



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VYUŽITÍ PŘÍSADE VHDNÉ PRO DODATEČNOU MODIFIKACI ASFALTOVÉ SMĚSI

USE OF AN ADDITIVE SUITABLE FOR ADDITIONAL MODIFICATION OF THE ASPHALT
MIXTURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

Bc. Sára Machová

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	NPC-SIK Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Sára Machová
Název	Využití přísady vhodné pro dodatečnou modifikaci asfaltové směsi
Vedoucí práce	doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky materiálů

Zkušební normy pro asfaltová pojiva

Specifikační normy pro asfaltová pojiva

Literatura z internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V současné době se vyvíjí speciální modifikační přísady, které jsou podle některých zdrojů schopné modifikovat asfaltové pojivo přímo při jeho dávkování do asfaltové směsi na obalovně. Cílem diplomové práce je popsat vliv přidání tohoto rychle reagujícího SBS polymeru na změnu vlastností asfaltového pojiva třídy 50/70, přičemž se budou variovat podmínky míchání přísady do asfaltového pojiva. Změny vlastností pojiva budou hodnoceny pomocí vybraných laboratorních zkoušek.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ 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).

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá modifikací asfaltového pojiva 50/70 rychle reagujícím SBS. Jedná se o poměrně novou přísadu, která by měla být schopná zlepšit vlastnosti pojiva v průběhu míchání asfaltové směsi na obalovně. V teoretické části je přiblížena problematika obaloven a polymerních modifikačních přísad. Dále jsou zde popsány použité zkušební metody jako je penetrace jehlou, bod měknutí, stanovení vratné duktility, DSR a MSCR. Ke zkouškám bylo vytvořeno několik vzorků modifikovaného pojiva, u kterých se kombinovala teplota míchání, doba míchání a obsah SBS. Výsledky jednotlivých zkoušek byly porovnány a vyhodnoceny v závěru práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

rychle reagující SBS, modifikace pojiva, obalovna asfaltových směsí, penetrace jehlou, bod měknutí, vratná duktilita, DSR, MSCR

ABSTRACT

This thesis deals with the modification of asphalt binder 50/70 with fast reacting SBS. This is a relatively new additive that should be able to improve the binder properties during mixing of the asphalt mix at the plant. In the theoretical part, the issue of asphalt-mixing plant and polymer modification additives is presented. Furthermore, the test methods used such as needle penetration, softening point, determination of the elastic recovery, DSR and MSCR are described. Several modified binder samples were developed for the tests, in which mixing temperature, mixing time and SBS content were combined. The results of each test were compared and evaluated at the end of the thesis.

KEYWORDS

fast reacting SBS, asphalt binder modification, asphalt-mixing plant, needle penetration, softening point, elastic recovery, DSR, MSCR

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Sára Machová *Využití přísady vhodné pro dodatečnou modifikaci asfaltové směsi.*
Brno, 2022. 57 s., 6 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta
stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Ondřej Dašek,
Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Využití přísady vhodné pro dodatečnou modifikaci asfaltové směsi* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 1. 2022

Bc. Sára Machová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Využití přísady vhodné pro dodatečnou modifikaci asfaltové směsi* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2022

Bc. Sára Machová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala mé milované rodině, která mě podporovala v průběhu celého studia. Zvláště bych chtěla poděkovat vedoucímu práce doc. Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. od kterého jsem se mnohé naučila a získala cenné rady, zejména pak za čas věnovaný v průběhu zpracování této diplomové práce.

OBSAH

1	ÚVOD.....	10
2	VÝROBA ASFALTOVÝCH SMĚSÍ ZA HORKA	11
2.1	Kontinuální obalovna	11
2.2	Šaržová obalovna.....	12
2.2.1	<i>Proces výroby</i>	12
2.3	Asfaltová směs s polymerem modifikovaným asfaltem.....	13
2.3.1	<i>Polymery</i>	14
2.3.2	<i>Vybrané polymery k modifikaci asfaltových pojiv</i>	16
2.3.3	<i>Výroba PmB</i>	19
3	ZKUŠEBNÍ METODY	20
3.1	Penetrace jehlou	20
3.2	Bod měknutí (kroužek a kulička)	22
3.3	Vratná duktilita.....	23
3.4	Dynamický smykový reometr	25
3.5	Zkouška MSCR.....	26
4	CÍL PRÁCE.....	28
5	POUŽITÉ MATERIÁLY	29
5.1	Asfaltové pojivo 50/70	29
5.2	Rychle reagující SBS.....	30
5.3	Postup úpravy základního pojiva.....	32
6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	34
6.1	Penetrace jehlou	34
6.2	Bod měknutí.....	34
6.3	Vratná duktilita.....	36

6.4	DSR.....	37
6.5	MSCR.....	43
7	ZÁVĚR.....	48
8	ZDROJE.....	50
9	SEZNAM GRAFŮ.....	54
10	SEZNAM TABULEK.....	55
11	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	56
12	SEZNAM PŘÍLOH.....	57
13	PŘÍLOHY.....	58

1 ÚVOD

Kvalita budovaných konstrukcí závisí na několika faktorech. Jedním z nich je kvalita použitých materiálů, což lze považovat za jeden z těch nejdůležitějších. U krytů pozemních komunikací tomu není jinak. V České republice jsou pozemní komunikace budovány zejména z netuhého krytu z různých asfaltových směsí.

Vše tedy začíná na počátku výroby tohoto stavebního materiálu, a to na obalovnách asfaltových směsí. V tomto odvětví je snaha o to, aby se proces výroby stále zdokonaloval, byl co nejkvalitnější, nejekonomičtější a samozřejmě také nejekologičtější v rámci dosavadních možností a znalostí.

Na území Česka se nachází něco málo přes sto poboček jednotlivých obaloven. [1] Ne všechny však vyrábí konkrétně asfaltové směsi s polymerem modifikovaným pojivem. U tohoto materiálu je specifické to, že vlastnosti čistého silničního asfaltu lze pozitivně ovlivnit, jak je i z názvu patrné, přísadou polymeru. Úprava samotného asfaltového pojiva probíhá nejčastěji v modifikační stanici, kde se specializují na tento typ zkvalitnění pojiv. Je to funkční systém, ale přesto je tu stále místo pro zlepšení. Jedním z dalších variant využití přísad z polymeru je modifikace asfaltového pojiva, a to přimísením přísady přímo do míchačky v obalovnách během samotného průběhu výroby směsi. Dále, pokud by bylo zjištěno, že vyrobená směs s modifikovaným pojivem nespĺňuje požadované kvalitativní hodnoty, lze opět vylepšit směs dodatečnou modifikací přimícháním polymerové přísady. Ovšem tato poslední zmíněná metoda modifikace v průběhu míchání směsi je stále na samém počátku a je potřeba stále zkoušet a vyvíjet co nejoptimálnější využití.

2 VÝROBA ASFALTOVÝCH SMĚSÍ ZA HORKA

Asfaltová směs se obecně skládají ze 2 vstupních materiálů, kameniva a asfaltového pojiva. Receptury lze však různě doplňovat jinými složkami a měnit tak vlastnosti finálního produktu. Míchání se děje v obalovnách. Existuje několik typů těchto zařízení, které například rozdělujeme na to, jestli jsou stacionární nebo mobilní. Popsány budou 2 základní typy, jedná se buď o kontinuální obalovnu nebo šaržovou obalovnu (obrázek 1).

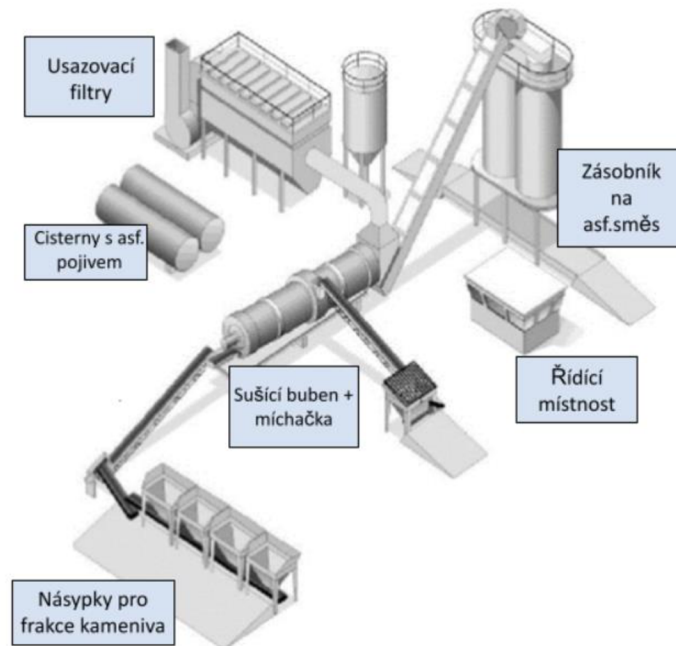


Obrázek 1 - Pražská šaržová obalovna v Herinku (2021)

2.1 KONTINUÁLNÍ OBALOVNA

Tento typ obalovny sice není v Česku skoro vůbec zastoupen, má však svá pozitiva. Předností je určitě schopnost vyrobit v časovém intervalu větší množství asfaltové směsi, než je tomu u šaržové obalovny. V porovnání, u stejné velikosti směšovače 4 t, zvládne tato obalovna při určitých podmínkách vyrobit za hodinu téměř o 100 t horké asfaltové směsi více než je tomu na šaržové obalovně. Tato schopnost ovšem omezila možnost měnit receptury směsí. Je tedy vhodná pro stavby, kde je zapotřebí vyrobit větší množství směsi jednoho typu. Na obrázku 2 je schématicky znázorněna kontinuální obalovna, kde je využita metoda drum-mix. Na této

obalovně je ovšem vcelku nevhodné přidávat polymer způsobem, kterým se dále zabývá tato práce, jelikož by se výrazně snížil výkon výroby. [2,3,5]



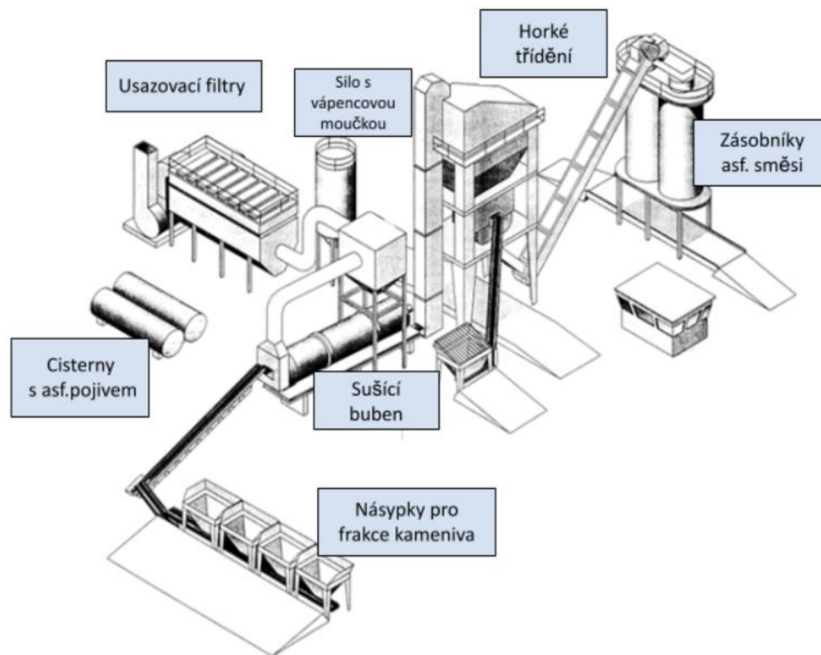
Obrázek 2 - Kontinuální obalovna [5]

2.2 ŠARŽOVÁ OBALOVNA

Šaržová obalovna má oproti kontinuální sice nižší výkon, tuto nevýhodu však plně kompenzuje možnost měnit receptury a vyrábět několik druhů asfaltových směsí s různým pojivem anebo s jiným složením frakcí kameniva. Celý systém obalovny je složitější a náročnější co se týče prostoru.

2.2.1 PROCES VÝROBY

Na obrázku 3 je schématicky znázorněna šaržová obalovna. Systém se obecně skládá ze studeného dávkování, sušícího bubnu, zásobníku vratného fileru, korečkového výtahu do věže, kde proces pokračuje horkým tříděním do zásobníků na horké kamenivo, dále jsou v systému zásobníky asfaltových pojiv, dávkovače přísad, míchací zařízení, sila na uskladnění vyrobené směsi, a nakonec řídicí centrum obalovny. Obvyklá doba míchání se pohybuje okolo 35 s. [4] Není však neobvyklé v případě potřeby tuto dobu prodloužit.



Obrázek 3 - Šaržová obalovna [5]

Díky procesu horkého třídění lze při správném nastavení výrobního cyklu vyrobit velmi kvalitní směs podle dané receptury, kterou je možné měnit dle potřeby zákazníků obalovny. Časté změny receptur v průběhu dne však značně omezují výkon obalovny.

2.3 ASFALTOVÁ SMĚS S POLYMEREM MODIFIKOVANÝM ASFALTEM

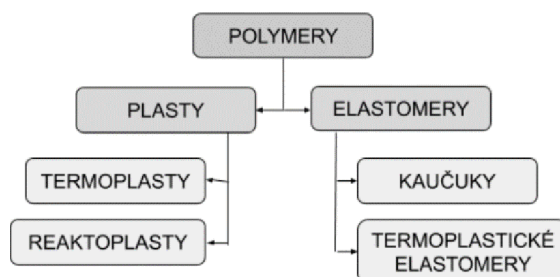
Hutněné asfaltové směsi jsou oblíbenou variantou pro kryt a horní podkladní vrstvy pozemních komunikací. Různé třídy komunikací jsou zatěžovány jiným množstvím vozidel, z toho tedy vyplývají odlišné požadavky na vlastnosti použitého materiálu při jejich výstavbách či rekonstrukcích. Jak je známo, asfaltové pojivo je viskoelastická látka, jejíž chování je závislé na okolní teplotě. Tato vlastnost způsobuje na vozovkách řadu problémů jako jsou trvalé deformace, například v podobě vyjetých kolejí, nebo v zimním období mrazové trhliny. V boji proti těmto závadám se začalo asfaltové pojivo různě modifikovat. Jednou z metod, jak pojiva zlepšit, je jejich smísení s přísadami z polymerů. Vybrané přísady a jejich zlepšující účinky v dané problematice jsou uvedeny v tabulce 1. [34,35]

Tabulka 1 - Vybrané modifikační přísady [34]

Typ přísady	Přísada	Způsob poškození vozovek				
		Trvalá deformace	Únavové trhliny	Mrazové trhliny	Působení vody	Stárnutí, oxidace
Elastomery	SB	X		X	X	
	SBS	X	X	X		
	SIS	X				
	SBR	X		X		
	Polychloropren latex	X	X			
	Přírodní pryž	X				
	ABS	X				
Plasty	EVA	X	X			
	EDPM	X				
	EA	X				
	Polyisobutylen	X				
	PE (HDPE, LDPE)	X		X		
	Polypropylen	X				

2.3.1 POLYMERY

Polymer lze zařadit do skupiny plastů nebo elastomerů. Rozdělení je znázorněno na obrázku 4. Plastomery neboli plasty se dále dělí dle toho, zda se po deformaci vrátí do původního stavu či nikoliv. K modifikaci silničního asfaltu je výhodnější využít elastomery, jelikož při standardních podmínkách nejsou tak tvrdé a křehké jako plasty. A navíc jsou schopny zabránit vzniku širšího spektra vad na vozovkách, viz tabulka 1.



