



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

DÁVKOVÁNÍ OŽIVOVACÍCH PŘÍRAD DO ASFALTOVÉ SMĚSI S VYSOKÝM OBSAHEM R-MATERIÁLU

DOSAGE OF REJUVENATING AGENTS TO ASPHALT MIXTURE WITH HIGH CONTENT
OF RAP

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Markéta Čumíčková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Markéta Čumíčková
Název	Dávkování oživovacích přísad do asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

Kolektiv autorů, Příloha k odborné zprávě o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017 projektu TJ01000248

Ali H., Long-term Aging of Recycled Binders, The Florida Department of Transportation, BDV29 Two 977-01.

Martin A. E., Zhou F., Arambula E., Park E., Chowdhury A., Kaseer F., Carvajal J., Hajj J., Daniel J., Glover Ch., The Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios, Interim Report, No. 9-58, 2015.

Internetové zdroje jako například : <https://sites.google.com/site/martinszaumanis/>

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Rešeršní část práce bude obsahovat popis způsobů návrhu optimálního dávkování oživovacích přísad do asfaltových směsí s vyšším obsahem R-materiálu. Dále bude v diplomové práci popsán provedený pokusný úsek, kde byla použita asfaltová směs typu ACO 11 s R-materiálem s různými druhy oživovacích přísad. Náplní praktické části práce bude sledování tohoto pokusného úseku v čase s hodnocením funkčních vlastností znovuzískaných asfaltových pojiv. Dále bude ověřeno dávkování oživovacích přísad pro různé R-materiály.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na dávkování oživovacích přísad do asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu. V teoretické části jsou popsány použité empirické a funkční laboratorní zkoušky. Praktická část se zabývá odhadem optimálního množství oživovacích přísad pomocí laboratorních zkoušek tak, aby jejich vhodným dávkováním do R-materiálu došlo k obnovení reologických vlastností degradovaného asfaltového pojiva. V rámci projektu TAČR ZÉTA byl vytvořen pokusný úsek z asfaltové směsi obsahující 50 % R-materiálu a příslušné množství oživovací přísady. Cílem práce je zjištění optimálního dávkování oživovací přísady do vzorků R-materiálů a laboratorně zestárlého asfaltového pojiva gradace 50/70, zjištění účinností vybraných oživovacích přísad a sledování změn parametrů pokusného úseku v čase.

KLÍČOVÁ SLOVA

oživovací přísada, R-materiál, asfaltové pojivo, recyklace asfaltových vozovek, rejuvenátor, fluxační přísada, RTFOT, DSR, BBR, penetrace jehlou, bod měknutí, komplexní modul ve smyku, fázový úhel, kritická teplota, modul tuhosti za ohybu

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on the appropriate dosage of rejuvenating agents in asphalt mixtures with high content of RAP. The empirical and functional laboratory tests are described in the theoretical part. The practical part deals with the estimation of the optimal amount of rejuvenating agents by means of laboratory tests so that the rheological properties of the degraded asphalt binder can be restored by suitable dosing into the RAP. As part of the TAČR ZÉTA project, an experimental section of asphalt mixture containing 50 % of the RAP and an appropriate amount of the rejuvenating agents was created. The aim of the thesis is to find an optimal dosage of the rejuvenating agents in the samples of the RAP and laboratory aged asphalt binder of gradation 50/70, to determine the effectiveness of selected rejuvenating agents and to monitor changes in the parameters of the experimental section during the period of time.

KEYWORDS

rejuvenating agent, RAP, asphalt binder, recycling of asphalt roads, rejuvenator, flowing additive, RTFOT, DSR, BBR, needle penetration, softening point, complex shear modulus, phase angle, critical temperature, creep stiffness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Markéta Čumíčková *Dávkování oživovacích přísad do asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu*. Brno, 2018. 115 s. Diplomová 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 diplomové práce s názvem *Dávkování oživovacích přísad do asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 30. 12. 2018

Bc. Markéta Čumíčková
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Dávkování oživovacích přísad do asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 30. 12. 2018

Bc. Markéta Čumíčková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych vyjádřila poděkování vedoucímu své diplomové práce Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D., celému týmu kolegů, kteří mě přizvali do projektu TAČR ZÉTA a všem zaměstnancům školní laboratoře VUT FAST v Brně. Jmenovitě bych ráda poděkovala Ing. Pavlu Coufalíkovi, Ph.D., Ing. Tomáši Koudelkovi a Ing. Ivě Coufalíkové. Všem jmenovaným vděčím za pomoc, cenné rady a ochotu, se kterou mi poskytovali veškeré informace v průběhu zpracování této práce. Dále bych ráda poděkovala své rodině a příteli za jejich podporu během studia.

Obsah

1	Úvod	13
2	Rešerše literatury	14
2.1	Asfalt.....	14
2.2	Recyklace asfaltových vozovek	14
2.3	R-materiál	16
2.4	Oživovací přísady	18
2.5	Způsoby návrhu optimálního dávkování oživovací přísady	20
2.6	Dávkování oživovací přísady během výroby	23
3	Cíl práce	25
4	Použité zkušební metody	28
4.1	Extrakce asfaltového pojiva	28
4.1.1	Přístroje a pomůcky	28
4.1.2	Příprava na zkoušku	29
4.1.3	Postup zkoušky	29
4.2	Zpětná destilace asfaltového pojiva	30
4.2.1	Přístroje a pomůcky	30
4.2.2	Příprava na zkoušku	31
4.2.3	Postup zkoušky	31
4.3	Stanovení dynamické viskozity pomocí dynamického smykového reometru (DSR)	31
4.3.1	Přístroje a pomůcky	32
4.3.2	Příprava na zkoušku	32
4.3.3	Postup zkoušky	33
4.3.4	Vyhodnocení zkoušky	33
4.4	Stanovení bodu vzplanutí	33

4.4.1	Přístroje a pomůcky	34
4.4.2	Příprava na zkoušku	34
4.4.3	Postup zkoušky	34
4.4.4	Vyhodnocení zkoušky	35
4.5	Stanovení penetrace jehlou	35
4.5.1	Přístroje a pomůcky	36
4.5.2	Příprava na zkoušku	36
4.5.3	Postup zkoušky	36
4.5.4	Vyhodnocení zkoušky	37
4.6	Stanovení bodu měknutí	38
4.6.1	Přístroje a pomůcky	38
4.6.2	Příprava na zkoušku	38
4.6.3	Postup zkoušky	39
4.6.4	Vyhodnocení zkoušky	40
4.7	Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dynamickým smykovým reometrem (DSR)	40
4.7.1	Přístroje a pomůcky	41
4.7.2	Příprava na zkoušku	42
4.7.3	Postup zkoušky	42
4.7.4	Vyhodnocení zkoušky	43
4.8	Stanovení modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty v BBR	43
4.8.1	Přístroje a pomůcky	44
4.8.2	Příprava na zkoušku	45
4.8.3	Postup zkoušky	47
4.8.4	Vyhodnocení zkoušky	47
4.9	Metoda stárnutí asfaltového pojiva RTFOT	48

4.9.1	Přístroje a pomůcky	49
4.9.2	Příprava na zkoušku	49
4.9.3	Postup zkoušky	49
4.9.4	Vyhodnocení zkoušky	50
5	Použité materiály	51
6	Výsledky zkoušek	53
6.1	Oživovací přísady	53
6.1.1	Stanovení dynamické viskozity dle ČSN EN 13702	53
6.1.2	Stanovení bodu vzplanutí dle ČSN EN ISO 2592	53
6.2	R–materiály	54
6.2.1	Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426	54
6.2.2	Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427	55
6.2.3	Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770	57
6.2.4	Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771	60
6.2.5	Korelace výsledků	62
6.2.5.1	Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí	62
6.2.5.2	Závislost komplexního modulu ve smyku a bodu měknutí	63
6.2.5.3	Závislost fázového úhlu a bodu měknutí	63
6.2.5.4	Závislost kritické teploty a bodu měknutí	64
6.2.5.5	Závislost penetrace jehlou a komplexního modulu ve smyku	64
6.2.5.6	Závislost penetrace jehlou a fázového úhlu	65
6.2.5.7	Závislost penetrace jehlou a kritické teploty	65
6.2.5.8	Závislost komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu	66
6.2.5.9	Závislost komplexního modulu ve smyku a kritické teploty	66

6.2.5.10	Závislost fázového úhlu a kritické teploty	67
6.3	Dávkování oživovacích přísad do pojiv získaných z R–materiálů	69
6.3.1	Výpočet účinnosti oživovací přísady	69
6.3.2	Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426	69
6.3.2.1	R-materiály s oživovací přísadou Sylvaroad RP1000	70
6.3.2.2	R-materiály s oživovací přísadou Storflux.....	72
6.3.3	Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427	73
6.3.3.1	R-materiály s oživovací přísadou Sylvaroad RP1000	74
6.3.3.2	R-materiály s oživovací přísadou Storflux.....	76
6.3.4	Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770.....	77
6.3.4.1	R-materiály s oživovací přísadou Sylvaroad RP1000	78
6.3.4.2	R-materiály s oživovací přísadou Storflux.....	79
6.3.4.3	R-materiály s oživovací přísadou Sylvaroad RP1000	81
6.3.4.4	R-materiály s oživovací přísadou Storflux.....	83
6.3.5	Určení optimálního dávkování oživovacích přísad	84
6.4	Dávkování oživovacích přísad do silničního asfaltu 50/70 zestárlého metodou 3xRTFOT	86
6.4.1	Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426	87
6.4.2	Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427	88
6.4.3	Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770.....	90
6.4.4	Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771	93
6.5	Srovnání účinností oživovacích přísad.....	95
6.6	Pokusný úsek	98
7	Závěr.....	105

8	Seznam použitých zdrojů	108
9	Seznam obrázků	111
10	Seznam tabulek.....	112
11	Seznam grafů	114

1 Úvod

Silniční doprava je v současnosti nejrozšířenějším druhem dopravy v Evropě. Podle organizace European Asphalt Pavement Association (EAPA) je 90 % silniční sítě v Evropě tvořeno komunikacemi, které jsou vyrobeny z asfaltových směsí. Asfaltová směs je tvořena směsí kameniva a asfaltového pojiva, které je v největší míře získáváno z ropy. Z dlouhodobého sledování vyplývá, že dochází ke stále většímu nárůstu ceny ropy a jejich derivátů. Proto je žádoucí využívat do asfaltových směsí R-materiál. Jeho využívání je přínosné pro ochranu životního prostředí, zachování materiálových a energetických zdrojů a v neposlední řadě také přináší ekonomický profit. [1] [2]

Během životnosti vozovky dochází ke stárnutí asfaltového pojiva, čímž se asfaltové pojivo stává tvrdším a křehčím. Pokud hodláme R-materiál využít do asfaltových směsí ve větším množství, je nutné jeho zestárlé asfaltové pojivo změkčit přidáním asfaltového pojiva o vyšší gradaci nebo přidáním oživovacích přísad, které jsou schopny navrátit pojivu jeho původní vlastnosti. Problémem je, že dosud neexistuje celosvětově ucelený postup pro návrh optimálního dávkování oživovacích přísad.

V rámci projektu TAČR ZÉTA, který podporuje kooperaci mezi akademickou a podnikatelskou sférou, jsem byla přizvána ke spolupráci na řešení projektu s názvem „*Použití oživovacích přísad pro prodloužení životnosti recyklovaných vozovek s vysokým obsahem R-materiálu*“. Z důvodu rozsahu diplomové práce uvádím a vyhodnocuji jen část výsledků, na kterých jsem se podílela. Díky řešení projektu došlo k navázání spolupráce s firmou Froněk, spol. s r.o., která vyrobila asfaltové směsi a následně je aplikovala na zkušební úsek.

2 Rešerše literatury

V této kapitole se zabývám chemickým a fyzikálním popisem asfaltu. Dále se věnuji důvodům recyklace asfaltových vozovek, zpětnému využití recyklátů a otázce používání R-materiálů do asfaltových směsí. Aby bylo možné R-materiál dávkovat ve vyšším množství, je nutné jeho zestárlé vlastnosti oživit pomocí oživovacích přísad. Těm se podrobně věnuji v další podkapitole. Problémem je, že dosud neexistuje žádná standardizovaná metoda, podle které lze nastavit optimální dávkování oživovací přísady do R-materiálu. Z tohoto důvodu se v poslední části rešerše věnuji vybraným světově známým přístupům, které se využívají pro stanovení optimálního dávkování a dále pak reálnému dávkování během výroby asfaltové směsi na obalovně.

