastů na asfaltovou směs. V první části této práce je přiblížena problematika modifikace asfaltových směsí a pojiv pomocí recyklovaných materiálů. V druhé části jsou popsány metody a poté výsledky jednotlivých zkoušek. K porovnání mezi modifikovanou směsí a srovnávací směsí byly provedeny zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí, DSR, MSCR, pojíždění kolem a jednoosé zkoušky tahem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfalt, modifikační přísady, druhotné materiály, Duroflex, znovuzískání pojiva, penetrace jehlou, bod měknutí, DSR, MSCR, jednoosá zkouška tahem, pojíždění kolem

ABSTRACT

Bachelor's thesis deals with the evaluation of properties of asphalt mixture with additive based on a mixture of recycled plastics. The first part of this thesis introduces the modification of asphalt mixtures and asphalt binders. The additives are made of recycled materials. The test methods are described in the second part of this thesis and the last part contains the test results of needle penetration, softening point, DSR, MSCR, wheel tracking, and uniaxial tension test.

KEYWORDS

Bitumen, modification additives, recycled materials, Duroflex, bitumen recovery, needle penetration, softening point, DSR, MSCR, uniaxial tension test, wheel tracking

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Sára Machová Hodnocení vlastností asfaltové směsi s přísadou na bázi směsi recyklovaných plastů. Brno, 2020. 66 s., 2 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem Hodnocení vlastností asfaltové směsi s přísadou na bázi směsi recyklovaných plastů je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 21. 5. 2020

Sára Machová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem Hodnocení vlastností asfaltové směsi s přísadou na bázi směsi recyklovaných plastů zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 21. 5. 2020

Sára Machová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala především vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. za cenné rady, výpomoc při hledání nezbytných informací a věnovaný čas ke konzultacím. Mé díky patří také Pavlu Strakovi za pomoc při provádění zkoušek v laboratoři.

OBSAH

1. Úvod	10
2. Rešerše literatury	11
2.1. Využití asfaltu	11
2.2. Výroba asfaltů	12
2.3. Charakteristika asfaltu	13
2.4. Druhotné materiály jako modifikační přísady	15
2.4.1. Modifikace celulóзовými vlákny	15
2.4.2. Modifikace polymery	16
2.4.2.1. Modifikace přísadou ze starých pneumatik	18
2.4.2.1.1. Recyklace pneumatik v Evropě	18
2.4.2.1.2. Výhody modifikace ELT	20
2.4.2.2. Modifikace plastovým odpadem	20
2.4.2.2.1. Modifikace pomocí odpadu z PVC	21
2.4.2.2.2. Modifikace pomocí použité balící pásky	22
2.4.2.2.3. Modifikace pomocí odpadu z PET	23
2.4.3. Modifikace asfaltové směsi přísadou Duroflex®	25
3. Cíle práce	28
4. Použité zkušební metody	29
4.1. Extrakce pojiva	29
4.2. Znovuzískání pojiva	30
4.3. Penetrace jehlou	31
4.4. Bod měknutí (kroužek a kulička)	33
4.5. Dynamický smykový reometr	34

4.6.	Zkouška MSCR.....	36
4.7.	Hutnění desek	38
4.8.	Pojíždění kolem.....	39
4.9.	Nízkoteplotní vlastnosti – jednoosá zkouška tahem.....	40
5.	Použité materiály	41
5.1.	Nemodifikovaná asfaltová směs	41
5.2.	Modifikovaná asfaltová směs	41
6.	Výsledky zkoušek	42
6.1.	Penetrace jehlou	42
6.2.	Stanovení bodu měknutí (kroužek a kulička).....	43
6.3.	Vyhodnocení výsledků z dynamického smykového reometru.....	44
6.4.	Vyhodnocení zkoušky MSCR	49
6.5.	Vyhodnocení zkoušky pojíždění kolem	51
6.6.	Nízkoteplotní vlastnosti – jednoosá zkouška tahem.....	53
7.	Závěr	56
8.	Seznam použité literatury a zdrojů	58
9.	Seznamy	64
9.1.	Seznam obrázků	64
9.2.	Seznam tabulek	65
9.3.	Seznam grafů	65
9.4.	Seznam příloh	66

1. ÚVOD

Se zvyšujícím se stupněm automobilizace rostou také nároky na kvalitu pozemních komunikací. Z toho vyplývající požadavky však nejsou jedinou příčinou k vývoji asfaltových směsí. Jako další nezanedbatelnou součástí vývoje je nutnost brát ohled na ekonomickou a ekologickou stránku výroby. To v praxi znamená, že je zapotřebí zvýšit odolnost a prodloužit životnost netuhých vozovek například použitím nových modifikovaných asfaltových směsí, avšak zároveň nezatěžovat přírodu při jejich výrobě a minimalizovat nárůst cen za materiál při rekonstrukcích nebo stavbě nových pozemních komunikací.

Nacházíme se v době, kdy se klade velký důraz nejen na kvalitu výrobků, ale i na šetrnost způsobu celkové výroby. Využití druhotných surovin, tedy i směsí recyklovaných plastů, jako modifikační přísada do asfaltových směsí, se zdá být tedy vhodnou cestou, jak splnit tyto požadavky.

Duroflex®-Standard je modifikační přísada vhodná pro použití do asfaltových směsí, vyrobená na bázi recyklovaných plastů. Konkrétně obsahuje podíly z plastomerů, elastomerů a vláken celulózy. Při jeho použití je dle výrobce redukováno množství emisí CO₂, vozovka má zvýšenou odolnost vůči vyjetí kolejí a odolnost proti vzniku možných trhlin.

V této bakalářské práci budou porovnány vybrané vlastnosti modifikované asfaltové směsi s přísadou Duroflex®-Standard s vlastnostmi asfaltové směsi bez modifikačních přísad.

2. REŠERŠE LITERATURY

2.1. VYUŽITÍ ASFALTU

Asfalt je víceúčelový materiál, jenž je z ekonomického hlediska pro určité aplikace cenově výhodný. Asfalt je využíván v průmyslu jako elektroizolační látka, také při přípravě slévárenských forem nebo ve válcovnách jako mazadlo. Pokud se jedná o pozemní stavebnictví, asfalt nalezneme v podobě asfaltových pásů (viz obrázek 1) nebo stěrek. Jeho významné hydroizolační vlastnosti jsou také oceňovány při výstavbě vodohospodářských děl a jejich těsnění. Avšak největší uplatnění asfaltu jako stavebního materiálu nalézáme jednoznačně v silničním stavitelství, tedy při stavbě pozemních komunikací, jejich opravě, údržbě a také při následné recyklaci netuhých vozovek. [1, 2, 3] Na obrázcích 2 a 3 můžeme vidět využití asfaltu jako pojiva ve směsích využitých při stavbě pozemní komunikace anebo její opravy.



Obrázek 1 - Použití asfaltových hydroizolačních pásů [48]



Obrázek 2 - Pozemní komunikace z netuhé vozovky [49]

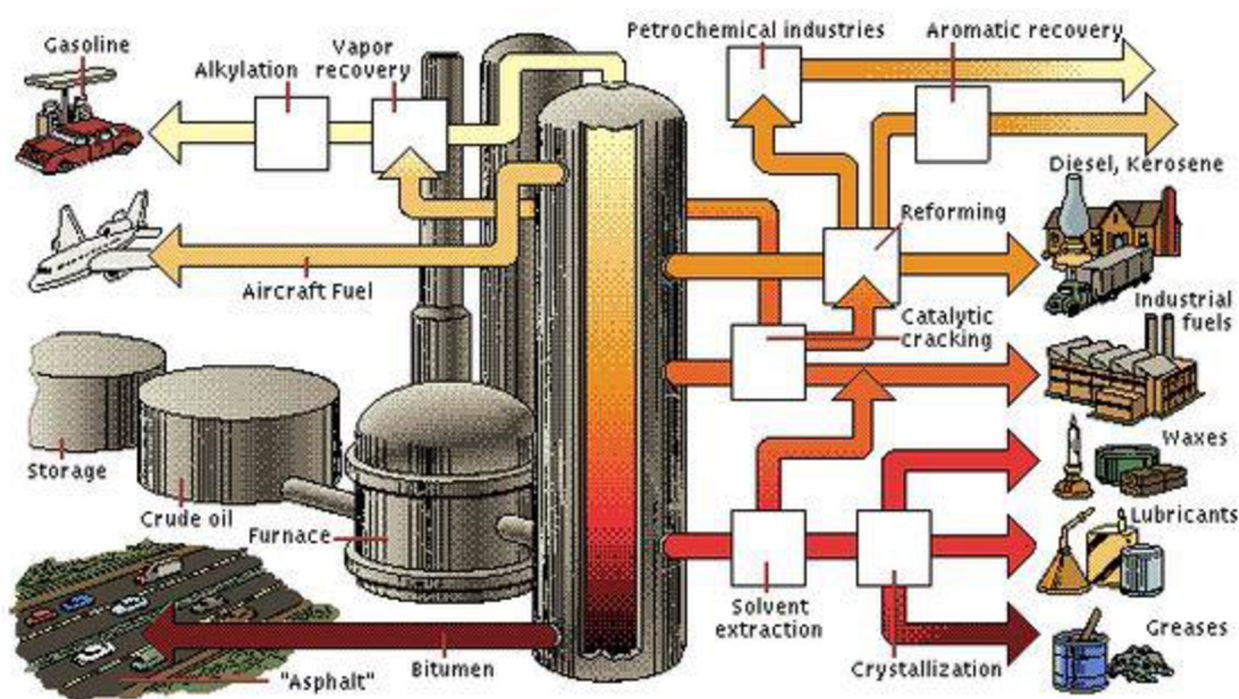


Obrázek 3 - Oprava pozemní komunikace [50]

2.2. VÝROBA ASFALTŮ

Pokud se budeme bavit o vlastnostech asfaltu, je důležité, abychom brali v potaz také jeho původ. Asfalt v současnosti získáváme především při zpracování surové ropy, jedná se v podstatě o poslední produkt celého procesu rafinace ropy. Jako vstupní materiál rozlišujeme ropu asfaltickou, poloasfaltickou a neasfaltickou. Druh může být upřesněn tím, zda se jedná o ropu parafinickou (obsah parafínu >2 %) nebo neparafinickou (obsah parafínu <1 %). [4,5,6]

Dle druhu výroby pak rozlišujeme asfalt destilační z klasické třístupňové vakuové destilace, vysokovakuové destilace, polofoukané asfalty ze semioxidace nebo oxidované asfalty z oxidace ropných zbytků. [7,8] Na obr. 4 můžeme vidět zpracování ropy frakční destilací.



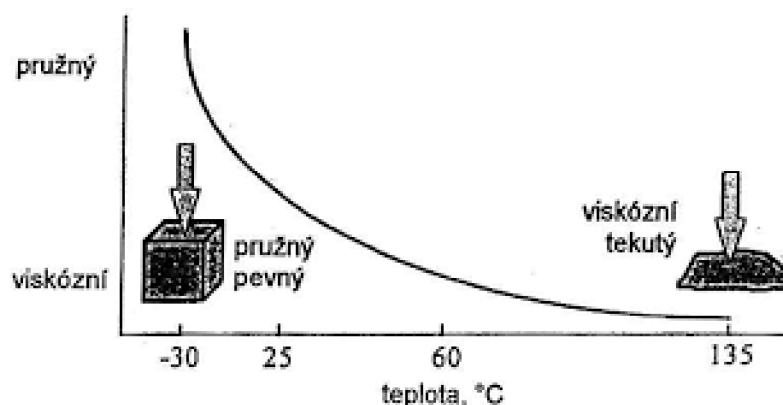
Obrázek 4 - Grafické znázornění frakční destilace ropy [51]

Nejedná se však pouze o materiál vytvořen průmyslovým způsobem, nalezneme jej také v podobě přírodního zdroje. Jelikož se asfalt nachází ve volné přírodě, obsahuje příměs jemně rozptýlených minerálních látek.[6] Momentálně největší zdroj přírodního asfaltu známého jako Trinidad Epuré nalezneme v Trinidadu v Karibském moři. Tento druh asfaltu však není úplně vhodný k přímému použití v silničním stavitelství, jelikož je příliš tvrdý, proto se běžně

smíchává s měkčím ropným asfaltem. [5] Pokud se pak budeme bavit o přírodním asfaltu těženém v Evropě, bude se jednat o asfalt z Albánie, z oblasti Selenica. Tento albánský asfalt patří mezi horninové, vyskytuje se jako velké čocky v píscích a štěrcích nebo vytváří vrstvy v pískovci či slínovém vápenci. [6]

2.3. CHARAKTERISTIKA ASFALTU

Z chemického hlediska se jedná o koloidní látku obecně složenou z pevných částic a z tekutých složek. Pevné částice nazýváme asfaltény a tekuté složky jako pryskyřice a oleje jsou sdruženy pod jedním názvem maltény. Asfalt je směs vysoce molekulárních uhlovodíků a heteroatomických látek, jenž je zcela rozpustná v toluenu. Na základě amerického a kanadského výzkumu Strategic Highway research: Special Report se asfalt skládá převážně z uhlíku (80-88 % hm.) a vodíku (8-11 % hm.), dále pak ze síry, dusíku, kyslíku, vanadu, kobaltu a niklu. Chemické složení je navíc složité popsat, jelikož při rozboru asfaltu nalezneme zhruba 300 až 2000 sloučenin. Proto tyto součásti zobečňujeme, jak je uvedeno výše, na asfaltény, v asfaltu má zastoupení přibližně 5 % až 25 %, a maltény. Toto rozdělení složek je zkoumáno analýzou známou jako SARA, z anglického překladu pro zastoupené frakce Saturate (saturáty), Aromatic (aromáty), Resin (pryskyřice), Asphaltene (asfaltény). [3,4,6,9]



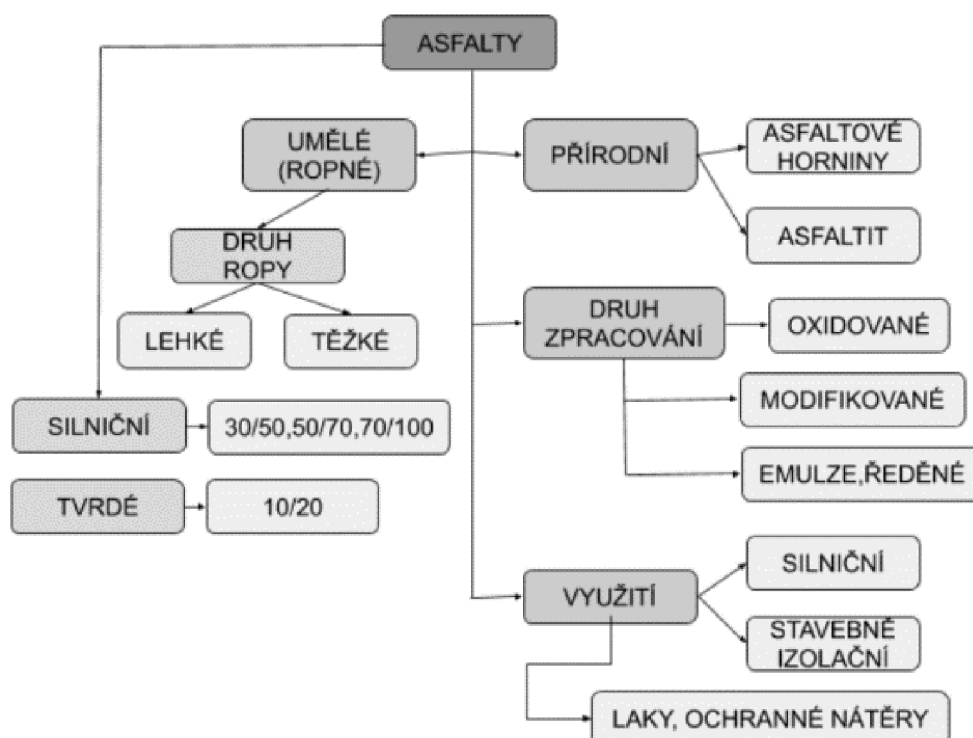
Obrázek 5 - Závislost stavu asfaltu na teplotě [4]

Evropská norma (EN 12597) popisuje asfalt jako prakticky netěkávý, adhezivní a voděodolný materiál. Nejvýznamnější vlastností je bezpochybně jeho teplotní citlivost. Charakteristika a celkově zkoušení tohoto materiálu úzce závisí na teplotě.

Z fyzikálního hlediska mluvíme o asfaltu jako amorfním, visko - elastickém materiálu, kdy se za nižších teplot jedná o pružnou pevnou látku. Naopak s rostoucí teplotou měkne a stává se kapalinou, kterou popisujeme pomocí viskozity závislé na teplotě. Toto chování je znázorněno na obrázku 5. Visko-elasticky se asfalt chová v teplotním rozmezí mezi bodem lámavosti a bodem měknutí. [3,4]

Při hodnocení asfaltů však nesmíme opomíjet ani vliv oxidace. Tento děj je spojen se stárnutím tohoto materiálu, kdy zoxidováním tvrdne a stává se křehčím. Tato vlastnost pochází z jeho organického původu. Tento proces oxidačního stárnutí lze navíc urychlit pomocí vysokých teplot, tedy i při jeho zpracování do asfaltových směsí v obalovně. Takto nepříznivě jako oxidace také působí ultrafialové záření. [1,5]

Nejedná se pouze o jeden typ asfaltu, ale liší se charakteristikami i díky svému původu, způsobem výroby a popřípadě také následným zpracováním. Takové dělení je schematicky znázorněné na obr. 6.



Obrázek 6 - Schéma rozdělení asfaltů

2.4. DRUHOTNÉ MATERIÁLY JAKO MODIFIKAČNÍ PŘÍSADY

Všeobecně je známo, že v dnešní době máme jako konzumní společnost rozsáhlý negativní vliv na prostředí kolem nás. Velkým problémem 21. století je bez diskuse naše produkce odpadu. Při novodobém směru zerowaste, kdy se lidé snaží minimalizovat celkovou tvorbu odpadu, se nabízí možnost přemýšlet nad tím, jak bychom mohli ve větší míře dále využít různé materiály, které jsou vnímány už jen jako odpad.

Díky rozvoji jak společnosti, tak ekonomiky, máme na cestách čím dál více narůstající množství vozidel. Toto zvyšující se zatížení na povrch vozovek je třeba řešit vývojem nových materiálů nebo alespoň zlepšením stávajících. Co se týče asfaltového pojiva a asfaltových směsí, jedná se především o jejich modifikaci, tedy zlepšení vlastností na základě přidání různých přísad a příměsí.

Modifikace se provádí kvůli zlepšení reologických vlastností asfaltových pojiv/směsí. Přísady dokážou snížit teplotní citlivost asfaltu a zároveň křehkost v oblasti nízkých teplot, zvýšit bod měknutí, omezit stárnutí asfaltu a zvýšit odolnost vůči vzniku trvalých deformací a navyšují i kohezi, soudržnost a lepivost při vyšších teplotách. [6]

Spojení myšlenky modifikace asfaltového pojiva, popřípadě směsi, a opětovného využití odpadního materiálu není však nic nového. Například gumoasfalt byl vytvořen v 60. letech minulého století. [13] Jako další modifikační přísada z druhotných materiálů stojí určitě za zmínku také starý papír, konkrétně celulózová vlákna, nebo staré ojeté pneumatiky a PET láhve. Dalšími zajímavými použitými materiály jsou nedopalky cigaret, bavlněná vlákna, vlákna ze sukulentů (sisal), vlákna staré rifloviny aj.