Obrázek 4 - Schéma rozdělení polymerů

Z chemického hlediska se jedná o makromolekuly složené z uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku a doplněny o prvky jako je křemík, bór, fosfor aj. Velmi důležitou roli hraje struktura molekul, ta je buď lineární anebo prostorová. Dle chemické struktury nabývají polymery různých vlastností a také rozdílného chování, jako je například hořlavost. K dalšímu zlepšení vlastností lze do polymerů přidat přísady, které dokážou zvýšit jejich zpracovatelnost anebo také snížit cenu finálního materiálu. Mezi tyto přísady patří různé stabilizátory tepelné nebo světelné, barviva, změkčovadla, vyztužující plniva aj. [6,7,8,9]

2.3.1.1 PLASTY

Jedná se o polymery, u kterých vzniká trvalá deformace po působení vnější síly. Dle obrázku 4 je dále dělíme na termoplasty a reaktoplasty v závislosti na jejich chování při zahřívání. Mezi termoplasty, což jsou polymery, které s vyšší teplotou měknou a jsou tvárné, patří polyethylen, polystyren, polyvinylchlorid atd. Jejich důležitá vlastnost je ta, že při jejich zpracování se nemění jejich chemická struktura, a tedy ani jejich vlastnosti. Naopak tzv. vytvrzováním reaktoplastů vzniká zesíťovaná struktura, která dále znemožňuje jejich další zpracovatelnost ve formě taveniny. Tyto plasty jsou však velmi tvrdé a odolné. Dále budou rozebrány dva zástupci této skupiny, konkrétně polyethylen a ethylen vinylacetát. [10]

2.3.1.2 ELASTOMERY

Známým zástupcem elastomerů je pryž. Pod tímto pojmem si lze představit základní vlastnosti této skupiny polymerů. Jde tedy o velmi pružnou látku, jenž má malou tuhost a lze je opětovně deformovat bez výrazného porušení. Pryž je vyráběná vulkanizací kaučuku, kdy vzniká řídké zesíťování z příčných vazeb makromolekul. Materiály této skupiny se dále rozdělují na termoplastické elastomery (TPE) a už několikrát zmíněné kaučuky. Tak jako pryž, tak i TPE tvoří zesíťovaná struktura, avšak při působení vyšší teploty přechází do tekutého stavu a lze s nimi pracovat podobně jako s termoplasty. Z této skupiny budou popsány také dva příklady, a to pryžový granulát a styren butadien styren. [10]

2.3.2 VYBRANÉ POLYMERY K MODIFIKACI ASFALTOVÝCH POJIV

Jak už bylo zmíněno výše v textu, na redukci různých vad netuhých vozovek se asfaltová pojiva zlepšují různými polymerovými přísadami, vzniká tak polymerem modifikované pojivo označováno zkratkou PmB. Systémem specifikace těchto pojiv se zabývá norma ČSN EN 14023. K výrobě kvalitního pojiva je důležité splnit 4 základní podmínky. První podmínkou je použití kvalitního silničního asfaltu jako základního kamene, dále je podstatná kompatibilita pojiva a přísady, použití kvalitní techniky, v tomto případě se jedná o kvalitní koloidní mlýn, který zajišťuje promíchání polymeru s asfaltem, a technologii skladování zabraňující separaci a usazování polymeru na stěnách. [11]

2.3.2.1 INTERAKCE ASFALTOVÉHO POJIVA S POLYMEREM

Výsledné vlastnosti polymerem modifikovaného asfaltového pojiva neboli PmB, závisí především na způsobu a v jaké míře jsou schopné tyto dvě látky spolureagovat. Základními parametry jsou složení, polarita a molekulární hmotnost přidávaného polymeru. Je vhodné také nezapomínat na to, že reakce je ovlivňována kvalitou a složením asfaltového pojiva, které se může v menší míře lišit.

K dosažení co nejlepších výsledků je zapotřebí splnit dvě základní podmínky. První podmínkou je to, aby přidaný polymer měl parametry rozpustnosti blízké hodnotám pojiva a byl tak schopný velmi dobře spolupůsobit. Druhou podmínkou je užití přiměřeného množství určitého typu přísady. Polymery reagují v pojivu tak, že nabobtnávají a mohou tudíž vytvořit spojitý systém obklopen ostrůvky malténů s vysokou koncentrací asfalténů. Tento děj probíhá při užitné teplotě v rozmezí 160 °C až 180 °C. [12]

2.3.2.2 ROZBOR VYBRANÝCH MODIFIKÁTORŮ

Příklady vhodných zástupců k modifikaci silničních asfaltů jsou ve zkratce popsány níže. Jedná se o dva zástupce jak ze skupiny plastů, tak i ze skupiny elastomerů. Vybrané polymery jsou schopny reagovat s asfaltem a propůjčit mu své výborné vlastnosti jako pružnost či odolnost vůči vnějším zatížením.

POLYETHYLEN

PE neboli polyethylen je jeden z nejpoužívanějších polymerů vůbec. Každý se s ním setkává dennodenně. Dle jeho hustoty jej lze rozdělit na HDPE (high density PE) nebo LDPE (low density PE). Zatímco se nízkohustotní polyethylen používá zejména k výrobě různých plastových fólií, vysokohustotní PE se využívá k výrobě odolnějších a pevnějších výrobků, a to od kojeneckých láhví až po trubky inženýrských sítí. Tento polymer má mimořádnou chemickou odolnost, je nenasákavý, mrazuvzdorný, lze jej tedy použít i v extrémně nízkých teplotách, je odolný proti vzniku napěťových trhlin a má dlouhou životnost. [13,14]

Protože je polyethylen lidmi hojně používán, nastává problém se vznikajícím odpadem, který lze však recyklovat. Existují různé varianty, jak PE využít k modifikaci silničního asfaltu. Jednou z těchto možností je výroba PE proužků, jenž jsou přidávány do asfaltu jako modifikátor. [15]

EVA

Pod zkratkou EVA se ukrývá látka s chemickým názvem ethylen vinylacetát. Jde o kopolymer, u kterého má výrazný vliv na vlastnosti právě druhá složka, vinylacetát, kdy se s vyšším množstvím snižuje podíl krystalické fáze. Existují tři základní typy tohoto materiálu dle obsahu VA, všechny jsou však nepromokavé, odolné vůči ultrafialovému záření a jsou zejména odolné proti trhlinám. EVA má široké spektrum využití, najdeme jej například v obuvi, v hračkách, v lékařství ve formě implantátů a v neposlední řadě také ve stavebnictví. [12,16]

Díky svým vlastnostem je EVA schopen značně zlepšit reologické vlastnosti silničního asfaltu tak jak je představeno například v práci Rheological characteristics of EVA modified bitumen and their correlations with bitumen concrete properties. V této práci zkoušeli 3 silniční asfalty s různou gradací do kterých přidali 0-9 % EVA. Ukázka výsledků je zobrazena na obrázku 5. [17]

EVA properties and penetration grade (PG), softening point T_{R88} , penetration index (PI), high temperature (135 °C) viscosity, relaxation times λ and τ and activation energies E_a of neat bitumens and EVA-PMBs.

Bitumen	EVA (%)	Sample label	PG (1/10 mm)	T_{R88} (°C)	PI(-)	Viscosity (cP)	λ (s)	τ (s)	E_a (J/mol)	
A	0	EVA-A	85.4	44.3	1.5	333	6.00E-01	6.95E-02	1.79E+05	
	3	EVA3-A	67.1	50.0	-0.5	526	4.91E+00	4.28E-02	2.54E+05	
	6	EVA6-A	50.6	57.9	0.6	874	8.17E+00	6.95E-02	2.24E+05	
	9	EVA9-A	42.4	62.1	1.0	987	2.11E+01	4.83E-01	2.17E+05	
B	0	EVA-B	57.3	47.9	1.4	471	8.00E-01	1.83E-01	1.93E+05	
	3	EVA3-B	35.3	57.2	-0.3	893	7.36E+00	7.85E-01	2.16E+05	
	6	EVA6-B	31.8	66.1	1.1	2031	1.52E+01	2.98E-01	1.85E+05	
	9	EVA9-B	28.3	69.9	1.5	3672	3.20E+01	8.85E+00	2.86E+05	
C	0	EVA-C	46.1	52.7	0.7	823	1.20E+00	2.98E-01	1.69E+05	
	3	EVA3-C	29.9	61.2	0.1	1753	1.08E+01	7.85E-01	1.94E+05	
	6	EVA6-C	26.3	69.6	1.3	3184	2.98E+01	8.85E+00	2.30E+05	
	9	EVA9-C	22.1	74.3	1.6	5338	3.85E+01	1.44E+01	2.04E+05	
EVA properties ^a	Glass transition temperature (°C)							Softening temperature (°C)		
	-33							120		

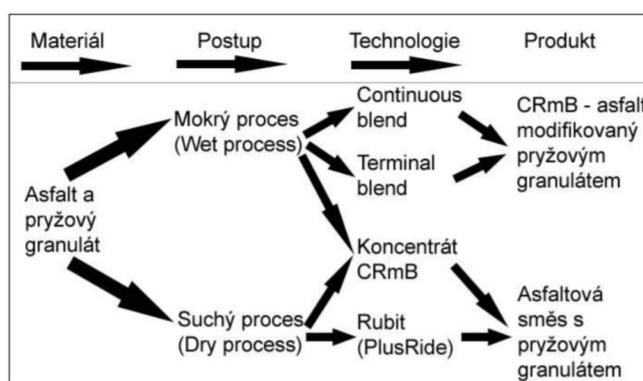
^a As indicated by the specification sheet provided by the manufacturer.

Obrázek 5 - Výsledky modifikací EVA [17]

PRYŽOVÝ GRANULÁT

Pryžový granulát je vyráběn granulováním/mletím starých pneumatik. Modifikace pryžovým granulátem je tedy součástí recyklačního cyklu. Jednou z nevýhod tohoto materiálu je to, že nelze zaručit totožné složení, jelikož zdrojem je sběr pneumatik různých výrobců. Přidáním tohoto modifikátoru lze zvýšit viskozitu, lepivost a stejně jako u ostatních přísad také měnit reologické vlastnosti asfaltu. Vedlejší účinek této modifikace na vlastnost finální asfaltové směsi je snížení hlučnosti, což je momentálně jednou s důležitých parametrů při budování komunikací ve městech.

Úprava tímto granulátem je provedena několika způsoby. Tento proces je shrnut na obrázku 6. U CRmB (Crumb Rubber modified Bitumen) je při jakékoliv metodě velmi důležité zabránit usazování granulátu. [18]



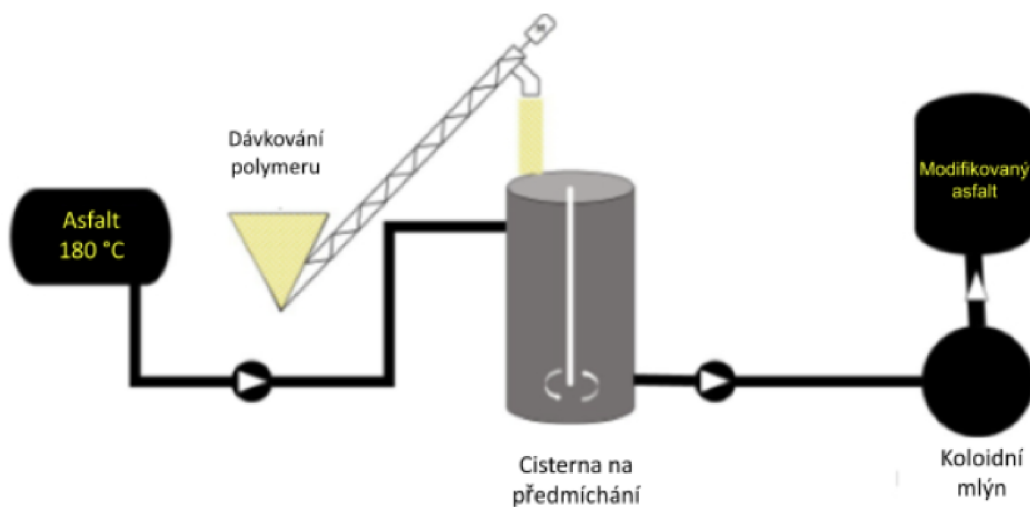
Obrázek 6 – Druhy použití pryžového granulátu v asfaltových směsích [18]

SBS

Styren butadiene styren nebo styren butadien (SB) je svými kvalitami momentálně jeden z nejvýznamnějších asfaltových modifikátorů. Je velmi pravděpodobné, že pokud je na pozemní komunikaci využit PmB, tak právě s touto přísadou. Díky úpravě silničního asfaltu s SBS dokáže vozovka s tímto pojivem lépe odolávat vzniku trvalých deformací a trhlinám vznikajících únavou materiálu nebo při nízkých teplotách. Tento materiál bude dále rozebrán v další kapitole *Použité materiály*, jelikož se jedná o látku, která je základem této práce. [19]

2.3.3 VÝROBA PMB

PmB lze získat z modifikační stanice, jejíž schéma je zobrazeno na obrázku 7. Skládá se ze zásobníků silničních asfaltů, zásobníku na přísady, nádrže s předmíchanou směsí, koloidního mlýnu a zásobníku na finální polymerem modifikovaný asfalt. Systém je ještě doplněn o různá měřicí zařízení, např. průtokoměry. Srdcem celého systému je však už zmíněný koloidní mlýn, díky kterému se zajišťuje dokonalé rozptýlení polymeru v asfaltu. [20,21]



Obrázek 7 - Schéma výroby modifikovaného asfaltu [20]

Další metodou, jak modifikovat asfaltové pojivo je metoda, kdy se přidá přísada v průběhu výroby asfaltové směsi na obalovně. V tomto případě je vhodné dávat pozor na kvalitní promíchání a také zajistit dostatečné dávkování přísady, aby byla schopna zreagovat, a naopak hotové směsi nezhoršila požadované vlastnosti.

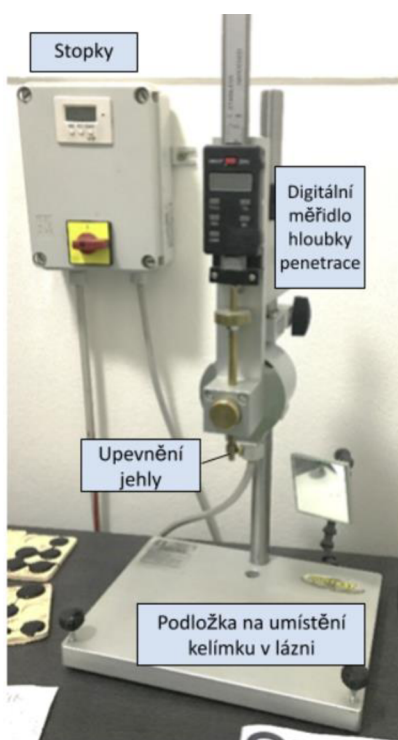
Pozitivem této metody je jednoznačně to, že urychlí celý proces výroby a není dále nutné zabraňovat usazování polymeru v pojivu pomocí dodatečného míchání.