2.1 Asfalt

Asfalt v silniční praxi patří k nejpoužívanějším stavebním materiálům. Využívá se jako pojivo do asfaltových směsí, do prolévaných podkladních vrstev nebo pro výrobu asfaltových emulzí. Z chemického pohledu se jedná o koloidní směs, která je tvořena vysoce molekulárními uhlovodíky a heteroatomickými látkami. Co se týče skupinového složení, můžeme jej rozdělit na tekuté a pevné. Tekuté složky jsou označovány jako maltény (saturáty, aromáty, pryskyřice) a pevné jako asfaltény. Asfalt lze označit jako amorfní, visko-elastickou látku, která vlivem působení teploty mění své chování. Při nízkých teplotách se chová jako pružná látka, naopak při vysokých jako kapalina. Visko-elastické chování je vymezeno oborem použitelnosti asfaltu, jehož spodní hranice je definována teplotou bodu lámavosti a horní teplotou bodu měknutí. [2]

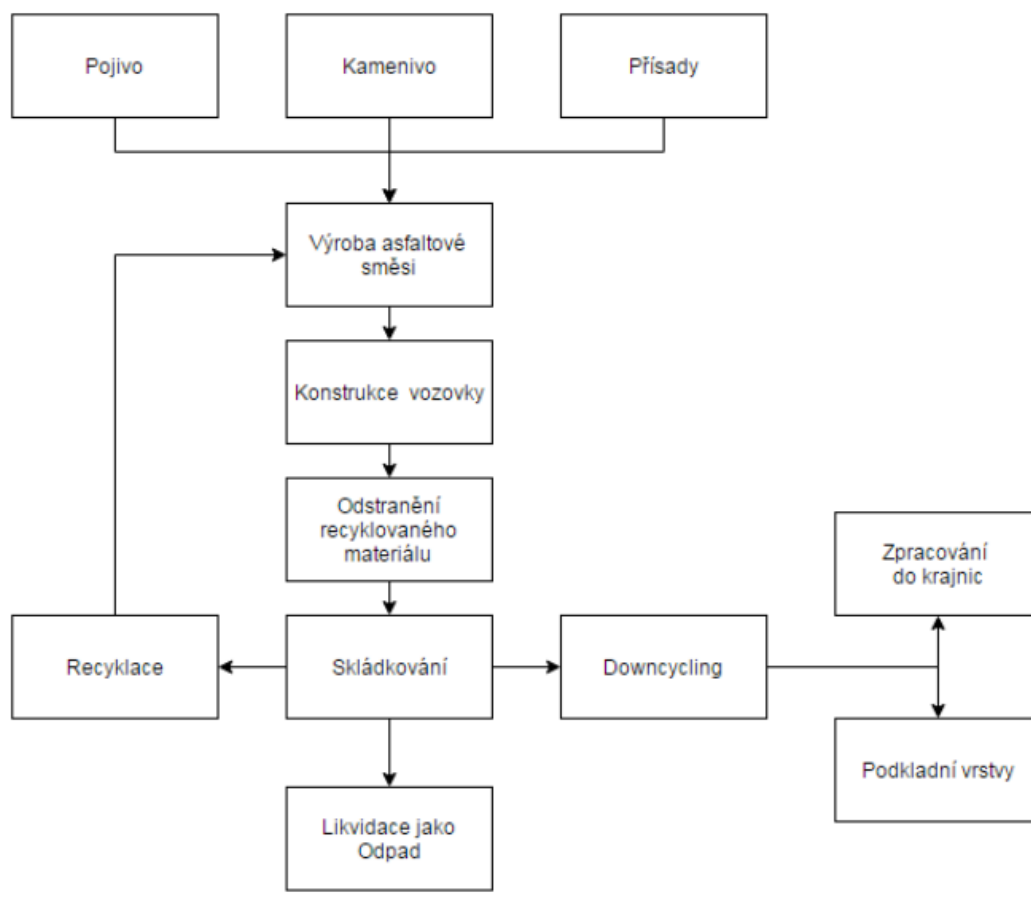
Podle původu lze asfalty rozdělit na přírodní a ropné. V roce 1595 bylo objeveno dodnes největší jezerní naleziště přírodního asfaltu, které se nachází na ostrově Trinidad. Ropné asfalty se získávají při destilaci surové ropy v rafinériích a jsou jejím posledním produktem. [2]

2.2 Recyklace asfaltových vozovek

Recyklace je technologický proces, při kterém se materiál zabudovaný ve vozovce získává zpět a následně se opět využívá. Díky recyklaci lze snížit

spotřebu materiálů pro výrobu asfaltových směsí (kamenivo, asfalt), pohonných hmot, redukovat vznik skleníkových plynů (především CO₂), snížit znečištění ovzduší výfukovými plyny, hluk, omezení skládek, a zároveň také dosáhnout snížení ekonomických nákladů, zatížení komunikací a zkrácení doby výstavby. Tyto všechny pozitivní vlivy směřují k udržitelnému rozvoji, kterého chceme dosáhnout. [2]

Na obrázku 1 je graficky popsán životní cyklus asfaltové směsi, v kterém se objevuje termín „downcycling“, který označuje proces, kdy je recyklovaný materiál použit jiným způsobem než, byl jeho původní účel. Například je zpracován do krajnic nebo do podkladních vrstev. V extrémních případech může být tento pojem použit v souvislosti s R-materiálem, který je z obrusné vrstvy dávkován do asfaltové směsi pro vrstvu ložní. [3]



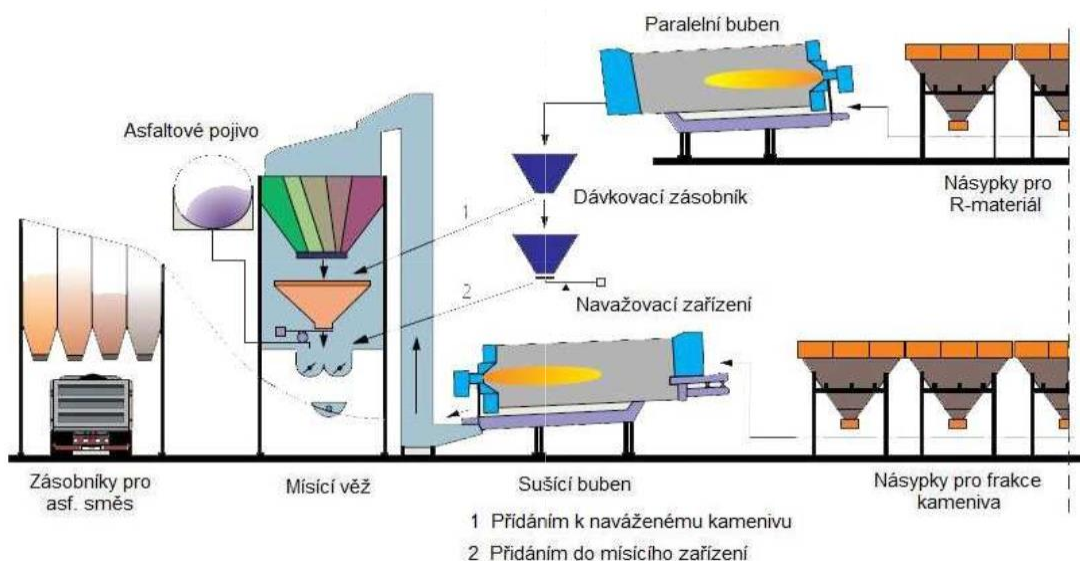
Obrázek 1: Životní cyklus asfaltové směsi [3]

2.3 R-materiál

Pojem R-materiál lze vysvětlit dle definice, která je zakotvena v normě ČSN EN 13108-8 a říká, že: „R-materiál je asfaltová směs znovuzískaná odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby“. [3]

Nejefektivnější využití R-materiálu spočívá v jeho znovupoužití ve vyráběných asfaltových směsích. Při srovnání se západoevropskými zeměmi je R-materiál v České republice využíván v menší míře. Bohužel v tomto ohledu neexistuje u nás legislativní podpora ze strany státu. Druhým důvodem může být také fakt, že v České republice stále panují neoprávněné pochybnosti investorů ohledně negativního dopadu, který může mít využívání R-materiálů na životní prostředí. Je nutné podotknout, že každý R-materiál nemusí být vhodný k jeho znovuvyužití do asfaltových směsí, z důvodu extrémní degradace asfaltového pojiva. V takových případech je na R-materiál nahlíženo jako na kamenivo a odborně se označuje pojmem „*black rock*“. Bohužel mezi zástupci silničních agentur neexistuje jednotná specifikace, podle níž lze označit R-materiál jako „*black rock*“. [2] [3]

Výroba asfaltové směsi s příměsí R-materiálu může probíhat za studena nebo za tepla na obalovně. Metoda recyklace za studena umožňuje dávkovat R-materiál přímo do míchačky nebo jej dávkovat stejným způsobem jako kamenivo, které se navažuje hmotnostně ze zásobníku. R-materiál je většinou uskladněn na nezastřešené skládce, z tohoto důvodu se během výroby asfaltové směsi můžou objevit problémy s vlhkostí. Kamenivo je nutné předehtřívát na vyšší teplotu. Při recyklaci za horka na obalovně je možné do asfaltové směsi přidávat větší množství R-materiálu, který je vysoušen v paralelním sušícím bubnu. Ten je umístěn v horní části šaržové obalovny a vysouší R-materiál na teplotu 120 – 130 °C. Schéma šaržové obalovny s paralelním sušícím bubnem je znázorněno na obrázku 2. [4] [5]



Obrázek 2: Schéma šaržové obalovny s paralelním sušícím bubnem [5]

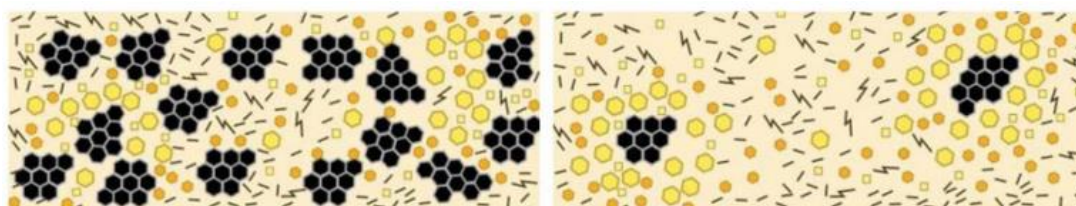
Jak už bylo naznačeno dříve, problémem R-materiálu je obsažené asfaltové pojivo, které v závislosti na čase podléhá stárnutí. Degradace asfaltového pojiva je způsobena působením vzdušného kyslíku, teploty nebo ultrafialového záření. Během degradačních procesů dochází ke změně fyzikálně-chemických vlastností. Zvyšuje se podíl vysokomolekulárních látek a asfaltové pojivo se stává tvrdším. Z tohoto důvodu může dojít k předčasnému vzniku poruch u asfaltových směsí. Jedná se zejména o výskyt únavových a nízkoteplotních trhlin, které reflektují, že asfaltové pojivo ztratilo schopnost relaxace. Během stárnutí u asfaltového pojiva dochází ke snížení parametru penetrace a fázového úhlu, a ke zvýšení bodu měknutí, komplexního modulu ve smyku a kritické teploty. [3]

Se zvyšujícím se množstvím dávkovaného R-materiálu do asfaltových směsí za horka na obalovně dochází ke zvýšení tuhosti asfaltové směsi. Ta se zároveň stává méně odolnou proti únavovému a termálnímu namáhání. Z tohoto důvodu je žádoucí snížit tuhost asfaltové směsi přidáním asfaltového pojiva vyšší gradace nebo dávkováním oživovací přísady. Abychom předešli možným problémům, které mohou nastat během výroby asfaltové směsi na obalovně a poté po dobu její životnosti ve vozovce, je nutné splnit podmínky, které jsou kladeny na teploty jednotlivých složek směsi, míchací čas, manipulaci

s R-materiálem (třídění, skladování, homogenizace), zvolení vhodného asfaltového pojiva (které vhodným způsobem zlepšuje vlastnosti zestárlého R-materiálu) a použití oživovacích přísad. [3]

2.4 Oživovací přísady

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2, pokud chceme R-materiál použít znovu do asfaltové směsi ve vyšším množství, je nutné obnovit reologické chování asfaltového pojiva pomocí oživovacích přísad nebo v případě dávkování R-materiálu v množství do cca 30 % až 40 % je možné jeho vlastnosti oživit pomocí asfaltového pojiva vyšší gradace. Oživovací přísady můžeme rozdělit do dvou skupin, na změkčovadla a rejuvenátory. Změkčovadla jsou fluxační přísady, které pouze snižují viskozitu zestárlého asfaltového pojiva a z dlouhodobého hlediska nejsou schopna zabránit tvorbě mrazových a únavových trhlin. Dokonce při vyšších provozních teplotách může dojít k tomu, že jejich efekt oživení zcela vymizí. Zatímco rejuvenátory mají za úkol obnovit visko-elastické chování asfaltového pojiva. Po přidání rejuvenátorou do R-materiálu dochází k přerušení procesu shlukování micel asfalténů, což je vidět v pravé části obrázku 3. Naproti tomu po přidání fluxační přísady nedojde k rozptýlení shluků asfalténů, ale pouze k zředění malténové fáze, což je vidět v levé části obrázku 3. Během stárnutí asfaltového pojiva v R-materiálu dochází ke zvýšení poměru asfalténů ve srovnání s maltény. Předpokladem je, že přidáním oživovací přísady dojde k navýšení malténové fáze oproti asfalténové v zestárlém pojivu. [3] [6]



Obrázek 3: Rozdíl mezi působením rejuvenační a změkčující přísady [3]

Účinnost oživovacích přísad je dána schopností rozptýlení se v asfaltové směsi a absorpcí oživovací přísady zestárlým pojivem obalujícím kamenivo. Proces se skládá z několika kroků. Nejprve oživovací přísada s velmi nízkou viskozitou obalí vrstvou kamenivo, které je obaleno vrstvou zestárlého pojiva.

Následně oživovací přísada začne pronikat do vrstvy zestárlého asfaltového pojiva, u kterého dochází k změkčení. V momentě, kdy dojde k úplnému vstřebání oživovací přísady do zestárlého pojiva, začne se snižovat viskozita jeho vnitřní vrstvy a zvětšovat viskozita jeho vnější vrstvy. Po určité době dojde k rovnováze. [7]

Oživovací přísady se v poslední době také využívají k preventivní údržbě asfaltových vozovek. Po 3 až 4 letech užívání vozovky dochází k nástřiku, rejuvenátorového pečecího materiálu (RSM – Rejuvenator Seal Materials), aby došlo k prodloužení její životnosti. Rovnoměrným nástřikem dochází ke změkčení zoxidované vrstvy asfaltového pojiva. Touto technologií je možné docílit zvýšení odolnosti proti ztrátě hmoty z krytu vozovky a také zlepšení protismykových vlastností. [4]

Oživovací přísady mohou být získávány během procesu zpracování ropy a produktů z ní vyrobených (oleje), živočišného nebo rostlinného původu (oleje), popřípadě mohou být uměle vyrobeny. V tabulce 1 jsou vypsány komerčně dostupné druhy oživovacích přísad, které uvádí NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) ve své zprávě z roku 2014. [3] [7]

Tabulka 1: Komerčně využívané rejuvenátory dle NCHRP [7]

Kategorie	Typ	Popis
Parafinické oleje	Odpadní motorový olej (WEO - Waste Engine Oil)	Rafinované mazací oleje
	Kaly z odpadního motorového oleje (WEOB - Waste Engine Oil Bottoms)	
	Valero VP 165® Storbit®	
Aromatické extrakty	Hydrolene®	Rafinované ropné produkty se složkami polárních aromatických olejů
	Reclamite®	
	Cyclogen L®	
	ValAro 130A®	
Naftenové oleje	SonneWarmix RJ™	Uhlovodíky upravené pro modifikaci asfaltu
	Ergon HyPrene®	
Triacylglyceroly a mastné kyseliny	Odpadní rostlinný olej	Odvozené z rostlinných olejů
	Odpadní rostlinná maziva	
	Hnědá maziva	
	Kyselina olejová	
Tálové oleje	Sylvaroad™ RP1000	Vedlejší produkty papírenského průmyslu stejného chemického složení jako tekuté stékavostní přísady a emulgátory
	Hydrogreen®	

2.5 Způsoby návrhu optimálního dávkování oživovací přísady

Při použití oživovacích přísad je důležité určit jejich množství tak, aby bylo co nejvíce možné provést reologii vazebného povlaku, která splňuje požadavky na vlastnosti původního asfaltového pojiva.

S narůstajícím množstvím oživovací přísady dochází ke změnám zestárlého pojiva. Tyto změny však nemusí být vždy pozitivní a žádoucí.