2.4.1. MODIFIKACE CELULÓZOVÝMI VLÁKNY

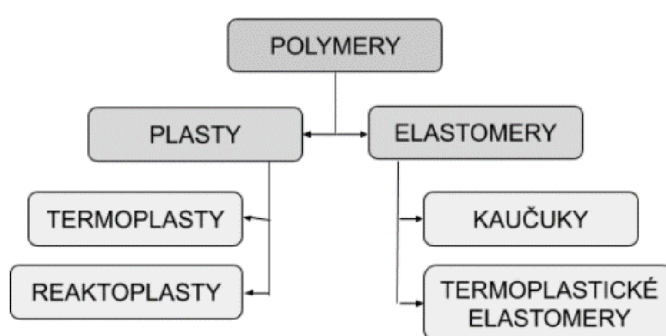
Celulózová vlákna se uplatňují především v asfaltových směsích vyráběných za horka (HMA). Hlavním plusem této přísady je to, že zabraňuje asfaltovému pojivu stékat z kameniva a tímto usnadňují přepravu těchto směsí. Konkrétně jsou

přimíchávána do asfaltových koberců drenážních a asfaltových koberců mastixových (SMA). [14,16,18] Tyto modifikované asfaltové směsi obsahují vlákna v rozmezí 0.20 – 0.30% hm. Ve studii [15], kdy se zkoumal vliv množství celulósových vláken na vlastnosti SMA, bylo zjištěno, že přidáním vláken v množství 0.2 % hm. bylo dosaženo nejmenších hodnot abraze, zatímco při přidání 0.3 % hm. byly zaznamenány nejlepší hodnoty modulu pružnosti. [15]

Mezi další klady celulósových vláken patří jejich zdravotní nezávadnost, biologická odbouratelnost při jejich likvidaci nebo při možném úniku do okolí při dávkování. [18] Přesto však nemají tak výrazné zlepšující schopnosti jako mají například polymerní přísady. [16]

2.4.2. MODIFIKACE POLYMERY

Dle chemického složení se za normálních teplot polymery nacházejí ve čtyřech fázových stavech, a to buď ve sklovitém, kaučukovitém, plastickém nebo krystalickém. [20] Jsou složeny z molekul, které jsou tvořeny převážně uhlíkem, vodíkem, kyslíkem, dusíkem a jsou rozšířeny i o další prvky jako je křemík, fosfor, bór atd. Rozlišujeme také zda mají makromolekulární řetězce upořádání v rovině (lineární, rozvětvené) či v prostoru v síťové struktuře. Tyto struktury mají pak vliv na různé chování a vlastnosti polymerů. [19,20]



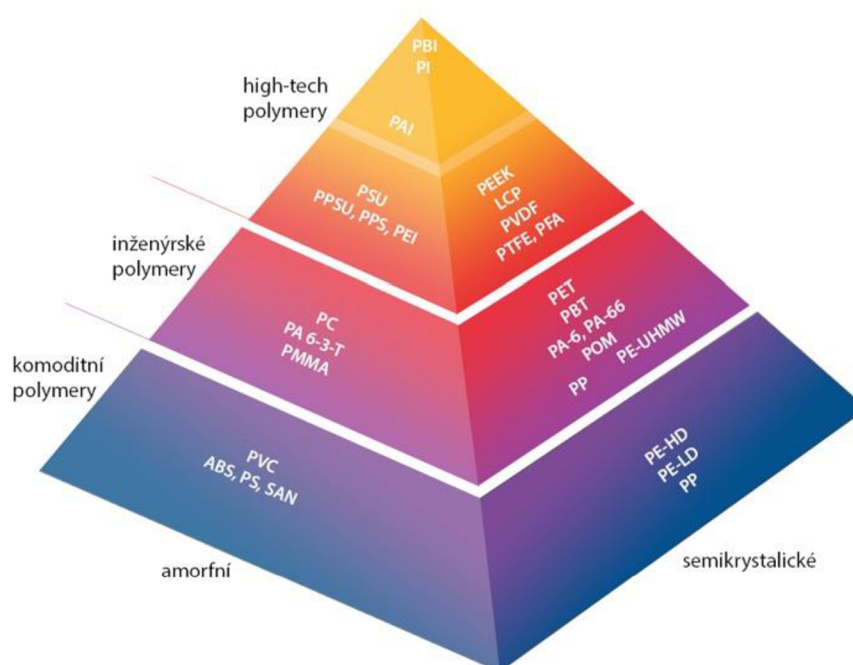
Obrázek 7 - Rozdělení polymerů

Obecně lze však polymery rozlišit na elastomery a plasty, ty dále na termoplasty a reaktoplasty. Co se týče elastomerů, jedná se převážně o kaučuky, ze kterých se vyrábí například pryž. Základní rozdělení polymerů je znázorněno na obr. 7. Elastomery mají tu vlastnost, že je můžeme při běžných podmínkách deformovat

bez porušení a tato deformace bývá ve větší míře vratná. Oproti tomu bývají plasty při stejných podmínkách tvrdé a zároveň křehké. Pokud je však zahřejeme, stávají se se zvyšující teplotou plastičtější a tvarovatelné. Další dělení pak záleží na tom, zda se plasty vrátí po zchlazení do tuhého stavu a tento děj je opakovatelný. Pokud se tak děje, hovoříme o termoplastech, oproti tomu, při nevratné změně, hovoříme o reaktoplastech. Změna je u těchto materiálu nevratná, jelikož dojde ke změně chemické struktury. [19]

Do termoplastů řadíme polyethylen (PE), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC) aj. Jako reaktoplasty považujeme epoxidovou pryskyřici (EP), fenol – formaldehydovou pryskyřici (PF) a dále třeba polyesterovou pryskyřici (UP).

Další dělení vychází dle pozice na trhu (viz obr. 8). Největší jak v objemu výroby, tak i spotřeby jsou plasty komoditní neboli plasty pro široké použití. Toto nej mají díky tomu, že se jedná o nejlevnější typ polymerů. Mezi ně patří PE, PS, polypropylen (PP) a PVC. Další třídy jsou pak plasty inženýrské a high-tech polymery. [21]



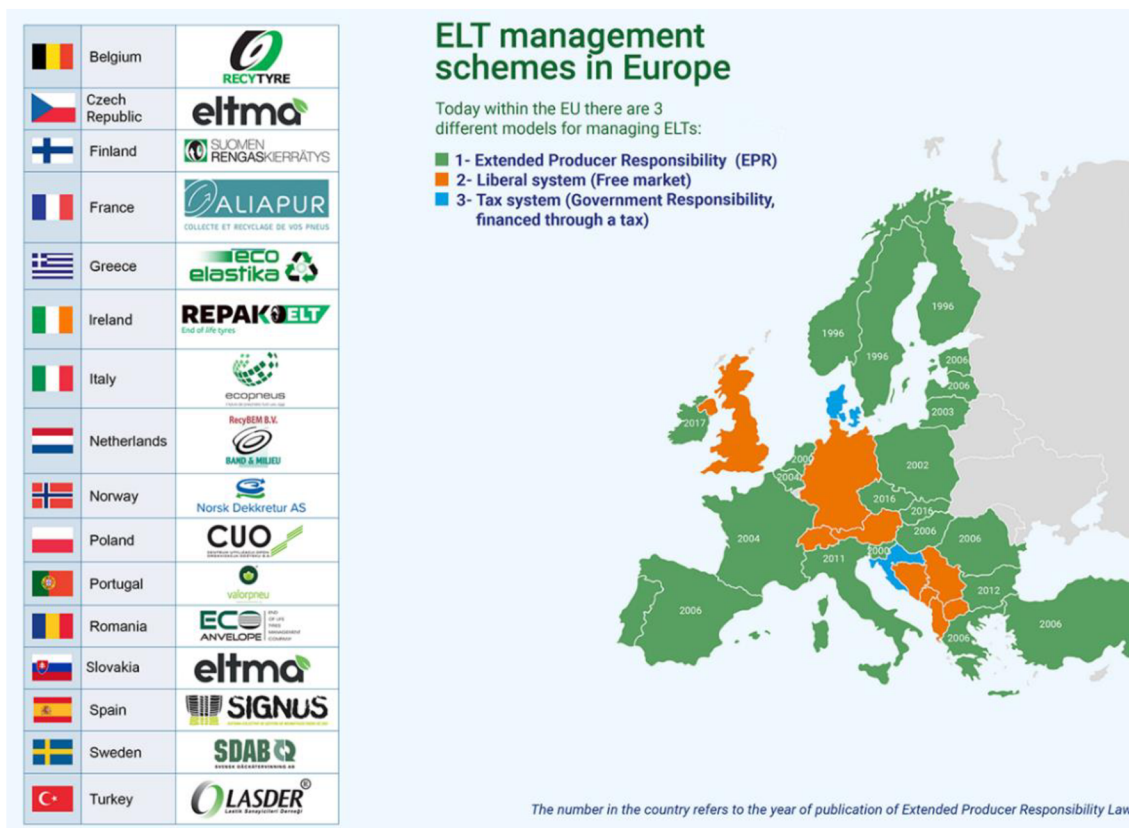
Obrázek 8 - Rozdělení polymerů na trhu [21]

2.4.2.1. MODIFIKACE PŘÍSAĐOU ZE STARÝCH PNEUMATIK

Historie pneumatik se datuje už od roku 1493, kdy byl objeven přírodní kaučuk během objevné Kolumbově cestě do Jižní Ameriky. Hlavní milník však nastal až po 351 letech, když v roce 1844 získal Charles Goodyear patent na vulkanizaci kaučuku sírou. Vývoj pokračoval vznikem prvních pneumatik na jízdní kola, pozdějším znovuobjevením pneumatik, první továrnou na pneumatiky založenou v roce 1890 v Anglii a poté následoval rozvoj výroby a rychlý nárůst využití a spotřeby pneumatik. [19,22]

2.4.2.1.1. RECYKLACE PNEUMATIK V EVROPĚ

V Evropě existuje asociace ETRMA (European Tyre & Rubber Manufacturers' Association), která sdružuje členy vyrábějící pneumatiky a pryžové výrobky. V této asociaci působí například výrobci pneumatik jako Pirelli, Continental, Goodyear, Hankook tire a Michelin.



Obrázek 9 - Znázornění působení ETRMA v Evropě [23]

V roce 2019 se prodalo přes 320 milionů kusů pneumatik jen v Evropě, v celosvětovém měřítku se jedná pouze o 20 % celkového prodeje. [23] Pokud se budeme zabývat tedy prodejem pneumatik na celém světě, bude se jednat o přibližně 1,5 miliardy prodaných pneumatik za jediný rok, které se opotřebují a bude třeba se jich zbavit. Takové pneumatiky se pak mohou stát druhotným materiálem nebo zdrojem k výrobě energií. Schéma na obr. 10 znázorňuje cyklus pneumatik od výroby po jejich zánik. Jsou označovány jako ELT (z anglického end-of-life tyre). Dle ETRMA se v roce 2017 využilo přibližně 92 % použitých pneumatik sesbíraných ve 32 zemích na výrobu energie anebo jako druhotný materiál v další produkci. [23] Velkým problémem je však samotný sběr pneumatik, jelikož pneumatiky nepatří do komunálního odpadu a nelze je tak odnést do sběrného dvora. V České republice lze staré pneumatiky odevzdat v pneusevisech a autoservisech zcela zdarma, a to od ledna 2018. [24]



Obrázek 10 - Schéma cyklu pneumatik [23]

2.4.2.1.2. VÝHODY MODIFIKACE ELT

Staré pneumatiky lze k modifikaci připravit dvěma způsoby. Prvním způsobem je kryogenní technologie, kdy se pneumatiky zmrazí pomocí tekutého dusíku a rozbijí na malé části. Druhým způsobem je pak mechanické mletí.

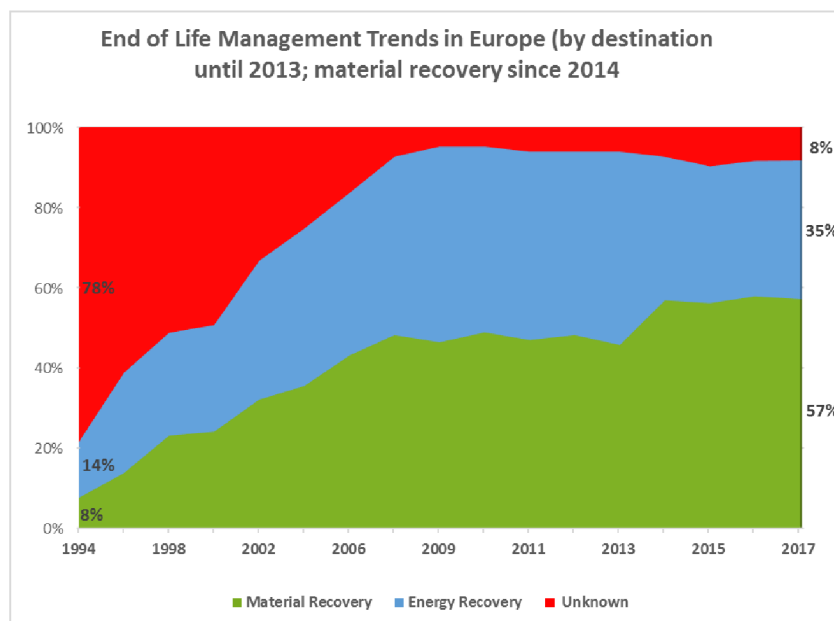
Použitím drtě z pneumatik získáme nejen asfaltové směsi, které dokážou více odolávat proti vyjetí kolejí ve vozovce a únavovým deformacím, ale také z pohledu ekologického je modifikace starými pneumatikami hodnocena velmi kladně. Jednak se sníží znečištění prostředí a maximalizuje využití přírodního zdroje, ale také se využitím sníží množství zbylého polymerního odpadu.

Dle provedené studie [13] bylo patrné, že modifikace pryžovou drtí ovlivňuje ve velké míře reologické vlastnosti asfaltu. Zvýšila se Brookfieldova viskozita, bod měknutí a komplexní smykový modul, oproti tomu se zmenšila hodnota penetrace. Studie byla provedena u modifikace asfaltového pojiva 80/100 pryžovou drtí (0.6 mm) při 180 °C. [13]

Je zajímavé, že k dosažení stoprocentní přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu podle metody Vialit, postačí 5-6 % hm. asfaltu pryžové drtě. [6]

2.4.2.2. MODIFIKACE PLASTOVÝM ODPADEM

Jak jsme doby předešlé pojmenovali dle nejpoužívanějšího materiálu na dobu kamennou, stříbrnou či železnou, tak dnešní dobu lze označit jako dobu plastovou. Plast je materiál velmi dobře dostupný, levný a hlavně víceúčelový. Ovšem momentálně také obrovským ekologickým problémem po celém světě. Tento problém vznikl v důsledku nedostatečného řešení, jak nakládat s plastovým odpadem. Ročně se vytvoří několik desítek miliónů tun plastového odpadu a zrecykluje se pouze necelých 30 %. Dříve se plastový odpad z Evropy vyvážel ve větší míře do Asie, to už je však minulostí i díky nově vzniklým regulacím v Číně. S tímto nově vzniklým problémem se Evropská unie snaží bojovat, a tak vznikají nové regulace týkající se tvorby i použití plastových produktů a následným zpracováním vzniklého plastového odpadu viz obr. 11, kde můžeme vidět znázorněné rozdělení využití recyklátu od roku 1994 do 2017.[25,26]



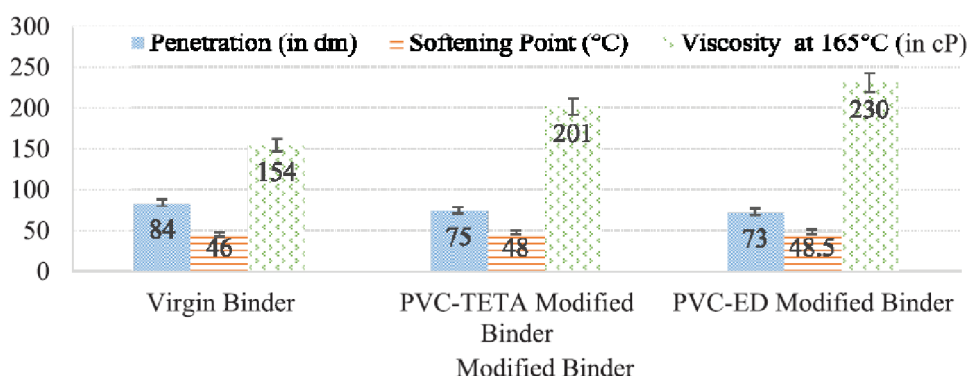
Obrázek 11 - Znázornění využití ELTs [23]

2.4.2.2.1. MODIFIKACE POMOCÍ ODPADU Z PVC

V roce 2013 se vyprodukovalo okolo 38,5 miliónů tun PVC a každým rokem toto číslo roste. PVC se řadí mezi termoplastické polymery. Využití najde v široké škále různých výrobních odvětví, např. v podobě lékařského zařízení, obalů, potrubí, v klempířství atp. Avšak toto široké využití má za následek také problém s jeho likvidací nebo recyklací v tomto obrovském množství. Nejen v množství, ale háček se také nachází ve složení, kdy PVC není vyráběno vždy se stejnými komponenty. Tato skutečnost se projevuje ve variabilitě recyklátů při mechanické recyklaci. V práci Kanna & Boudreaux z roku 2016 nalezneme informaci ze zprávy od The United States Environmental Protection Agency, že bylo vytvořeno přes 910 tisíc tun PVC odpadu, ale ani ne 0,25 % bylo dále recyklováno. [27] To je vcelku znepokojující, jelikož PVC zastupuje přibližně jednu desetinu celkové výroby plastů.

Při zkoušení modifikace asfaltového pojiva bylo využito chemicky upravené PVC. První modifikace byla provedena s PVC pomocí polyaminů: trietylentetramin (TETA) a etyléndiamin (ED). Následně se modifikovalo asfaltové pojivo s PVC-TETA/PVC-ED. Zlepšením asfaltového pojiva došlo ke zvýšení bodu měknutí, zmenšení hodnot penetrace. Tyto výsledky jsou shrnuty na obrázku 12. Došlo ke snížení stékavosti

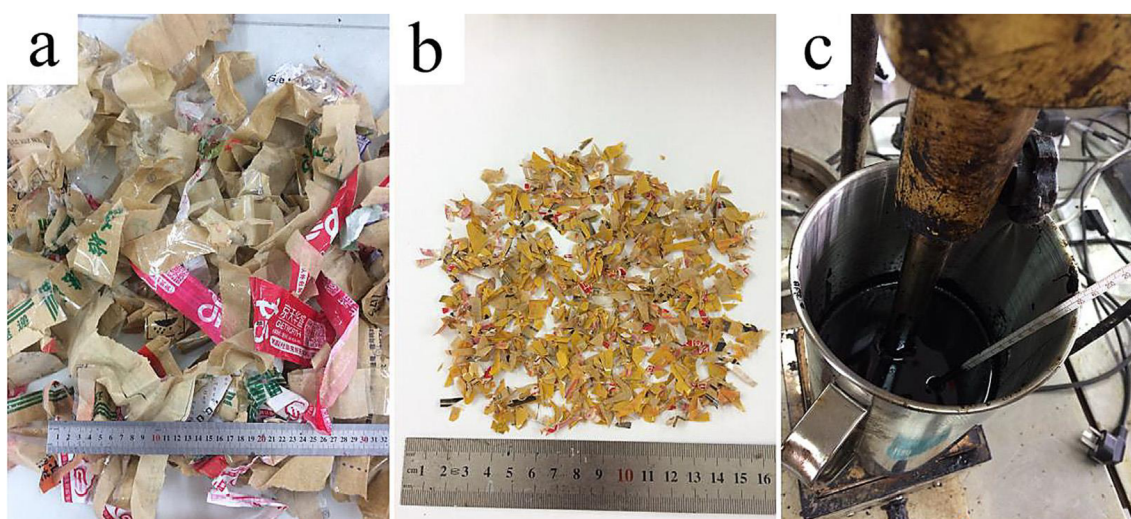
(hlavně u použití PVC-TETA), zvýšila se také odolnost vůči vyjetí kolejí při vyšších teplotách a nízkoteplotní reologické vlastnosti se zlepšily. [27]



Obrázek 12 - Výsledky zkoušek [27]

2.4.2.2. MODIFIKACE POMOCÍ POUŽITÉ BALÍČÍ PÁSKY

Tato metoda využila vlastností modifikace asfaltového pojiva, jak použitím polymerů, tak i celulozovými vlákny. Nápad k tomuto experimentu vznikl na popud zvyšujícího se počtu balíčků a tím i zvyšující se spotřeby balíčkové pásky. Jenom v Číně byla spotřeba 330 milionů rolí pásky za rok 2016. V pokusu [28] byla použita páska vyrobená zejména z polyetylénu (80 %) a soprenu/styrenu. Na pásce byly také zbytky z papírových obalů, vlákna byla délky 10 μ m až 30 μ m. Použitý materiál vidíme na obrázku 13. Modifikováno bylo asfaltové pojivo 60/70.