3 ZKUŠEBNÍ METODY

Ke zhodnocení míry modifikace byly v práci využity jak konvenční (penetrace jehlou, bod měknutí, vratná duktilita), tak i funkční zkoušky (DSR, MSCR). Postup provádění jednotlivých zkoušek jsou popsány níže.

3.1 PENETRACE JEHLOU

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 1426: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. Jde o základní zkoušku pojiva, kdy se zjistí jejich gradace a lze je poté definovat jako různé třídy silničních asfaltů. [22]



Obrázek 8 - Penetrometr

Postup zkoušky je rozdělen do tří kroků. Nejdříve se musí připravit vzorek nalitím zahřátého zkoušeného pojiva do čistého kelímku na analytické vzorky (obrázek 9). Množství v kelímku se odhadne tak, aby výška hladiny vzorku v kelímku byla alespoň o 10 mm vyšší, než je předpokládaná hloubka vniknutí jehly. Po prvotním zchladnutí

(na teplotu mezi 15 °C až 30 °C bez deformace hladiny) se vloží kelímek do temperovací lázně s konstantní teplotou 25 °C minimálně na 60 min. Na konci temperování se kelímek se vzorkem vloží do přenosné misky s vodou z lázně, tak aby byl zcela ponořen a zamezilo se změně teploty v průběhu zkoušky. Samotné měření se provádí v penetrometru, který zajistí, že jehla zatížená závažím o hmotnosti 100 g proniká do vzorku po dobu 5 s. Na obrázku 8 je zobrazen penetrometr se základním popisem.

V této zkoušce je konzistence vzorku pojiva vyjádřena v penetračních jednotkách, tedy jako hloubka proniknutí jehly v desetinách milimetrů. 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 v penetrometru uvolní jehla a provádí se měření. 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. [23]



Obrázek 9 - Kelímky se zkoušenými pojivy

3.2 BOD MĚKNUTÍ (KROUŽEK A KULIČKA)

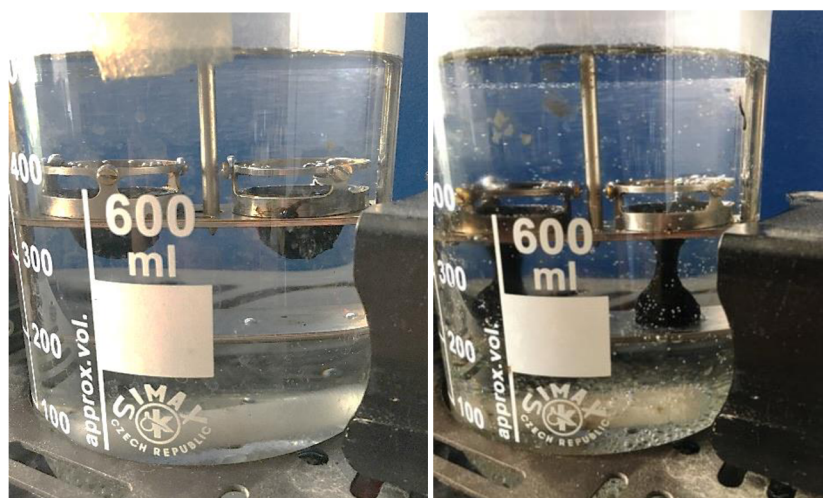
Zkouška se provádí dle normy ČSN EN 1427: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička. Touto zkouškou se stanoví horní hranice oboru plasticity, kdy se pojivo mění z plastické látky na viskózní.

Ve zkratce, podstata metody spočívá v určení teploty, kdy kovová kulička položená na vrstvě asfaltového pojiva v kroužku prodlouží tuto vrstvu na délku 25 mm. Tento proces je zobrazen na obrázku 11.



Obrázek 10 - Příklad na měření metodou KK

Postup měření se opět skládá ze tří základních kroků, příprava vzorků, temperování a měření. Jako první se připraví dva kroužky, které umístíme na odlévací destičku a naplníme zahřátým pojivem, které po vychladnutí začistíme vhodným nástrojem tak, aby povrch vzorku byl zarovnaný s vrchní hranou kroužků. Takto připravené vzorky vložíme do měřící sestavy se středícím zařízením pro kuličky. Měřící sestavu doplňuje kádinka naplněná



Obrázek 11 - Postupný propad kuliček

odvzdušněnou studenou vodou nebo glycerínem. Hladina lázně by měla být ve výšce (50 ± 3) mm nad horním okrajem kroužků. V závislosti na druhu lázně se celá sestava zchladí na počáteční měřící teplotu (u vodní na (5 ± 1) °C, u glycerínové přibližně na 30 °C). Po temperaci se před vložením kádinky se sestavou do měřícího zařízení vloží do středícího zařízení ocelové kuličky s průměrem $(9,50 \pm 0,05)$ mm a hmotnosti $(3,50 \pm 0,05)$ g. Je nutné, aby kuličky měly stejnou teplotu jako je v kádince.

Takto připravenou soustavu umístíme co nejrychleji do zkušebního přístroje (obrázek 10). Voda v lázni se zahřívá rychlostí 5 °C/min a je zároveň míchána zespolu. 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. [24]

3.3 VRATNÁ DUKTILITA

Měření vratné duktility také patří mezi jednu z konvenčních zkoušek. Provádí se u modifikovaných pojiv dle normy ČSN EN 13398 - Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů. Podstatou zkoušky je zhodnotit elastické chování pojiva po přidání modifikátorů.



Obrázek 12 - Vratná duktilita - příprava vzorku

K provedení této zkoušky se vyrobí vzorky odlité ve formě viz obrázek 12. Po nalití pojiva do formy se vzorek nechá vychladnout a přebytek se seřízne vhodným nástrojem obdobně jako při přípravě kroužků. Takto seřízlý vzorek má uprostřed plochu příčného řezu rovnu $(1 \pm 0,2)$ cm². Před samotným spuštěním duktilometru je nutné zajistit temperování vzorků při teplotě $(25 \pm 0,5)$ °C po dobu 90 min. Toto lze provést ve vodní lázni v duktilometru, teplota tak bude u vzorku i měřícího přístroje stejná. Poté se z formy vzorku uvolní podkladní destička a bočnice a asfaltové tělísko se vloží na vodící desky. Spuštěním duktilometru se tělísko začne protahovat rychlostí $(50 \pm 2,5)$ mm/min až na konečnou délku protažení L (200 ± 1) mm. Následně se vzorek uprostřed přestřihne na dvě polovlákná a po 30 minutách se změří mezera d mezi konci těchto polovlákn.

Výsledná míra v mm se použije ve vzorci:

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

který vede k výpočtu vratné duktility, R_E . Výsledek je dán v absolutních procentech a je zaokrouhlen na celé číslo. V případě, že se vlákno přetrhne ještě před dosažením požadovaného protažení, lze i tento výsledek zhodnotit. V takovém případě se jako délka protažení uvede délka protažení v momentě, kdy se vlákno přetrhlo. Tento postup je možno provést jen pokud přetrhnutí nebylo způsobeno špatným provedením vzorků. [25] Na obrázku 13 je vidět vzorek před přetrhnutím.



Obrázek 13 - Vratná duktilita - přetržení vzorku

3.4 DYNAMICKÝ SMYKOVÝ REOMETR

Dynamický smykový reometr neboli DSR je přístroj, jímž se měří komplexní modul ve smyku (G^*) a úhel fázového 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.“ [26]



Obrázek 14 - Dynamický smykový reometr

Ke zkoušce se připraví pár vzorků vlitím do formy nebo vytvořením plátek 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 (obrázek 14), 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.

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. [26]

3.5 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, pomocí kterých je možné usuzovat na náchylnost pojiva k deformaci.

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 procentuálního 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. Příklad 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. Měřící destičky se předehřejí 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 měřící 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 měřící 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 zatěhuje 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.

Celkově se měří 10 cyklů dotvarování a zotavení při zatížení 0,100 kPa a poté se bez přerušování pokračuje dalšími 10 cykly, ale se smykovým napětím 3,200 kPa. Jeden vzorek lze použít pouze jednou k naměření těchto 20 cyklů. Příklad 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. [27]

4 CÍL PRÁCE

Výsledkem této práce bude zhodnocení vlivu přítomnosti rychle reagujícího SBS polymeru na změnu vlastností asfaltového pojiva třídy 50/70. Bude vytvořeno několik vzorků, které se budou lišit různými podmínkami míchání přísady do pojiva. K hodnocení vlastností se provede celkem 5 typů zkoušek vhodných pro modifikované asfalty dle platných norem. Jedná se o penetraci jehlou, stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička, stanovení vratné duktility, stanovení komplexního smykového modulu v DSR a zkoušku opakovaného smykového dotvarování a zotavení (MSCR). Postup prací bude následovný:

- ↳ vytvoření vzorků s různým množstvím přísady, teplotou zpracování a časem míchání
- ↳ provedení konvenčních zkoušek pojiv
- ↳ prvotní zhodnocení a výběr 4 vhodných vzorků ke zkouškám pojiv v DSR
- ↳ provedení zkoušek v dynamickém smykovém reometru
- ↳ kompletní zpracování výsledků
- ↳ finální zhodnocení různých kombinací míchání přísady do pojiva

5 POUŽITÉ MATERIÁLY

5.1 ASFALTOVÉ POJIVO 50/70

Asfalt je koloidní látka organického charakteru. Skládá se z asfalténů, pevné částice, a malténů, tekutá složka. Díky tomu, že se vyrábí rafinací ropy, která má různý původ, má také výsledný asfalt různé složení, které má ve výsledku vliv na samotné vlastnosti pojiva. Tento poměr lze zjistit chemickou analýzou nazvanou SARA, což je zkratka ze zastoupených frakcí - Saturate (saturáty), Aromatic (aromáty), Resin (pryskyřice), Asphaltene (asfaltény). Z chemického hlediska se tedy asfalty můžou lišit dle výrobce, ovšem ke sjednocení do různých tříd asfaltových pojiv musí splňovat kritéria dána platnou normou EN 12591 – Asfalty a asfaltová pojiva. [22,28]

Tabulka 2 - Specifikace pro silniční asfalty [22]

Vlastnosti	Metoda zkoušení	Jednotka	20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220
Penetrace při 25 °C	EN 1426	0,1 mm	20 – 30	30 – 45	35 – 50	40 – 60	50 – 70	70 – 100	100 – 150	160 – 220
Bod měknutí	EN 1427	°C	55 – 63	52 – 60	50 – 58	48 – 56	46 – 54	43 – 51	39 – 47	35 – 43
Odolnost proti stárnutí při 163 °C	EN 12607-1									
Zbýlá penetrace		%	≥ 55	≥ 53	≥ 53	≥ 50	≥ 50	≥ 46	≥ 43	≥ 37
Zvýšení bodu měknutí, max. – přesnost 1 nebo		°C	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 9	≤ 10	≤ 11
Zvýšení bodu měknutí, max. – přesnost 2 ^a		°C	≤ 10	≤ 11	≤ 11	≤ 11	≤ 11	≤ 11	≤ 12	≤ 12
Změna hmotnosti ^b (absolutní hodnota)		%	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 0,8	≤ 1,0
Bod vzplanutí	EN ISO 2592	°C	≥ 240	≥ 240	≥ 240	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 230	≥ 220
Rozpustnost	EN 12592	%	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0

^a V případě volby přesnosti 2, musí být tato spojena s bodem lámavosti podle Fraasse a/nebo s penetračním indexem měřeným na nezestárnutém pojivu (viz tabulka 1B).

^b Změna hmotnosti může být kladná nebo záporná.

Dle normy lze asfaltová pojiva rozřadit do různých tříd podle výsledků zkoušky penetrace jehlou. V tabulce 2 je zobrazena specifikace pro silniční asfalty z normy EN 12591. Asfaltové pojivo s gradací 50/70 patří mezi běžné silniční asfalty hojně využívané nejen v České republice k výstavbě, rekonstrukcím a opravám netuhých vozovek.

K dalšímu zpracování bylo použito pojivo od firmy OMV (OMV Bitumen 50/70). Jedná se o pojivo vyráběno destilací ropy, která může pocházet z různých částí světa. Totožné složení tedy nelze 100 % garantovat, ovšem vlastnosti požadované normou ano. Specifikace výrobku je popsána v příloze 1. [29]

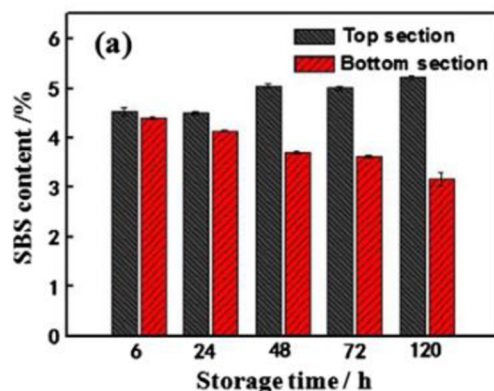
5.2 RYCHLE REAGUJÍCÍ SBS

Kopolymer styren-butadienu-styrenu (SBS) je bez debat jeden z nejpoužívanějších modifikátorů na dnešním trhu. Výroba modifikovaného asfaltového pojiva s SBS probíhá v modifikačních stanicích, kde jsou schopni tuto přísadu smíchat s pojivem téměř dokonale díky výkonným přístrojům jako je například koloidní mlýn. Samotné míchání nezpůsobuje výrobě problémy, ale následné skladování a přeprava ano. SBS se ve skladovacích nádobách může oddělovat od asfaltu. Tento problém je částečně vyřešen dodatečným mícháním v zásobnících. Další problém nastává s teplotní citlivostí SBS, kdy při delším skladování a udržování vyšších teplot modifikovaného pojiva dochází k degradaci tohoto polymeru. Spojení obou problémů bylo řešeno v práci z roku 2016, kdy se odborníci zabývali hodnocením stability skladování modifikovaného asfaltu kopolymerem SBS. Na obrázku 15 jsou zobrazeny výsledky zkoušky bodu měknutí u tří vzorků PmB s 4 % hm. SBS. Přestože v práci poukazují na to, že je tato zkouška nedostatečná k plnohodnotnému zhodnocení, jelikož dochází k degradaci SBS, lze vidět rozdíl mezi vzorky odebraných z vrchní části a vzorky ze spodní části nádob. Navíc tento rozdíl se zvětšuje s delší dobou skladování. K přesnějšímu výsledku použili další metodu, elektrochemickou analýzu. Na obrázku 16 je graficky zobrazen výsledek pro jeden ze tří vzorků, kdy se s délkou skladování za horka oddělovalo SBS a tak ve vrchní části naměřili vyšší obsah této přísady než ve spodní části. [30,31]

Softening point test results of SBS-modified asphalt samples after hot storage.