Překročené dávkování může být nákladnější a dokonce i potenciálně škodlivé pro výkonnost asfaltové směsi. Nejdůležitějším faktorem, který je třeba zvážit při určování příslušné dávky oživovacích přísad, je její účinek na vlastnosti zestárlého pojiva a následně na výkonnost asfaltové směsi. Použití vysokých dávek oživovacích přísad změkčuje ve velké míře stárnoucí pojiva, což je výhodné z hlediska odolnosti asfaltových směsí proti porušení trhlinami. Na druhou stranu toto dávkování může také negativně ovlivnit odolnost směsi vůči trvalé deformaci. Proto by dávkování mělo být pečlivě optimalizováno. [10]

Obvykle jsou dávky oživovacích přísad doporučovány samotnými výrobci na základě jejich zkušeností. Menší dávky jsou obvykle upřednostňovány. Avšak nedá se nastavit pro konkrétní oživovací přísadu jedna určitá dávka pro všechny typy asfaltových směsí. Dávkování je ovlivněno různými faktory. Jedním z nich může být např. stupeň zestárnutí asfaltového pojiva dle zatřídění do užitných tříd (Performance Grade – PG), který vychází ze závěrů výzkumných programů SHRP. Užitné třídy používané v USA můžeme velmi zjednodušeně pro představu popsat penetrační třídou, která se využívá u nás. Množství dávkované oživovací přísady závisí na stupni zestárnutí asfaltového pojiva, to znamená, že dávkování oživovací přísady se bude odvíjet od hodnoty penetrace znovuzískaného asfaltového pojiva. Dále pak je dávkování ovlivňováno zdrojem pojiva nebo typem kameniva. Je důležité pochopit, jakým způsobem lze dávku oživovací přísady přidávat k R-materiálu. Někteří výrobci uvádějí, že oživovací přísada by měla být přidána jako náhrada za pojivo ve směsi. To znamená, že pokud je dávka oživovací přísady přidána v množství (v procentech) hmotnosti zestárlého pojiva, pak musí být výchozí asfaltové pojivo ve stejném množství odebráno z asfaltové směsi. Jiní výrobci uvádějí, že oživovací přísada by měla být přidána jako doplněk k asfaltové směsi, což znamená, že by měla být přidána bez úpravy obsahu výchozího asfaltového pojiva. V současné době existuje mnoho přístupů používaných k určení optimální dávky oživovacích přísad, ale dosud není k dispozici žádná standardizovaná metoda. [10]

Jedním ze způsobů odhadu optimálního dávkování oživovací přísady je použití návrhových diagramů (blending charts), které jsou nejčastěji odvozeny

od zkoušky viskozity, penetrace jehlou nebo bodu měknutí. Jiný přístup využívá způsobu zatřídění asfaltových pojiv do užitečných tříd PG, kdy dochází k vyhodnocení změn ve výkonnosti stupně zestárlého pojiva v důsledku přidání oživovacích přísad a poté určení optimálního množství oživovacích přísad potřebných k obnovení výkonnostních vlastností zestárlého pojiva. Obvykle je minimální dávka stanovena tak, aby došlo k zajištění dostatečné odolnosti proti únavě a vzniku nízkoteplotních trhlin (střední a nízkoteplotní stupeň PG), zatímco při zvýšeném dávkování musí být zajištěna adekvátní odolnost proti vzniku trvalých deformací (vysokoteplotní stupeň PG). [10]

Efektivitu zvolené oživovací přísady je možné stanovit dle rovnice 2.1, kdy efektivita změkčení vyjadřuje míru změny penetrace asfaltového pojiva při dávkování jednoho procenta přísady. Místo penetrace jehlou může ve výpočtu figurovat změna bodu měknutí nebo změna viskozity (případně jiné proměnné). [3]

$$Efe. \text{změkčení} = \frac{\text{Penetr. oživ. pojiva [0,1 mm]} - \text{Penetr. zestár. pojiva [0,1 mm]}}{\text{Dávkování oživovací přísady [\%]}} \quad (2.1)$$

Shen a Ohne (2002) představili komplexní přístup k určení dávkování oživovacích přísad s ohledem na výkonnostní vlastnosti zestárlého pojiva ve třech teplotních požadavcích specifikovaných systémem pojiva Superpave. Směsi zestárlého pojiva s obsahem oživovací přísady v různých dávkách (6 %, 9 % a 14% hmotnosti zestárlého asfaltového pojiva) byly zkoušeny pomocí testů v DSR a BBR při třech podmínkách stárnutí: původní (tj. bez laboratorního stárnutí), po stárnutí RTFO a po stárnutí RTFO+PAV. Při vysoké teplotě výsledky ukázaly, že přidání oživovací přísady způsobilo významné snížení parametru $G^*/\sin(\delta)$. Tímto parametrem se v USA hodnotí například odolnost vůči trvalým deformacím. Snížení bylo nelineární vzhledem k nárůstu dávky oživovací přísady. U vzorku s nižším obsahem oživovací přísady došlo k rychlejšímu snížení komplexního modulu ve smyku. Nicméně, pro střední teplotu se parametr $G^*\sin(\delta)$, který popisuje únavové vlastnosti, lineárně snížil s nárůstem oživovací přísady. Stejný případ byl pozorován při nízkých

teplotách, kdy výsledky BBR naznačovaly, že tuhost při nízkých teplotách klesala lineárně, zatímco m-hodnota se lineárně zvýšila o zvýšení dávky oživovací přísady. [10]

Tran a kol. (2012) použil podobný přístup a stanovil optimální dávku oživovací přísady potřebné k obnovení výkonnostních vlastností R-materiálů pomocí stupně výkonnosti. Směsi zestárých pojiv byly smíseny s různými dávkami oživovací přísady (0 %, 10 %, 12 % a 20 % hmotnosti zestárého asfaltového pojiva). Pro každou směs asfaltového pojiva byly použity zkoušky prováděné na přístroji DSR a BBR, které určují vlastnosti při vysoké a nízké teplotě před a po stárnutí metodou RTFO+PAV. Nejnižší dávka, která splnila požadavky na stupeň PG, byla považována za optimální. Zjistili, že oba kritické nízkoteplotní stupně PG (PGL) a kritické vysokoteplotní stupně PG (PGH) klesly lineárně se zvýšením dávky oživovací přísady. Zde dochází k rozdílu při srovnání vysokoteplotního stupně PG (PGH) nalezeným Shenem a Ohnem (2002). Snížení jak nízké tak i vysoké PG teploty probíhá téměř lineárně se zvyšujícím se dávkováním oživovací přísady. Avšak co se týče vlivu dávkování oživovací přísady na střední teplotu PG (IPG) v tomto případě průběh není lineární. [10]

Aby bylo možné přesně definovat vztah mezi dávkou oživovací přísady a mírou jeho vlivu na obnovenou reologii vazebného povlaku, je zapotřebí dalších výzkumů. Zejména při vyšších teplotách převládá obava z nízké odolnosti proti trvalým deformacím spojená s použitím vyšších dávek oživovací přísady. [10]

2.6 Dávkování oživovací přísady během výroby

Je důležité, aby výrobce určoval a vyhodnotil, kde a jak lze dodat oživovací přísadu do zařízení. Míchací zařízení a postupy závisí na řadě proměnných včetně typu a vlastností oživovací přísady a kompatibility s existujícími zařízeními, fázování a časem míchání. V závislosti na konfiguraci obaloven může být oživovací přísada přidávána např. k R-materiálu během drcení, během skládkování, na dopravníkový pás R-materiálu, před vstupem R-materiálu do paralelního bubnu, na výstupu z paralelního bubnu (před vstupem do míchačky) nebo do míchačky. Dávkování lze také provést

přímo do sila asfaltového pojiva nebo na jeho váhu. Každý způsob dávkování může mít své výhody a nevýhody. [11]

Každá oživovací přísada by měla mít čas reagovat se zestárlym asfaltovým pojivem. Homogenní rozložení oživovací přísady je důležité pro získání regenerovaného asfaltového pojiva. Při dávkování na výstupu z paralelního bubnu je zestárlý asfalt již přehřátý a po určitou dobu dochází k pronikání oživovací přísady do něj. To s největší pravděpodobností maximalizuje dobu rozptýlení oživovací přísady do regenerovaného asfaltu před mísením se zbývajícími složkami. Tento postup je možný pouze v případě, že oživovací přísada má vhodnou teplotu bodu vzplanutí a zároveň dobrou tepelnou stabilitu. Co se týče přidávání oživovací přísady během míchání, je třeba vzít v úvahu fázi a dobu v procesu míchání. Míchání je poměrně krátký proces (25 - 45 s), a proto je nutno pečlivě zvážit postupné přidání oživovací přísady k recyklovanému asfaltovému pojivu (nebo celé směsi), aby bylo dosaženo požadovaného výsledku. [11]

3 Cíl práce

Hlavním cílem diplomové práce je stanovení optimálního dávkování dvou vybraných oživovacích přísad do asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu. Co se týče použitých materiálů, pro účely diplomové práce budou vybrány dvě oživovací přísady, deset různých vzorků R-materiálů, v laboratoři bude metodou 3xRTFOT provedeno stárnutí asfaltového pojiva gradace 50/70 a v neposlední řadě budou vytvořeny dvě asfaltové směsi pro pokusný úsek.

Na vybraných oživovacích přísadách budou postupně provedeny zkoušky stanovení dynamické viskozity dle ČSN EN 13702 a stanovení bodu vzplanutí dle ČSN EN ISO 2592.

Ze vzorků R-materiálů bude pomocí extrakce a následně zpětné destilace získáno deset asfaltových pojiv, na kterých budou prováděny zkoušky stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426, stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427, stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770 a stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771.

Po zjištění vlastností asfaltových pojiv získaných z R-materiálů dojde u těchto pojiv k oživovacímu procesu pomocí dvou oživovacích přísad. Dávkování každé oživovací přísady bude probíhat odděleně v množství 4 % a 12 %. Na takto oživených asfaltových pojivech budou následně provedeny zkoušky stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426, stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427, stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770. Výsledky zkoušek budou vyhodnoceny a pomocí znázornění grafickou formou budou odvozeny účinnosti a optimální dávkování oživovacích přísad. Cílem je stanovit vhodné dávkování oživovací přísady tak, aby došlo k znovuoživení asfaltového pojiva, jehož vlastnosti budou totožné s výchozím asfaltovým pojivem gradace 50/70.

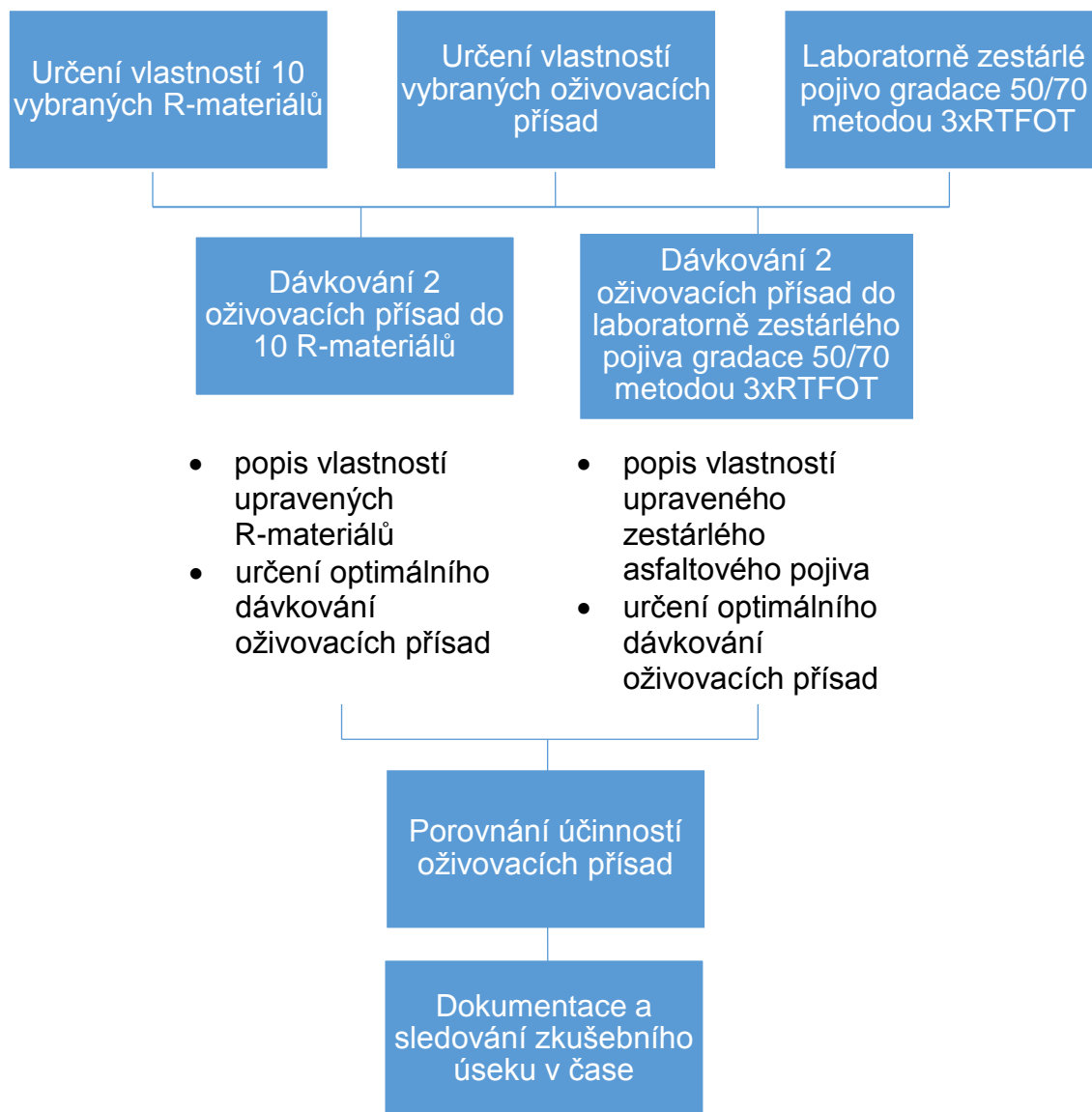
Stejný postup znovuoživení bude aplikován i pro laboratorně zestárlé asfaltové pojivo gradace 50/70 metodou 3xRTFOT, u kterého bude snaha dosáhnout stejných vlastností, jaké mělo původní asfaltové pojivo gradace

50/70. Rozdíl bude v aplikaci oživovacích přísad, které se budou dávkovat v množstvích 4 %, 8 % a 12 %. Na takto vytvořených vzorcích s různým množstvím oživovacích přísad budou provedeny zkoušky stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426, stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427, stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770 a stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771.