Obrázek 13 - Použití použité balíčkové pásky [28]

Z výsledků pokusu bylo zjištěno, že se zvyšujícím se množstvím pásky se také zvyšovala odolnost vůči vyjetí kolejí. Mimo jiné se také zvýšila únavová odolnost materiálu, zlepšení bylo ale omezeno množstvím pásky, odolnost se opět začala snižovat po přidání pásky v množství překračující 6 % hm. asfaltu. [28]

2.4.2.2.3. MODIFIKACE POMOCÍ ODPADU Z PET

Polyethylentereftalát je známý především pod svou zkratkou PET. Tento plastový materiál patří mezi termoplastické polymery a je to jeden z nejpoužívanějších polymerů na světě. Jako modifikační přísada se využily hlavně použité PET láhve. Ty se na trh dostaly už v roce 1978 díky firmě Coca-Cola, u nás jsme skleněné láhve začali nahrazovat plastovými až po roce 1993. [26] Trevor Nace napsal v roce 2017 příspěvek na Forbes.com, ve kterém poukazuje na to, že se statisticky každou minutu prodá milion PET láhví a z toho se recykluje pouze 9 %. [29] Není tedy žádným překvapením, že se různé organizace, vlády a další snaží s tímto masivním problémem týkající se odpadu plastových láhví, a nejen láhví, bojovat hlavně pomocí recyklace a eliminovat tak množství zbylého plastového odpadu na skládkách či v mořích a oceánech.

K modifikaci v několika pokusech byly použité pouze mechanicky (na obr. 14 lze vidět drť z mech. zpracování) nebo v druhém případě chemicky recyklované PET láhve. Co se týče PET láhve jako takové, uvažujeme pouze láhve bez víček a etiket, které nebývají z PET. [31,32,33] U obou typů přísad byly prokázány zlepšující účinky na modifikovanou asfaltovou směs.



Obrázek 14 - Ukázka drtě z PET láhví [33]

U asfaltové směsi typu SMA (Stone Mastix Asphalt) použitím přísady z mechanicky recyklovaných PET láhví bylo při zkoušení zjištěno, že přidáním 4 % PET se hloubka vyjetých kolejí (trvalá deformace) sníží až o 29 % oproti běžné nemodifikované směsi (viz obr. 15). Významně byla i ovlivněna stékavost, a to konkrétně její snížení (viz obr. 16), což je u směsi typu SMA velice pozitivní. Celkově bylo vyhodnoceno, že ideální množství přísady je v rozmezí 4 % až 6 % hm. asfaltu. [33]

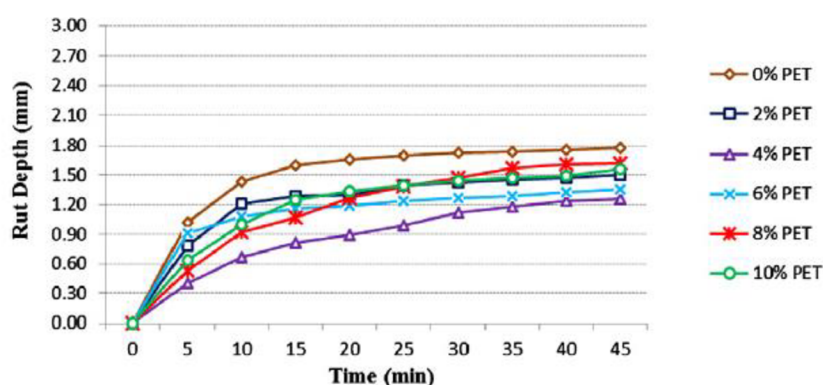


Fig. 4. Wheel track test results.

Obrázek 15 - Výsledky zkoušky poježdění kolem [33]

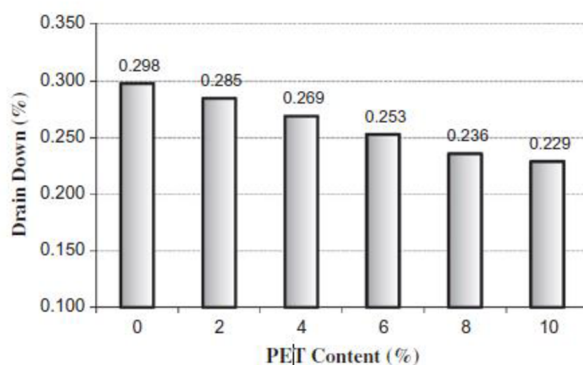


Fig. 5. The drain down test results.

Obrázek 16 - Výsledky zkoušky stékavosti pojiva z povrchu kameniva [33]

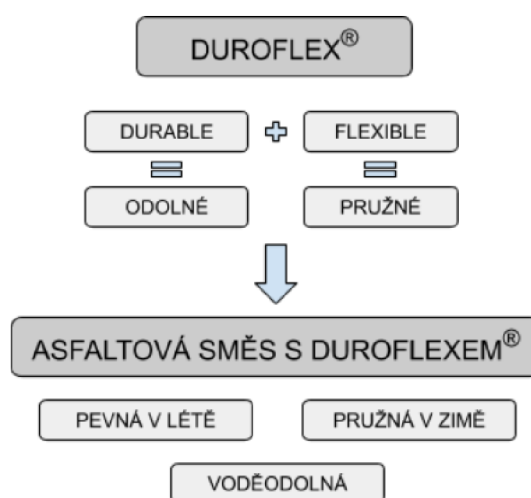
Co se týče přísady z chemicky zrecyklovaných PET láhví, výsledky byly taktéž v závěru pozitivní. U tohoto typu však záleželo na druhu použitého derivátu vzniklého po aminolýze PET a také na jeho množství. Na obrázku 17 lze vidět rozdíl v přilnavosti pojiva na kamenivu podle druhu úpravy (čistě pojivo, pojivo modifikované derivátem ozn. BHETA nebo derivátem s označením BAET). [32]



Obrázek 17 - Ukázka přilnavosti pojiva na kamenivu [32]

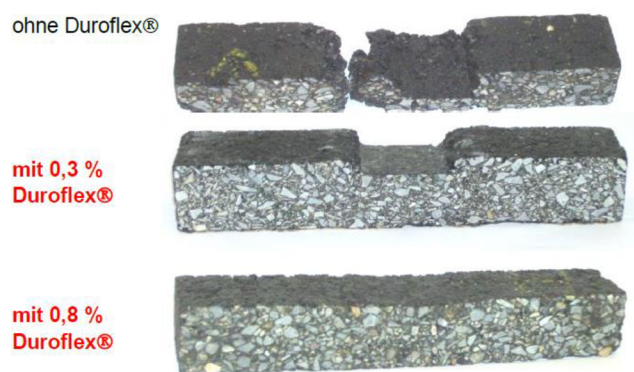
2.4.3. MODIFIKACE ASFALTOVÉ SMĚSI PŘÍSAĐOU DUROFLEX®

Duroflex existuje ve formě granulí o velikosti 3-4 mm, kvůli lepšímu zpracování, a do směsí se běžně přidává v množství 0,2-1,0 % hm. Název je vytvořen podle jeho schopností zlepšovat asfaltové směsi.[34] Jeho význam lze vidět na obr. 18.



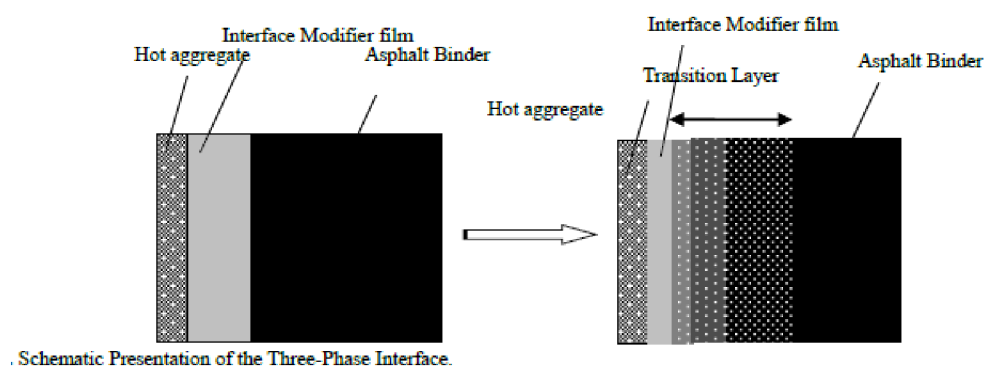
Obrázek 18 - Význam názvu přísady Duroflex®

Jedná se o přísadu na bázi recyklovaného materiálu. Hlavními složkami jsou polymery, jenž mají ve složení největší zastoupení ($\geq 80\%$), a celulózová vlákna. [35] V tomto vícesložkovém systému jsou navíc přidány inhibitory, které chrání směs před UV zářením a vzdušným kyslíkem. Takto složená přísada s obchodním názvem Duroflex® prokazatelně zlepšuje reologické vlastnosti asfaltových směsí. Přidáním Duroflexu dosáhneme zmenšení hloubky vyjetých kolejí (znatelný rozdíl lze vidět na obr. 19, kde vidíme vzorek bez Duroflexu, s 0,3 % a 0,8 % Duroflexem), zvýšení odolnosti vůči vzniku mrazových trhlin a zlepšíme také přilnavost pojiva ke kamenivu. [36]



Obrázek 19 - Výsledek po zkoušce opakovaného pojíždění kolem [36]

V roce 2012, Gui-lian Zou a Jiang-miao Yu zkoušeli Duroflexem modifikované asfaltové směsi. V jejich práci byla provedena zkouška opakovaného pojíždění kolem při 60 °C. Po 60 minutách naměřili na neupravené směsi hloubku koleje 6,288 mm a na modifikované směsi s Duroflexem v množství 0,8 % hm. hloubku 1,668 mm. Tento výsledek zkoušky poukazuje na výrazné zlepšení odolnosti směsi vůči tvorbě trvalých deformací. Dalším zjištěním bylo to, že vzniklo třífázové rozhraní viz obr. 20 (kamenivo – Duroflex – asfaltové pojivo). Rastrovým elektronovým mikroskopem (SEM) také naměřili, že na kamenivu je vrstva Duroflexu <math><4\mu\text{m}</math>. Část Duroflexu však nepřilnulo ke kamenivu, ale bylo rozptýleno v pojivu. Jedním z výsledků bylo také zlepšení elasticity asfaltového pojiva a menší zlepšení došlo také u nízkoteplotní odolnosti. [33]



Obrázek 20 - Schéma třífázového rozhraní [33]

Duroflex je vhodný jak při opravě netuhých vozovek, tak i při výstavbě nových komunikací. Jedním z hlavních pozitiv při využití této přísady je to, že není třeba žádné speciální technologie nebo zařízení. Duroflex se pouze přidá ke kamenivu před asfaltovým pojivem. Celý proces včetně teplot je doporučen výrobcem nebo

upraven dle aktuálních požadavků. Zejména se pak využívá na stavbě vozovek z asfaltových směsí s R-materiálem. Takové směsi lze zpracovat za horka nebo za studena. Obě varianty jsou při práci s Duroflexem vhodné, ale je preferována a výrobcem také doporučována první možnost, a to tedy zpracování asfaltové směsi za horka, jelikož taková směs má ve výsledku lepší vlastnosti. Při opravných pracích s R-materiálem musí být splněno několik podmínek. Je nutné vědět, kterých vrstev vozovky se oprava týká, jaké vlastnosti mají a následně se musí určit v jakém poměru se přidá R-materiál do nové asfaltové směsi a kolik Duroflexu bude třeba, aby nová směs měla stejné anebo lepší vlastnosti než ta původní. [37]

Vývoj této přísady stále pokračuje. Výrobce uvedl na trh další typy, jejichž zpracování má na životní prostředí menší dopad než jejich předchůdce. Došlo ke snížení emise CO₂ a emisí výparů a aerosolů z asfaltu. Je to díky tomu, že přísady lze zpracovat při nižších teplotách, a to buď při 140 °C nebo při 175 °C. Jedná se o Duroflex – Standard, Duroflex – Super a Duroflex – Super 140 neboli Duroflex – Eco, zobrazeno na obr. 21. Rozdíl mezi druhy nenajdeme pouze v teplotě zpracování, ale také v množství, jenž je ve směsi potřeba. V porovnání lze uvést příklad, kdy do upravované směsi je nutné přidat Duroflexu – Standard 0,6 % hm. a oproti tomu postačí Duroflexu – Super/Super 140 pouze 0,4 % hm., abychom získali stejné výsledky. [38]



Obrázek 21 - Granule Duroflex – Eco [35]

3. CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce bude porovnat vlastnosti dvou asfaltových směsí. Zadání vzniklo na základě požadavku firmy Skanska Asphalt s.r.o., která také dodala obě směsi. Konkrétně se bude jednat o směs modifikovanou přísadou na bázi recyklovaných plastů (přísada Duroflex Standard) a vlastnosti této směsi se porovnájí s vlastnostmi směsi bez této přísady. Veškeré zkoušky budou provedeny dle platných norem uvedených v části o použitých metodách níže v textu.

Postup práce bude následovný:

- Extrakce pojiv
- Znovuzískání pojiv
- Zkouška penetrace jehlou
- Stanovení bodu měknutí
- Zkoušky v dynamickém smykovém reometru
- Příprava a zhutnění desky z modifikované a nemodifikované směsi
- Zkouška pojíždění kolem
- Jednoosá zkouška tahem na připravených tělesech
- Vyhodnocení a srovnání naměřených hodnot

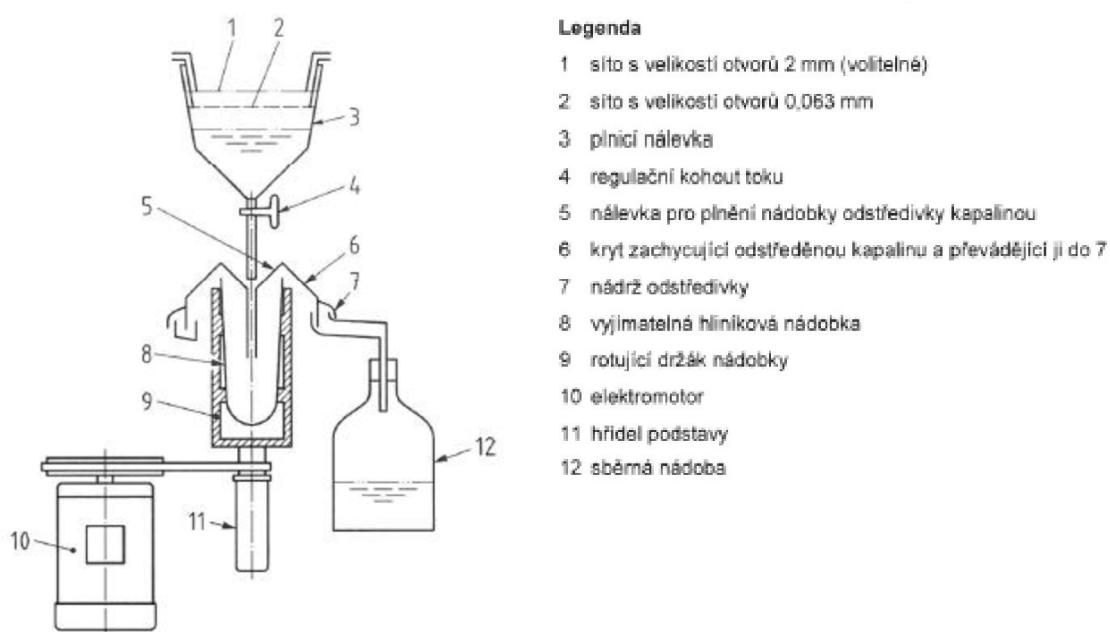
4. POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

V bakalářské práci budou provedeny na pojivech zkoušky konvenční, mezi které patří penetrace a bod měknutí, zkouška funkční za pomoci dynamického smykového reometru a na asfaltových směsích zkouška odolnosti vůči tvorbě mrazových trhlin a zkouška pojíždění kolem.

4.1. EXTRAKCE POJIVA

K provedení zkoušek je zapotřebí získat pojivo z dodaných směsí. Extrakce pojiva se řídí normou ČSN EN 12697-1: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 1: Obsah rozpustného pojiva.

K oddělení pojiva ze směsi se použije rozpouštědlo tetrachlorethylen neboli perchlorethylen. Toto rozpouštědlo se nalije v dostatečném množství do uzavíratelné nádoby s předem odváženou směsí a s občasným promícháním se nechá, dokud se pojivo nerozpustí.



Obrázek 22 - Schéma průtokové odstředivky na oddělení fileru [39]

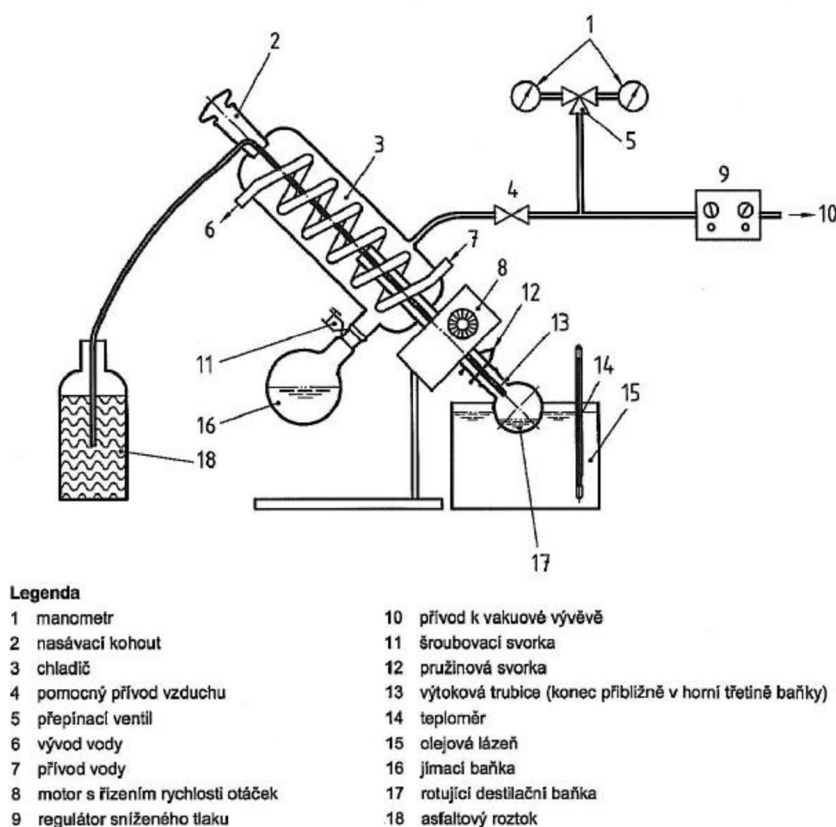
Následně se k oddělení kameniva obsah nádoby vylije přes síta s velikostí otvorů 2 mm a 0,063 mm do průtokové odstředivky, do které se předem připraví filtrační patrona. Popis laboratorní odstředivky lze vidět na obr. 22. Kamenivo se dále

promývá co nejmenším množstvím rozpouštědla až do doby, kdy je dekantované rozpouštědlo opět skoro bezbarvé. Odstředěný roztok umístíme do připravené nádoby a ten následně použijeme při znovuzískání extrahovaného pojiva. [39]

4.2. ZNOVUZÍSKÁNÍ POJIVA

Pro znovuzískání pojiva se využívá postup z normy ČSN EN 12697-3: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení.

Jako první se připraví vakuová rotační odparka (schématicky zobrazena na obr. 23) k destilaci předem připraveného roztoku (viz část 3.1).