Sample	Storage time (h)	Softening point (°C)				
		6	24	48	72	120
A	Top section	80.6	80.7	84.1	84.4	85.7
	Bottom section	80.2	80.2	66.4	65.5	64.1
	ΔT (°C)	0.4	0.5	17.7	18.9	21.6
B	Top section	78.9	75.9	76.1	75.5	75.3
	Bottom section	77.8	74.9	75.5	75.0	74.0
	ΔT (°C)	1.1	1.0	0.6	0.5	1.3
C	Top section	85.8	87.7	80.2	76.9	75.5
	Bottom section	83.7	81.5	76.2	74.7	74.1
	ΔT (°C)	2.1	6.2	4	2.2	1.4

Obrázek 15 - Hodnoty bodu měknutí [31]



Obrázek 16 - Výsledek elektrochemické analýzy [31]

Přestože zatím nebylo plně prokázáno, že by tato degradace přísady výrazně snižovala kvalitu asfaltových směsí s tímto pojivem, existuje zde motivace vytvořit funkční přísadu na bázi SBS, kterou by bylo možné přidat přímo v obalovnách. Předěšlo by se jednak problému separace, tak i delšímu vystavování vyšším teplotám. Jeden z takových produktů je také vzorek rychle reagujícího SBS použitého v této práci. Oproti běžné přísadě SBS se tento vzorek už na první pohled liší ve formě, ve které se používá. Běžné SBS se používá nejčastěji ve formě peletek. Zkoušené SBS je ve formě prášku, jak je také vidět na obrázku 17. [30,32]



Obrázek 17 - Vlevo zkoušené SBS, vpravo peletky SBS

Proces přidání SBS přímo do asfaltové směsi na obalovnách je také podpořena několikaletou zkušeností z Dánska. V článku 15 years experience adding polymer powder directly into the asphalt mixer se zabývali podobnými si polymery SBS a SIS. U obou byl potvrzen jejich zlepšující účinek na pojivo. Navíc u extrahovaného pojiva z 15 let staré vozovky zjistili, že pojivo zlepšené polymerem SIS má pomalejší proces stárnutí než běžné pojivo bez úpravy. [36]

5.3 POSTUP ÚPRAVY ZÁKLADNÍHO POJIVA

Během práce vzniklo celkem 9 vzorků s různými kombinacemi míchání přísady. Kombinace byly sestaveny ze 3 proměnných – doby míchání, teploty míchání a obsahu SBS. Jako první proběhly zkoušky na samotném pojivu jako referenčním vzorku. Dále se vytvořily vzorky modifikovaného pojiva. Nejdříve se čisté pojivo zahřálo na požadovanou teplotu, poté se přidalo dané množství SBS a míchalo se ručně po určitou dobu. V případě, kdy se jednalo o vzorek, který se měl míchat 60 s nebo 600 s, proces míchání probíhal ručně. V jiném případě se použil přístroj s otáčkoměrem a bylo zároveň nutné zajistit sestavu ohříváčem, aby vzorek nezchladl. Proces tohoto míchání je zobrazen na obrázku 13.



Obrázek 18 - Sestava k míchání vzorku

Práce s přísadou byly obecně bez problémů. Ovšem nevýhodou byl vznik shluků, které je možné vidět také na obrázku 12. Tyto větší shluky, bylo nutné odstranit před vmícháním, aby bylo možné docílit co nejlepšího rozmíchání v pojivu. I přesto se SBS nedokázalo za krátkou dobu 600 s plně rozptýlit a vznikaly tak drobná zrníčka v pojivu, které lze vidět na obrázku 14. Při zahřátí samotného prášku SBS vznikla lepivá plastická hmota, která byla zachycena na obrázku 15.



Obrázek 19 - Zrníčka SBS v pojivu



Obrázek 20 - SBS po zahřátí

Samostatnou úlohou bylo vytvořit vzorek, který by simuloval alespoň částečně proces zrání v zásobnících na PmB. Vznikly tak další 4 vzorky, které byly postupně odebírány po 1 hodině z nádoby umístěné v laboratorní sušárně, aby se udržela teplota pojiva a napodobilo se tak skladování za horka. Doba míchání byla na počátku 600 s a poté se míchalo 60 s každou půlhodinu. V tabulce 3 jsou shrnuty vzorky, které byly dále podrobeny zkouškám penetrace jehlou, bodu měknutí a vratné duktility. Z těchto vzorků se následně dle výsledků konvenčních zkoušek vybrali 4 zástupci, kteří se dále použili při zkouškách v dynamickém smykovém reometru.

Tabulka 3 - Souhrn vytvořených vzorků pojiv

Zkušební vzorky													
										Zrání v sušárně			
Vzorek č.	1	2	3*	4*	5	6	7*	8*	9	10	11	12	13
SBS [wt %]	0	5					7,5			5			
Doba míchání [s]	0	60	60	600	1800	600	60	600	600	Doba zrání vzorků [hod]			
											1	2	3
Teplota [°C]	160		180			200	180		200	180			
* vzorky vybrané ke zkoušce v DSR													

Celý proces od míchání vzorků až po jejich odzkoušení probíhalo v laboratoři na Ústavu pozemních komunikací fakulty stavební VUT. V příloze 2 je vložen souhrn

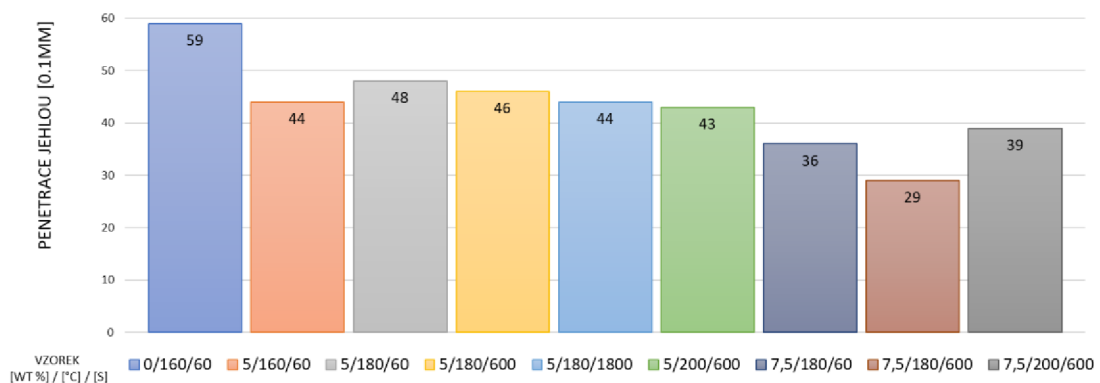
výsledků jednotlivých prací v laboratoři vč. poznámek z průběhu práce se vzorky a jejich měření.

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V následující kapitole jsou zpracovány hodnoty z provedených zkoušek. Pro lepší orientaci je většina výsledků zobrazena v grafech. Celkem bylo provedeno 27 zkoušek konvenčních a 12 zkoušek v dynamickém smykovém reometru.

6.1 PENETRACE JEHLOU

Tato zkouška byla provedena dle postupu uvedené v normě ČSN EN 1426, která byla shrnuta v kapitole 4.1. Jedná se o základní zkušební metodu asfaltových pojiv, kdy se měří viskozita vzorku při 25 °C. Čím je asfalt viskoznější, tím je hodnota penetrace nižší.



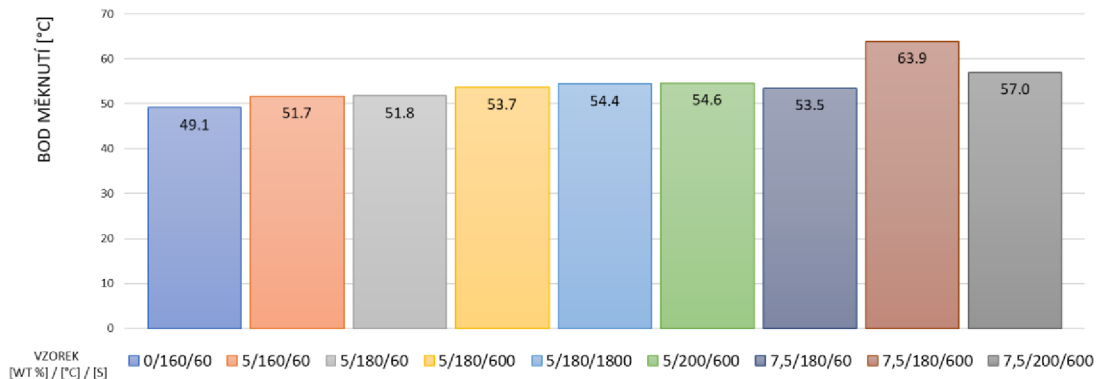
Graf 1 -Hodnoty z měření penetrace jehlou

Na grafu 1 lze vidět, že u vzorků, jenž byly modifikované SBS, se snížila hodnota penetrace oproti čistému pojivu o 11 až 30 (0,1 mm). To bylo způsobeno zahuštěním pojiva modifikátorem. Nejnižší hodnota, 29 (0,1 mm), se naměřila u vzorku se 7,5 hm. % SBS, které se míchalo po dobu 600 s při teplotě 180 °C. Vzorky, které zrály v sušárně, nebylo možné podrobit této zkoušce, jelikož je náročná na množství potřebného pojiva.

6.2 BOD MĚKNUTÍ

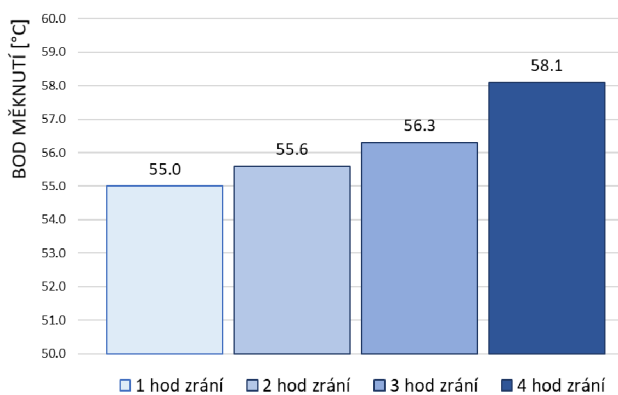
Výsledná hodnota této zkoušky určuje horní hranici oboru použitelnosti asfaltového pojiva. Měření probíhá dle předepsaného postupu uvedeného v bodě

4.2. této práce. Kromě přípravy vzorku se jednalo o automatický průběh zkoušky v přístroji pro zkušební metodu kroužek a kulička. Na obrázku 16 lze vidět, že v přístroji se najednou měří dva vzorky, naměřená hodnota levé a pravé kuličky nesmí být u modifikovaného asfaltu rozdílná o víc než 2 °C (u běžného o 1 °C). Pokud je tato podmínka splněna, lze tyto dvě hodnoty zprůměrovat.



Graf 2 - Hodnoty z měření bodu měknutí

Při porovnání výsledků této metody (viz graf 2) nejvíce vyčnívá vzorek, který měl nejnižší hodnotu penetrace jehlou. Rozdíl mezi tímto vzorkem se 7,5 hm. % rychle reagujícího SBS a čistým pojivem je 14,8 °C, což je značný rozdíl. Ostatní vzorky zvýšily bod měknutí o 2,6 – 7,9 °C. Nejvyšší hodnota je tedy téměř dvojnásobná oproti druhému nejvyššímu výsledku, kdy rozdíl mezi těmito vzorky je pouze teplota míchání. Na následujícím grafu 3 jsou zobrazeny výsledky pro vzorky zrajících v sušárně, které obsahovaly 5 % rychle reagujícího SBS. Bod měknutí vzrostl po 4 hodinách zrání o 9 °C oproti hodnotě bodu měknutí čistého pojiva.



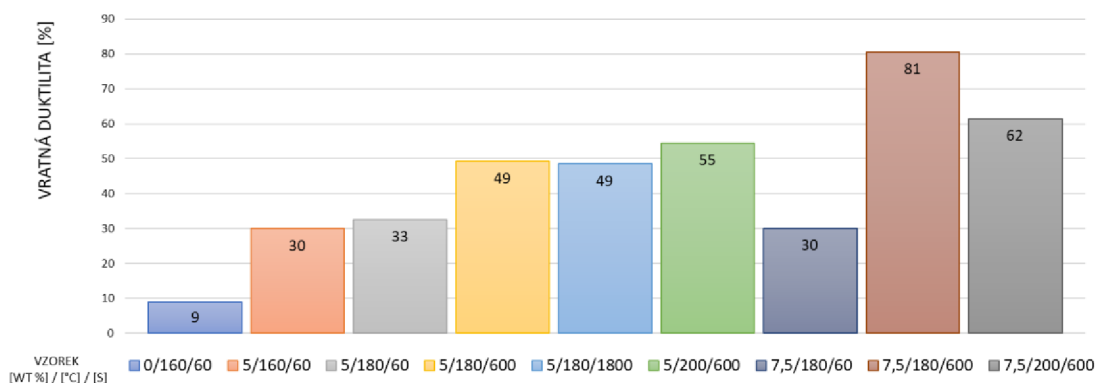
Graf 3 - KK - vzorky po zrání v sušárně



Obrázek 21 - KK - Propad kuliček

6.3 VRATNÁ DUKTILITA

Zkouška, která byla popsána v kapitole 4.3., je důležitá pro zhodnocení elastického chování pojiva. Měření probíhalo v přístroji Ductimeter, ve kterém se vzorky před samotným spuštěním zkoušky zároveň temperovaly na teplotu 25 °C.



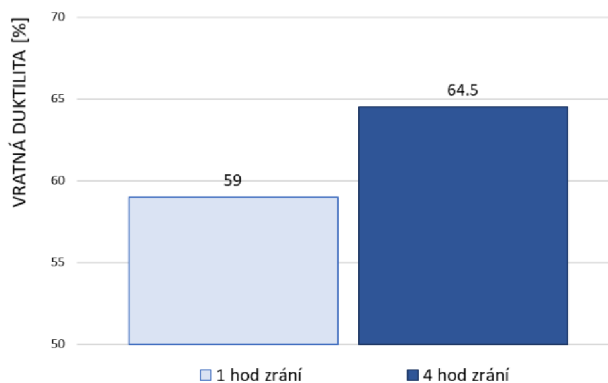
Graf 4 - Hodnoty z měření vratné duktility

Během měření se před dosažením požadovaného protažení 200 mm přetrhlo několik vzorků. Jednalo se konkrétně o vzorek pojiva zobrazeného v grafu 4 na 2., 3. a 7. pozici zleva. Tyto vzorky měly stejnou dobu míchání 60 s a jejich výsledné hodnoty vratné duktility byly z celého měření ty nejnižší. Z toho vyplývá, že největší vliv na hodnotu vratné duktility, a tudíž pružnost pojiva má doba míchání rychle reagujícího SBS s pojivem. Nejvyšší hodnota vratné duktility 81 % se naměřila opět u vzorku se 7,5 hm. % rychle reagujícího SBS. Nižší hodnota u posledního vzorku mohlo způsobit počáteční poškození asfaltu vysokou teplotou. Na obrázku 17 je zobrazen stav polovláken vzorku po půlhodině od přestřihnutí vlákna. Původní tvar průřezu si zachoval vzorek (7,5 hm. %/180 °C/600 s), u kterého bylo naměřeno zmíněných 81 % vratné duktility (na obrázku 17 uprostřed). Lze tedy vidět, že takto modifikovaný asfalt je schopný lépe odolávat trvalým deformacím.