Dalším cílem práce je určit účinnost každé oživovací přísady pro jednotlivou provedenou zkoušku. Následně budou tyto účinnosti porovnány a stanoven závěr, zda došlo v laboratoři k vhodnému nasimulování reálné situace, ke které dochází na obalovně při dávkování oživovací přísady do asfaltové směsi s příměsí vysokého obsahu R-materiálu.

Dále pak bude popsán pokusný úsek, který byl realizován v rámci projektu TAČR ZÉTA TJ01000248. Pro účely diplomové práce budou sledovány dva úseky v odlišné délce. Na každém z nich byl proveden na podzim roku 2017 asfaltový kryt z asfaltové směsi ACO 11. Ta obsahuje 50% R-materiálu, který byl v každém úseku oživen jinou oživovací přísadou. Pokusný úsek bude sledován v čase pomocí zkoušek stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426, stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427, stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770 a stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771.

Na obrázku 4 je graficky znázorněn vývojový diagram, který popisuje celkový postup práce.



Obrázek 4: Vývojový diagram postupu prací

4 Použité zkušební metody

Tato kapitola je věnována popisu konvenčních (empirických) zkoušek, které vycházejí z dlouhodobých zkušeností, ale také popisu funkčních zkoušek, které se snaží co nejreálněji simulovat podmínky ve skutečné konstrukci vozovky. Co se týče funkčních zkoušek, jedná se o nové metody, které byly vyvinuty v rámci projektu SHRP (Strategic Highway Research Project) v letech 1988 až 1993 v USA. V současné době jsou přejímány do nových evropských norem. Tyto konvenční a funkční zkoušky byly prováděny na oživovacích přísadách, asfaltových pojivech z R-materiálů, asfaltových pojivech z R-materiálů oživených vybranými oživovacími přísadami, zestárlém asfaltovém pojivu gradace 50/70 oživeném vybranými oživovacími přísadami a na asfaltových pojivech z vývrtů odebraných ze zkušebního úseku. Podstaty jednotlivých zkoušek zde budou postupně popsány podle příslušných norem a předpisů a jejich vyhodnocení bude zpracováno v kapitole 6.

4.1 Extrakce asfaltového pojiva

Zkouška je popsána v normě ČSN EN 12697-1 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 1: Obsah rozpustného pojiva.

Zjednodušeně se jedná o metodu, při níž se pomocí rozpouštědla oddělí asfaltové pojivo od kameniva. Extrakcí získáme čisté kamenivo s filerem a roztok rozpouštědla s asfaltovým pojivem. [12]

4.1.1 Přístroje a pomůcky

Před samotnou extrakcí je nutné si připravit nádobu s uzávěrem, papírové filtry, rozpouštědlo (Perchloroethylen), síta a separační gel. Extrakce asfaltového pojiva probíhá v průtokové laboratorní odstředivce. Celková sestava pro extrakci asfaltového pojiva je na obrázku 5. [12]



Obrázek 5: Průtoková laboratorní odstředivka

4.1.2 Příprava na zkoušku

Vzorek asfaltové směsi je umístěn do nádoby s uzávěrem a poté je zalit dostatečným množstvím rozpouštědla. Asfaltová směs nesmí být v rozpouštědle déle než 24 hodin. Před začátkem zkoušky je nutno připravit filtrační patronu. Patrona společně s destilačním papírem je umístěna do průtokové laboratorní odstředivky. [12] [26]

4.1.3 Postup zkoušky

Přes sadu sít provádíme dekantaci roztoku. Kamenivo se promývá rozpouštědlem, dokud není čisté nebo téměř čisté. Během extrakce jímáme roztok rozpouštědla a asfaltového pojiva do zvláštní nádoby. Kamenivo zachycené na sítích lze vysušit a použít pro zkoušku stanovení zrnitosti. Tuto zkoušku jsem nezahrnula do své diplomové práce, z tohoto důvodu jsem s kamenivem dále nepracovala. [12]

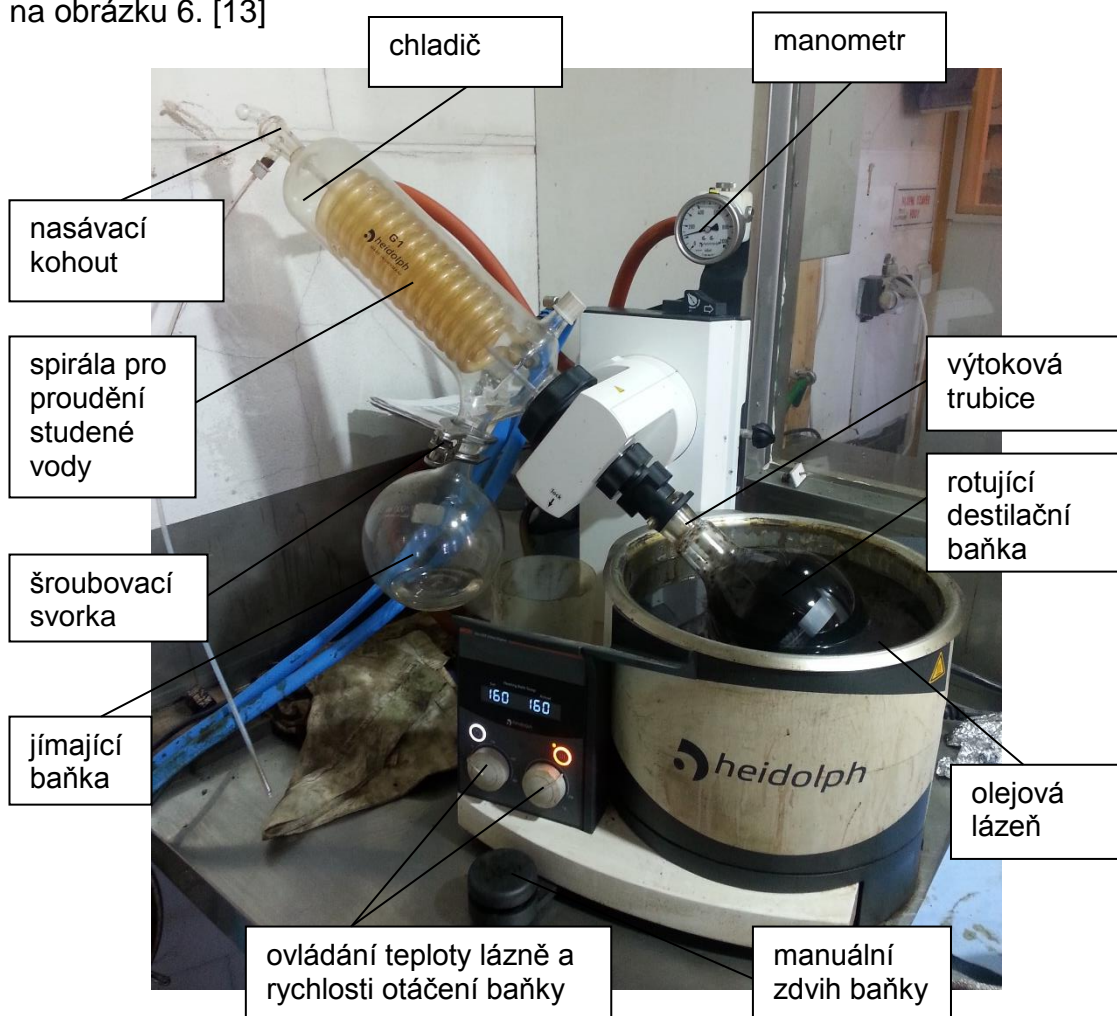
4.2 Zpětná destilace asfaltového pojiva

Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 12697-3 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení.

Roztok rozpouštědla s asfaltovým pojivem se zpracuje v rotačním vakuovém destilačním přístroji, kde se oddělí rozpouštědlo od asfaltového pojiva na základě odlišných teplot varu. [13]

4.2.1 Přístroje a pomůcky

Zpětná destilace asfaltového pojiva se provádí v rotačním vakuovém destilačním přístroji. Přístroj je vyfocen a jeho jednotlivé části jsou popsány na obrázku 6. [13]



Obrázek 6: Popis vakuového destilačního zařízení

4.2.2 Příprava na zkoušku

Před začátkem nasávání roztoku rozpouštědla s asfaltovým pojivem se sestaví celková aparatura přístroje dle obrázku výše. Pomocí ropné vazelíny se utěsní skleněné spoje. Olejová lázeň se zahřeje na teplotu $110 \pm 5^\circ\text{C}$ (při volbě počáteční teploty záleží na druhu zvoleného rozpouštědla). Chladičem se nechá protékat studená voda. Prázdná destilační baňka se připevní k přístroji v místě olejové lázně. [13]

4.2.3 Postup zkoušky

Při dosažení teploty olejové lázně $110 \pm 5^\circ\text{C}$ se nastaví tlak na $40 \pm 5\text{ kPa}$, prázdná destilační baňka se pomocí manuálního ovládání ponoří do olejové lázně a nechá se rotovat rychlostí 75 otáček/min. Poté se začne s nasáváním roztoku pomocí nasávacího kohoutu. Při nasávání je třeba dbát na to, aby množství roztoku v baňce bylo cca 1 cm pod hladinou olejové lázně. V případě, že by se do destilační baňky dostalo vzorku více, může dojít k jeho vystříknutí a znečištění destilační kolony. [13] [14]

Po nasátí veškerého asfaltového roztoku a vydestilování rozpouštědla se teplota olejové lázně zvýší na $160 \pm 5^\circ\text{C}$ a vzorek se nechá 10 minut destilovat. Poté je destilace doprovázena pozvolným snižováním tlaku na 10 kPa za 1 min až na $2 \pm 0,5\text{ kPa}$. Dále se pokračuje v destilaci, dokud neskončí odpařování perchlorethylenu a na asfaltu se nepřestanou tvořit bubliny. Pokud se bubliny ve vzorku tvoří stále a perchlorethylen se zatím zcela neodpařil, zvýší se teplota na $180 \pm 5^\circ\text{C}$ při stejném tlaku $2 \pm 0,5\text{ kPa}$. Výsledkem destilace je asfaltové pojivo, které se naleje do předem připravené plechovky, a dále pak se na něm provádějí zkoušky, které jsou popsány níže. [13]

4.3 Stanovení dynamické viskozity pomocí dynamického smykového reometru (DSR)

Dynamická viskozita je popsána v normě ČSN EN 13702 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska.

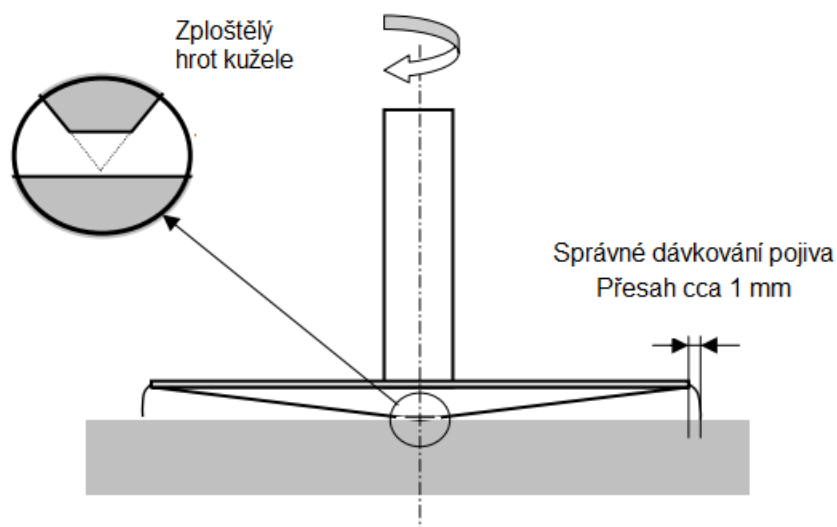
Zkouška probíhá obdobně jako u měření komplexního smykového modulu, avšak rozdíl je v použití horní geometrie. Ta má u stanovení dynamické viskozity tvar kužele o průměru 40 mm a úhlu stoupání 4 °. Dalším rozdílem je zkušební teplota, která po celou dobu měření viskozity oživovacích přísad zůstává konstantní 25 °C. Tato zkouška se provádí z důvodu zaručení čerpatelnosti oživovacích přísad v průběhu výroby asfaltové směsi na obalovně. Vyhovující výsledky zaručují, že lze s oživovacími přísadami pracovat za běžných teplot. [15] [16] [14] [3]

4.3.1 Přístroje a pomůcky

Měření probíhá, stejně jako u stanovení komplexního smykového modulu, v dynamickém smykovém reometru, ke kterému dále náleží výpočetní zařízení, kompresor a chladicí zařízení. Pro samotnou přípravu a následnou zkoušku vzorku je nutná podložka z nepřílnavého materiálu, špachtle a měřicí geometrie, jejíž parametry byly popsány v předcházejícím odstavci. [16] [18]

4.3.2 Příprava na zkoušku

Vzorky nalité na nepřílnavé podložce se umístí na měřicí geometrii, která je vyobrazena na obrázku 7. Daná geometrie má tu výhodu, že rychlost smykového přetvoření i smykové napětí nejsou závislé na pozici mezi kuželem a deskou. Před umístěním vzorku se měřicí geometrie vytemperuje na teplotu 25 °C. [16] [18]



Obrázek 7: Zkušební geometrie typu kužel – deska [17]

4.3.3 Postup zkoušky

Vzorek se umístí na spodní měřicí geometrii a poté se na ni nechá sjet zploštělý hrot kužele. Vytvořený přebytek pojiva kolem geometrie se odstraní špachtlí. Na začátku zkoušky se musí sledovat hodnota dynamické viskozity, která musí být nezávislá na smykové rychlosti. Během měření se kužel otáčí a měří se odpor proti tomuto pohybu. [16] [18]

4.3.4 Vyhodnocení zkoušky

Postupným zvyšováním smykové rychlosti z 1 na 100 [s⁻¹] měříme narůstající smykové napětí, z kterého odvozujeme dynamickou viskozitu dle rovnice 4.1. [16] [18]

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \tag{4.1}$$

τ ... smykové napětí [Pa]

η ... dynamická viskozita [Pa · s]

$\dot{\gamma}$... smyková rychlost (přetvoření) [s⁻¹]

4.4 Stanovení bodu vzplanutí

Zkouška bodu vzplanutí (flash point) je popsána v normě ČSN EN ISO 2592 společně se zkouškou bodu hoření.