Obrázek 23 - Schéma rotační vakuové odparky [40]

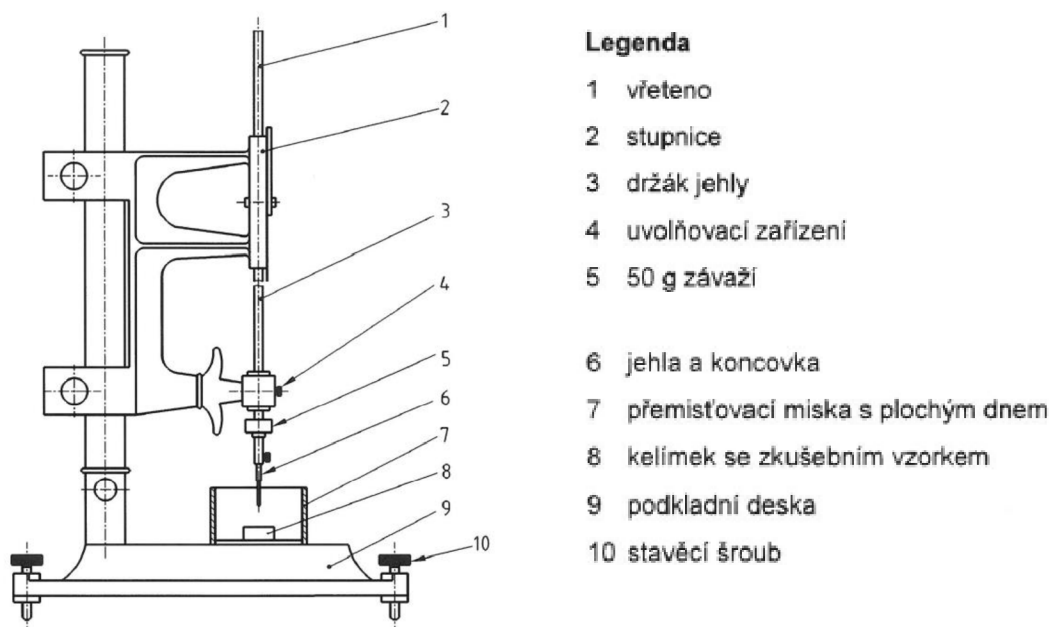
Za pomoci vazelíny se zajistí vzduchotěsnost veškerých zabroušených spojů. Destilační baňka bude rotovat rychlostí (75 ± 15) ot./min. v olejové lázni při teplotě (110 ± 5) °C a tlaku (40 ± 5) kPa. Teplota a tlak závisí na druhu rozpouštědla. Do destilační baňky takto připraveného přístroje se nasaje roztok, a to v maximálním množství 400 ml. V průběhu se dle potřeby vyprázdní jímací baňka.

Po přidání veškerého roztoku se pokračuje v odpařování rozpouštědla do doby, kdy se v pojivu přestanou tvořit bubliny. Nakonec se teplota zvýší na $(160 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a tlak sníží na $(2 \pm 0,5) \text{ kPa}$. Když se i po 10 minutách budou stále vytvářet bubliny, bude zapotřebí zvýšit teplotu na $(180 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Pokud se v destilační baňce během následujících deseti minut neobjeví další probublávání, je proces znovuzískání pojiva hotov. Destilace by neměla trvat déle než 2 hodiny. A abychom zabránili možnému výraznému ztvrdnutí pojiva díky rozpouštědлу, je nutné extrakci a znovuzískání pojiva provést během 24 hodin. [40]

4.3. PENETRACE JEHLOU

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 1426: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou.

V této zkoušce je konzistence vzorku pojiva vyjádřena v penetračních jednotkách, tedy jako hloubka proniknutí jehly v desetínách milimetrů. K provedení je potřeba zajistit podmínky měření: teplota $25 ^\circ\text{C}$, aplikované zatížení 100 g po dobu 5 s – to je zajištěno v penetrometru znázorněném na obrázku 24.



Legenda

- 1 vřeteno
- 2 stupnice
- 3 držák jehly
- 4 uvolňovací zařízení
- 5 50 g závaží
- 6 jehla a koncovka
- 7 přemísťovací miska s plochým dnem
- 8 kelímek se zkušebním vzorkem
- 9 podkladní deska
- 10 stavěcí šroub

Obrázek 24 - Příklad penetrometru [41]

Vzorek pojiva připravíme do čistého kelímku na analytické vzorky, a to v takovém množství, aby výška hladiny byla alespoň o 10 mm větší, než je předpokládaná hloubka vniknutí jehly. Vzorek se nechá chladit na teplotu mezi 15 °C až 30 °C. Před měřením se vzorek nechá alespoň 60 minut temperovat v lázni s řízenou konstantní teplotou 25 °C. Kelímek se po temperování umístí do přenosné misky s vodou z lázně tak, aby byl kelímek úplně ponořen. Přenosná miska se položí na podstavec připraveného penetrometru.

Platné stanovení se provede do místa minimálně 10 mm od stran kelímku a minimálně 10 mm od předešlých stanovení. Jehla se sníží k povrchu vzorku tak, že se dotýká svého odraženého obrazu, tato pozice se určí jako nulová. Poté se uvolní jehla přitížená aplikovaným zatížením 100 g, aby vnikala do vzorku po dobu 5 s. Následně se na stupnici odečte hodnota penetrace. Provedou se minimálně tři platná stanovení třemi různými jehlami. Maximální rozdíl mezi extrémními hodnotami musí být maximálně 2 penetrační jednotky u penetrací do 49 penetračních jednotek. Výsledek se vyjádří jako aritmetický průměr v penetračních jednotkách zaokrouhlený na nejbližší celé číslo. [41]



Obrázek 26 - Příklad ke stanovení penetrace jehlou

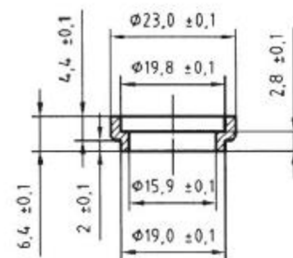
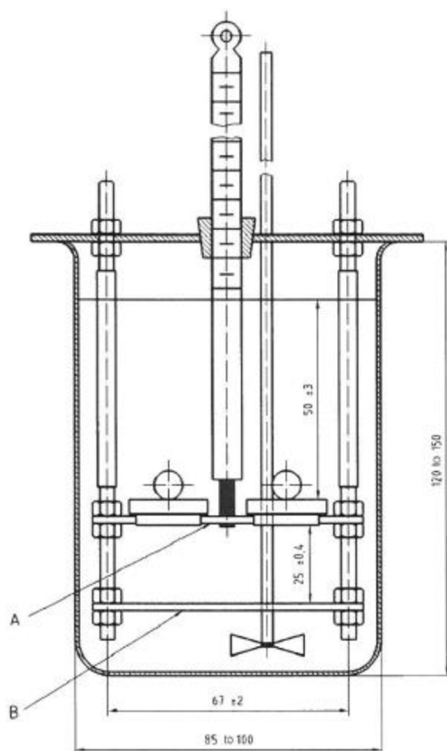


Obrázek 25 - Zkušební kelímky s pojivem

4.4. BOD MĚKNUTÍ (KROUŽEK A KULIČKA)

Zkouška se provede dle normy ČSN EN 1427: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička. Touto zkouškou se stanoví horní hranice oboru plasticity.

Jako první se připraví dva kroužky, které umístíme na odlévací destičku a naplníme zahřátým pojivem, které po vychladnutí začistíme tak, aby povrch vzorku byl zarovnaný s vrchní hranou kroužků. Rozměry kroužků dány normou jsou zobrazeny na obr. 28.



Obrázek 28 - Rozměry kroužku [42]

◀ Obrázek 27 - Sestava dvou kroužků s držákem kroužků (A) a základní deskou (B) [42]

Připravené vzorky vložíme do sestavy se středícím zařízením pro kuličky. Základní sestava je zobrazena na obr. 27. Kádinka se naplní odvzdušněnou studenou vodou. Hladina lázně by měla být ve výšce (50 ± 3) mm nad horním okrajem kroužků. Poté celou sestavu zchladíme na (5 ± 1) °C, pakliže by se jednalo o glycerínovou lázeň, sestavu bychom zahřáli na teplotu okolo 30 °C. Pomocí chemických kleští se vloží kuličky do středícího zařízení a při tom musí být zajištěno, aby kuličky měly stejnou počáteční teplotu jako celá sestava. Kuličky jsou z korozi vzdorné oceli s průměrem $(9,50 \pm 0,05)$ mm a hmotnosti $(3,50 \pm 0,05)$ g.

Takto připravenou soustavu umístíme co nejrychleji do zkušebního přístroje. Voda v lázni se zahřívá rychlostí 5 °C/min a je zároveň míchána zespodu. V průběhu, kdy teplota lázně roste, pojivo měkne a kulička v asfaltu začne klesat. Jakmile se kulička obalená asfaltem dotkne základní desky nebo v automatickém přístroji paprsku světla, je potřeba zaznamenat aktuální teplotu lázně. Tato hodnota je hodnotou bodu měknutí. Rozdíl hodnot mezi pravou a levou kuličkou nesmí být větší než 1 °C, pokud se jedná o bod měknutí pod 80 °C (u modifikovaných asfaltů nesmí být rozdíl větší než 2 °C). Když tato podmínka nebude splněna, je zapotřebí zkoušku provést znovu. [42]



Obrázek 29 - Zkušební zařízení ke zkoušce bodu měknutí

4.5. DYNAMICKÝ SMYKOVÝ REOMETR

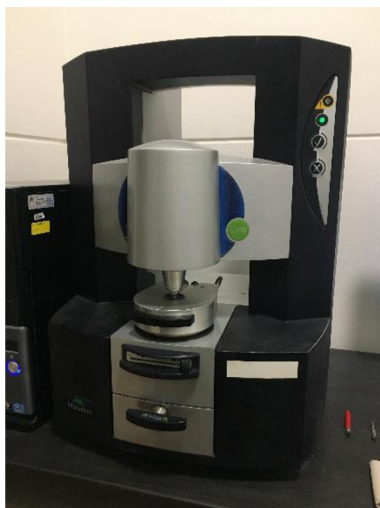
Dynamický smykový reometr neboli DSR je přístroj, jímž se měří komplexní modul ve smyku (G^*) a fázový úhel posunu (δ) zkoušeného asfaltového pojiva. Zkouška se řídí normou ČSN EN 14770.

Podstata metody je vysvětlena takto: „Na temperovanou zkušební soustavu, v níž je zkušební vzorek asfaltu, se aplikuje oscilující smykové napětí dané velikosti. Měří se odezva deformace pojiva na působící napětí. Alternativně se nechá působit na zkušební vzorek dané smykové napětí a měří se vzniklá smyková deformace.

S výjimkou specifických účelů se zkouška provádí v oblasti viskoelastického chování.“ [43]

Ke zkoušce se připraví pár vzorků vlitím do formy nebo vytvořením plátků z nahřátého pojiva, u něž musí být zajištěna homogenita, ta především u modifikovaných pojiv. Počet vzorků je roven přibližně 1,5násobku množství potřebného ke zkoušení. Před odebráním vzorků z formy a jejich odzkoušení je dána minimální doba prodlení pro nemodifikované asfalty 2 hodiny, 12 hodin pro polymerem modifikované asfalty a maximální doba prodlení je pak 3 dny pro veškerá pojiva.

Jako první se nastaví dynamický smykový reometr, dle konkrétního návodu pro jednotlivé přístroje. Obecně se nahřejí destičky reometru, vloží se vzorek, upraví se na nastavenou mezeru plus 0,025-0,050 mm a udrží se minimálně 5 minut na teplotě přilnutí. Přebytek pojiva se opatrně odstraní stěrkou či ořezávacím nástrojem. Po tomto se nastaví opět zadaná mezera s odchylkou $\pm 0,01$ mm. Zkontroluje se, zda pojivo pokrývá celou plochu destiček a může se začít se zadanou zkouškou. Tento postup přípravy do počátku zkoušky by měl trvat max. 10 minut.



Obrázek 30 - Dynamický smykový reometr



Obrázek 31 - Zkušební vzorky v silikonové formě

Zkouška začíná od nejnižší frekvence oscilace a pokračuje po nejvyšší, to vše za určité teploty. Po první zkoušce při dané teplotě se pokračuje na další zkušební

teplotu rychlostí maximálně 5 °C/min. Zkouška končí v momentu, kdy se naměří komplexní modul ve smyku, jenž je mimo rozsah zvolené zkušební geometrie soupravy nebo je dosaženo meze poddajnosti přístroje, v takovém případě je zkouška pouze pozastavena a je nutná nová zkušební geometrie soupravy. Abychom eliminovali změny ve vlastnostech pojiva, je nutné omezit dobu zkoušky na maximálně 6 hodin. Výsledky jsou vyhodnoceny nejčastěji v podobě grafů. [43]

4.6. ZKOUŠKA MSCR

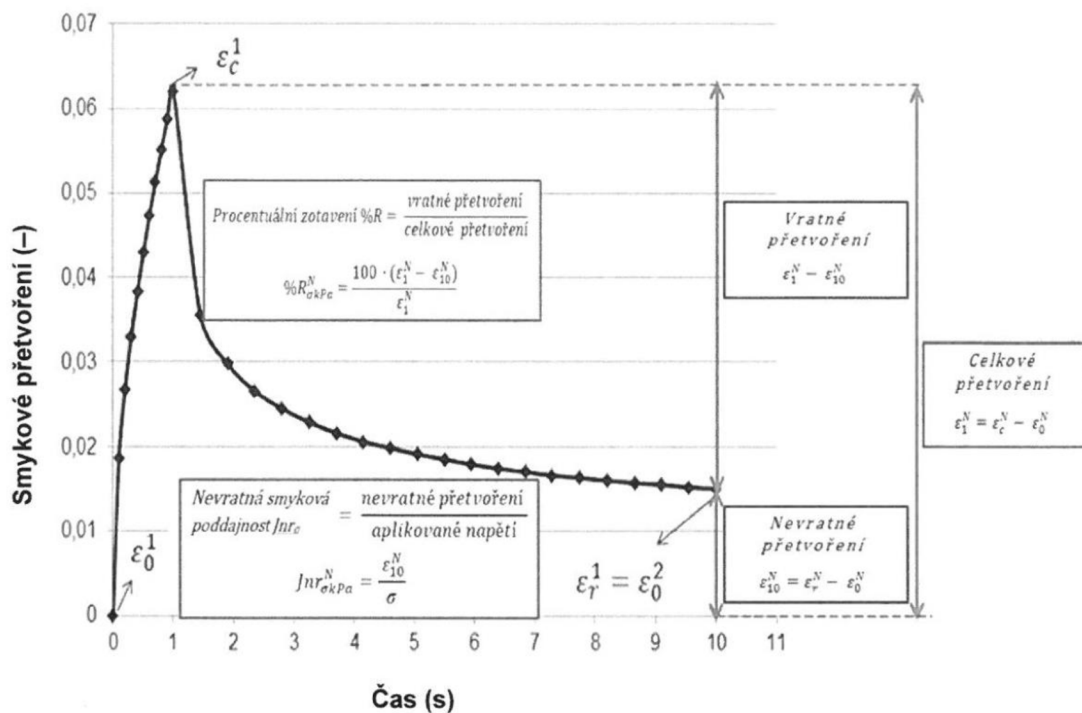
Multiple Stress Creep and Recovery Test, zkráceně zkouška MSCR, je zkušební metoda prováděna na asfaltech nebo asfaltovém pojivu podle ČSN EN 16659, kdy výsledkem této zkoušky je stanovení jejich procentuálního zotavení a nevratné smykové poddajnosti.

Základem této zkoušky je měření smykového dotvarování v oblasti pomalého toku při dané teplotě. Toto měření probíhá v dynamickém smykovém reometru. Na vzorku se stanovuje přítomnost elastické odezvy a její napěťová závislost při opakovaném zatížení vzorku různým smykovým napětím, čemuž odpovídá veličina procentuální zotavení asfaltových pojiv. Druhá veličina, nevratná smyková poddajnost, je ukazatelem citlivosti a napěťové závislosti asfaltových pojiv proti tvorbě trvalých plastických deformací.

Před samotným měřením je zapotřebí si vytvořit zkušební vzorky odlitím zahřátého asfaltového pojiva (teplota je dána bodem měknutí ± 5 °C, maximálně však 180 °C, a u polymerem modifikovaných pojiv v rozmezí 180 až 200 °C) do odlévací formy ze silikonu nebo jiného materiálu, jenž je nepřilnavý ke vzorku. Je zakázáno používat mazadla nebo separační produkty, a to z toho důvodu, že mohou ovlivnit přilnavost vzorku k destičkám měřící geometrie. Dalším krokem je nastavení a příprava reometru. Přístroj by měl být kalibrován v pravidelných intervalech, to také platí pro systém regulující teplotu. Při zkoušce MSCR se používá 25 mm měřící geometrie typu deska – deska a mezera je nastavena na 1 mm. Destičky je zapotřebí před vložením vzorku opatrně očistit rozpouštědlem a měkkou utěrkou tak, aby nedošlo k poškození jejich ploch. Dbá se také na to, aby se

při manipulaci neohnula hřídel horní destičky. Měřicí destičky se předeheřejí na zkušební teplotu, nastaví se nulová mezera a do takto připraveného reometru se vloží vzorek. Mezera se následně upraví na výšku 1,025 mm – 1,050 mm, odstraní se přebytečné pojivo a destičky se posunou tak, aby mezera byla 1 mm ($\pm 0,01$ mm). Vzorek už není zapotřebí nijak upravovat, pokud však nepokrývá celou plochu měřicí destičky, je nutné celý proces přípravy zopakovat s novým vzorkem. Proces od vložení vzorku do reometru po spuštění měření by neměl trvat déle než 10 minut.

Po zahájení měření se měřicí destičky zahřejí na zkušební teplotu ($\pm 0,1$ °C) a vzorek se v nich ponechá minimálně 15 minut, aby v něm došlo k teplotní rovnováze. Hodnota přetvoření musí být nastavena na nulovou hodnotu. Vzorek se následně začne zatěžovat v různých cyklech. V prvním cyklu se vzorek zatěžuje konstantním smykovým napětím 0,100 kPa, tato fáze dotvarování trvá 1,00 sekundu. Poté dojde k fázi zotavení při nulovém smykovém zatížení, a to po dobu 9,00 sekund.



Obrázek 32 - Příklad jednoho cyklu dotvarování a zotavení [44]

Celkově se měří 10 cyklů dotvarování a zotavení při zatížení 0,100 kPa a poté se bez přerušení pokračuje dalšími 10 cykly, ale se smykovým napětím 3,200 kPa. Jeden vzorek lze použít pouze jednou k naměření těchto 20 cyklů. Přístroj by měl

zaznamenávat hodnotu napětí a přetvoření ve fázi dotvarování každou 0,1 sekundy a ve fázi zotavení přinejmenším každou 0,45 sekundy zkušebního cyklu. Příklad by měl být také schopný zaznamenat hodnoty v čase 1,00 ($\pm 0,05$) sekund a 10,00 ($\pm 0,05$) sekund. Pokud však toho není schopný a software přístroje není aktualizován výrobcem, zkouška se stává neplatnou.

Výsledky procentuálního zotavení a nevratné smykové poddajnosti se vyjádří dle rovnic uvedených v normě v kapitole Vyjádření výsledků. [44]

4.7. HUTNĚNÍ DESEK

Při výrobě desky z asfaltové směsi dochází k jejímu zhutnění pomocí lamelového zhutňovače desek dle normy ČSN EN 12697-33+A1.

Připravená asfaltová směs se hutní pomocí válce pojíždějícího po sestavě ocelových lamel, které jsou postupně zatlačovány do směsi. Tato metoda, kdy se využívá lamelový zhutňovač, je vhodná pouze tehdy, kdy je stanovená objemová hmotnost nebo mezerovitost zkušebního tělesa.

Před samotným hutněním se připraví navážka o hmotnosti takové, aby deska daných rozměrů měla požadovanou objemovou hmotnost a mezerovitost. Tato hmotnost navážky se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$M = 10^{-6} \times L \times l \times e \times \rho_m \times \left(\frac{100 - v}{100} \right),$$

kde M je hmotnost navážky v kg, L je vnitřní délka formy v mm, l je vnitřní šířka formy v mm, e je konečná tloušťka desky v mm, ρ_m je maximální objemová hmotnost asfaltové směsi v kg.m^{-3} a v je mezerovitost směsi v desce v %. Odvážená navážka asfaltové směsi ($M \pm 0,1 \%$) se ohřeje na teplotu hutnění odpovídající teplotám daným v normě EN 12697-35:2004+A1. Před vložením směsi do formy, je zapotřebí formu řádně upnout a potřít mazadlem nebo jiným separačním prostředkem, aby z ní bylo na konci možné zhutněnou desku vyjmout.