Obrázek 22 – Polovlákná vzorků 7,8 a 9 (zleva)

Ze vzorků zrajících v sušárně při teplotě 180 °C byly odzkoušeny pouze 2 zástupci, vzorek po 1 hodině zrání a vzorek po 4 hodinách zrání. Během 3 hodin zrání se hodnota vratné duktility zvýšila o 5,5 %. Konečná hodnota 64,5 % u vzorku s 5 % SBS je srovnatelná s hodnotou u vzorku se 7,5 % SBS a míchání při 200 °C po dobu 600 s.



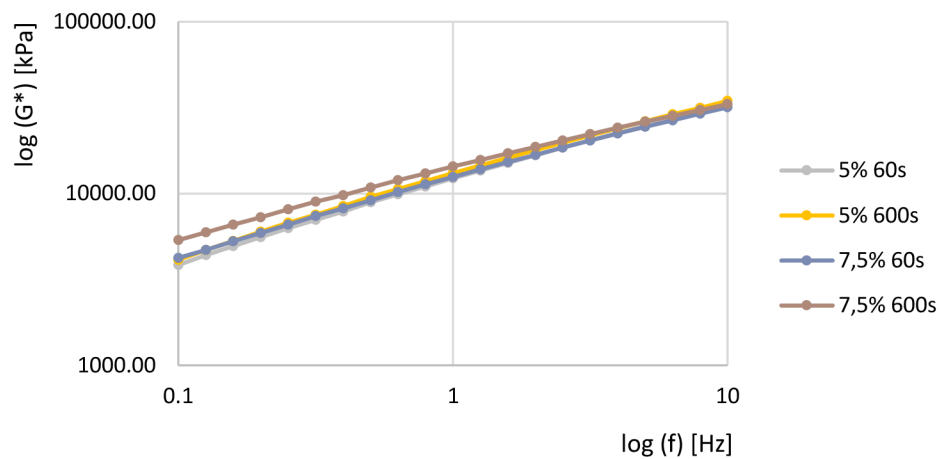
Graf 5 - Vratná duktilita - vzorky po zrání v sušárně

6.4 DSR

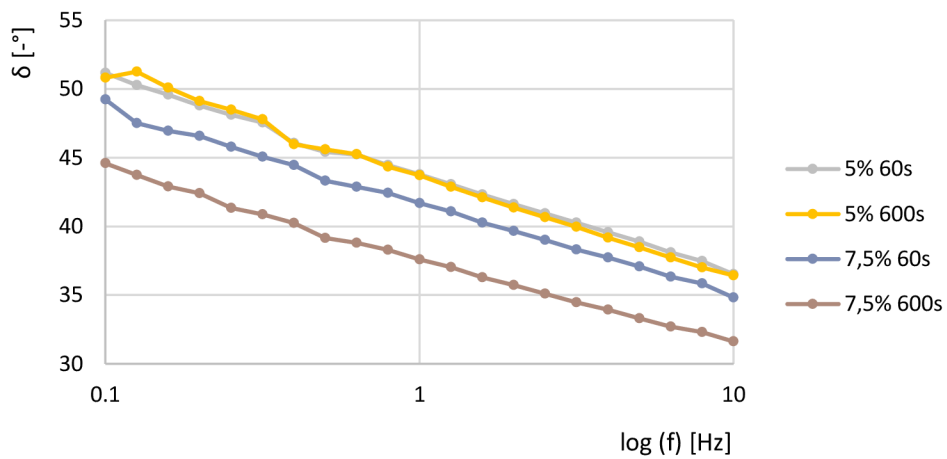
Po zhodnocení výsledných hodnot ze zkoušek penetrace jehlou, bodu měknutí a vratné duktility byly vybrány 4 vzorky pro měření v dynamickém smykovém reometru. Jako hlavní vzorek se vybral ten, který měl v předchozích měření nejlepší hodnoty. Poté se k tomu vybrali další tři zástupci, aby byl vytvořen systém, ve kterém jsou podmínky výroby vzorků srovnatelné. Byl tedy vybrán vzorek se 7,5 hm. % rychle reagujícího SBS, s dobou míchání 600 s a teplotou míchání 180 °C. Jako doplňující vzorky byly vybrány ty, u kterých byla teplota míchání také 180 °C a rozdíl byl tedy v obsahu modifikátoru (5 hm.% nebo 7,5 hm. %) a době míchání (60 s nebo 600 s).

Příprava vzorků a samotné měření probíhalo dle normy ČSN EN 14770. K měření byla použita geometrie 8 mm a 25 mm. Následně byly naměřené hodnoty zpracovány do grafů 4 až 17. Jsou zpracovány vztahy mezi komplexním modulem ve smyku G^* a frekvencí f , úhlem fázového posunu δ a frekvencí a také mezi komplexním modulem ve smyku a úhlem fázového posunu. Doplněny jsou o grafy závislostí mezi G^* a δ na teplotě při zatěžovací frekvenci 1,59 Hz.

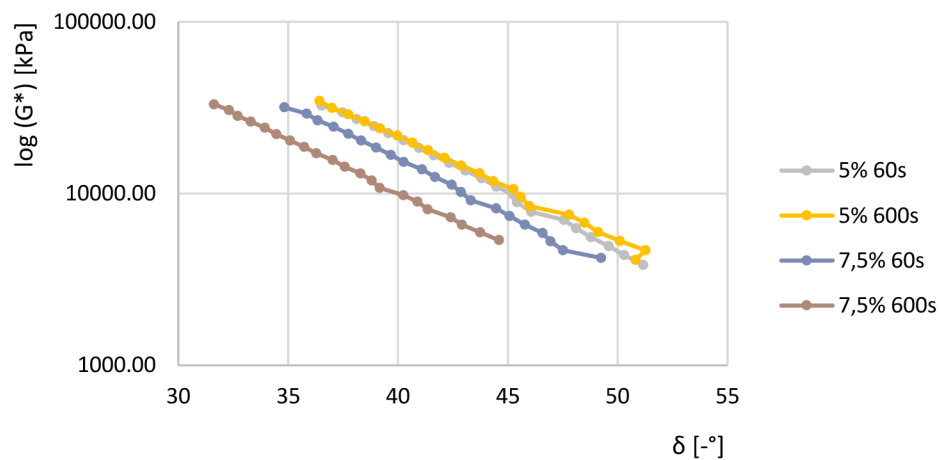
Zkušební geometrie 8 mm:



Graf 6 - DSR - Závislost G^* na frekvenci při 10 °C (geo. 8 mm)

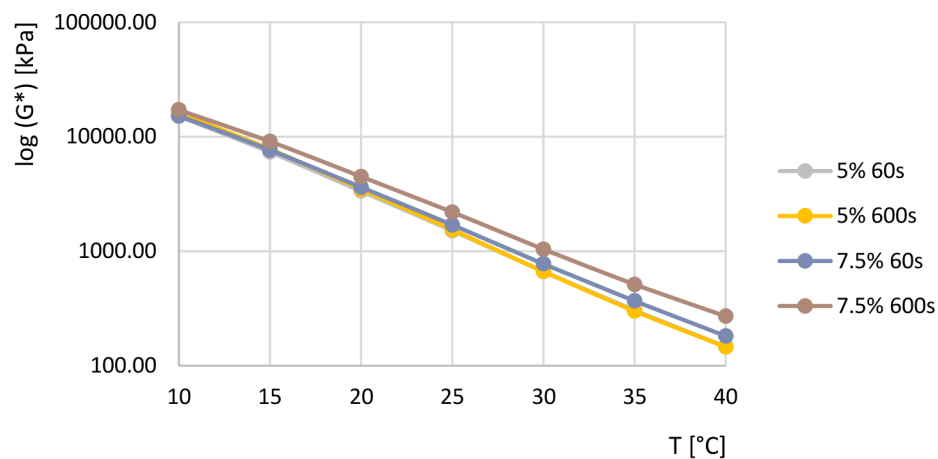


Graf 7 - DSR - Závislost δ na frekvenci při 10 °C (geo. 8 mm)

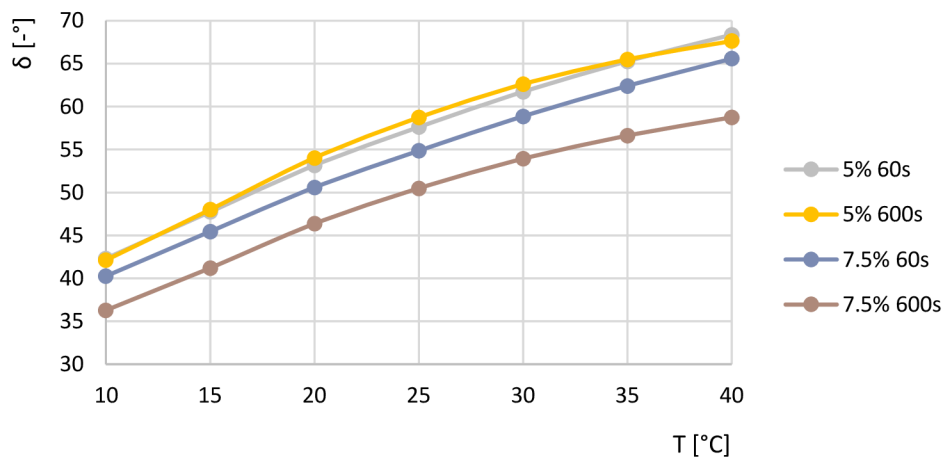


Graf 8 - DSR - Závislost G^* na δ při 10 °C (geo. 8 mm)

Z předcházejících grafů lze vyčíst, že vzorek se 7,5 % SBS a dobou míchání 600 s je z vybraných vzorků nejtuzší. Tento vzorek má nejnižší úhel fázového posunu a zároveň nejvyšší komplexní modul ve smyku. Rozdíly mezi vlastnostmi jednotlivých pojiv, určené při této nízké teplotě, jsou ovšem malé. Na grafu 9 a 10 jsou pak zobrazeny křivky znázorňující závislost G^* a δ na zkušební teplotě při frekvenci 1,59 Hz. Se zvyšující teplotou klesá komplexní modul ve smyku a při tom se zvyšuje úhel fázového posunu.



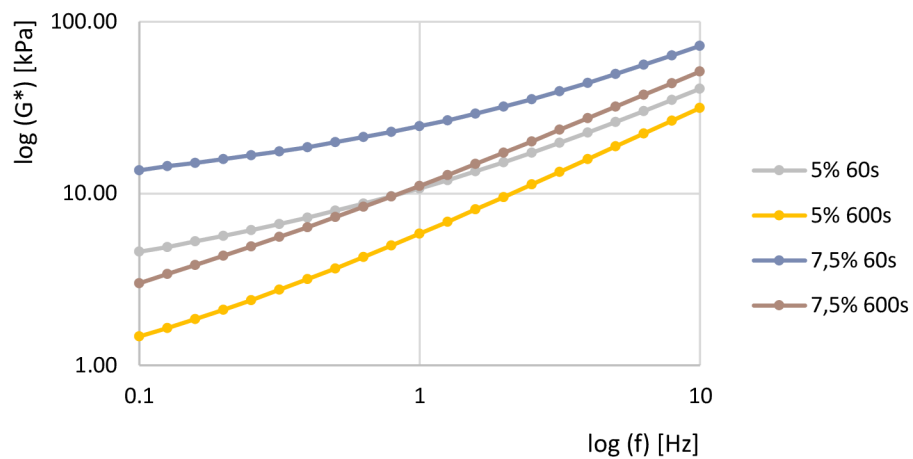
Graf 9 - DSR - Závislost G^* na zkušební teplotě při 1,59 Hz (geo. 8 mm)



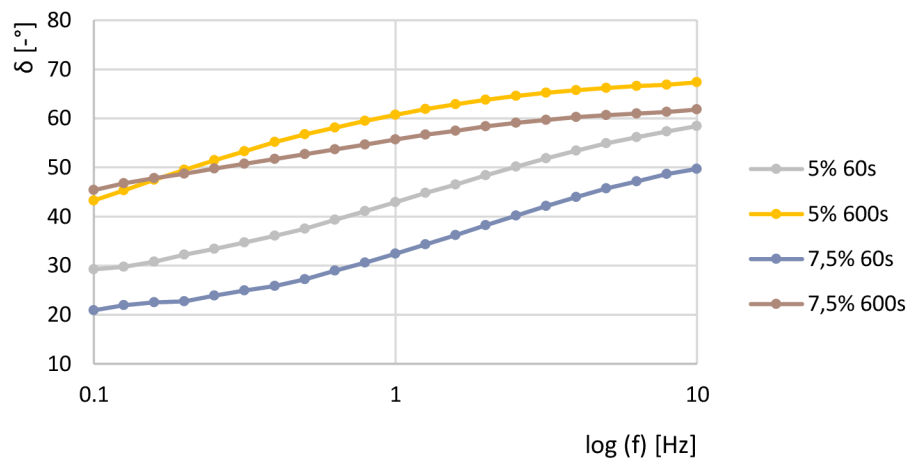
Graf 10 - DSR - Závislost δ na zkušební teplotě při 1,59 Hz (geo. 8 mm)

U těchto nízkých teplot zkoušky nejsou viditelné výrazné známky modifikace jednotlivých pojiv. Všechny průběhy jsou v grafech téměř lineární. Grafy pro ostatní teploty měření (15-40 °C) jsou vloženy do příloh této práce.