Pro účely této diplomové práce byla provedena pouze zkouška bodu vzplanutí. Ta spočívá v určení nejnižší teploty zkušební dávky, přepočtené na standardní atmosférický tlak 101,3 kPa, při které aplikace zkušebního plamene způsobí, že se páry zkušební dávky zapálí a plamen se rozšíří po povrchu kapaliny. Tato zkouška se provádí z důvodu zajištění bezpečnosti při výrobě asfaltové směsi s vyšším obsahem R-materiálu, během níž dochází k vysokým teplotám. [3] [19]

4.4.1 Přístroje a pomůcky

Při zkoušce je používán přístroj s otevřeným kelímkem podle Clevelanda. Dále pak ochranný kryt, který je přibližně čtvercového rozměru, teploměr s částečným ponorem a tlakoměr. [19]

4.4.2 Příprava na zkoušku

Zkušební kelímek se naplní vzorkem tak, aby vrchol menisku byl přesně na plnicí rysce. Teploměr se umístí svisle, tak aby byl ve výšce 6 mm nad dnem zkušebního kelímku. K přístroji se připojí přívod plynu a zapálí se zkušební plamen, který se nastaví na průměr mezi 3,2 mm a 4,8 mm. [19]

Nejprve se zahřívá zkušební dávka tak, aby rychlost nárůstu teploty byla v rozmezí 14 – 17 °C/min. V okamžiku, kdy je teplota zkušební dávky cca 56 °C pod očekávaným bodem vzplanutí, sníží se ohřev tak, aby rychlost nárůstu teploty byla v rozmezí 5 – 6 °C/min. [19]

4.4.3 Postup zkoušky

Při teplotě 23 ± 5 °C před očekávaným bodem vzplanutí se začne s aplikací zkušebního plamene, zkoušení pokračuje vždy při nárůstu teploty o 2 °C. Zkouška trvá přibližně 1 s, zkušebním plamenem se pohybuje rovnoměrně nepřerušovaně přes střed kelímku, což je vidět na obrázku 8. Při následném zkoušení bodu vzplanutí vedeme pohyb zkušebního plamene v opačném směru. [19]



Obrázek 8: Pohyb zkušební plamen nad vzorkem

4.4.4 Vyhodnocení zkoušky

Jako pozorovaný bod vzplanutí se zaznamená teplota zkušební dávky, odečtená na teploměru v okamžiku, kdy se páry zkušební dávky zapálí a po povrchu kapaliny se rozšíří plamen. Je důležité nezaměnit skutečný bod vzplanutí s modrým světelným závojem, který někdy obklopuje zkušební plamen. [19]

4.5 Stanovení penetrace jehlou

Zkouška je popsán v normě ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. [20]

Stanovení penetrace jehlou je definováno hloubkou proniknutí jehly do vzorku asfaltového pojiva, který je vytemperován na teplotu 25 °C. Při této

teplotě je vzorek zatěžován hmotností 100 g po dobu 5 s. Výsledná hodnota penetrace se uvádí v penetračních jednotkách (1 p. j. = 0,1 mm). [20]

4.5.1 Přístroje a pomůcky

Pro měření penetrace se využívá penetrometr, jehož součástí je penetrační jehla o průměru 1 mm, která má zkosený hrot do tvaru kužele s průměrem 0,16 mm až 0,14 mm. Díky penetrometru lez s penetrační jehlou pohybovat ve vertikálním směru. Analytický vzorek je umístěn v kovové nebo skleněné nádobě, která má vnitřní průměr 55 mm až 70 mm. Při zkoušce je také zapotřebí zařízení na měření času a teploměr. [20]

4.5.2 Příprava na zkoušku

Pomocí laboratorní sušárny jsou vzorky asfaltového pojiva zahřáty na teplotu, která nesmí být vyšší než 100 °C nad očekávaným bodem měknutí. Daná teplota vychází z normy ČSN EN 12594 Asfalty a asfaltová pojiva - Příprava analytických vzorků. Následně se vzorky asfaltového pojiva promíchají a rozlijí do připravených penetračních misek. Nádoby jsou naplněny tak, aby po zchlazení vzorku na zkušební teplotu 25 °C byla výška ztuhlé hladiny minimálně o 10 mm větší, než je předpokládaná hloubka vniknutí jehly. Po vychladnutí vzorků na teplotu 30 °C až 15 °C, což trvá zhruba 1,5 hod, se umístí do vodní lázně s teplotou 25 °C. V té se nacházejí vzorky po stejnou dobu, po kterou chladly na vzduchu. [20]

Před zkouškou se připraví a zkontroluje přístroj pro stanovení penetrace a penetrační jehla. Je nutné, aby se držák jehly pohyboval ve svislém směru a byl zbaven nečistot. Pokud se na hrotu penetrační jehly nacházejí nečistoty, je nutné je odstranit toluenem a osušit čistým hadříkem. Poté se penetrační jehla vloží do držáku. Po celou dobu měření je vzorek umístěn ve vodní lázni, která musí mít normou předepsanou teplotu (25 °C ± 0,15 °C). [20]

4.5.3 Postup zkoušky

Vzorek se ve vodní lázni umístí do požadované pozice, vynulují se hodnoty na stupnici penetrometru a poté se začne penetrační jehla postupně snižovat k povrchu vzorku do doby, než se ho hrotem dotkne. V tomto okamžiku se nastaví doba zatěžování na stanovených 5 s a přístroj se spustí. Na stupnici

se odečte hodnota hloubky vpichu tzv. penetrace, která se přepočte na penetrační jednotky. Na obrázku 9 je možno vidět vpichy provedené do vzorku asfaltového pojiva. Zkouška je ukončena zapsáním naměřeného výsledku, opatrným vyjmutím jehly ze vzorku a jejím následným očištěním. [20]

Výše popisovaný postup se provede minimálně třikrát pro každý vzorek asfaltového pojiva. Je nutné dodržovat předepsanou vzdálenost vpichů (10 mm) od stran nádoby a také od sebe navzájem. [20]



Obrázek 9: Vpich jehly do vzorku [20]

4.5.4 Vyhodnocení zkoušky

Aritmetickým průměrem tří platných měření, která se zaokrouhlí na celé číslo, je získána výsledná hodnota penetrace. Z normy je znám maximální rozdíl výsledných platných hodnot, které byly naměřeny za stanovených podmínek (teplota 25 °C, zatěžovací hmotnost 100 g a doba zatěžování 5 s). Jednotlivé hodnoty jsou brány v platnost, pokud se od sebe neliší víc, než o hodnoty uvedené v tabulce 2. Pro měření probíhající za jiných podmínek nebo při měření penetrace vzorků modifikovaných asfaltů, je možné tuto tabulku brát jen jako orientační. [20]

Tabulka 2: Maximální rozdíl platných stanovení [20]

Penetrace v 0,1 mm	do 49	50 až 149	150 až 249	250 a výše
Maximální rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším stanovením	2	4	6	8

4.6 Stanovení bodu měknutí

Zkouška stanovení bodu měknutí je popsán normou ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička. [20]

Vrstva asfaltového pojiva vyplňující kovový kroužek je umístěna v tekutinové lázni, která se zahřívá. Na vrstvě asfaltového pojiva je umístěna kovová kulička. Výsledkem zkoušky je teplota, při níž vrstva asfaltového pojiva změkne natolik, že kulička protáhne vrstvu (proboří se) na délku 25 mm. Této zkoušce se také říká „zkouška kroužek a kulička“ (Ring&Ball). [20]

4.6.1 Přístroje a pomůcky

Při zkoušce stanovení bodu měknutí se využívá automatického zařízení, které se skládá z odlévací destičky, dvou mosazných kroužků a dvou kuliček z korozivzdorné oceli, které se umísťují do středících prstenců. Vzorky se umísťují do skleněné kádinky naplněné tekutinou, ve které je umístěno míchadlo. V tabulce 3 jsou uvedeny rozhodující teploty bodu měknutí, kterými je třeba se řídit při volbě kapalinové lázně. Teplota je kontrolována zařízením na měření teploty. [20]

Tabulka 3: Kapalinová lázeň pro stanovení bodu měknutí [20]

Bod měknutí	Kapalinová lázeň	Počáteční teplota lázně
≤ 80 °C	vodní lázeň	(5 ± 1) °C
> 80 °C	glycerin	(30 ± 1) °C

4.6.2 Příprava na zkoušku

Příprava začíná odebráním zkušební vzorku v souladu s ČSN EN 58 při dodržení všech nezbytných opatření. Po zahřátí dvou mosazných kroužků

na teplotu předpokládaného bodu měknutí (ne vyšší než 100 °C) se umístí na odlévací destičku, která je pokryta separačním prostředkem. Do každého z kroužků se nalije zahřáté asfaltové pojivo s mírným přebytkem a vzorky se poté chladí při laboratorní teplotě po dobu 30 min. V momentě, kdy dojde k zchladnutí analytických vzorků, odřízne se přebytečné asfaltové pojivo a zarovná se s okrajem kroužku pomocí nahřáté špachtle. [20]

Připravené kroužky vyplněné asfaltovým pojivem se umístí do otvorů nerezového stojanu a opatří se středícími prstenci. Soustava se vloží do kádinky se zvolenou tekutinou a poté se společně s ocelovými kuličkami nechá zchladit na teplotu (5 ± 1) °C po dobu 15 min. Po vyjmutí kádinky z chladicího zařízení se kuličky vloží do středících prstenců, kádinka se umístí na topnou desku a spustí se měření. [20]

4.6.3 Postup zkoušky

Díky magnetickému míchadlu dochází k rovnoměrnému zvyšování teploty v celém objemu kádinky. Teplota kapaliny narůstá rychlostí 5 °C/min. Se zvyšující se teplotou také postupně narůstá deformace vrstvy asfaltového pojiva, která se pod tíhou ocelové kuličky postupně protahuje. [20]

V momentě, kdy ocelová kulička obalená pojivem propadne vrstvou na délku $(25 \pm 0,4)$ mm, což zaznamená světelný paprsek, je zkouška ukončena. Propad ocelových kuliček je zachycen na obrázku 10. Teploty, při nichž došlo k jednotlivým propadům, jsou automaticky zaznamenány. [20]



Obrázek 10: Propad kuliček [20]

4.6.4 Vyhodnocení zkoušky

Ze dvou výsledných teplot se vytvoří aritmetický průměr, který je označován jako bod měknutí pro zkoušené asfaltové pojivo. Pokud je rozdíl mezi dvěma teplotami větší než $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro bod měknutí pod $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo větší než $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro bod měknutí nad $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, musí se zkouška opakovat. [20]

4.7 Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dynamickým smykovým reometrem (DSR)

Tato funkční zkouška je popsána v normě ČSN EN 14770 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR).

DSR se využívá pro měření reologických vlastností asfaltových pojiv. Předmětem normy je postup, který zahrnuje stanovení komplexního smykového modulu G^* a úhlu fázového posunu δ pojiv v širokém rozsahu zkušebních frekvencí a teplot při zkoušce oscilace ve smyku. [16]

Vzorek asfaltového pojiva se umístí mezi dvě destičky, z nichž spodní destička je pevná a horní je oscilující. Horní destička svým pohybem vytváří oscilující smykové napětí, které vzorek namáhá sinusovým zatížením (oscilací). Měří se odezva deformace pojiva na působící napětí. [16]

4.7.1 Přístroje a pomůcky

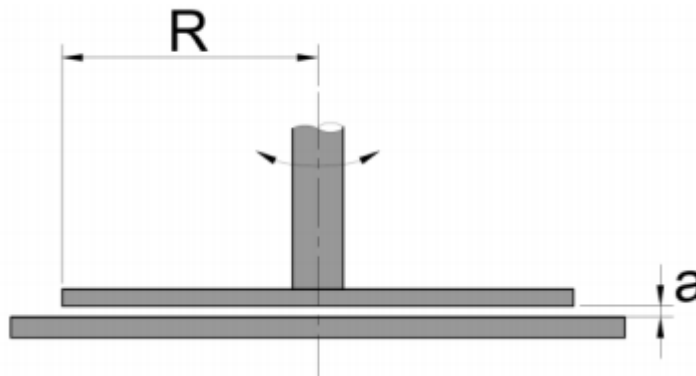
Na obrázku 11 je zachycen rotační smykový reometr (DSR) Kinexus PRO britského výrobce Malvern, který musí umožňovat nastavení teplot v rozmezí od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, vyvodit kroutící moment v rozsahu $0,05\text{ }\mu\text{Nm}$ až 200 mNm , umožnit stanovení komplexního smykového modulu v G^* v rozmezí 1 kPa až $10\text{ MPa} \pm 2\%$ a úhel fázového posunu δ v rozmezí 0° až $90^{\circ} \pm 0,1^{\circ}$. Zkušební frekvence reometru se pak pohybují v rozmezí $1\text{ }\mu\text{Hz}$ až 150 Hz . [21] [16] [14]



Obrázek 11: Dynamický smykový reometr

Dalším vybavením, potřebným pro provedení dané zkoušky, je kompresor, chladič zařízení, výpočetní zařízení, podložky z nepřílnavého materiálu pro přípravu vzorků, špachtle a v neposlední řadě měřící geometrie, která je tvořena horní a dolní částí. Typ geometrie je volen dle druhu zkušební metody a vlastností zkušebního materiálu. Pro měření v oscilačním módu se

využívá geometrie typu deska – deska, která je na obrázku 12. Obě destičky musí být vertikálně vycentrovány. [16] [14]



Obrázek 12: Zkušební geometrie typu deska – deska [22]

4.7.2 Příprava na zkoušku

Reometr se připraví dle příručky výrobce a vybere se správná měřící geometrie. Pro zkoušku oscilačního měření se použijí destičky o průměru 8 mm až 25 mm s mezerou 0,5 mm až 2,0 mm. Průměr destičky 25 mm je vhodný pro tuhosti rozsahu 1 kPa až 100 kPa a průměr 8 mm pro tuhosti od 100 kPa do 10 MPa. V této diplomové práci byla použita geometrie velikosti 25 mm při zkušební teplotě 60 °C a frekvencí 1,59 Hz. [16]

Přístroj se kalibruje, následuje manuální určení počáteční zkušební teploty, tzn. 60 °C a vložení vzorku. Vložený vzorek se nechá změknout a poté se na něj spustí horní geometrie. V okolí geometrie se vytvoří přebytek asfaltového pojiva, který se opatrně odstraní nahřátou špachtlí. [16]