Do připravené formy se vsype zahřátá asfaltová směs a rovnoměrně se rozprostře tak, aby nedošlo k její segragaci a povrch byl co nejrovnější. Také je důležité věnovat pozornost rohům formy, kde je nutné směs upěchovat a zabránit

se tak vzniku dutin. Do formy se poté vloží krycí plech a také hutnicí lamely, ty se umísťují ve svislé poloze. Nakonec se pustí válec, který pojíždí po lamelách konstantní silou $F (\pm 20 \%)$ do té doby, dokud válec nedosedne na hranu formy, což odpovídá maximálnímu svislému posunu válce vůči stolu. Zhutněná zkušební deska se nechá vychladnout na laboratorní teplotu a následně se vyjme z formy. [45]

4.8. POJÍŽDĚNÍ KOLEM

Při zkoušce pojíždění kolem se měří míra trvalé deformace na vzorku asfaltové směsi od účinků zatížení při stálé teplotě. Průběh zkoušky se řídí normou ČSN EN 12697-22+A1.

V této zkušební metodě se používá speciální zařízení, které simuluje pojíždění kolem na asfaltové směsi s maximální velikostí zrna menší než 32 mm. Délka či doba pojezdu, rozměry zkušební těles a velikost zatížení se liší v závislosti na tom, jaké zkušební zařízení je použito. V normě jsou uvedeny tři typy – velká, extra velká a malá zkušební zařízení.

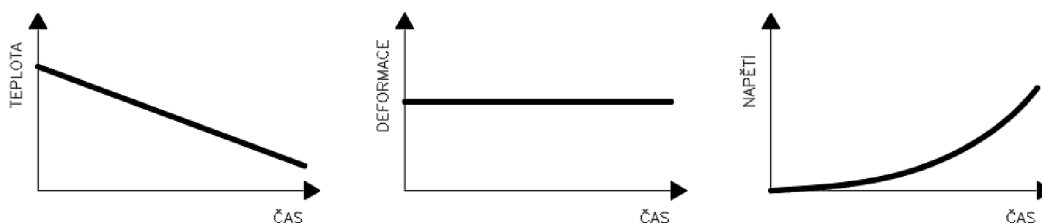
Pro měření lze použít vzorky směsi vyrobené v laboratoři dle bodu 4.7, zhutněním zkušební desky, nebo vzorky odebrané vývrtem z vozovky. V této práci bude využito malé zkušební zařízení s temperováním vzorku na vzduchu. Zkušební tělesa se upnou do forem předem natřených nepřilnavým prostředkem, aby se zabránilo přilnutí tělesa k formě. Poté jsou tělesa temperována na zkušební teplotu na vzduchu, a to nejméně po dobu 4 hodin při jmenovité tloušťce zkušebního tělesa menší nebo rovno 60 mm (při jmenovité tloušťce tělesa větší než 60 mm je to minimálně 6 hodin) a maximálně 24 hodin. Toto temperování probíhá zároveň i na samotném zařízení, aby na počátku měření mělo stejnou teplotu jako zkušební tělesa. Následně se formy po temperování vloží do zařízení a zahájí se měření, které je zcela automatické a trvá po dobu 10 000 cyklů, kdy jeden cyklus je roven pojezdu kola tam a zpět, anebo do dosažení hloubky koleje 20 mm. To záleží na tom, co nastane dříve. V průběhu celého měření se zaznamenává hloubka vyjeté koleje a teplota. [46]

Výsledky zkoušky jsou vyhodnoceny graficky, kde se zobrazí závislost hloubky vyjeté koleje na počtu zatěžovacích cyklů.

4.9. NÍZKOTEPLTNÍ VLASTNOSTI – JEDNOOSÁ ZKOUŠKA TAHEM

Norma ČSN EN 12697-46 se zabývá jednoosou zkouškou tahem, ze které lze určit odolnost asfaltové směsi proti tvorbě trhlin při nízkých teplotách. Z této zkoušky lze vyhodnotit například pevnost v tahu, odolnost vůči únavě při nízkých teplotách vlivem kombinace kryogenního a mechanického zatížení anebo doba relaxace.

V této normě nalezneme také postup pro zkoušku nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty neboli TSRST. Při této zkoušce je těleso ve zkušebním zařízení vystaveno nízké teplotě, která postupně klesá konstantní rychlostí. Se snižující se teplotou roste hodnota teplotního smrštění tělesa a při tom se zároveň udržuje jeho konstantní délka, to v něm způsobuje vznik kryogenního (tahového) napětí. Tento děj je znázorněn na obrázku 26. Napětí nepřetržitě roste až do bodu, kdy dojde k porušení tělesa.



Obrázek 33 - Grafické zobrazení teploty, deformace a napětí během TSRST


Před zahájením zkoušky je zapotřebí připravit zkušební tělesa. Jedná se o hranoly nebo válce s jmenovitými rozměry podle tabulky uvedené v normě. Tato tělesa lze získat nařezáním desek vyrobených obdobně jako v bodu 4.7 této práce nebo odebráním vzorků z vozovky. Připravené zkušební těleso se přilepí ke dvěma čelistem, jenž umožňují těleso upnout do zkušebního zařízení. Tělesa je nutné mít vycentrovaná, a to použitím centrovacího rámu. Poté co je zkušební těleso pevně spojeno s čelistmi, je možné jej upevnit v zařízení a zahájit měření. Normou je doporučeno zahájit zkoušku při teplotě 20 °C a teplotu poté snižovat rychlostí 10 °C za hodinu. V průběhu zkoušky se zaznamenává nárůst napětí pomocí připevněných tenzometrů a teplota tělesa. Výsledkem je zaznamenané

časově závislé kryogenní napětí $\sigma_{cry}(T)$ a napětí $\sigma_{cry, failure}$ při teplotě $T_{failure}$, kdy dojde k porušení tělesa. [47]

5. POUŽITÉ MATERIÁLY

Obě asfaltové směsi, na kterých byly v této bakalářské práci prováděny zkoušky, byly dodány firmou Skanska Asphalt s.r.o. Jedná se konkrétně o asfaltovou směs modifikovanou přísadou DUROFLEX Standard a o totožnou směs bez této přísady.


5.1. NEMODIFIKOVANÁ ASFALTOVÁ SMĚS

Asfaltová směs bez modifikační přísady byla použita jako srovnávací směs. Jedná se konkrétně o ACO11+ 50/70. Bližší specifikace směsi o zrnitosti kameniva a obsahu pojiva byla zajištěna také firmou Skanska Asphalt s.r.o., tento dokument je součástí této práce jako Příloha č.1. Shrnutí tohoto dokumentu je zpracováno níže v tabulce 1. Tato asfaltová směs bude dále zobrazena v grafech a tabulkách pomocí žluté barvy .

Obsah pojiva v % hm. směsi předepsáno (5,9 ± 0,5) %	5,92 %
Objemová hmotnost ztuhlé směsi	2 352 kg/m ³
Max. objemová hmotnost	2 456 kg/m ³
Mezerovitost	4,2 obj. %

Tabulka 1 – Výsledky z protokolu kontrolní zkoušky ACO11+ 50/70

5.2. MODIFIKOVANÁ ASFALTOVÁ SMĚS

Asfaltová směs ACO11+ 50/70 byla modifikována přísadou Duroflex-Standard a stejně jako ke směsi nemodifikované byl vypracován protokol uveden jako Příloha č.2. Výsledky z protokolu jsou zobrazeny v tabulce 2. V této bakalářské práci bude modifikovaná asfaltová směs zobrazena v grafech a tabulkách pomocí zelené barvy .

Obsah pojiva v % hm. směsi předepsáno (5,9 ± 0,5) %	5,84 %
Objemová hmotnost zhutněné směsi	2 349 kg/m ³
Max. objemová hmotnost	2 455 kg/m ³
Mezerovitost	4,3 obj. %

Tabulka 2 – Výsledky z protokolu kontrolní zkoušky ACO11+ 50/70 s Duroflex-Standard

6. VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Zkoušky na asfaltovém pojivu a asfaltové směsi byly postupně realizované v období od listopadu 2019 do začátku února 2020 v laboratoři Ústavu pozemních komunikací v prostorách Stavební fakulty Vysokého učení technického v Brně. Jednotlivé zkoušky byly provedeny dle postupu uvedeného v normě pro konkrétní zkušební metodu, viz bod 4. Použité zkušební metody.

6.1. PENETRACE JEHLOU

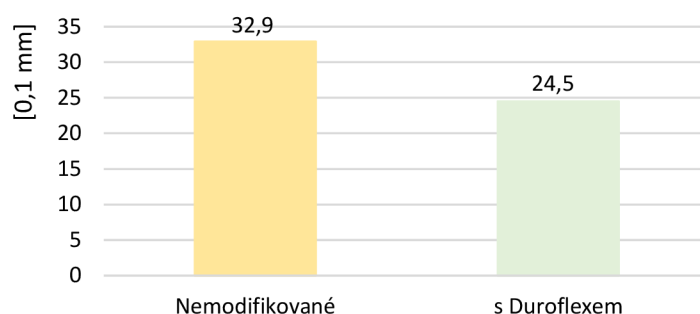
Zkouška byla provedena na zkušebních vzorcích dvou asfaltových pojev dle bodu 4.3. Tato pojiva byla znovuzískána z dodaných asfaltových směsí postupem popsaným v bodě 4.1 a 4.2 této práce. Výsledky jsou zapsány v tabulce 3 a průměrné hodnoty jsou také zobrazeny v grafu 1.

n	Penetrace [0,1 mm]	
	Nemodifikované pojivo	S přísadou - Duroflex®
1	33,8	25,2
2	32,1	24,0
3	32,9	24,2
\bar{x}	32,9	24,5

Tabulka 3 - Výsledky zkoušky penetrace jehlou

Z výsledků měření lze vidět, že pojivo ze směsi modifikované Duroflexem je tvrdší než pojivo bez této přísady. Rozdíl průměrných hodnot je 8,4 penetračních

jednotek. Zkouška byla stanovena na tři platná stanovení pro každý vzorek a maximální rozdíl těchto stanovení nepřekročil hodnotu 2 penetračních jednotek.



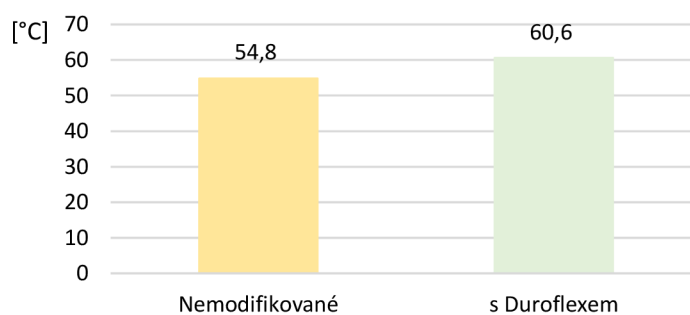
Graf 1 - Srovnání výsledků penetrace jehlou

6.2. STANOVENÍ BODU MĚKNUTÍ (KROUŽEK A KULIČKA)

Zkušební metoda ke stanovení bodu měknutí byla provedena dle platné normy a byla stručně popsána v bodu 4.4. Zkouška byla provedena v automatickém přístroji určeném pro stanovení bodu měknutí. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 4 a pro srovnání jsou průměrné hodnoty zobrazeny v grafu 2.

K&K	Bod měknutí [°C]	
	Nemodifikované pojivo	S přísadou - Duroflex®
Levá	54,8	60,6
pravá	54,8	60,7
\bar{x}	54,8	60,6

Tabulka 4 - Výsledky zkoušky Kroužek a kulička



Graf 2 - Srovnání bodů měknutí obou směsí

Při porovnání obou výsledků lze tvrdit, že pojivo z modifikované směsi je odolnější vůči vzniku trvalých deformací než pojivo získané ze směsi bez této úpravy. Rozdíl bodů měknutí mezi zkoušenými pojivy je 5,8 °C. Naměřené hodnoty u levého a u pravého propadu kuličky nebyly větší, než je dáno normou. Měření bylo tedy platné a nebylo potřeba jej opakovat.



Obrázek 34 - Propad kuličky kroužkem



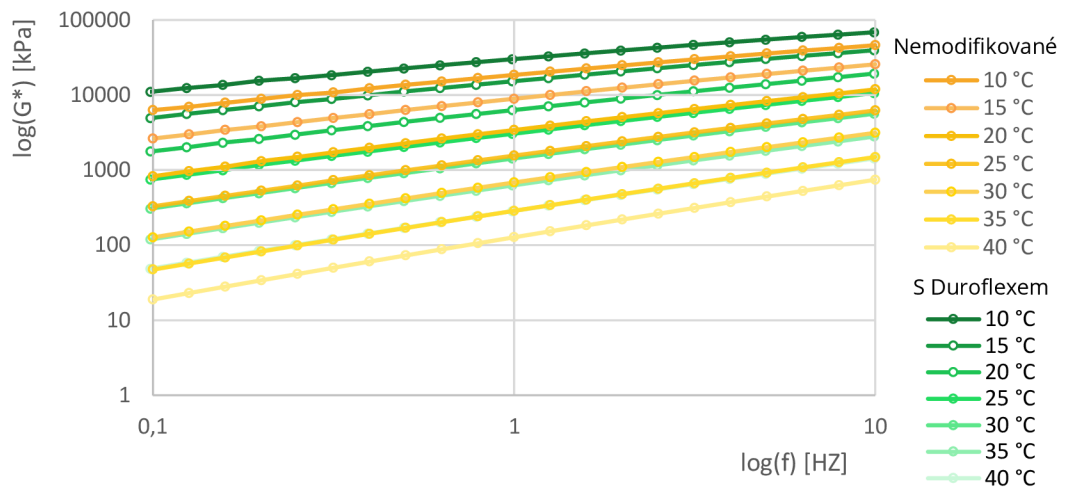
Obrázek 35 - Připravené kroužky s pojivem

6.3. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ Z DYNAMICKÉHO SMYKOVÉHO REOMETRU

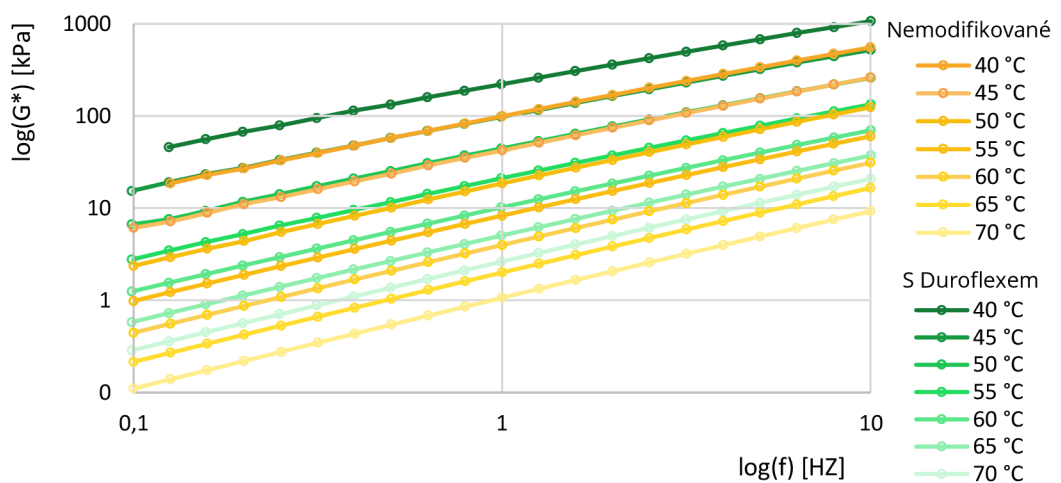
V dynamickém smykovém reometru se měřili vzorky s 8 mm a 25 mm geometrií. Postup byl popsán výše v bodě 4.5. a pracovalo se se stejnými pojivy jako u penetrace jehlou či stanovení bodu měknutí.

Při přípravě přístroje je třeba postupovat dle návodu pro konkrétní měřicí přístroj. V této zkoušce se měřilo na přístroji od firmy Malvern Instruments Limited. Před vložením vzorku bylo zapotřebí nahřát destičky reometru a nastavit nulovou mezeru, aby bylo měření co nejpřesnější. U 25 mm geometrie se měřilo při teplotě od 40 °C do 70 °C s krokem 5 °C. Co se týče zkoušky s 8 mm geometrií, měření probíhalo v rozmezí teplot 10 °C až 40 °C se stejným krokem. Frekvence zatěžování byla u všech měření stejná, a to 0,1 Hz až 10 Hz v rámci lineárně viskoelastické oblasti. Celkově proběhly čtyři zkoušky, konkrétně jedna zkouška s 8 mm geometrií a jedna zkouška s 25 mm geometrií na nemodifikovaném pojivu a obdobně na pojivu s Duroflexem. Z naměřených hodnot byly poté vypracovány následující grafy 3 až 11.

V grafech 3 a 4 je zobrazena závislost komplexního modulu ve smyku na frekvenci zatěžování. Při tomto zobrazení lze vidět, že pojivo s Duroflexem má oproti nemodifikovanému pojivu vyšší komplexní modul ve smyku v průběhu celé zkoušky.



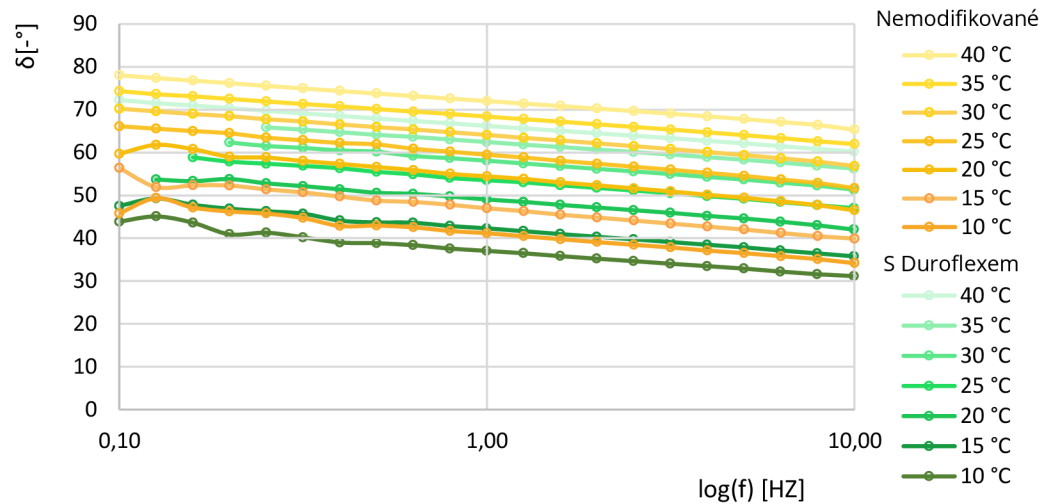
Graf 3 – Závislost komplexního modulu ve smyku na frekvenci (vzorek o průměru 8 mm)



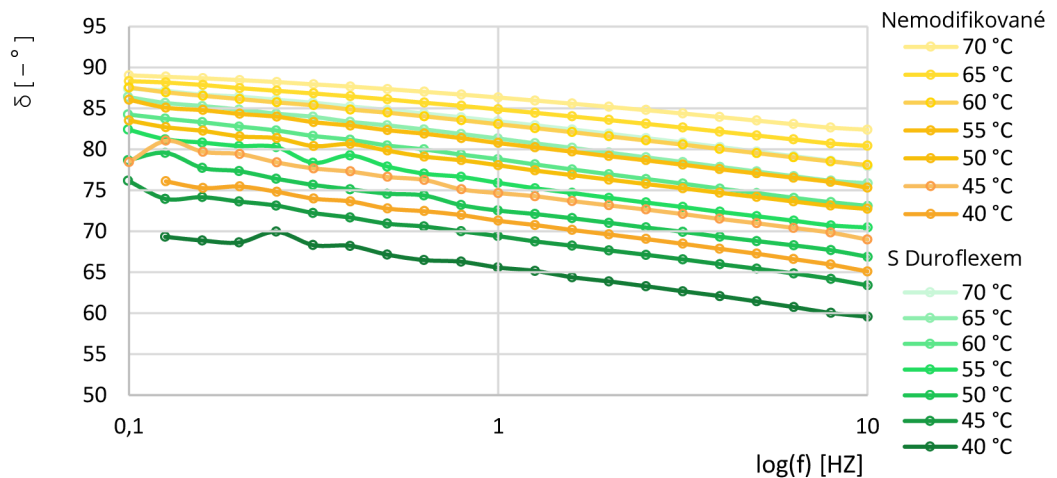
Graf 4 – Závislost komplexního modulu ve smyku na frekvenci (vzorek o průměru 25 mm)

Následující grafy 5 a 6 zobrazují závislost úhlu fázového posunu na frekvenci zatěžování. V tomto případě je úhel fázového posunu u pojiva s Duroflexem nižší než u nemodifikovaného pojiva.