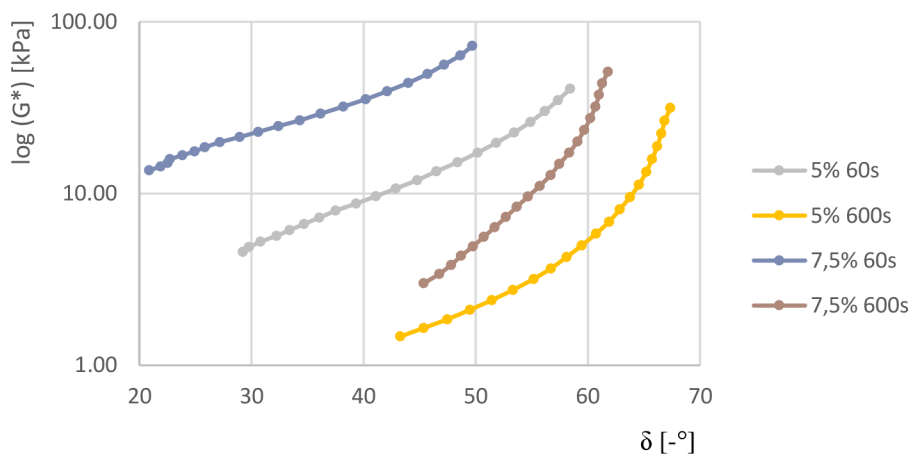
Zkušební geometrie 25 mm:



Graf 11 - DSR - Závislost G^* na frekvenci při 60 °C (geo. 25 mm)

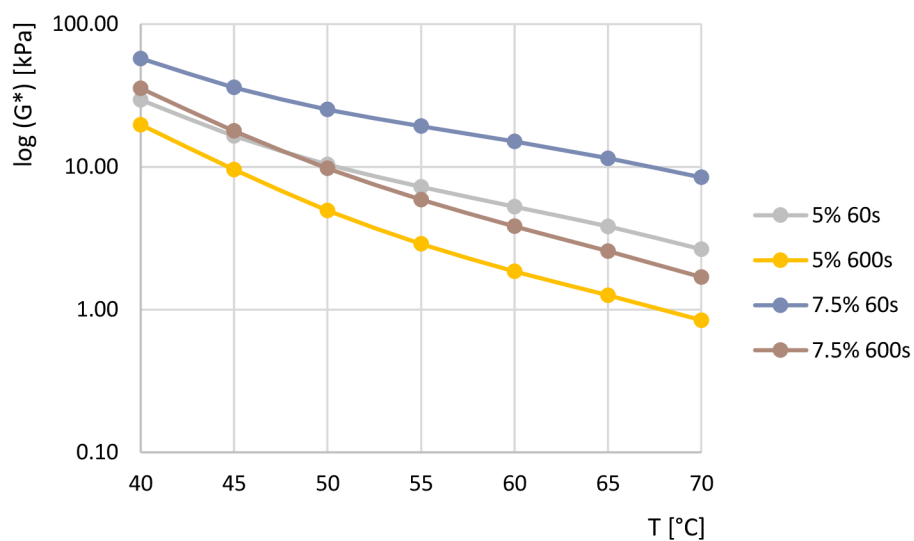


Graf 12 - DSR - Závislost δ na frekvenci při 60 °C (geo. 25 mm)

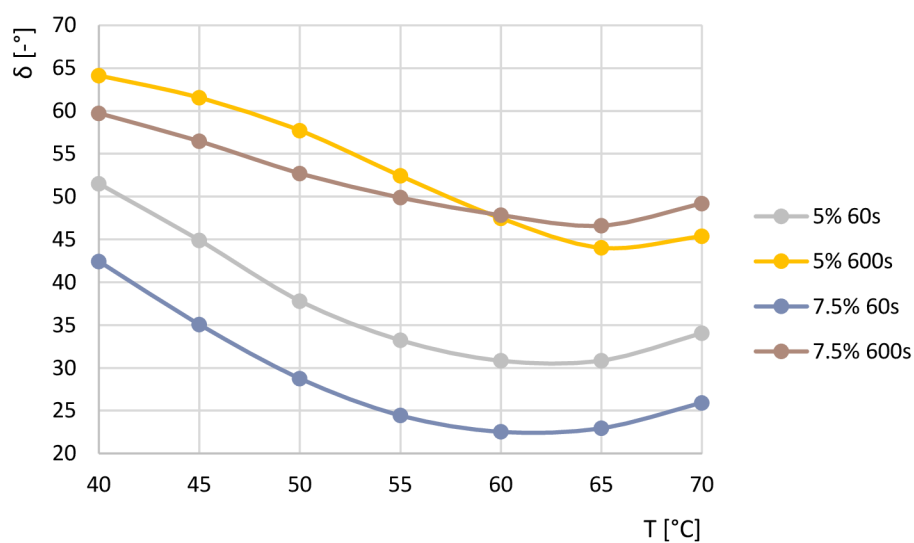


Graf 13 - DSR - Závislost G^* na δ při 60 °C (geo. 25 mm)

Při použití geometrie 25 mm, a tedy zkušební teplotě v rozmezí 40 °C až 70 °C jsou rozdíly mezi vzorky viditelnější než při měření s 8 mm geometrií (10 °C až 40 °C). Křivky jsou už zakřivenější a nejsou si tak podobné. V tomto případě je tužší vzorek se 7,5 % SBS s dobou míchání 60 s. Vzorek, který byl nejtušší za nižších teplot je v tomto vyhodnocení druhý nejtušší. V grafu 14 je vidět, že s rostoucí teplotou klesá komplexní modul ve smyku. V grafu 15 lze však vidět, že křivky úhlu fázového posunu sice na počátku klesají, ale s rostoucí teplotou kolem 60-65 °C opět rostou. To je běžné právě v případě modifikovaných pojiv.

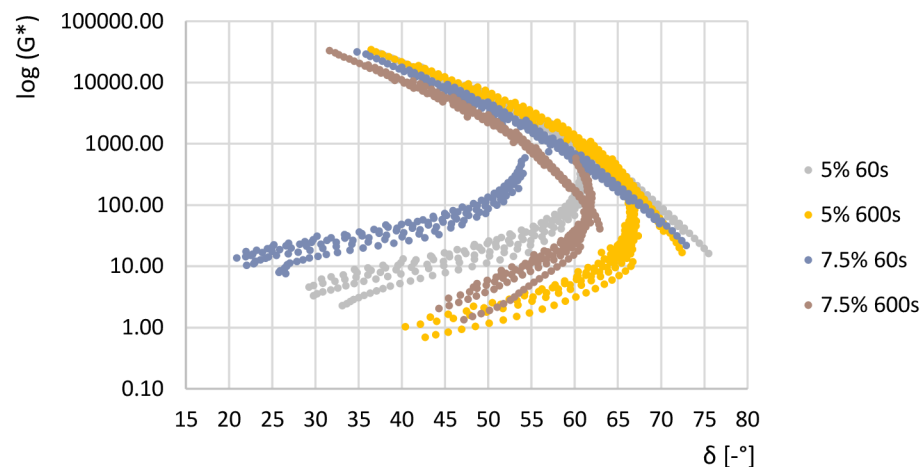


Graf 14 - DSR - Závislost G^* na zkušební teplotě při 1,59 Hz (geo. 25 mm)



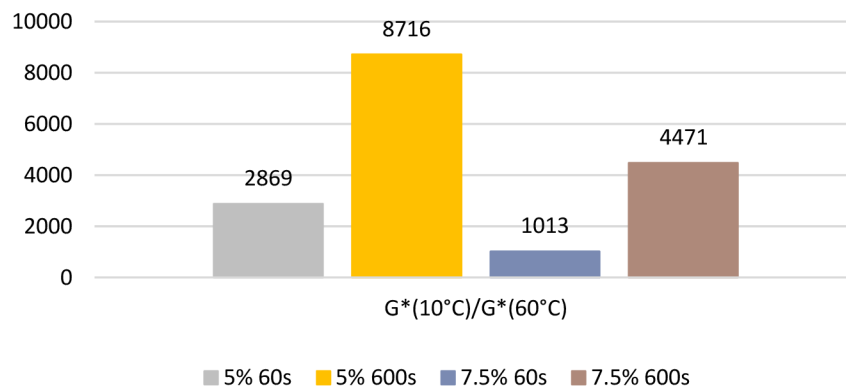
Graf 15 - DSR - Závislost δ na zkušební teplotě při 1,59 Hz (geo. 25 mm)

Blackův diagram (geometrie 8 mm i 25 mm) je další metoda, jak graficky znázornit výsledky z DSR, viz graf 16. Jedná se o graf závislosti komplexního modulu ve smyku v logaritmickém měřítku na úhlu fázového posunu. Zakřivený tvar znázorňuje přítomnost modifikační přísady v asfaltu. Zatímco jsou při vyšších teplotách měření s geometrií 25 mm výsledky v zakřiveném tvaru, při nižších teplotách jsou výsledky v plošším tvaru a jsou velmi podobné jako u nemodifikovaných asfaltů.



Graf 16 - DSR - Blackův diagram z hodnot měření obou geometrií

Podíl komplexních modulů ve smyku při teplotě 10 °C a 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz poukazuje na teplotní citlivost pojiv. Pojiva, která byla míchána pouze 60 s jsou méně citlivá než ta pojiva, jež byla míchána 600 s. Výsledky jsou zobrazeny v grafu 17. Výsledné hodnoty mohly být ovlivněny množstvím nerozpuštěných částic SBS, protože při pohledu na výsledky s předcházejících zkoušek bylo předpokládáno, že vzorky v Blackově diagramu a také v grafu teplotní



Graf 17 - DSR - Poměr hodnot G^* při 10 °C a 60 °C (1,59 Hz)

citlivosti budou zobrazeny opačně. Tedy nejvyšší teplotní citlivost by měl vzorek s 5 % SBS a dobou míchání 60 s a nejnižší citlivost vzorek se 7,5 % SBS a dobou míchání 600 s.

6.5 MSCR

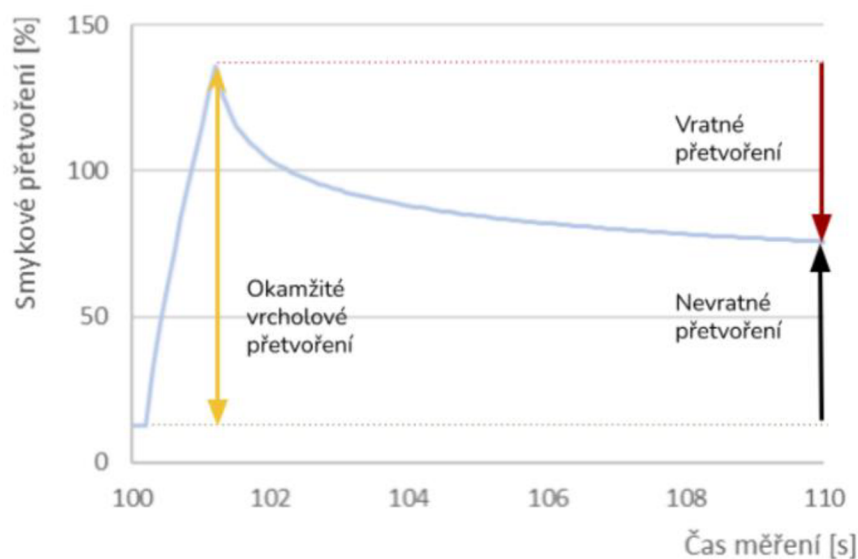
Zkouška MSCR popsaná v kapitole 3.5 je schopná lépe zhodnotit odolnost pojiva vůči tvorbě trvalých deformací. Na obrázku 18 je graficky zobrazen průběh přetvoření během 1 cyklu zatížení. Z této zkoušky lze získat data, ze kterých lze vypočítat hodnota přetvoření (1), a poté i průměrné elastické zotavení R (2) a nevratnou smykovou poddajnost J_{nr} (3) dle vzorců:

$$\varepsilon = \frac{\theta \cdot r}{t} \quad [-] \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_p} \cdot 100 \quad [%] \quad (2)$$

$$J_{nr} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \frac{\varepsilon_n}{T} \quad \left[\frac{1}{kPa} \right] \quad (3)$$

- ε přetvoření (r=vratné, p=vrcholové, n=nevratné)
- θ úhlové pootočení [rad]
- r poloměr geometrie [mm]
- t tloušťka vzorku [mm]
- T hodnota smykového napětí [kPa]



Obrázek 23 - Přetvoření v průběhu MSCR

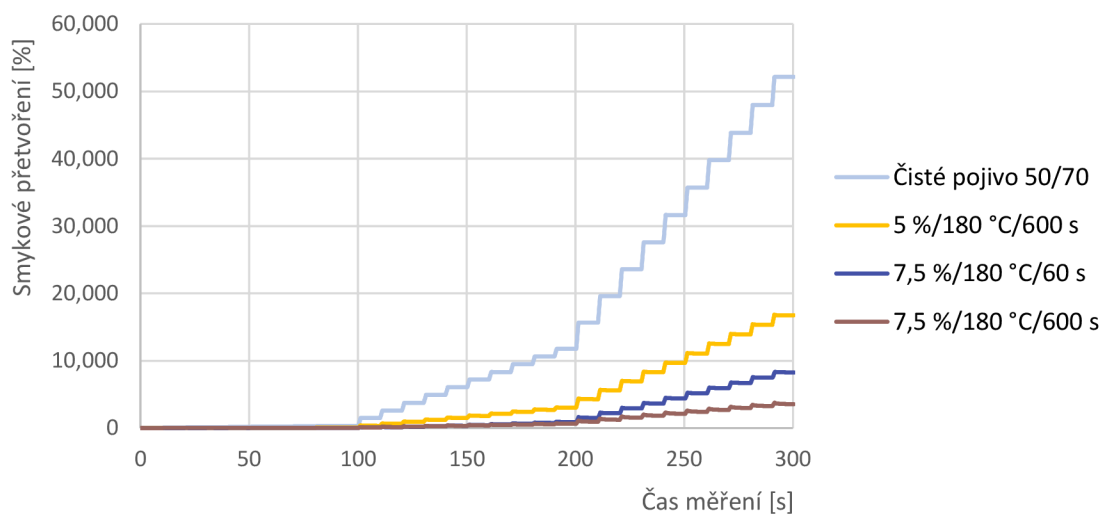
K měření MSCR byly vybrány 4 vzorky. Byly odzkoušeny stejné vzorky jako u předcházející zkoušky v DSR. Pouze vzorek s 5 hm.% rychle reagujícího SBS s dobou míchání 60 s byl nahrazen. Místo něj byl odzkoušen vzorek čistého pojiva. Ve finále je tak možné vidět rozdíl mezi nemodifikovaným a modifikovaným pojivem. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 4 a jsou doplněny o graf 20 - Průběh zatěžovacích cyklů a grafy 21-22, ve kterých je zaznamenáno prvních 10 s při zatěžování smykovým napětím 0,1 kPa a 3,2 kPa. Jeden celý cyklus je složen z 1 s zatěžování a z 9 s odlehčení vzorku. Jedno měření tedy obsahovalo celkem 30 cyklů (10 x 0,1 kPa, 10 x 3,2 kPa, 10 x 10 kPa) při 60 °C. Pro vyhodnocení jsou důležité hodnoty při zatěžování smykovým napětím 0,1 kPa a 3,2 kPa.