4.7.3 Postup zkoušky

Zkušební teplota se nachází v rozmezí 25 °C až 85 °C. Je nutné zvolit dostatečné množství zkušebních teplot tak, aby mohlo být asfaltové pojivo dostatečně charakterizováno a přírůstek teploty nebyl větší než 10 °C ± 0,1 °C. Zkouška probíhá při frekvenci v rozsahu 0,1 Hz až 10,0 Hz. Při první zvolené teplotě dochází k postupnému nárůstu frekvence. Poté zkouška pokračuje při další zkušební teplotě, na kterou se přechází rychlostí 5 °C/min. Zkouška je ukončena v okamžiku naměření komplexního modulu ve smyku mimo rozsah zvolené zkušební geometrie. [16]

4.7.4 Vyhodnocení zkoušky

Oscilačním měřením získáme komplexní smykový modul G^* , který popisuje celkový odpor asfaltového pojiva proti deformaci při vystavení opakovaným pulzům smykového napětí a fázový úhel δ , který je indikátorem relativní velikosti vratné a nevratné deformace. [16]

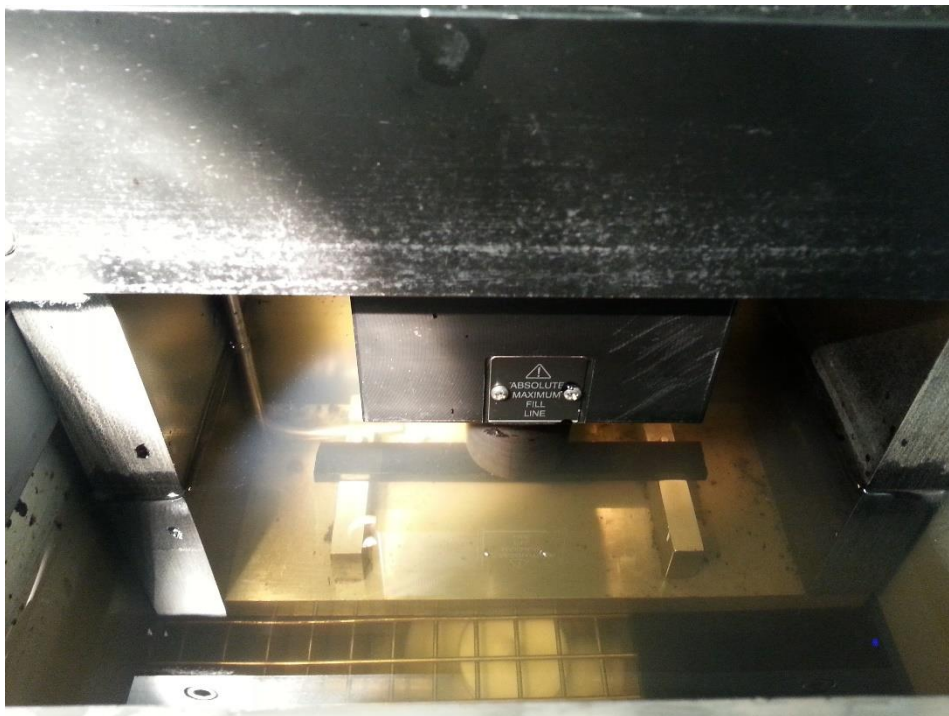
Grafické zobrazení výsledků se provádí pomocí isochron nebo isoterm. Isochrony jsou křivky vyjadřující chování látky při konstantní frekvenci a isotermy jsou křivky vyjadřující chování látky při konstantní teplotě. [14]

Další možností grafického znázornění výsledku je Blackův diagram, který udává závislost mezi komplexním smykovým modulem a úhlem fázového posunu, nebo znázornění pomocí hlavních (kmenových) křivek, při jejichž konstrukci se využívá superpozice času a teploty. [15] [18]

4.8 Stanovení modulu tuhosti za ohybu a m-hodnoty v BBR

Zkouška je popsán v normě ČSN EN 14771 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR). [20]

Podstatou normy je stanovení modulu tuhosti za ohybu při pomalém toku asfaltového pojiva v rozmezí od 30 MPa do 1 GPa za použití průhybového trámečkového reometru. Toto zařízení se používá k měření průhybu ve středu trámečku asfaltového pojiva, který je vyvolán tříbodovým ohybem, což je vidět na obrázku 13. Na střed zkoušeného tělíška se po dobu 240 s nechá působit konstantní zatížení a poté se odměří vzniklý průhyb. Z ohybového napětí a ohybové deformace se vypočítá modul tuhosti za ohybu daného vzorku. [20]



Obrázek 13: Třibodový ohyb [20]

4.8.1 Přístroje a pomůcky

Na obrázku 14 je zachycen průhybový trámečkový reometr, který je složen ze zatěžovacího rámu s podpěrami zkušebního tělíska, temperační lázně a systému na snímání dat. Zatěžovací rám se skládá z podpěr vzorku, zatěžovacího dřívku o poloměru $6,3 \text{ mm} \pm 0,3 \text{ mm}$, zatěžovacího článku o kapacitě $2,5 \text{ mN}$ až $2,0 \text{ N}$, prostředku k nulování zatížení, zařízení pro vkládání konstantního zatížení a převodníku k měření průhybu. Pro vytvoření zkušebního trámečku je nutná forma z vhodného kovu s vnitřními rozměry $6,4 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ šíře, $12,7 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ hloubky a $127 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ délky. Na obrázku 15 je snímek složené prázdné formy o předepsaných normových rozměrech. [20]



Obrázek 14: Průhybový trámečkový reometr [20]

4.8.2 Příprava na zkoušku

Před zahájením zkoušky je nutné zahřát dané vzorky na určitou teplotu, která nesmí být vyšší než 100 °C nad očekávaným bodem měknutí. Pokud by byla zkouška prováděna na polymerem modifikovaných asfaltových pojivech, nastaví se teplota od 180 °C do 200 °C bez ohledu na bod měknutí. Tyto teploty vycházejí z normy ČSN EN 12594 Asfalty a asfaltová pojiva - Příprava analytických vzorků. Po zahřátí se asfaltové pojivo nalévá do předem připravených kovových forem, které jsou vytemperovány na laboratorní teplotu. Na obrázku 16 je zachycena naplněná forma s mírným přebytkem asfaltového pojiva. Po vychladnutí, které trvá 45 až 60 min, se přebytek asfaltového pojiva seřízne nahřátou špachtlí do roviny s okraji formy. Seříznutý vzorek je zachycen na obrázku 17. [20]

Poté se forma s asfaltovým pojivem ochlazuje po dobu 5 min a následně se z ní trámeček opatrně vyjímá. Tato teplota, při níž se odraňují jednotlivé části formy, nesmí být nižší, než teplota samotného zkoušení. Musí se také dbát na to, aby při odstraňování formy, nedošlo k pokroucení vzorku. [20]



Obrázek 15: Prázdná forma [20]



Obrázek 16: Naplněná forma [20]



Obrázek 17: Vzorek po seříznutí [20]

Před zkouškou každé sady zkušebních tělísek je nutno zkontrolovat nastavení kontaktního zatížení a zkušebního zatížení. Počáteční teplota zkoušení se zvolí dle očekávané úrovně tuhosti a přístroj se nechá vytemperovat. Teplota lázně musí odpovídat teplotě zkoušení ($\pm 0,2$ °C). [20]

Po odformování je tělísko ihned přemístěno do zkušební lázně a následně temperováno při zkušební teplotě po dobu 60 min \pm 2 min. Po uplynutí této doby se tělísko umístí na podpěry tak, aby se šířka vzorku (ve formě), po umístění tělíska na podpěry, stala jeho tloušťkou. [20]

4.8.3 Postup zkoušky

Na zkušební trámeček je působeno kontaktní silou $980 \text{ mN} \pm 50 \text{ mN}$ (100 g) po dobu 240 s a zaznamenává se hodnota průhybu v závislosti na čase. Ze vzniklého průhybu se stanoví modul tuhosti za ohybu $S_m(t)$ v čase 60 s od počátku zatěžování. V době mezi 0,5 s a 5,0 s musí být zatížení v rozmezí $\pm 50 \text{ mN}$ od průměrného zkušebního zatížení a po zbývající dobu $\pm 10 \text{ mN}$ od průměrného zkušebního zatížení. [20]

4.8.4 Vyhodnocení zkoušky

Teplota, při které ohybová tuhost $S(60s) = 300 \text{ MPa}$, resp. m-hodnota $m(60s) = 0,3$, je označována jako tzv. kritická teplota. Výpočtem lze této hodnoty dosáhnout interpolací hodnot ohybové tuhosti $S(60s)$, resp. m-hodnoty $m(60s)$, stanovených při alespoň 3 teplotách (např. $-10 \text{ }^\circ\text{C}$, $-16 \text{ }^\circ\text{C}$ a $-22 \text{ }^\circ\text{C}$). Cílem měření je nalézt teplotu, při které se $S(t)$ blíží hodnotě 300 MPa zdola a $m(t)$ se shora blíží hodnotě 0,3. Předpokládá se, že při teplotě o $10 \text{ }^\circ\text{C}$ nižší, než je kritická teplota, dochází k riziku vzniku trhlin ve vozovce. [20]

Měření, pro které je průhyb středu zkušebního tělíska větší než 4,0 mm resp. menší než 0,08 mm, je nevěrohodné. [20]

Vytvořením grafu závislosti naměřeného zatížení a naměřeného průhybu se vypočítá modul tuhosti za ohybu zkušebního tělíska v časech zatížení 8,0 s, 15,0 s, 30,0 s, 60,0 s, 120,0 s, 240,0 s, podle následující rovnice 4.2. [20]

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)} \quad (4.2)$$

$S(t)$... modul tuhosti za ohybu v čase t [MPa]

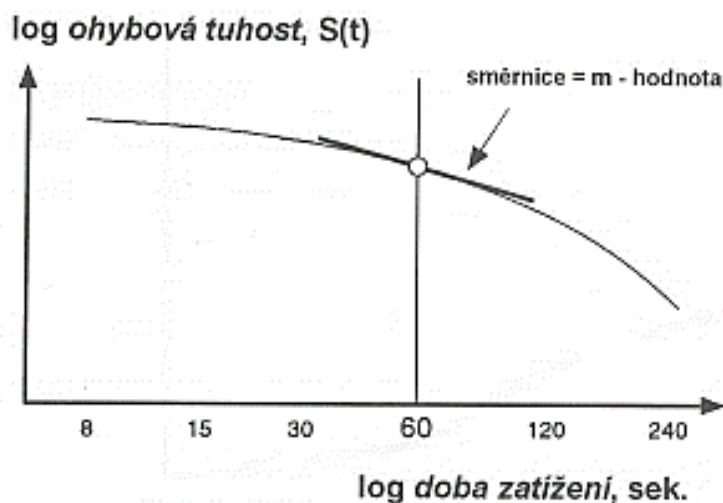
L ... vzdálenost mezi podpěrami [mm]

b ... šířka zkušebního tělíska [mm]

h ... tloušťka zkušebního tělíska [mm]

$\delta(t)$... průhyb zkušebního tělíska v čase t [mm]

Parametr, který se dále sleduje, je sklon křivky dotvarování, tzv. m-hodnota, která je směrnici tečny ke křivce závislosti logaritmu modulu tuhosti na logaritmu času. Tato závislost je graficky popsána na obrázku 18. Hodnota m-hodnoty, stejně jako hodnota ohybové tuhosti, se opět stanovuje v čase 60 s od počátku zatěžování. [20]



Obrázek 18: Závislost logaritmu modulu tuhosti na logaritmu času [20]

Výpočet m-hodnoty lze provést podle následující rovnice 4.3.

$$m(t) = |B + 2 \times C \times \log(t)| \quad (4.3)$$

B, C ... regresní koeficienty

t ... doba zatěžování [s]

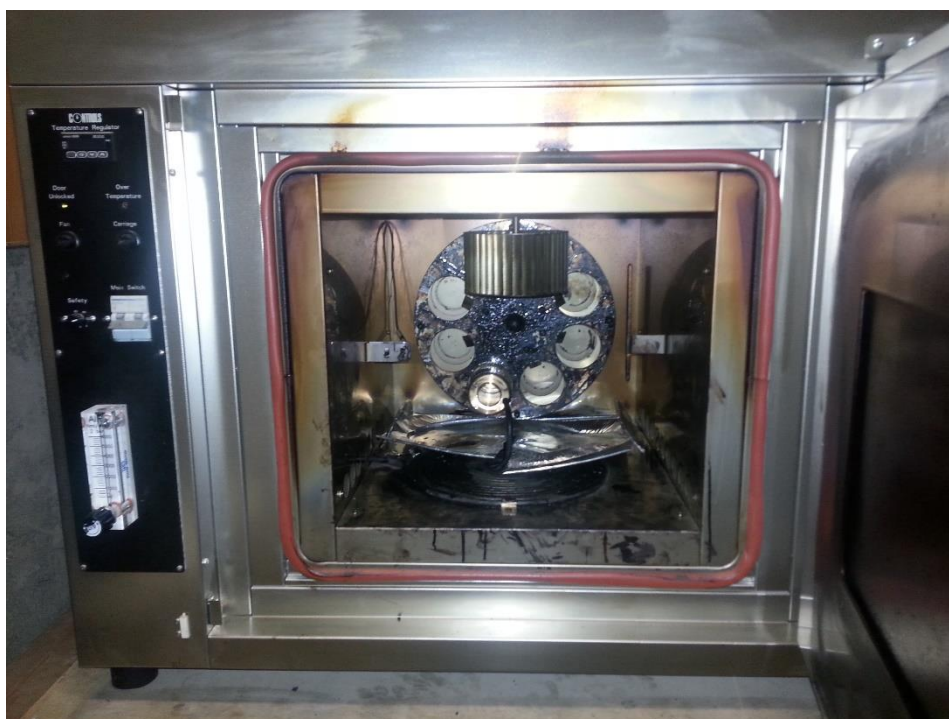
4.9 Metoda stárnutí asfaltového pojiva RTFOT

Metoda RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) pro stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu je popsána normou ČSN EN 12607-1. Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu (RTFOT).

Pro účely diplomové práce byl trojnásobně prodloužen čas expozice (3xRTFOT) z důvodu lepší simulace dlouhodobého stárnutí asfaltového pojiva v konstrukci vozovky.