Z těchto výsledků, hodnot komplexního modulu ve smyku (G^*) a úhlu fázového posunu (δ), lze říci, že pojivo získané ze směsi s Duroflexem je celkově tužší než pojivo získané ze srovnávací směsi bez přísad.



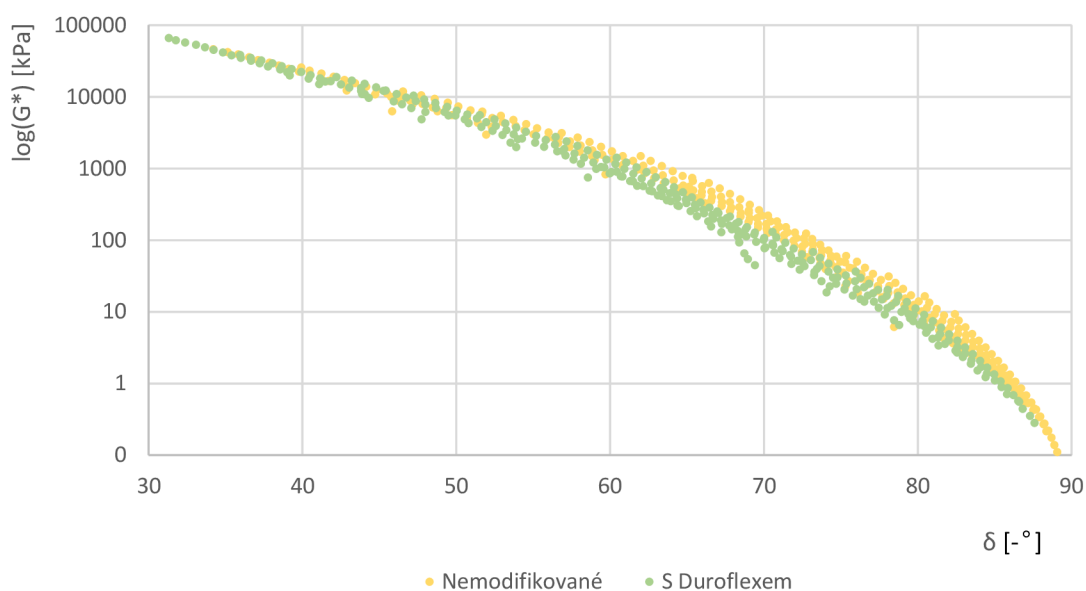
Graf 5 – Závislost úhlu fázového posunu na frekvenci (vzorek průměru 8 mm)



Graf 6 – Závislost úhlu fázového posunu na frekvenci (vzorek průměru 25 mm)

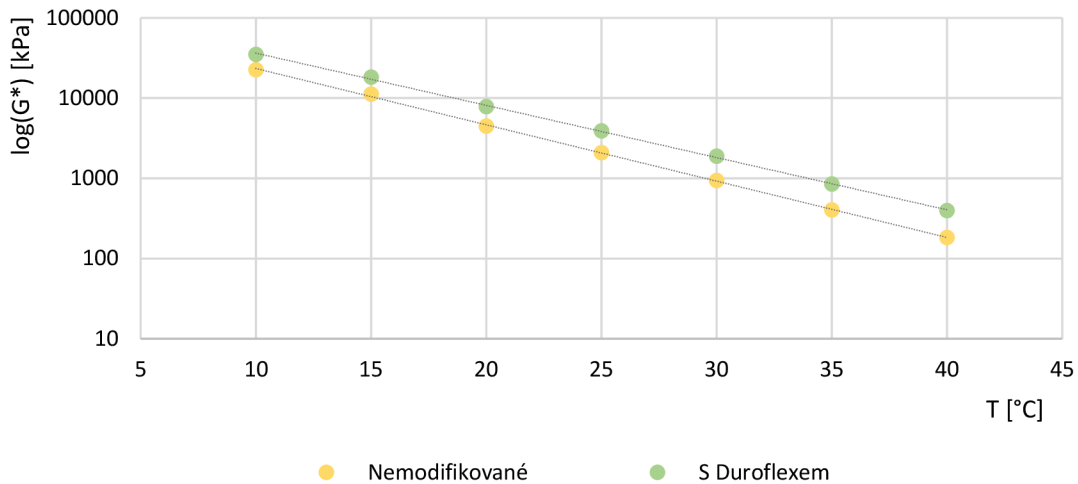
Dalším způsobem zobrazení výsledků z dynamického smykového reometru je prostřednictvím Blackova diagramu v grafu 7. Tento Blackův diagram vyjadřuje závislost komplexního modulu ve smyku na fázovém úhlu posunu. Přestože tvar vytvořeného zakřiveného obrazce se mezi pojivy výrazně neliší, pojivo s Duroflexem má při stejné hodnotě komplexního modulu ve smyku nižší hodnotu úhlu fázového posunu, zejména tedy v oblasti menších hodnot G^* . Z toho vyplývá, že toto pojivo je

pružnější než pojivo z nemodifikované směsi. Hodnoty v grafu jsou spojeny z výsledků měření s 8 mm geometrií a 25 mm geometrií. Z tvaru Blackova diagramu pojiva obsahujícího přísadu Duroflex je možné odhadovat, že toto pojivo se svým chováním podobá nemodifikovanému asfaltovému pojivu, protože Blackův diagram dosahuje hladkého obloukového tvaru bez známek zvlnění, které je zpravidla zapříčiněno přítomností modifikační přísady. Z toho je možné usuzovat, že přísada Duroflex má spíše „ztvrzující“ účinek než účinek modifikační. Tento výsledek může být ovšem ovlivněn přípravou pojiva, resp., jeho znovuzískáním z asfaltové směsi, přičemž mohlo dojít k ovlivnění jeho vlastností rozpouštědlem, případně mohla část pojiva zůstat v kamenivu (stejně jako je tomu například v případě pryžových částic obsažených v asfaltech modifikovaných pryžovými granulátem).

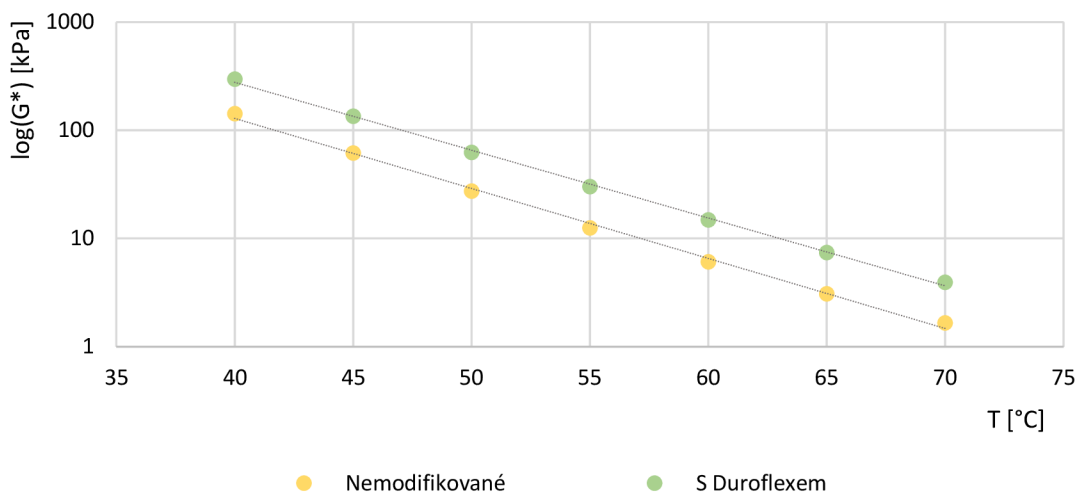


Graf 7 – Blackův diagram

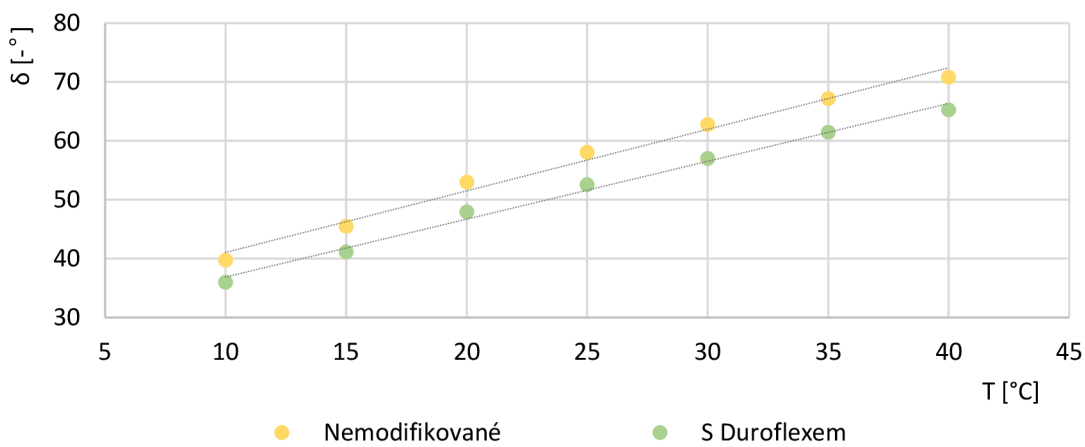
Jako poslední vyjádření výsledků z DSR je v grafech 8 až 11. V těchto grafech jsou zpracovány hodnoty komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu v závislosti na teplotě, a to pouze při frekvenci zatížení 1,59 Hz. V těchto grafech je možné vidět, že s rostoucí zkušební teplotou klesá hodnota komplexního smykového modulu téměř lineárně (při logaritmickém zobrazení osy komplexního modulu ve smyku) a naopak úhel fázového posunu klesá. Tento děj je u obou zkoušených pojiv podobný.



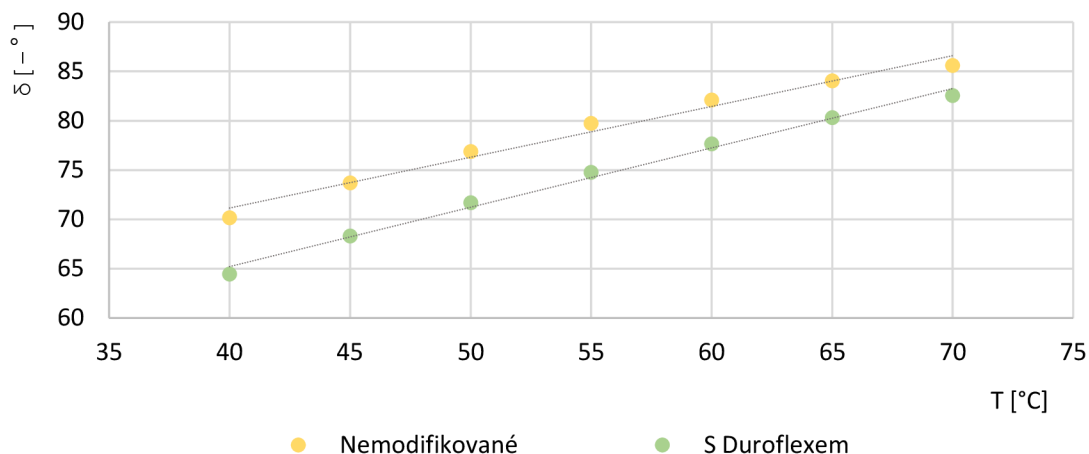
Graf 8 – Závislost G^* na teplotě při frekvenci $f = 1,59$ Hz (vzorek 8 mm)



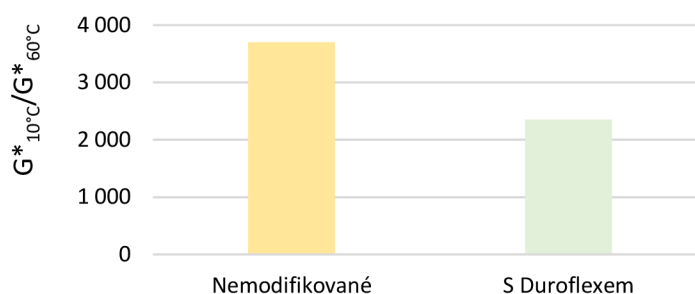
Graf 9 – Závislost G^* na teplotě při frekvenci $f = 1,59$ Hz (vzorek 25 mm)



Graf 10 – Závislost δ na teplotě při frekvenci $f = 1,59$ Hz (vzorek 8 mm)



Graf 11 – Závislost δ na teplotě při frekvenci $f = 1,59$ Hz (vzorek 25 mm)



Graf 12 – Teplotní citlivost pojiva ($f=1,59$ Hz)

V grafu 12 je zobrazen rozdíl v teplotní citlivosti mezi pojivy. Teplotní citlivost byla vypočtena jako podíl komplexních modulů ve smyku při teplotě 10 °C a 60 °C a frekvenci 1,59 Hz.

6.4. VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY MSCR

Zkouška MSCR proběhla dle postupu popsaného v bodě 4.6. Použila se 25 mm geometrie a po vložení připraveného vzorku do reometru byla nastavená mezera 1 mm. Zkušební teplota, při které se měření realizovalo, byla 60 °C. V rámci měření bylo navíc přidáno 10 cyklů dotvarování a zotavení při zatížení vzorku konstantním smykovým napětím 10 kPa.

Hlavními výsledky zkoušky MSCR jsou hodnoty nevratné smykové poddajnosti J_{nr} a hodnoty průměrného elastického zotavení R při smykovém napětí 0,1 kPa, 3,2 kPa a 10 kPa. Tyto hodnoty jsou uvedeny v následujících tabulkách 5 a 6. Průběh celé zkoušky je poté zobrazen v grafu 13.

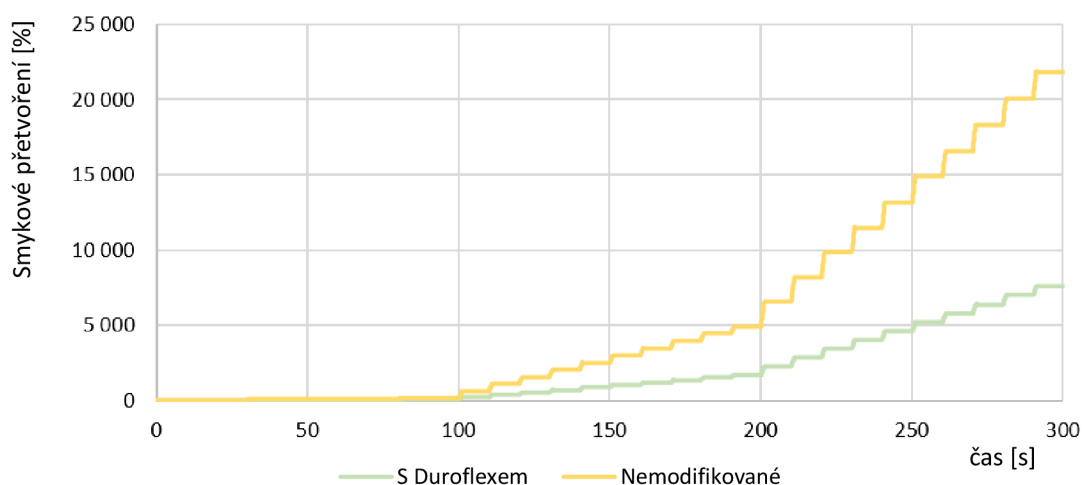
$J_{nr0,1}$ [kPa ⁻¹]	$J_{nr3,2}$ [kPa ⁻¹]	J_{nr10} [kPa ⁻¹]	$J_{nrdiff3,2-0,1}$ [%]	$J_{nrdiff10-3,2}$ [%]	$J_{nrdiff10-3,2}$ [%]
1,35	1,49	1,69	10,60	25,45	13,41
$R_{0,1}$ [%]	$R_{3,2}$ [%]	R_{10} [%]	$R_{diff3,2-0,1}$ [%]	$R_{diff10-3,2}$ [%]	$R_{diff10-3,2}$ [%]
6,04	2,15	0,55	64,41	90,91	74,46

Tabulka 5 - Výsledky zkoušky MSCR - nemodifikované pojivo

$J_{nr0,1}$ [kPa ⁻¹]	$J_{nr3,2}$ [kPa ⁻¹]	J_{nr10} [kPa ⁻¹]	$J_{nrdiff3,2-0,1}$ [%]	$J_{nrdiff10-3,2}$ [%]	$J_{nrdiff10-3,2}$ [%]
0,46	0,51	0,59	9,50	28,43	17,27
$R_{0,1}$ [%]	$R_{3,2}$ [%]	R_{10} [%]	$R_{diff3,2-0,1}$ [%]	$R_{diff10-3,2}$ [%]	$R_{diff10-3,2}$ [%]
13,75	9,46	2,45	31,20	82,20	74,13

Tabulka 6 - Výsledky zkoušky MSCR – pojivo s Duroflexem

U pojiva získaného ze směsi modifikované Duroflexem jsou hodnoty J_{nr} pro napětí (0,1;3,2;10) kPa výrazně menší než u pojiva ze srovnávací nemodifikované směsi a hodnoty R jsou naopak větší. Z toho lze vyvodit závěr, že pojivo s Duroflexem má větší schopnost odolávat vzniku deformaci než pojivo nemodifikované. Je tomu spíše proto, že pojivo obsahující přísadu Duroflex je tužší, než že by se toto pojivo chovalo pružněji (tzn. lépe se navracelo). V grafu 13 je také znázorněn zvětšující se rozdíl ve smykovém přetvoření mezi pojivy v závislosti na čase.



Graf 13- Závislost smykového přetvoření na čase ze zkoušky MSCR

6.5. VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY POJÍŽDĚNÍ KOLEM

Odolnost vůči trvalým deformacím se na směsích měřila pomocí metody pojíždění kolem. Zkouška probíhala dle normy ČSN EN 12697-22+A1: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška pojíždění kolem. Desky byly připravené hutněním v lamelovém hutňovači postupem popsáném v bodě 4.7., kdy teplota směsi k hutnění byla 150 °C. Samotné zkoušky pojíždění kolem probíhaly u obou zkoušených asfaltových směsích při teplotě 60 °C. Zkušební zařízení měřilo zcela automaticky. Po vložení připravených desek z asfaltové směsi s Duroflexem do zařízení se zahájilo měření a bylo ukončeno po 10 000 cyklech. Stejně měření bylo také uskutečněno s deskami ze srovnávací asfaltové směsi. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 7.