Tabulka 4 - Výsledky zkoušky MSCR

	1	2	3	4
	Čisté pojivo	5 /180/600	7,5/180/60	7,5/180/600
	Pozn. označení ve tvaru hm.%/°C/s			
$J_{nr,0,1 \text{ kPa}}$ [%]	3,26	0,57	0,05	0,12
$J_{nr,3,2 \text{ kPa}}$ [%]	3,57	0,92	0,27	0,19
$J_{nr,10 \text{ kPa}}$ [%]	4,04	1,37	0,74	0,29
$J_{nr, \text{ diff, (3,2-0,1)}}$ [%]	9,4	61,9	467,0	53,1
$R_{0,1 \text{ kPa}}$ [kPa ⁻¹]	1,79	39,06	84,19	64,51
$R_{3,2 \text{ kPa}}$ [kPa ⁻¹]	0,33	19,23	45,98	53,14
$R_{10 \text{ kPa}}$ [kPa ⁻¹]	0,06	6,10	11,94	42,31
$R_{\text{diff, (3,2-0,1)}}$ [%]	81,7	50,8	45,4	17,6

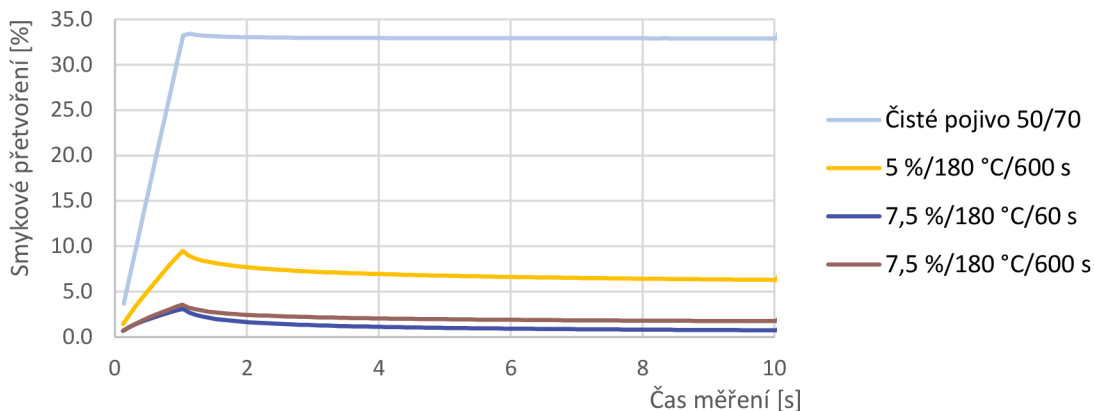
Výsledné hodnoty vycházely podle předpokladu. S vyšší modifikací i dobou míchání se zvyšovala hodnota R a snižovala hodnota J_{nr} . Menší výkyv byl naměřen u vzorku 3, kdy při zatížení 0,1 kPa vykazoval o něco málo lepší výsledky než u vzorku

4, který by měl být nejlépe modifikován. Taktéž vznikl u tohoto vzorku 3 v hodnotě výpočtu rozdílu mezi hodnotami nevratné smykové poddajnosti $J_{nr,diff}$. Hodnota 467 % je oproti výsledkům ostatním modifikovaným pojiv téměř desetinásobná. Ačkoliv je tato zkouška přizpůsobena reálnějším podmínkám, tedy vyššímu zatížení a teplotě, je zapotřebí brát ohled na možné nesrovnalosti při průměrování výsledků z 10 cyklů. Výhrady ke zpracování výsledků lze nalézt v článku Vliv vybraných vstupních parametrů na naměřené hodnoty zkoušky MSCR. V závěru příspěvku autoři shrnují určité nedostatky, které ovlivňují celkové vyhodnocení a upozorňují také na problém měření při nízkém zatížení: „V případě, že je přetvoření velmi malé (na hranici rozsahu měřicího přístroje) není možné vypočítat dostatečně přesné hodnoty. Tento problém nastává zejména při nízké teplotě provádění zkoušky nebo při nízkém napětí (0,1 kPa), kdy je rozdílnost mezi jednotlivými cykly vysoká. Navíc při napětí 0,1 kPa je korelace s asfaltovými směsmi (odolnost vůči tvorbě trvalých deformací) sama o sobě nízká.“ [33]

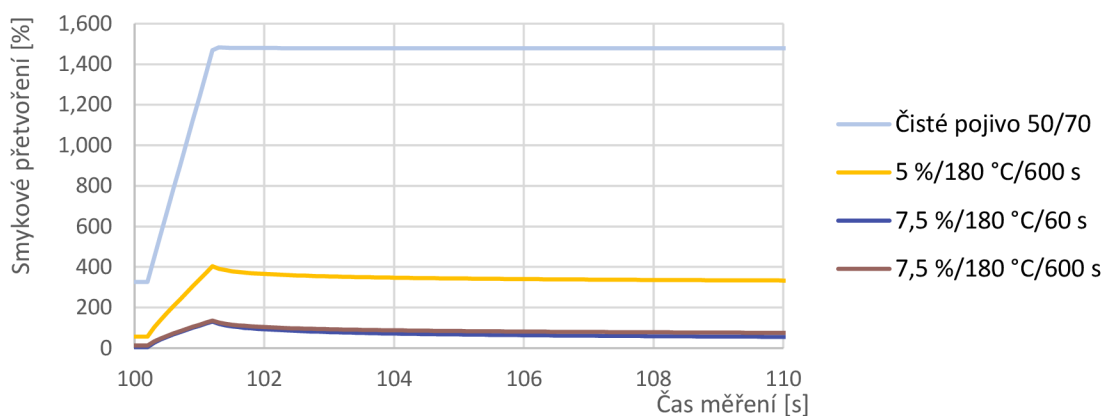


Graf 18 - MSCR - Průběh zatěžovacích cyklů

V grafu MSCR je vidět značný rozdíl mezi nemodifikovaným a modifikovaným pojivem. Na následujících grafech 21 a 22 jsou zobrazeny první cykly pro smykové napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa. I přes desetinásobně menší dobu míchání mají vzorky se 7,5 % SBS při smykovém zatížení do 3,2 kPa velmi podobný průběh a hodnoty smykového přetvoření. To znamená, že obsah rychle reagujícího SBS může mít větší vliv na výsledné vlastnosti než čas míchání.

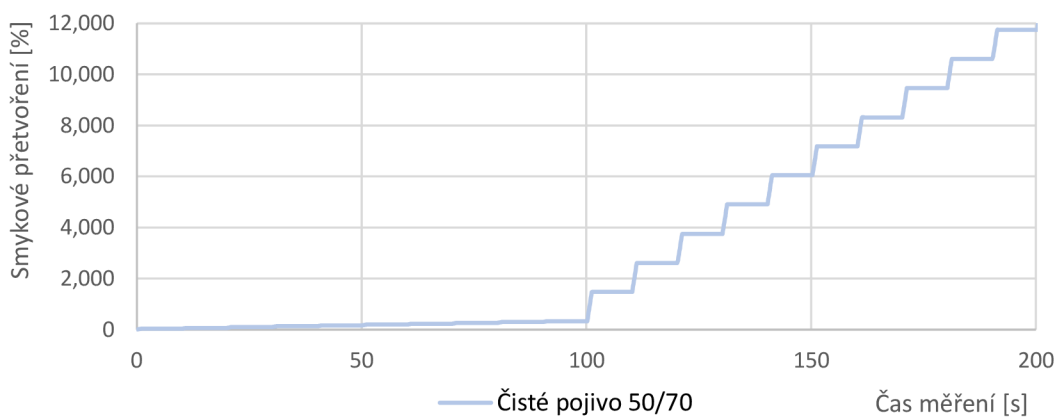


Graf 19 - MSCR - 1. cyklus smykovým zatížením 0,1 kPa

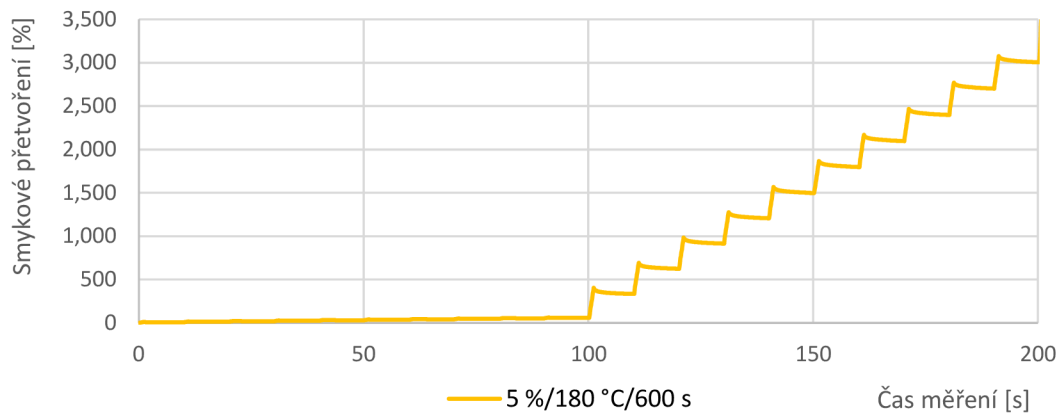


Graf 20 - MSCR - 1. cyklus smykovým zatížením 3,2 kPa

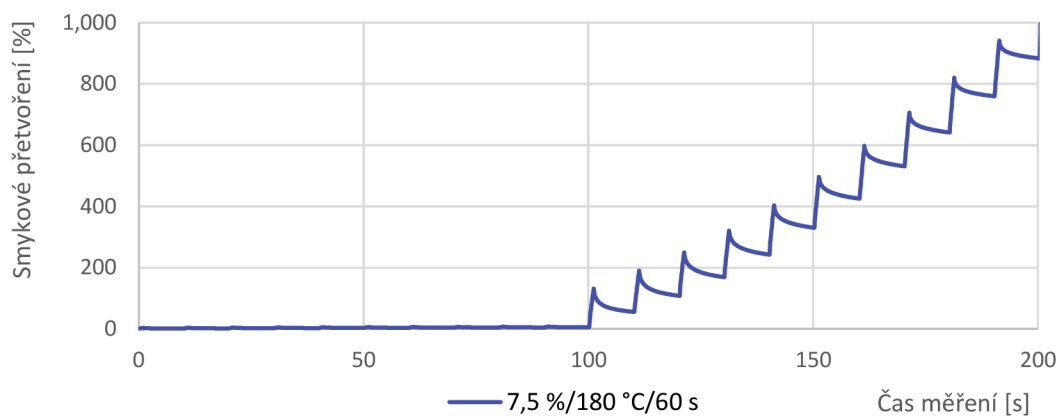
V následujících grafech 21-24 jsou zobrazeny průběhy měření jednotlivých vzorků. Lze vidět postupnou změnu tvarů křivek s narůstající hodnotou vratného přetvoření.



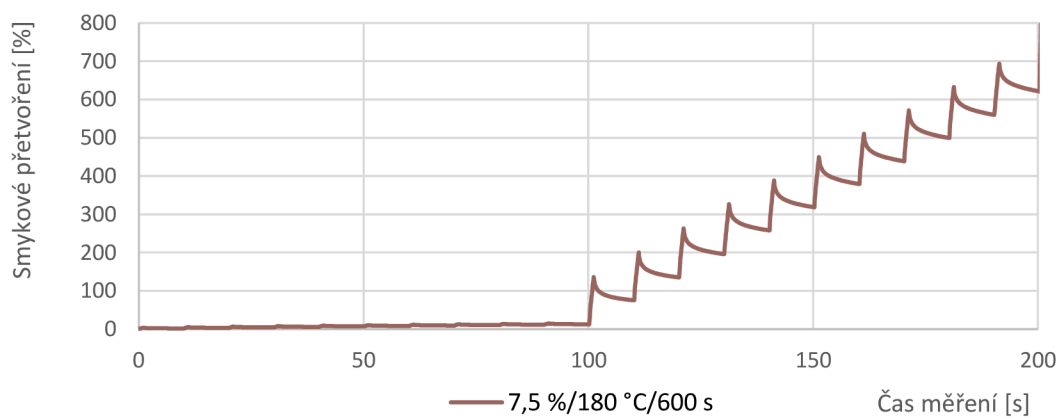
Graf 21 - MSCR - Průběh měření čisté pojivo



Graf 22 - MSCR - průběh měření (5%/180°C/600s)



Graf 23 - MSCR - průběh měření (7,5%/180°C/60s)



Graf 24 - MSCR - průběh měření (7,5%/180°C/600s)

7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zhodnotit vliv rychle reagujícího SBS polymeru na změnu vlastností asfaltového pojiva třídy 50/70. Zkoušky byly provedeny se vzorky, které byly vyrobeny s různými kombinacemi míchání. Lišily se v obsahu SBS, teplotě míchání a době míchání. Celkem se podrobilo zkouškám 9 vzorků a 4 doplňující vzorky, které napodobily proces zrání modifikovaného asfaltu při vysoké teplotě.

Jako první byla provedena zkouška penetrace jehlou. V této metodě bylo zjištěno, že vzorky s vyšším obsahem SBS mají nižší hodnotu penetrace. Také u vzorků, které obsahovaly stejné množství SBS a byly míchány při stejné teplotě, se snižovala výsledná hodnota penetrace s rostoucí dobou míchání. Nejnižší penetrace 29 (0,1 mm) se naměřila u vzorku se 7,5 hm.% rychle reagujícího SBS, teplotou míchání 180 °C a dobou míchání 600 s. Na druhou stranu nejvyšší hodnota byla naměřena u čistého pojiva a to 59 (0,1 mm).

Dále se pokračovalo se stanovením bodu měknutí. V tomto případě měl nejvyšší hodnotu bodu měknutí 63,9 °C vzorek, který měl také nejnižší hodnotu penetrace jehlou. Nejnižší bod měknutí byl naměřen u čistého pojiva. Jakákoliv kombinace míchání SBS zlepšila asfaltové pojivo zvýšením horní hranice oboru použitelnosti asfaltu, některé jen nepatrně o pár stupňů, jiné výrazněji.

Při provádění zkoušky vratné duktility se 3 vzorky přetrhly ještě před dosažením požadovaného protažení 200 mm. Týkalo se to vzorků, jež se míchaly pouze 60 s. Nejlepší výsledek vratné duktility (81 %) se naměřil opět u vzorku se 7,5 hm.% rychle reagujícího SBS, teplotou míchání 180 °C a dobou míchání 600 s.

Pomocí zobrazení naměřených hodnot komplexního smykového modulu a fázového úhlu z DSR v grafech je vidět, že se modifikace pojiva při nižších teplotách 10-40 °C tak výrazně neprojevuje jako tomu bylo u měření s teplotami v rozmezí 40-70 °C. Pojiva se 7,5 % SBS jsou tužší než ty s 5 %. Při zhodnocení teplotní citlivosti

bylo zjištěno, že na tuto vlastnost má vliv doba míchání vzorků. Vzorky s dobou míchání 60 s jsou méně citlivé než ty, které se míchaly 600 s. Pokud by se porovnával rozdíl pomocí obsahu SBS, tak menší teplotní citlivost mají vzorky s vyšším obsahem modifikátoru. Takové výsledky byly překvapivé, jelikož se dle předchozích výsledků očekávalo, že hodnoty budou v jiném pořadí. Tedy vzorek se 7,5 % obsahem SBS a dobou míchání 600 s bude méně teplotně citlivý než vzorek s 5 % obsahem SBS a dobou míchání pouze 60 s. Je pravděpodobné, že za tímto výsledkem stojí množství nerozpuštěných částic SBS v asfaltu, které ovlivnily průběh měření.

Jako poslední se provedla zkouška MSCR v dynamickém smykovém reometru při teplotě 60 °C. V celkovém pohledu na výsledky se dá říct, že s rostoucím obsahem rychle reagujícího SBS a také s rostoucí dobou míchání SBS s asfaltem se zvyšuje odolnost asfaltu vůči tvorbě trvalých deformací.