4.9.1 Přístroje a pomůcky

Při stárnutí asfaltového pojiva je zapotřebí váha, 8 skleněných nádobek z teplovzdorného skla, teploměry, sušárna s dvojitou stěnou a elektrickým ohřevem, průtokoměr zajišťující rovnoměrný proud teplého vzduchu, který je schopen měřit průtok vzduchu v množství 4 l/min. Laboratorní sušárna je zachycena na obrázku 19. [23]



Obrázek 19: Laboratorní sušárna

4.9.2 Příprava na zkoušku

Do skleněných nádobek z teplovzdorného skla se nalije asfaltové pojivo o hmotnosti $35 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$. Laboratorní sušárna se předeheje na teplotu $163 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ a nechá se temperovat po dobu jedné hodiny. [23]

4.9.3 Postup zkoušky

Po vyhřátí sušárny na teplotu 163 °C se do držáků opatrně vloží skleněné nádoby s asfaltovým pojivem. Otáčení držáku se nastaví na rychlost

15 otáček/min a průtok vzduchu 4 l/min \pm 0,2 l/min. Během otáčení držáku se uvnitř každé skleněné nádoby vytvoří tenká vrstva pojiva tloušťky 1,25 mm, která se ohřívá v sušárně za konstantního přívodu vzduchu. Zkouška trvá 75 min a v případě postupu s prodlouženou dobou expozice 3 x 75 min. [23]

4.9.4 Vyhodnocení zkoušky

Účinkem tepla a vzduchu dojde ke změně hmotnosti (vyjádřený v %) a změně fyzikálních vlastností asfaltového pojiva. Na takto zestárlém asfaltovém pojivu se dále provádějí empirické a funkční zkoušky, které lze porovnávat s výsledky provedených zkoušek před stárnutím. [23] [3]

5 Použité materiály

Pro potřeby diplomové práce byly vybrány dvě oživovací přísady od dvou výrobců, které se liší především svým chemickým složením. Seznam produktů včetně uvedeného výrobce je uveden v tabulce 4.

Tabulka 4: Zkoušené oživovací přísady

Název	Výrobce	Deklarace složení
Sylvaroad RP1000	KRATON	Polyol ester (tálové a terpentínové oleje)
Storflux	Storimpex GmbH	Složitý zbytek z vakuové destilace ropy

Oživovací přísada Sylvaroad RP1000 byla speciálně vyvinuta k obnovení vlastností zestárlého asfaltového pojiva obsaženého v R-materiálu. Pochází z přírodního obnovitelného zdroje, přesněji z neopracovaného tálového oleje (z borovicového dřeva), který vzniká jako vedlejší produkt při papírenské výrobě. Během její výroby a aplikaci nedochází k uvolňování škodlivých látek, je velmi ekologická. Její teplotní stabilita při vysokých teplotách usnadňuje dávkování do R-materiálu před vstupem do vyhřívacího bubnu, což umožňuje efektivnější míchání. [4]

Oživovací přísada Storflux je složitým zbytkem z vakuové destilace ropy. Patří mezi fluxační přísady, které mají změkčovací účinek. Storflux lze úspěšně využít k regeneraci oxidovaného asfaltového pojiva v R-materiálu. [3] [8]

Oživovací přísady byly dávkovány v množství 4 % a 12 % do vzorků deseti R-materiálů, které jsou vypsány v tabulce 5.

Tabulka 5: Seznam vybraných R-materiálů

Označení	Místo odběru		Deklarace složení
R1	Obalovna firmy Froněk, spol. s.r.o.	Lubná, okres Rakovník	Směsný
R2	Obalovna firmy Froněk, spol. s.r.o.	Lubná, okres Rakovník	Ložná vrstva
R3	Obalovna firmy Froněk, spol. s.r.o.	Lubná, okres Rakovník	Směsný
R4	Eurovia CS, a.s., obalovna Úžín.	Chlumeck, okres Ústí nad Labem	Směsný
R5	Obalovna firmy Kareta s.r.o.	Bruntál, okres Bruntál	Směsný
R6	Brněnská obalovna s.r.o.	Chrlice, okres Brno-město	Směsný
R7	Brněnská obalovna s.r.o.	Chrlice, okres Brno-město	Směsný
R8	Obalovna firmy Froněk, spol. s.r.o.	Lubná, okres Rakovník	Ložná vrstvy
R9	Obalovna firmy Colas, a.s.	Holubice, okres Vyškov	Směsný
R10	Východočeská obalovna, s r.o.	Plačice, okres Hradec Králové	Směsný

Dále pak byly jednotlivé oživovací přísady (Sylvaroad a Storflux) dávkovány v množství 4 %, 8 % a 12 % do asfaltového pojiva gradace 50/70, které bylo podrobeno dlouhodobému laboratornímu stárnutí metodou 3xRTFOT. Tímto postupem byla simulována situace, která je popsána v předcházejícím odstavci tzn. přidávání oživovacích přísad do reálného degradovaného pojiva.

Pro pokusný úsek byly vytvořeny dvě asfaltová směsi ACO 11 s 50 % R-materiálu a s danou oživovací přísadou.

6 Výsledky zkoušek

Tato kapitola se zabývá vyjádřením výsledků laboratorních zkoušek, které jsou podrobně popsány v kapitole 4.

6.1 Oživovací přísady

Na vzorcích dvou oživovacích přísad byly provedeny dvě laboratorní zkoušky. Jedná se o stanovení dynamické viskozity při teplotě 25 °C a stanovení bodu vzplanutí.

6.1.1 Stanovení dynamické viskozity dle ČSN EN 13702

Tato zkouška se provádí z důvodu zaručení čerpatelnosti oživovacích přísad v průběhu výroby asfaltové směsi na obalovně. Dle naměřených hodnot uvedených v tabulce 6 má oživovací přísada Sylvaroad RP1000 nižší dynamickou viskozitu (tekutější konzistenci) než oživovací přísada Storflux.

Tabulka 6: Výsledky dynamické viskozity oživovacích přísad

Oživovací přísady	Viskozita 25 °C [mPa.s]
Sylvaroad RP1000	87
Storflux	191

6.1.2 Stanovení bodu vzplanutí dle ČSN EN ISO 2592

Stanovení bodu vzplanutí je nutno provést z důvodu zajištění bezpečnosti při výrobě asfaltové směsi s vyšším obsahem R-materiálu, během níž dochází k vysokým teplotám. Z tabulky 7 je patrné, že laboratorně naměřený bod vzplanutí u oživovací přísady Storflux splňuje předepsanou teplotu, která je uvedena v bezpečnostních listech. V případě oživovací přísady Sylvaroad RP1000 je laboratorní hodnota nepatrně nižší než uvádějí bezpečnostní listy, což může být způsobeno nepřesnostmi měření.

Norma ČSN 65 7204 požaduje pro silniční asfalty 50/70 minimální hodnotu bodu vzplanutí 230 °C. Z výsledků je patrné, že přísada Sylvaroad RP1000 tuto hodnotu značně přesahuje a přísada Storflux dosahuje jen o málo nižší hodnoty bodu vzplanutí. Tato přísada by splnila požadavek na bod vzplanutí pro silniční asfalt gradace 160/220 (220 °C).

Tabulka 7: Výsledky bodu vzplanutí oživovacích přísad

Oživovací přísady	Bod vzplanutí [°C]	
	laboratorně	bezpečnostní listy
Sylvaroad RP1000	276	279
Storflux	224	>220

6.2 R–materiály

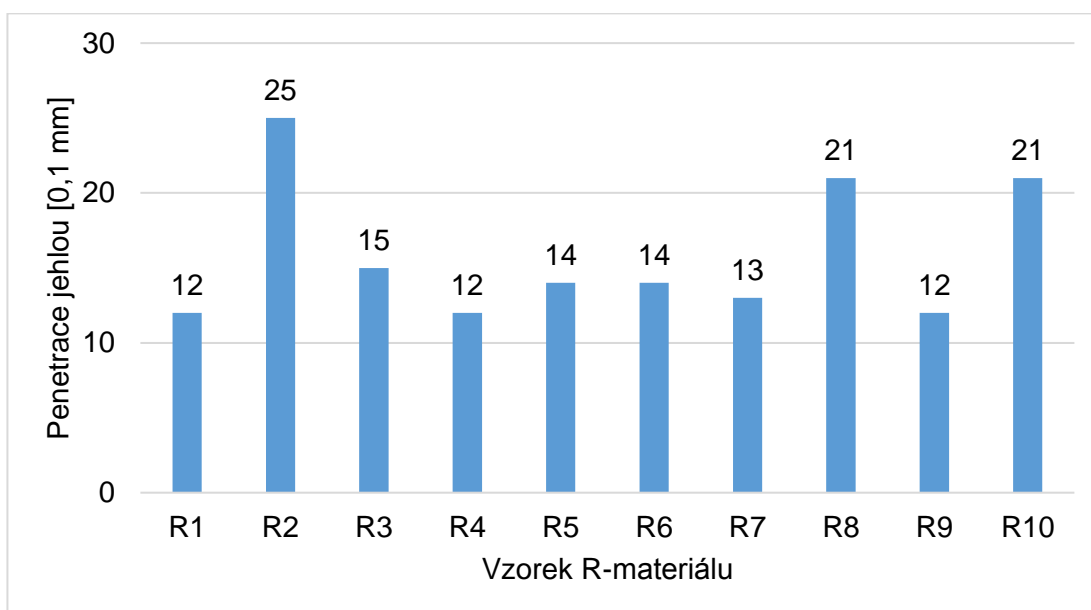
Na vzorcích deseti R-materiálů byly provedeny extrakce asfaltového pojiva a následně jejich zpětná destilace. Na vydestilovaných asfaltových pojivech byly provedeny empirické laboratorní zkoušky jako stanovení penetrace jehlou a bodu měknutí. Dále pak došlo ke stanovení komplexního modulu ve smyku, fázového úhlu a modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru.

6.2.1 Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

V tabulce 8 jsou uvedeny výsledky penetrace jehlou, které byly provedeny na deseti R-materiálech. Z výsledků vyplývá, že u všech vzorků došlo ke snížení penetrace oproti předpokládanému použitému asfaltovému pojivu (50/70). Z grafu 1 vyplývá, že penetrace nyní odpovídá gradaci asfaltového pojiva 10/20 a v případě tří vzorků (R2, R8 a R10) gradaci 20/30. Asfaltové pojivo ve všech R-materiálech značně ztvrdlo. Pro jeho zpětné využití v asfaltových směsích je nutné zlepšit jeho fyzikální vlastnosti přidáním oživovací přísady.

Tabulka 8: Hodnoty penetrace jehlou R-materiálů

Označení R-materiálů	Penetrace jehlou [0,1 mm]
R1	12
R2	25
R3	15
R4	12
R5	14
R6	14
R7	13
R8	21
R9	12
R10	21



Graf 1: Hodnoty penetrace jehlou R-materiálů

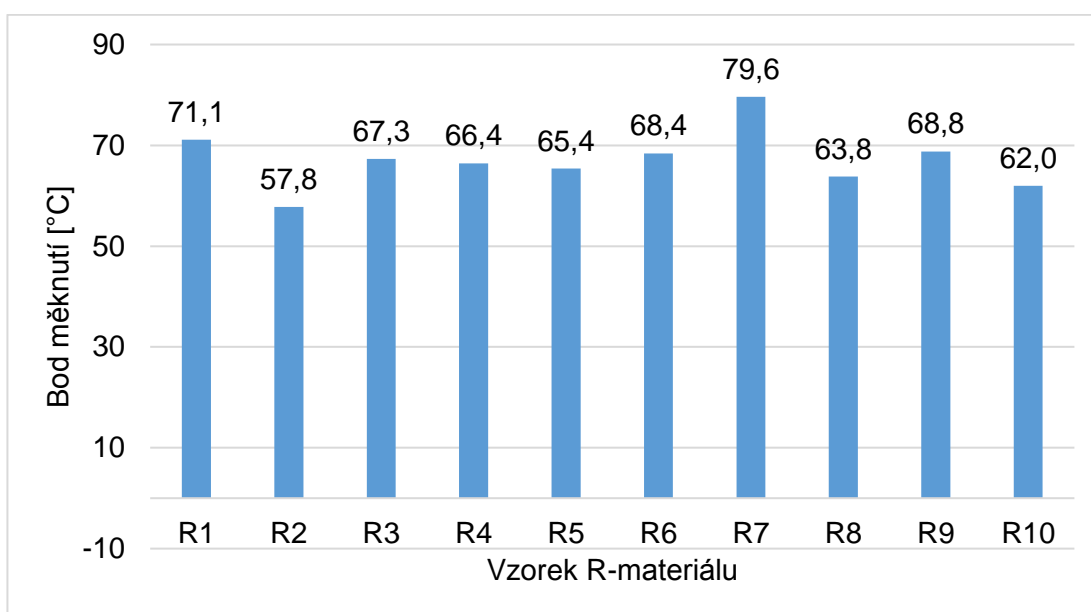
6.2.2 Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427

U všech vzorků došlo ke zvýšení bodu měknutí za předpokladu, že výchozím asfaltovým pojivem u všech vzorků R-materiálů bylo asfaltové pojivo gradace 50/70. Naměřené hodnoty jsou vypsány v tabulce 9. Z grafu 2 je patrné, že stejně jako u stanovení penetrace jehlou došlo k poklesu gradace

asfaltového pojiva z 50/70 (46 až 54 °C) na 20/30 (55 až 63 °C) a 10/20 (66 až 76 °C) dle normy ČSN 65 7204. V případě vzorku asfaltového pojiva z R-materiálu R7 došlo ještě k výraznějšímu poklesu gradace, což může být způsobeno tím, že původní asfaltové pojivo obsažené v R-materiálu bylo polymerem modifikované.