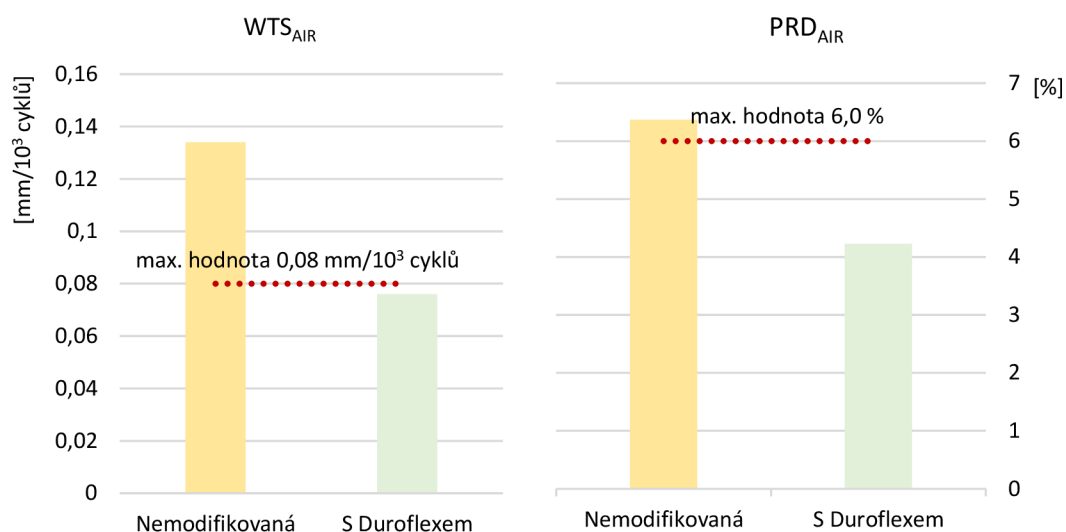
	Nemodifikovaná	Modifikovaná - Duroflex®
Tloušťka desky	39,1 mm	39,5 mm
Hloubka koleje po 5000 cyklech	2,49 mm	1,67 mm
Hloubka koleje po 10000 cyklech	3,16 mm	2,05 mm
WTS_{AIR}	0,134 mm/10 ³ cyklů	0,076 mm/10 ³ cyklů
PRD_{AIR}	6,368 %	4,228 %

Tabulka 7 - Výsledky zkoušky pojíždění kolem

V tabulce lze také kromě výsledků nalézt hodnoty průměrné poměrné hloubky vyjeté koleje PRD_{AIR} , což je průměr poměrné hloubky vyjeté koleje ze dvou zkušebních těles, a poměrný přírůstek hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} vypočtený jako: $WTS_{AIR} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$, kde $d_{10\,000}$ je hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech a $d_{5\,000}$ je hloubka vyjeté koleje po 5 000 cyklech.

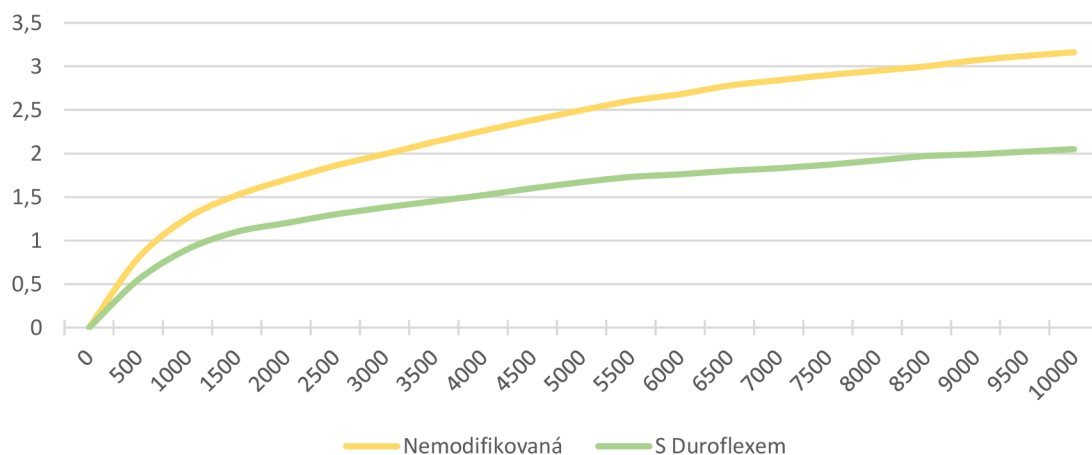
U asfaltové směsi s Duroflexem je výsledná hloubka koleje po 10 000 cyklech o 1,11 mm menší než u srovnávací směsi bez této přísady. Poměrný přírůstek hloubky vyjeté koleje je u nemodifikované směsi téměř dvojnásobný než u směsi

s Duroflexem. Větší odolnost vůči trvalým deformacím prokázala tedy asfaltová směs s Duroflexem.



Graf 14 - Porovnání výsledků s požadavky v normě ČSN 73 6121

Zkoušky probíhaly v přísnějších podmínkách, kdy zkušební teplota byla o 10 °C vyšší, než požaduje norma ČSN 73 6121: Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody. A jak je vidět v grafu 14, při této vyšší zkušební teplotě vyhověla požadavkům na asfaltové betony do obrusných vrstev pouze asfaltová směs s Duroflexem, jelikož hodnota WTS_{AIR} vyšla menší než 0,08 mm/10³ cyklů a hodnota PRD_{AIR} byla menší než 6 %. V grafu 15 je znázorněn průběh nárůstu hloubky vyjeté koleje z obou provedených zkoušek.



Graf 15 - Průběh zkoušky poježdění kolem

6.6. NÍZKOTEPLTNÍ VLASTNOSTI – JEDNOOSÁ ZKOUŠKA TAHEM

Postup této zkušební metody je popsán v normě ČSN EN 12697-46 a zkouška TSRST byla stručně popsána v bodě 4.9. Zkouška byla provedena na 6 tělesech, tři pro každou směs, ve zkušebním zařízení typu Cyklon -40 °C.

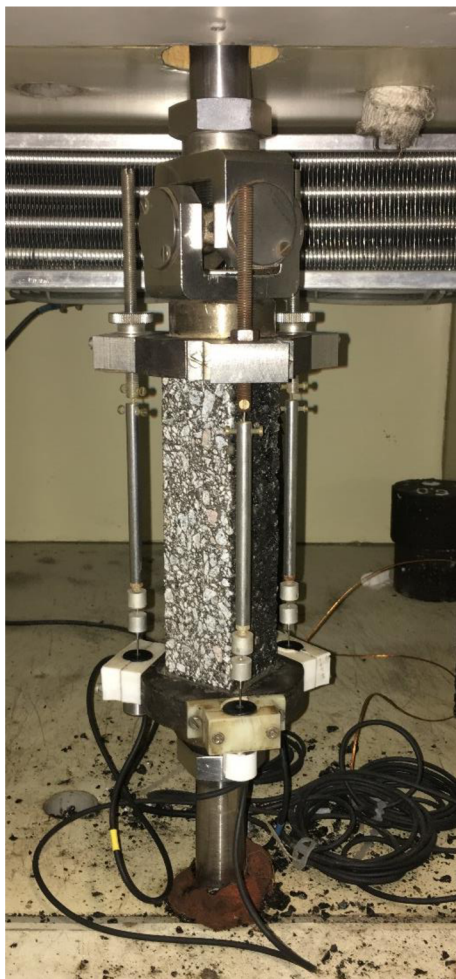
Pro tuto zkušební metodu byly vytvořeny zhutněné desky ze zkoušených asfaltových směsí vyrobených dle bodu 4.7., jenž byly následně nařezány na zkušební tělesa, konkrétně hranoly. Rozměry jednotlivých hranolů jsou uvedeny v tabulce 8. Označení hranolů pomocí n, odpovídá části desky. Krajní hranoly, tedy 1 a 5, nebyly při zkoušce využity, aby bylo zamezeno vlivu nedokonalého zhutnění okrajů desky na výsledné hodnoty zkoušek.

n	Nemodifikovaná směs			Směs s Duroflexem		
	a [mm]	b [mm]	L [mm]	a [mm]	b [mm]	L [mm]
2	50,4	50	200	50,4	50,2	200
3	50,7	50,2	200	50,3	50,2	200
4	50,2	50,2	200	50,3	50,1	200
\bar{x}	50,4	50,1	200	50,3	50,2	200

Tabulka 8 - Rozměry zkušebních hranolů

Těleso č.	Nemodifikovaná		Modifikovaná - Duroflex®	
	$\sigma_{\text{cry, failure}}$ [MPa]	T_{failure} [°]	$\sigma_{\text{cry, failure}}$ [MPa]	T_{failure} [°]
2	2,96	-17,9	3,34	-15,3
3	3,15	-18,0	3,28	-16,4
4	3,07	-17,7	3,29	-15,8
\bar{x}	3,06	-17,9	3,30	-15,8

Tabulka 9 - Výsledky zkoušky TSRST



Obrázek 36 - Připravený hranol
v chladící komoře

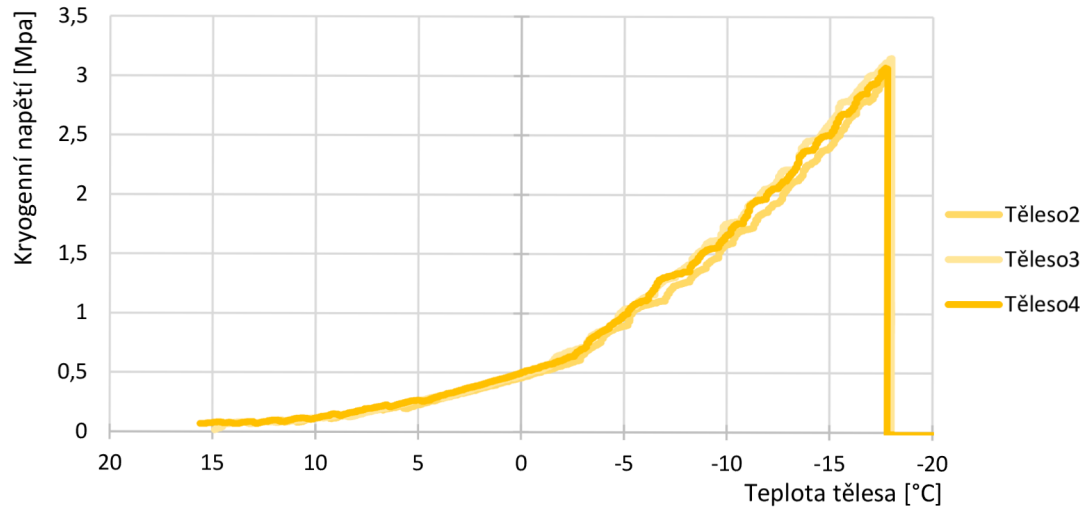


Obrázek 37 - Zkušební těleso
přípevněno v čelistech

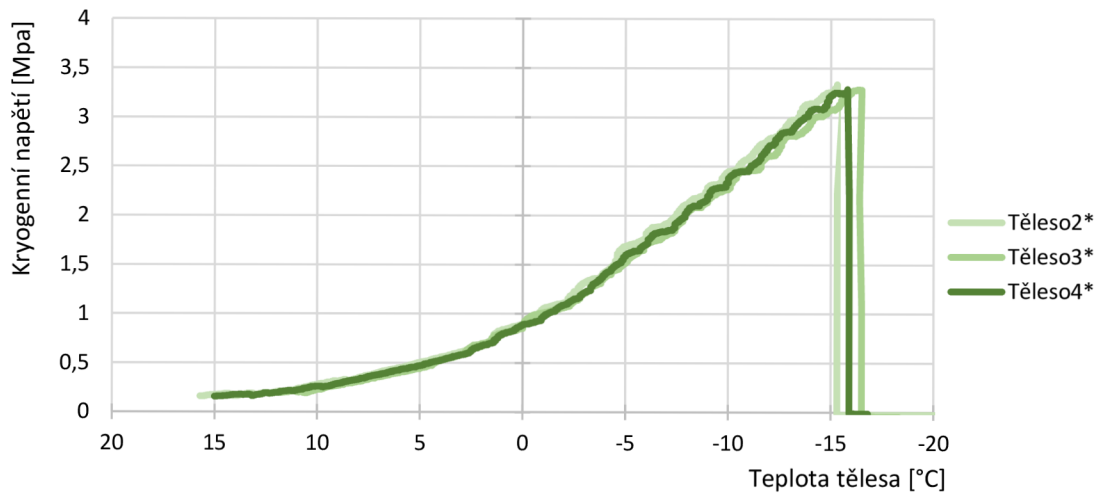


Obrázek 38 - Porušené
zkušební těleso

V tabulce 9 jsou uvedena výsledná kritická napětí a jim odpovídající kritické teploty, při kterých došlo k porušení vzorku. U modifikované směsi je teplota porušení o něco málo vyšší než u nemodifikované směsi. Asfaltová směs s Duroflexem má tedy o něco vyšší nízkoteplotní vlastnosti. Tato vlastnost je spojená s tím, že pojivo ve směsi s Duroflexem je tužší, a tedy i křehčí při nízkých teplotách než pojivo v nemodifikované asfaltové směsi. Průběhy jednotlivých zkoušek jsou zobrazeny v grafech 16 a 17.



Graf 16 – Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa při TSRST (nemodifikovaná směs)



Graf 17 – Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa při TSRST (směs s Duroflexem)

7. ZÁVĚR

Cílem této závěrečné práce bylo porovnat vybrané vlastnosti dvou asfaltových směsí. Jednalo se o asfaltovou směs s modifikační přísadou na bázi recyklovaných plastů (Duroflex–Standard) a srovnávací asfaltovou směs bez této přísady. K porovnání byly použité výsledky ze zkoušek penetrace jehlou, bodu měknutí, DSR, MSCR, pojíždění kolem a z jednoosé zkoušky tahem.

U zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí, DSR a MSCR byla použita pojiva, která byla znovuzískána z dodaných směsí. Celkově lepší výsledky byly naměřeny u pojiva znovuzískaného z asfaltové směsi modifikované Duroflexem. Toto pojivo mělo o 5,8 °C vyšší bod měknutí a o 8,4 (0,1 mm) menší hodnotu penetrace jehlou. Při zkoušce v dynamickém smykovém reometru byl zjištěn komplexní modul ve smyku pojiva s přísadou Duroflex vyšší a úhel fázového posunu nižší v průběhu celého teplotně-frekvenčního rozsahu, než tomu bylo u pojiva z nemodifikované směsi. Při zobrazení Blackova diagramu však není vidět patrný rozdíl mezi těmito pojivy. U obou pojiv byl tvar Blackova diagramu zaoblen a bez výrazných změn, které by byly očekávány v případě přítomnosti modifikační přísady. Tento překvapivý výsledek u pojiva s přísadou mohl být zapříčiněn tím, že pojivo bylo znovuzískáváno ze směsi a část tak zůstala v kamenivu anebo jeho vlastnosti byly ovlivněny použitým rozpouštědlem. Asfaltové pojivo s Duroflexem má také nižší teplotní citlivost. Výsledky zkoušky MSCR jen potvrdily vyhodnocení ostatních provedených zkoušek pojiv. Asfaltové pojivo ze směsi modifikované Duroflexem mělo téměř třikrát nižší hodnotu nevratné smykové poddajnosti, než tomu bylo u srovnávacího pojiva.

Při zkoušce pojíždění kolem byla hloubka vyjeté koleje u modifikované směsi po 10 000 cyklech o 1,11 mm menší, než tomu bylo u srovnávací směsi. A přestože byla zkouška prováděna při přísnějších podmínkách, se zkušební teplotou 60 °C, modifikovaná směs vyhověla podmínkám pro asfaltové betony pro obrusné vrstvy dané normou ČSN 73 6121. Srovnávací směs dané podmínky už nesplňovala. Co se týče nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí, lze dojít k závěru, že modifikovaná směs je mírně křehčí než směs nemodifikovaná. K porušení vzorku ze srovnávací

směsi došlo při teplotě nižší, než tomu bylo u vzorku s Duroflexem, ovšem rozdíl je téměř zanedbatelný.

Závěrem lze říci, že asfaltová směs je díky přísadě Duroflex-Standart odolnější vůči deformaci, než by byla bez této modifikační přísady. Díky Duroflexu je pojivo tužší, ale také mírně křehčí při nízkých teplotách. Celkově má tedy tento způsob modifikace asfaltových směsí pozitivní vliv na jejich vlastnosti, zejména pokud je nutné zvýšit odolnost asfaltové směsi vůči deformaci.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

[1] STEHLÍK, Dušan. Silniční stavební materiály a technologie na pozemních komunikacích, základní rozdělení. Prezentace, VUT v Brně. Brno, 2010.

[2] petroleum.cz, Asfalty a asphaltové výrobky. petroleum.cz [online]. Copyright © [cit. 09.03.2020]. Dostupné z: <http://petroleum.cz/vyroby/asfalty.aspx>

[3] PORTO, Michele, Paolino CAPUTO, Valeria LOISE, Shahin ESKANDARSEFAT, Bagdat TELTAYEV a Cesare OLIVIERO ROSSI. Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances. Applied Sciences [online]. 2019. DOI: 10.3390/app9040742. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2076-3417/9/4/742>

[4] ZAJÍČEK, Jan. Technologie stavby vozovek. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN ISBN978-80-87438-59-6.

[5] VARAUS, Michal. Pozemní komunikace II. Asphaltová pojiva. Brno, 2005

[6] KAUN, Miroslav, František LUXEMBURK a České vysoké učení technické v Praze. Pozemní komunikace 30. Praha: ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02486-5. Dostupné také z: <https://kramerius.techlib.cz/kramerius-web-client/uuid/uuid:9d782ae8-6d88-4920-bf86-243234b676f7>

[7] JEŽKOVÁ, Jaromíra. Dopravní stavby. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03393-7 (brož.). Dostupné také z: <https://kramerius.techlib.cz/kramerius-web-client/uuid/uuid:1cf49e63-48fb-11e1-92b9-0050568253d9>

[8] petroleum.cz, Oxidace asfaltů. petroleum.cz, Úvodní stránka [online]. Copyright © [cit. 09.03.2020]. Dostupné z: <http://petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-42.aspx>

[9] Výroba ropných asfaltů. Co je asfalt. Složení asfaltů – mikrostruktura. Analýza složení TLC/FID – SARA – PDF Free Download. Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací. [online]. Copyright © DocPlayer.cz. Dostupné z: <https://docplayer.cz/68513056-Vyroba-ropnych-asfaltu-co-je-asfalt-slozeni-asfaltu-mikrostruktura-analyza-slozeni-tlc-fid-sara.html>

[10] VYMAZAL, Tomáš. KUDRNA, Jan. Stavební látky druhy asfaltů. Asfalty a dehty. Složení asfaltů. Vlastnosti asfaltů – PDF. [online]. Copyright © DocPlayer.cz. Dostupné z: <https://docplayer.cz/16911628-Stavebni-latky-druhy-asfaltu-asfalty-asfalty-a-dehty-slozeni-asfaltu-vlastnosti-asfaltu.html>

[11] PĚNČÍK, Michal. Pojiva do netuhých vozovek. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

[12] ROTOVÁ, Petra. Využití stavebního recyklátu v dopravních stavbách. Praha, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce RNDr. Jan Král.

[13] M. MASHAAN, Nuha Salim, Mohamed Rehan KARIM, Manfred PARTL, Duanyi WANG, Huayang YU a Zhi ZHANG. Waste tyre rubber in asphalt pavement modification: a preliminary study. *Materials Research Innovations* [online]. 2014, 18(sup6), S6-6-S6-9 [cit. 2020-03-25]. DOI: 10.1179/1432891714Z.000000000922. ISSN 1432-8917. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1432891714Z.000000000922>.