Výše uvedenými zkouškami bylo prokázáno, že rychle reagující SBS polymer má na asfaltové pojivo zlepšující (modifikační) účinky. Výsledky z tohoto měření napovídají, že by tento rychle reagující modifikátor mohl dobře fungovat už při krátkém míchání bez speciálního koloidního mlýnu a bez dalšího zrání. Přesto je nutné podotknout, že výsledky mohly být ovlivněny určitou nehomogenitou materiálu. Dalším vhodným krokem by mělo být ověření těchto závěrů pomocí zkoušek provedených přímo na asfaltových směsích, kde by se porovnaly vlastnosti asfaltové směsi obsahující tento rychle reagující SBS s vlastnostmi asfaltové směsi se standardním polymerem modifikovaným asfaltem. Jelikož se jedná o polymer, který je při vyšších teplotách dost plastický a lepivý, bylo by vhodné jej přidat až po částečném zamíchání kameniva s pojivem, aby se zabránilo přilnutí SBS prášku ke kamenivu.

8 ZDROJE

- [1] Obalovny - BETON SERVER - BETON, VŠE Z BETONU A VŠE PRO BETON V ČR. BetonServer - BETON SERVER - BETON, VŠE Z BETONU A VŠE PRO BETON V ČR [online]. Copyright © 2018 betonserver.cz, Všechna práva vyhrazena [cit. 26.12.2021]. Dostupné z: <https://www.betonserver.cz/obalovny-asfalt/obalovny>
- [2] ACP 240-340 CONTIMIX | Ammann Group. Region and Language | Ammann [online]. Copyright ©2021 [cit. 07.12.2021]. Dostupné z: <https://www.ammann.com/cz-cz/plants/asphalt-plants/continuous-asphalt-mixing/acp-contimix>
- [3] ABP 240-320 UNIVERSAL | Ammann Group. Region and Language | Ammann [online]. Copyright ©2021 [cit. 07.12.2021]. Dostupné z: <https://www.ammann.com/cz-cz/plants/asphalt-plants/batch-asphalt-mixing/abp-universal>
- [4] ARMY CORPS OF ENGINEERS a FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *HOT-MIX ASPHALT PAVING HANDBOOK 2000: AC 150/5370-14A,, Appendix 1 (FAA)* [online]. 2000 [cit. 2021-12-06]. ISBN 0309071577. Dostupné z: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/150-5370-14a/150_5370_14a_app1_part_ii_a.pdf
- [5] A typical drum asphalt plant (Pavement Tools Consortium, 2010) | Download Scientific Diagram. ResearchGate | Find and share research [online]. Copyright © 2008 [cit. 06.12.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/A-typical-drum-asphalt-plant-Pavement-Tools-Consortium-2010_fig8_221526056
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] Podstata, význam a historie polymerů. [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/01.html>
- [9] Složení polymerů - přísady. [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/05.html>
- [10] Rozdělení a charakteristika polymerů. [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/04.html>

- [11] PMB – MODIFIED BITUMEN. MARINI FAYAT GROUP [online]. [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: <https://marini.fayat.com/en/products/pmb-modified-bitumen>
- [12] RYCHLÍKOVÁ, Marie. Význam polymerů pro výrobu modifikovaných asfaltů. Zlín, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Vedoucí práce Ing. Jana Navrátilová, Ph.D.
- [13] Encyklopedie plastů: nízkotlaký (vysokohustotní) polyethylen (HDPE) - Samosebou.cz. Samosebou.cz [online]. Copyright © 2021 [cit. 28.12.2021]. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/2020/07/02/encyklopedie-plastu-nizkotlaky-vysokohustotni-polyethylen-hdpe/>
- [14] Plasty Tribon s.r.o. Brno [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-plasty-tribon.cz/prodej-plastu/materialy-polotovaru/bezne-plasty/polyethylen>
- [15] PL, Meyyappan., Keerthana. S, Jemimah Carmichael. M, Jorge PAIS, Paulo PEREIRA a Maurizio CRISPINO. Arriving the suitability of polyethylene wastes in flexible pavements: An experimental approach. Materials Today: Proceedings [online]. 2021, 48, 1202-1208 [cit. 2022-01-06]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.07.457 [16] plasty - Samosebou.cz. Samosebou.cz [online]. Copyright © 2021 [cit. 28.12.2021]. Dostupné z: <https://www.samosebou.cz/tag/plasty/>
- [17] BROVELLI, Claudio, Loic HILLIOU, Yacine HEMAR, Jorge PAIS, Paulo PEREIRA a Maurizio CRISPINO. Rheological characteristics of EVA modified bitumen and their correlations with bitumen concrete properties. Construction and Building Materials [online]. 2013, 48, 1202-1208 [cit. 2022-01-06]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.032
- [18] DAŠEK, Ondřej. Uplatnění pryžového granulátu v asfaltových pojivech a hutněných asfaltových směsích. Brno, 2013. 186 s., 86 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc..
- [20] AMT TECHNO-Polymer Modified Bitumen Plant, Modified Asphalt Plant, PMB Plant, PMA Plant, Automatic Polymer Modified Bitumen Plant, Automatic Polymer Modified Asphalt etc.. [online]. Copyright ©2021 AMT TECHNO. All rights reserved. [cit. 28.12.2021]. Dostupné z: http://www.amttechno.com/Products/polymer_modified_bitumen_plant
- [21] Bc. Jana Klusková Využití polymerů do konstrukcí vozovek pozemních komunikací. Brno, 2019. 84 s. textu. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
- [22] ČSN EN 12597: Asfalty a asfaltová pojiva – Terminologie. ÚNMZ, 2014

- [23] ČSN EN 1426: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. ÚNMZ, 2015.
- [24] ČSN EN 1427: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda Kroužek a kulička. ÚNMZ, 2015.
- [25] ČSN EN 13398: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů. ČAS, 2018
- [26] ČSN EN 14770: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR). ÚNMZ, 2012.
- [27] ČSN EN 16659: Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test). ÚNMZ, 2016.
- [28] 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.
- [29] OMV Technické informace [online]. Dostupné z: <https://www.omv.cz/cs-cz/firemni-zakaznici/specialni-produkty/asfalty>
- [30] ZHANG, Wengang, Zhirong JIA, Yixia ZHANG, Kui HU, Longting DING a Fang WANG. The Effect of Direct-to-Plant Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer Components on Bitumen Modification. *Polymers* [online]. 2019, **11**(1) [cit. 2021-12-27]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym11010140
- [31] NIU, Yanfang, Ziqiang ZHU, Jiaying XIAO, Zhengchun LIU, Bo LIANG a Fang WANG. Evaluation of storage stability of styrene-butadiene-styrene block copolymer-modified asphalt via electrochemical analysis. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, **107**(9), 38-43 [cit. 2021-12-27]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.174
- [32] SBS Pellets - Small | Hawaii Asphalt Paving Industry. Hawaii Asphalt Paving Industry [online]. Copyright © 2012 Hawaii Asphalt Paving Industry [cit. 27.12.2021]. Dostupné z: <http://hawaiiasphalt.org/news-events/hapi-newsletters/sbs-pellets-small/>
- [33] ING. BENEŠOVÁ, Lucie a ING. VALENTIN, PH.D., Jan, Vliv vybraných vstupních parametrů na naměřené hodnoty zkoušky MSCR [online]. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra silničních staveb [cit. 2022-01-03]. Dostupné z: <https://www.silnice-mosty.cz/464-vliv-vybranych-vstupnich-parametru-na-namerene-hodnoty-zkousky-mscr/>

- [34] NIVITHA, M R, Modifiers for Bitumen, Part 01 [video]. Department of Civil Engineering PSG College of Technology Coimbatore 2020. [vid. 02.03.2020]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=L1Ts6qHQXNY&list=WL&index=10>
- [35] NIVITHA, M R, Modifiers for Bitumen, Part 02 [video]. Department of Civil Engineering PSG College of Technology Coimbatore 2020. [vid. 02.03.2020]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=UMVq_5g5dql&list=WL&index=11
- [36] Bjarne Bo Jensen, Jørn Bank Andersen. 15 years experience adding polymer powder directly into the asphalt mixer. NCC Roads A/S, Denmark. P5EE-152 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul, 2012.

9 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Hodnoty z měření penetrace jehlou	34
Graf 2 - Hodnoty z měření bodu měknutí	35
Graf 3 - KK - vzorky po zrání v sušárně	35
Graf 4 - Hodnoty z měření vratné duktility	36
Graf 5 - Vratná duktilita - vzorky po zrání v sušárně	37
Graf 6 - DSR - Závislost G^* na frekvenci při 10 °C (geo. 8 mm)	38
Graf 7 - DSR - Závislost δ na frekvenci při 10 °C (geo. 8 mm)	38
Graf 8 - DSR - Závislost G^* na δ při 10 °C (geo. 8 mm)	38
Graf 9 - DSR - Závislost G^* na zkušební teplotě při 1,59 Hz (geo. 8 mm)	39
Graf 10 - DSR - Závislost δ na zkušební teplotě při 1,59 Hz (geo. 8 mm)	39
Graf 11 - DSR - Závislost G^* na frekvenci při 60 °C (geo. 25 mm)	40
Graf 12 - DSR - Závislost δ na frekvenci při 60 °C (geo. 25 mm)	40
Graf 13 - DSR - Závislost G^* na δ při 60 °C (geo. 25 mm)	40
Graf 14 - DSR - Závislost G^* na zkušební teplotě při 1,59 Hz (geo. 25 mm)	41
Graf 15 - DSR - Závislost δ na zkušební teplotě při 1,59 Hz (geo. 25 mm)	41
Graf 16 - DSR - Blackův diagram z hodnot měření obou geometrií	42
Graf 17 - DSR - Poměr hodnot G^* při 10 °C a 60 °C (1,59 Hz)	42
Graf 18 - MSCR - Průběh zatěžovacích cyklů	45
Graf 19 - MSCR - 1. cyklus smykovým zatížením 0,1 kPa	46
Graf 20 - MSCR - 1. cyklus smykovým zatížením 3,2 kPa	46
Graf 21 - MSCR - Průběh měření čisté pojivo	46
Graf 22 - MSCR - průběh měření (5%/180°C/600s)	47
Graf 23 - MSCR - průběh měření (7,5%/180°C/60s)	47
Graf 24 - MSCR - průběh měření (7,5%/180°C/600s)	47

10 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Vybrané modifikační přísady [34]	14
Tabulka 2 - Specifikace pro silniční asfalty [22].....	29
Tabulka 3 - Souhrn vytvořených vzorků pojiv	33
Tabulka 4 - Výsledky zkoušky MSCR.....	44

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Pražská šaržová obalovna v Herinku (2021)	11
Obrázek 2 - Kontinuální obalovna [5]	12
Obrázek 3 - Šaržová obalovna [5]	13
Obrázek 4 - Schéma rozdělení polymerů	14
Obrázek 5 - Výsledky modifikací EVA [17].....	18
Obrázek 6 – Druhy použití pryžového granulátu v asfaltových směsích [18].....	18
Obrázek 7 - Schéma výroby modifikovaného asfaltu [20]	19
Obrázek 8 - Penetrometr	20
Obrázek 9 - Kelímky se zkoušenými pojivy.....	21
Obrázek 10 - Příklad na měření metodou KK	22
Obrázek 11 - Postupný propad kuliček.....	22
Obrázek 12 - Vratná duktilita - příprava vzorku	23
Obrázek 13 - Vratná duktilita - přetržení vzorku.....	24
Obrázek 14 - Dynamický smykový reometr	25
Obrázek 15 - Hodnoty bodu měknutí [31]	30
Obrázek 16 - Výsledek elektrochemické analýzy [31].....	31
Obrázek 17 - Vlevo zkoušené SBS, vpravo peletky SBS.....	31
Obrázek 18 - Sestava k míchání vzorku	32
Obrázek 19 - Zrníčka SBS v pojivu	32
Obrázek 20 - SBS po zahřátí	33
Obrázek 21 - KK - Propad kuliček	35
Obrázek 22 – Polovlákná vzorků 7,8 a 9 (zleva)	36
Obrázek 23 - Přetvoření v průběhu MSCR.....	43

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Specifikace dodávky	58
Příloha 2 – Souhrn výsledků z měření.....	59
Příloha 3 – Grafy – měření DSR	60

13 PŘÍLOHY

Příloha 1 – Specifikace dodávky

Specifikace dodávky



OMV Bitumen 50/70

Splňuje požadavky pro živice ke stavbě silnic dle normy EN 12591:2009

1F, Produktové číslo: 885000

Určený způsob použití

Pojivo pro výstavbu a údržbu vozovek, letištních a jiných dopravních ploch. Chcete-li získat další informace, kontaktujte společnost Bitumen na telefonním čísle pro postupy týkající se použití: +43-1-40440-40845

zkušební postup	Vlastnost	jednotka	Limitní hodnoty
EN ISO 2592	Bod vzplanutí	°C	min. 230
EN 1426	penetrace při 25°C	x 0,1 mm	50 - 70
EN 1427	Bod měknutí	°C	46 - 54
EN 12593	Bod lámavosti podle Fraasse	°C	max. -8
EN 12607-1	Odolnost proti tvrdnutí při 163°C		
EN 12607-1	Změna hmotnosti	%	max. 0,5
EN 1427	Nárůst bodu měknutí	°C	max. 9
EN 1426	Zbytková penetrace	%	min. 50
EN 12592	Rozpustnost	% (m/m)	min. 99,0
EN 12596	Dynamická viskozita při 60°C	Pa.s	min. 145
EN 12595	Kinematická viskozita při 135°C	mm ² /s	min. 295

Číslo celního sazebníku:27132000

Výsledky zkoušek														
										Zrání v peci				
vzorek	1	2	3	4	5	6	7	8	9	vzorek	7	8	9	10
Improcel v pojivu 50/70 [wt %]	0	5	5	5	5	5	7,5	7,5	7,5	Improcel v pojivu 50/70 [wt %]	5			
Teplota [°C]	160	160	180	180	180	200	180	180	200	Teplota [°C]	180			
Doba míchání [s]	60	60	60	600	1800	600	60	600	600	Doba odběru vzorku [hod] od počátku zrání	1	2	3	4
Bod měknutí [°C]	49.1	51.7	51.8	53.7	54.4	54.6	53.5	63.9	57.0	Bod měknutí [°C]	55.0	55.6	56.3	58.1
Vratná duktilita [mm]/[%]	18	42	45	98.5	97	109	47	161	123	Vratná duktilita [mm]	118	x	x	129
	9	30	32.6	49.25	48.5	54.5	30.1	80.5	61.5		59	x	x	64.5
Penetrace jehlou [p.j.]	59.2	43.9	48.2	46.1	44.3	43.1	36	29	39	pozn.: vmíchání improcelu 600 s; míchání 60 s po 30 min; na počátku vznikala tužší vrstva na povrchu vzorku a u stěn nádoby, improcel se postupně rozpouštěl, pojivo bylo s každým mícháním lesklejší bez patrných zrníček, při 8. míchání (posledním) se v nádobě neobjevuje tužší vrstva na povrchu a lépe se s pojivem pracovalo při tvorbě vzorků				
pozn.: asfaltové pojivo 50/70 OMV; zlepšení při delším míchání, zůstává zrnité, směs s SBS obsahuje shluky, při vratné duktilitě se vzorek 2,3 a 7 přetrhl (140 a 138 mm, 156 mm)														

Příloha 3 - Grafy - měření DSR