[14] LANDI, Daniele, Marco MARCONI, Edoardo a Michele GERMANI. Comparative life cycle assessment of standard, cellulose-reinforced and end of life tires fiber-reinforced hot mix asphalt mixtures. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2020, 248 [cit. 2020-03-25]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119295. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619341654>

[15] FAUZI, N A N Md, K A MASRI, P J RAMADHANSYAH, et al. Volumetric Properties and Resilient Modulus of Stone Mastic Asphalt incorporating Cellulose Fiber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, 712 [cit. 2020-03-25]. DOI: 10.1088/1757-899X/712/1/012028. ISSN 1757-899X. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/712/1/012028>

[16] SADEGHIAN, Mohammad, Manouchehr LATIFI NAMIN, Hadi GOLI, et al. Evaluation of the fatigue failure and recovery of SMA mixtures with cellulose fiber and with SBS modifier. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, 226, 818-826 [cit. 2020-03-25]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.308. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181931983X>

- [17] IRFAN, Muhammad, Yasir ALI, Sarfraz AHMED, et al. Rutting and Fatigue Properties of Cellulose Fiber-Added Stone Mastic Asphalt Concrete Mixtures. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2019, 2019, 1-8 [cit. 2020-03-25]. DOI: 10.1155/2019/5604197. ISSN 1687-8434. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2019/5604197/>
- [18] MALÁ, Markéta. Využití R-materiálu v krytových vrstvách vozovek. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [19] DUCHÁČEK, Vratislav a Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2006. s. 10. ISBN 80-7080-617-6. Dostupné také z: <https://kramerius.techlib.cz/kramerius-web-client/uuid/uuid:71cec930-5cff-492a-86b5-dc50d43517ba>
- [20] JIŘIČKOVÁ, Milena. *Materiálové inženýrství I*. Praha: České vysoké učení technické, 2011. s. 202. ISBN 978-80-01-04932-7. Dostupné také z: <https://kramerius.techlib.cz/kramerius-web-client/uuid/uuid:1ab27ab3-47b3-11e4-a587-001b63bd97ba>
- [21] Rozdělení a charakteristika polymerů. [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>
- [22] BERÁNEK, L. *Výroba pneumatik*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 44 s. Vedoucí diplomové práce Ing. EVA NOVOTNÁ, Ph.D., Paed IGIP.
- [23] ETRMA-European Tyre & Rubber Manufacturers' Association. Brussel [Online]. Dostupné na: www.etrma.org
- [24] PNEUMATIKY | TŘÍDĚNÍODPADU.CZ. *Odpady | tříděníodadu.cz* [online]. Copyright © 2007 [cit. 27.03.2020]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/pneumatiky>
- [25] *Plastový odpad a jeho recyklace v EU (infografika) | Zpravodajství | Evropský parlament*. [online]. Copyright ©AP images [cit. 27.03.2020]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/society/20181212STO21610/plastovy-odpad-a-jeho-recyklace-v-eu-infografika>
- [26] PLASTY | TŘÍDĚNÍODPADU.CZ. *Odpady | tříděníodadu.cz* [online]. Copyright © 2007 [cit. 27.03.2020]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/plasty>

- [27] PADHAN, Rabindra Kumar, Anand SREERAM a Chandra Sekhar MOHANTA. Chemically recycled polyvinyl chloride as a bitumen modifier: synthesis, characterisation and performance evaluation. *Road Materials and Pavement Design* [online]. 2019, , 1-14 [cit. 2020-03-27]. DOI: 10.1080/14680629.2019.1614968. ISSN 1468-0629. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2019.1614968>
- [28] HU, Chichun, Weijie LIN, Manfred PARTL, Duanyi WANG, Huayang YU a Zhi ZHANG. Waste packaging tape as a novel bitumen modifier for hot-mix asphalt: a preliminary study. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, 193, 23-31 [cit. 2020-03-25]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.170. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818325807>
- [29] NACE, Trevor. We're Now At A Million Plastic Bottles Per Minute - 91 % Of Which Are Not Recycled. 2017, Forbes.com [Online]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/trevornace/2017/07/26/million-plastic-bottles-minute-91-not-recycled/#1180b1a8292c>
- [30] LAPIAN, F E P, M I RAMLI, M PASRA a A ARSYAD. Opportunity applying response surface methodology (RSM) for optimization of performing butonic asphalt mixture using plastic waste modifier: a preliminary study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [online]. 2020, 419 [cit. 2020-03-25]. DOI: 10.1088/1755-1315/419/1/012032. ISSN 1755-1315. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/419/1/012032>
- [31] PADHAN, Rabindra Kumar, Chandrasekhar MOHANTA, Anand SREERAM a Anurag GUPTA. Rheological evaluation of bitumen modified using antistripping additives synthesised from waste polyethylene terephthalate (PET): a preliminary study. *International Journal of Pavement Engineering* [online]. 2018, 419, 1-9 [cit. 2020-03-25]. DOI: 10.1080/10298436.2018.1519192. ISSN 1029-8436. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10298436.2018.1519192>
- [32] AHMADINIA, Esmail, Majid ZARGAR, Mohamed Rehan KARIM, Mahrez ABDELAZIZ a Ebrahim AHMADINIA. Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, 36, 984-989 [cit. 2020-03-28]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015. ISSN 09500618. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061812004072>

- [33] ZOU, Gui-lian a Jiang-miao YU. Effects of Interface Modifier on Asphalt Concrete Mixture Performance and Analysis of its Mechanism. International Journal of Pavement Research [online]. 2012, 5(6), 419-427 [cit. 2020-04-08]. ISSN 19971400.
- [34] Datenblatt Duroflex-Standard 02-2019: ASPHALT-ADDITIV Duroflex®-Standard und Untertypen, Datenblatt DLN-ATI- 3006842-3, ATI Asphalt Technology International Holding GmbH, 2019
- [35] Duroflex – Information 2018: Duroflex®, ATI Asphalt Technology International Holding GmbH, reklamní leták
- [36] Asphalt Additiv Duroflex Kurzbeschreibung: Asphaltadditiv "Duroflex®", rub Berlin GmbH, výzkumná zpráva
- [37] Asphalt_Recycling Erklärung zur ppt II: Asphalt Recycling, výzkumná zpráva, podklady získány od Ing. Z. Hegra
- [38] comparison Duroflex – variants: Pohlmann, P.: Proving the influence of three kinds of Duroflex® under different asphalt modification temperatures upon the resistance of asphalt concrete against rut deformation, Asphalt Technology International Holding GmbH, výzkumná zpráva, Berlin, 2017
- [39] ČSN EN 12697-1: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 1: Obsah rozpustného pojiva. ÚNMZ, 2018.
- [40] ČSN EN 12697-3: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení. ČNI, 2006.
- [41] ČSN EN 1426: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. ÚNMZ, 2015.
- [42] ČSN EN 1427: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda Kroužek a kulička. ÚNMZ, 2015.
- [43] ČSN EN 14770: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR). ÚNMZ, 2012.
- [44] ČSN EN 16659: Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test). ÚNMZ, 2016.

- [45] ČSN EN 12697-33+A1: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. ČNI, 2007.
- [46] ČSN EN 12697-22+A1: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška pojíždění kolem. ÚNMZ, 2007.
- [47] ČSN EN 12697-46: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem. ÚNMZ, 2012.
- [48] STAV-INVEST, střešní systémy, s.r.o. [online]. Copyright © 2009–2018. Dostupné z: <https://www.stavinvest.cz/asfaltove-pasy-zvyseni-cen-1-cervna-2019/>
- [49] Metrostav a.s. [online]. Copyright © 2020. Dostupné z: <https://www.metrostav.cz/cs/nase-technologie/asfaltove-vozovky>
- [50] AdMaS [online]. Copyright © 2018. Dostupné z: <https://admas.eu/realizace-zkusebniho-useku-z-nove-navrzene-asfaltove-smesi/>
- [51] Refining & Productions: AO "TERGAZ" REFINERY. *Crude Oil Refinery in Russia* [online]. Copyright © AO. Dostupné z: <http://tergaz.ru/SERVICES-ACTIVITIES/>

9. SEZNAMY

9.1. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Použití asfaltových hydroizolačních pásů [48].....	11
Obrázek 2 - Pozemní komunikace z netuhé vozovky [49].....	11
Obrázek 3 - Oprava pozemní komunikace [50].....	11
Obrázek 4 - Grafické znázornění frakční destilace ropy [51].....	12
Obrázek 5 - Závislost stavu asfaltu na teplotě.....	13
Obrázek 6 - Schéma rozdělení asfaltů	14
Obrázek 7 - Rozdělení polymerů.....	16
Obrázek 8 - Rozdělení polymerů na trhu [21].....	17
Obrázek 9 - Znázornění působení ETRMA v Evropě [23].....	18
Obrázek 10 - Schéma cyklu pneumatik [23].....	19
Obrázek 11 - Znázornění využití ELTs [23].....	21
Obrázek 12 - Výsledky zkoušek [27].....	22
Obrázek 13 - Použití použité balící pásy [28]	22
Obrázek 14 - Ukázka drtě z PET láhví [33].....	23
Obrázek 15 - Výsledky zkoušky pojiždění kolem [33]	24
Obrázek 16 - Výsledky zkoušky stékavosti pojiva z povrchu kameniva [33].....	24
Obrázek 17 - Ukázka přilnavosti pojiva na kamenivu [32].....	25
Obrázek 18 - Význam názvu přísady Duroflex.....	25
Obrázek 19 - Výsledek po zkoušce opakovaného pojiždění kolem [36].....	26
Obrázek 20 - Schéma třífázového rozhraní [33].....	26
Obrázek 21 - Granule Duroflex – Eco [35].....	27
Obrázek 22 - Schéma průtokové odstředivky na oddělení fileru [39].....	29
Obrázek 23 - Schéma rotační vakuové odparky [40]	30
Obrázek 24 - Příklad penetrometru [41].....	31
Obrázek 25 - Zkušební kelímky naplněny.....	32
Obrázek 26 - Příklad ke stanovení penetrace jehlou	32
Obrázek 27 - Sestava dvou kroužků s držákem kroužků (A) a základní deskou (B) [42]	33
Obrázek 28 - Rozměry kroužku [42].....	33
Obrázek 29 - Zkušební zařízení ke zkoušce bodu měknutí.....	34
Obrázek 30 - Dynamický smykový reometr	35
Obrázek 31 - Zkušební vzorky v silikonové formě	35

Obrázek 32 - Příklad jednoho cyklu dotvarování a zotavení [44].....	37
Obrázek 33 - Grafické zobrazení teploty, deformace a napětí během TSRST.....	40
Obrázek 34 - Propad kuličky kroužkem.....	44
Obrázek 35 - Připravené kroužky s pojivem.....	44
Obrázek 36 - Připravený hranol v chladící komoře.....	54
Obrázek 37 - Zkušební těleso připevněno v čelistech.....	54
Obrázek 38 - Porušené zkušební těleso.....	54

9.2. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Výsledky z protokolu kontrolní zkoušky ACO11+ 50/70.....	41
Tabulka 2 – Výsledky z protokolu kontrolní zkoušky ACO11+ 50/70 s DUROFLEX.....	42
Tabulka 3 - Výsledky zkoušky penetrace jehlou.....	42
Tabulka 4 - Výsledky zkoušky Kroužek a kulička.....	43
Tabulka 5 - Výsledky zkoušky MSCR - nemodifikované pojivo.....	50
Tabulka 6 - Výsledky zkoušky MSCR – pojivo s Duroflexem.....	50
Tabulka 7 - Výsledky zkoušky pojždění kolem.....	51
Tabulka 8 - Rozměry zkušebních hranolů.....	53
Tabulka 9 - Výsledky zkoušky TSRST.....	53

9.3. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Srovnání výsledků penetrace jehlou.....	43
Graf 2 – Srovnání bodů měknutí obou směsí.....	43
Graf 3 – Závislost komplexního modulu ve smyku na frekvenci (vzorek o průměru 8 mm).....	45
Graf 4 – Závislost komplexního modulu ve smyku na frekvenci (vzorek o průměru 25 mm).....	45
Graf 5 – Závislost úhlu fázového posunu na frekvenci (vzorek průměru 8 mm).....	46
Graf 6 – Závislost úhlu fázového posunu na frekvenci (vzorek průměru 25 mm).....	46
Graf 7 – Blackův diagram.....	47
Graf 8 – Závislost G^* na teplotě při frekvenci $f = 1,59$ Hz (vzorek 8 mm).....	48
Graf 9 – Závislost G^* na teplotě při frekvenci $f = 1,59$ Hz (vzorek 25 mm).....	48
Graf 10 – Závislost δ na teplotě při frekvenci $f = 1,59$ Hz (vzorek 8 mm).....	48
Graf 11 – Závislost δ na teplotě při frekvenci $f = 1,59$ Hz (vzorek 25 mm).....	49
Graf 12 – Teplotní citlivost pojiva ($f=1,59$ Hz).....	49
Graf 13 - Závislost smykového přetvoření na čase ze zkoušky MSCR.....	50

<i>Graf 14 - Porovnání výsledků s požadavky v normě ČSN 73 6121.....</i>	<i>52</i>
<i>Graf 15 - Průběh zkoušky pojíždění kolem.....</i>	<i>52</i>
<i>Graf 16 – Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa při TSRST (nemodifikovaná směs).....</i>	<i>55</i>
<i>Graf 17 – Závislost kryogenního napětí na teplotě tělesa při TSRST (směs s Duroflexem).....</i>	<i>55</i>

9.4. SEZNAM PŘÍLOH

<i>Příloha č. 1 - Protokol zkoušky srovnávací směsi ACO11+ 50/70</i>	<i>67</i>
<i>Příloha č. 2 – Protokol zkoušky směsi ACO11+ 50/70 s přísadou DUROFLEX Standard</i>	<i>68</i>

Příloha č. 1– Protokol zkoušky srovnávací směsi ACO11+ 50/70

Skanska Asfalt s.r.o.
Pavelkova 6/1133, Hodolany, 772 11 Olomouc
Laboratoř útvary TKJ v Modřeci - Poličce

Zkušební laboratoř s odbornou způsobilostí č. 168 Modřec - Polička

Počet stran : 1

Strana : 1

Formulář: L-02

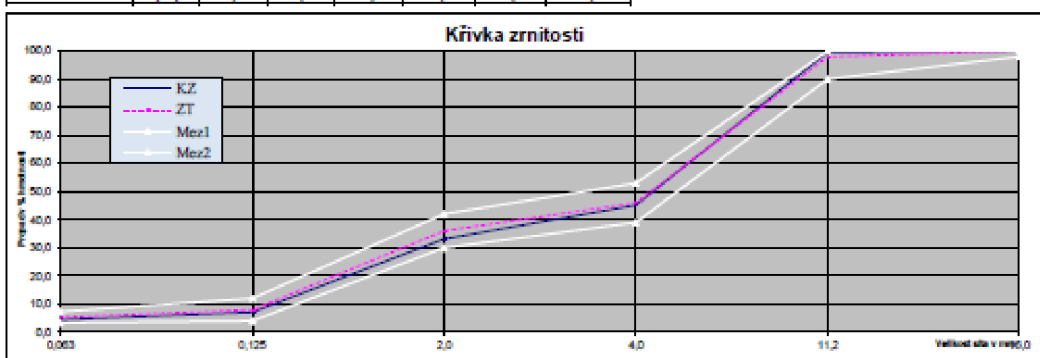
PROTOKOL č. 121M/19
KONTROLNÍ ZKOUŠKY ASFALTOVÉ SMĚSI

Zákazník : SWIETELSKY Druh směsi : **ACO 11 + 50/70** Datum odběru: 10.09.19
Obalovna : Modřec Odebral: Hegrová Čas odběru: 8:03
Název stavby : SWIET - Studnice Číslo zkoušky typu: **ZT SA/34M/18** Datum příjmu: 10.09.2019
Místo odběru: 579 33 44 Stavební objekt: 0 Datum zkoušky: 10.09.2019

Teplota směsi 170 °C

KRIVKA ZRNITOSTI

Síť	mm	16,0	11,2	4,0	2,0	0,125	0,063
Propad - KZ	%	100,0	99,4	45,2	33,1	7,1	4,4
Propad - ZT	%	100,0	98,0	46,0	36,0	8,0	5,3
Rozdíl KZ-PZ	(+/-)	0,0	1,4	-0,8	-2,9	-0,9	-0,9



OBSAH POJIVA	Předepsaný (+0,5%)	Stanovený
v % hmot. směsi	5,90	5,92

FYZIKALNE MECHANICKE VLASTNOSTI :

Vlastnosti	Výsledek zkoušky	Specifikace	
		Předpis ¹⁾	Hodn. ²⁾
Objem hmot. zhut. asf. směsi $\rho_{b,hd}$ (Mg/m ³) dle ČSN EN 12 697-6	2,352	ČSN 73 6121	-
Max. objemová hmotnost asf. směsi ρ_{uv} (Mg/m ³) dle ČSN EN 12 697-6	2,456		-
Mezerovitost V_m (obj. %) dle ČSN EN 12 697-6	4,2		2,0 - 6,0

1) označení výrobkové specifikace nebo národní přílohy 2) rozsah (rozmezí) předepsaných hodnot

Závěr: Zjištěné výsledky jednotlivých zkoušek vyhovují požadavkům ČSN 73 6121 a ČSN EN 13 108-21.

Prohlášení : Výsledky zkoušek se týkají pouze zkoušených předmětů v protokolu uvedených.
Bez písemného souhlasu zkuš. laboratoře se nesmí protokol reprodukovat jinak, než celý !

Tisk:
V Modřeci: 31.10.2019

Obdržel : zákazník lx

Ing. Zdeněk Hegr
vedoucí laboratoře

Příloha č. 2 – Protokol zkoušky směsi ACO11+ 50/70 s přísadou DUROFLEX Standard

Skanska Asfalt s.r.o.
Pavelkova 6/1133, Hodolany, 772 11 Olomouc
Laboratoř útvary TKJ v Modřeci - Poličce

Zkušební laboratoř s odbornou způsobilostí č. 168 Modřec - Polička

Počet stran : 1
Strana : 1
Formulář: L- 02

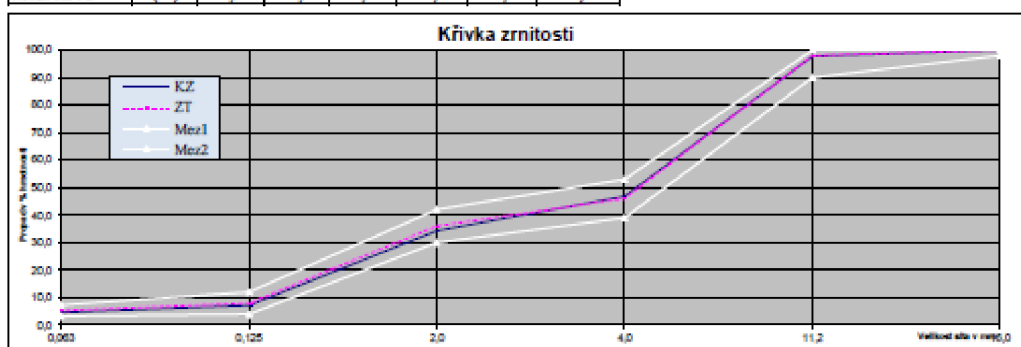
PROTOKOL č. 120M/19
KONTROLNÍ ZKOUŠKY ASFALTOVÉ SMĚSI

Zákazník : Skanska a.s. Druh směsi : **ACO 11 + 50/70** Datum odběru: 10.09.19
Obalovna : Modřec Odebral: Hegr, Zdeněk Čas odběru: 9:34
Název stavby : Brandýs nad Orlicí Číslo zkoušky typu: **ZT SA/34M/18** Datum příjmu: 10.09.2019
Místo odběru: 513 98 89 Stavební objekt: 0 Datum zkoušky: 10.09.2019

Teplota směsi 171 °C

KŘIVKA ZRNITOSTI

Site	mm	16,0	11,2	4,0	2,0	0,125	0,063
Propad - KZ	%	100,0	97,7	46,8	34,3	7,2	4,6
Propad - ZT	%	100,0	98,0	46,0	36,0	8,0	5,3
Rozdíl KZ-PZ	(+/-)	0,0	-0,3	0,8	-1,7	-0,8	-0,7



OBSAH POJIVA	Předepsaný (+0,5%)	Stanovený
v % hmot. směsi	5,90	5,84

FYZIKALNE MECHANICKE VLASTNOSTI :

Vlastnosti	Výsledek zkoušky	Specifikace	
		Předpis ¹⁾	Hodn. ²⁾
Objem hmot. zhut. asf. směsi ρ_{bzhd} (Mg/m ³)	2,349	ČSN 73 6121	-
Max. objemová hmotnost asf. směsi ρ_{mv} (Mg/m ³)	2,455		-
Mezerovitost V_m (obj. %)	4,3		2,0 - 6,0

1) označení výrobkové specifikace nebo národní přílohy 2) rozsah (rozmezí) předepsaných hodnot

Závěr: Zjištěné výsledky jednotlivých zkoušek vyhovují požadavkům ČSN 73 6121 a ČSN EN 13 108-21.

Prohlášení: Výsledky zkoušek se týkají pouze zkoušených předmětů v protokolu uvedených.
Bez písemného souhlasu zkuš. laboratoře se nesmí protokol reprodukovat jinak, než celý!

Tisk:
V Modřeci: 31.10.2019

Obdržel: zákazník 1x

Ing. Zdeněk Hegr
vedoucí laboratoře