Tabulka 9: Hodnoty bodu měknutí R-materiálů

Označení R-materiálů	Bod měknutí [°C]
R1	71,1
R2	57,8
R3	67,3
R4	66,4
R5	65,4
R6	68,4
R7	79,6
R8	63,8
R9	68,8
R10	62,0



Graf 2: Hodnoty bodu měknutí R-materiálů

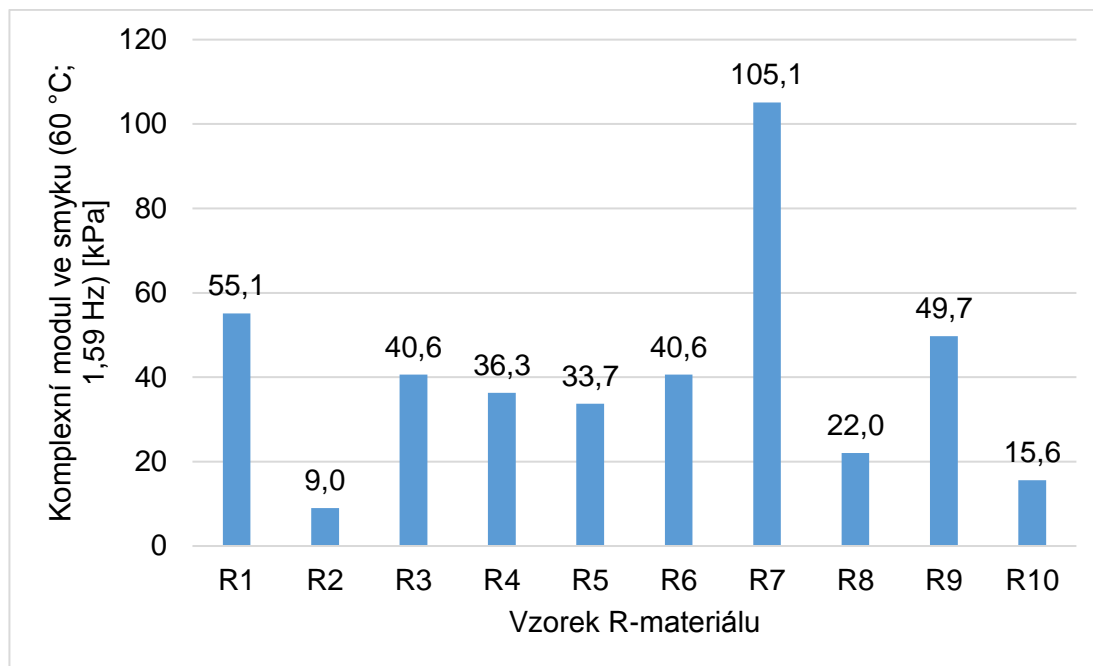
6.2.3 Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770

Komplexní modul ve smyku G^* byl hodnocen při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz. V tabulce 10 jsou vypsány naměřené hodnoty. Z grafu 3 je patrné, že při srovnání všech deseti R-materiálů největší rozdílnost v naměřených hodnotách je u R2 a R7 oproti průměrné hodnotě. R2 nabývá hodnoty 9,0 kPa a R7 105,1 kPa. Z tohoto rozdílu hodnot lze usuzovat, že v případě R-materiálu R7 se jedná o asfaltové pojivo, které je mnohem více zestárlé než asfaltové pojivo vzorku R-materiálu R2.

V [22] je uvedeno srovnání výsledků G^* třinácti vzorků silničních asfaltů 50/70 s různým stupněm zestárnutí. Ze vzájemného porovnání výsledků je možné říci, že G^* srovnávaných pojiv znovuzískaných z R-materiálů R1 až R10 odpovídá poněkud více G^* asfaltových pojiv 50/70 zestárlých metodou RTFOT+PAV.

Tabulka 10: Hodnoty komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)
R-materiálů

Označení R-materiálů	Komplexní modul ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) [kPa]
R1	55,1
R2	9,0
R3	40,6
R4	36,3
R5	33,7
R6	40,6
R7	105,1
R8	22,0
R9	49,7
R10	15,6



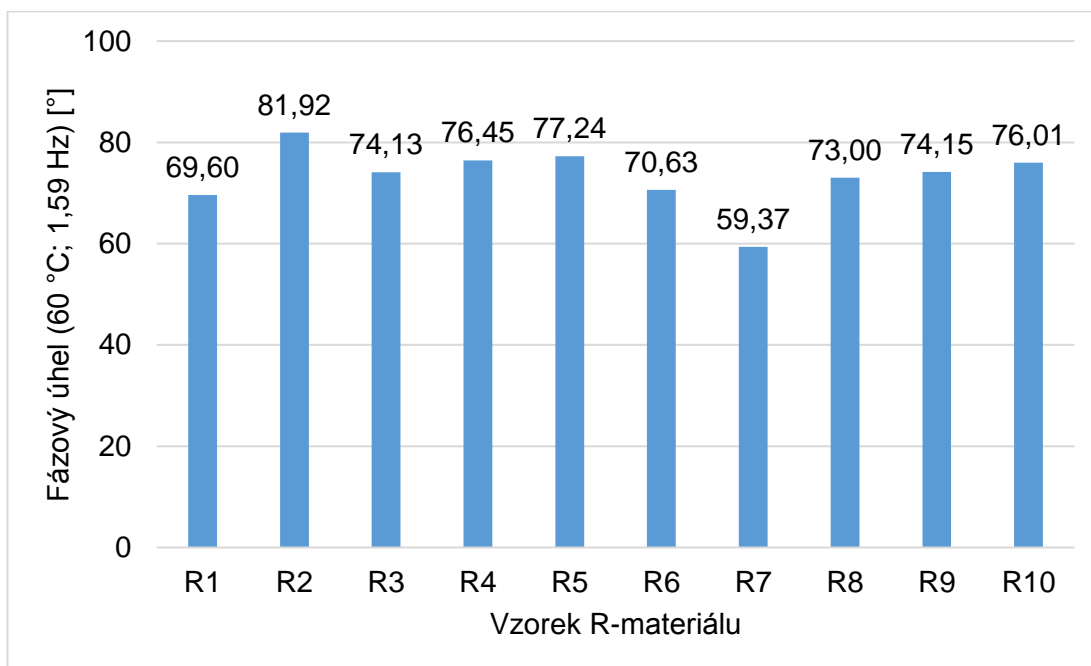
Graf 3: Hodnoty komplexního modulu ve smyku R-materiálů při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz

Při měření komplexního modulu ve smyku G^* (60 °C; 1,59 Hz) dynamickým smykovým reometrem byl zároveň určován fázový úhel δ (60 °C; 1,59 Hz), jehož naměřené hodnoty jsou vypsány v tabulce 11. Jako u předchozího měření tak i zde, jsou největší rozdíly hodnot patrné na vzorku R2 (81,92 °) a R7 (59,37 °), což vyplývá z grafu 4. Nízký fázový úhel u vzorku R7 napovídá, že výchozím asfaltovým pojivem u tohoto R-materiálu bylo modifikované asfaltové pojivo.

Z porovnání výsledků fázových úhlů δ uvedených v [22], které byly naměřeny na třinácti vzorcích laboratorně zestárlých asfaltových pojiv gradace 50/70 metodou RTFOT+PAV, vyplývá, že tato laboratorní simulace téměř odpovídá reálnému stárnutí asfaltového pojiva ve vozovce.

Tabulka 11: Hodnoty fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) R-materiálů

Označení R-materiálů	Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz) [°]
R1	69,60
R2	81,92
R3	74,13
R4	76,45
R5	77,24
R6	70,63
R7	59,37
R8	73,00
R9	74,15
R10	76,01



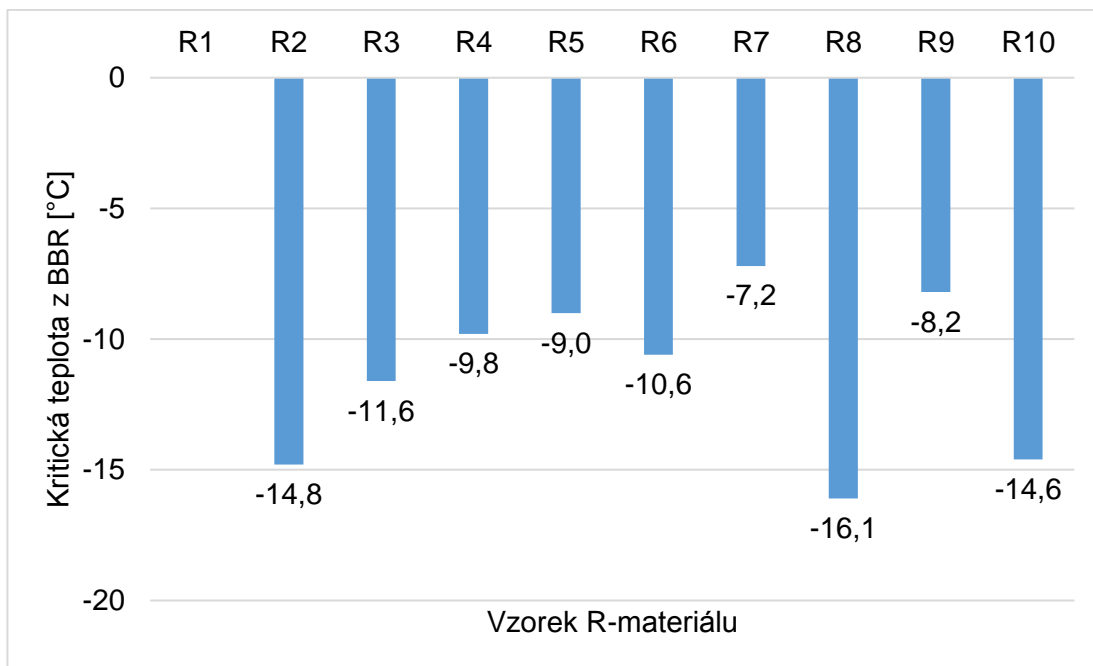
Graf 4: Hodnoty fázového úhlu R-materiálů při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz

6.2.4 Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771

Poslední zkouškou provedenou na R-materiálech bylo stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR). Úkolem bylo určit teplotu, při které je modul tuhosti za ohybu $Sm(60) = 300$ MPa a m-hodnota $m(60) = 0,3$. Větší ze dvou ($Sm(60)$ a m-hodnota) je označována jako kritická teplota a její hodnoty jsou vypsány v tabulce 12. Dle amerického předpisu SHRP vznikl předpoklad, že při teplotě o 10 °C nižší, než je kritická teplota, dochází k riziku vzniku mrazových trhlin ve vozovce. Z důvodu nedostatku asfaltového pojiva nebyla zkouška provedena u vzorku R1. Z grafu 5 je patrné, že hodnota kritické teploty u sledovaných vzorků se pohybuje v rozmezí -7,2 až -16,1 °C.

Tabulka 12: Hodnoty kritické teploty z BBR R-materiálů

Označení R-materiálů	Kritická teplota z BBR [°C]
R1	-
R2	-14,8
R3	-11,6
R4	-9,8
R5	-9,0
R6	-10,6
R7	-7,2
R8	-16,1
R9	-8,2
R10	-14,6



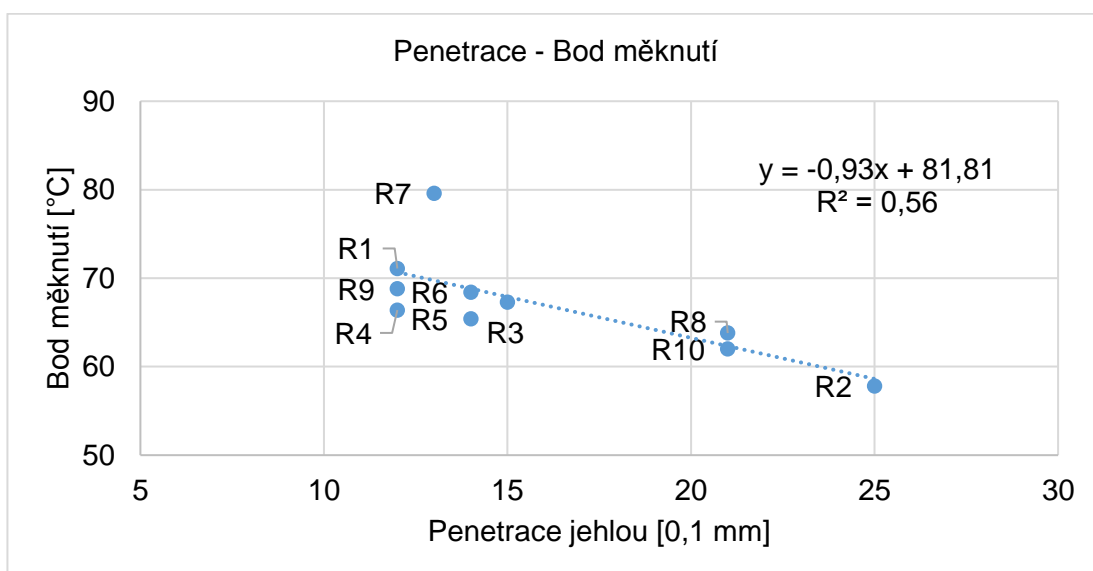
Graf 5: Hodnoty kritické teploty z BBR R-materiálů

6.2.5 Korelace výsledků

Zde jsou grafickou formou znázorněny korelace mezi prováděnými zkouškami. Jednotlivé závislosti jsou popsány korelační funkcí s rovnicí křivky y a koeficientem determinace R^2 . Jestliže koeficient determinace nabývá hodnot blízkých se 1, pak se jedná o silnou závislost. Pokud je naopak jeho hodnota blízká 0, můžeme říci, že mezi proměnnými neexistuje žádná závislost.

6.2.5.1 Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí

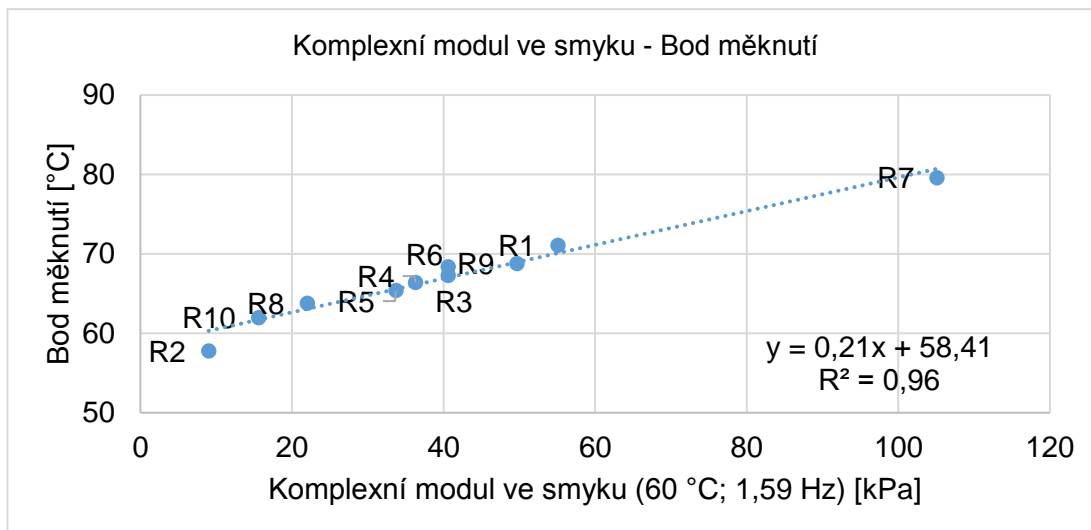
Graf 6 zachycuje závislost mezi penetrací jehlou a bodem měknutí. Závislost mezi proměnnými není příliš silná, což potvrzuje nízký koeficient determinace, který nabývá hodnoty $R^2 = 0,56$.



Graf 6: Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí

6.2.5.2 Závislost komplexního modulu ve smyku a bodu měknutí

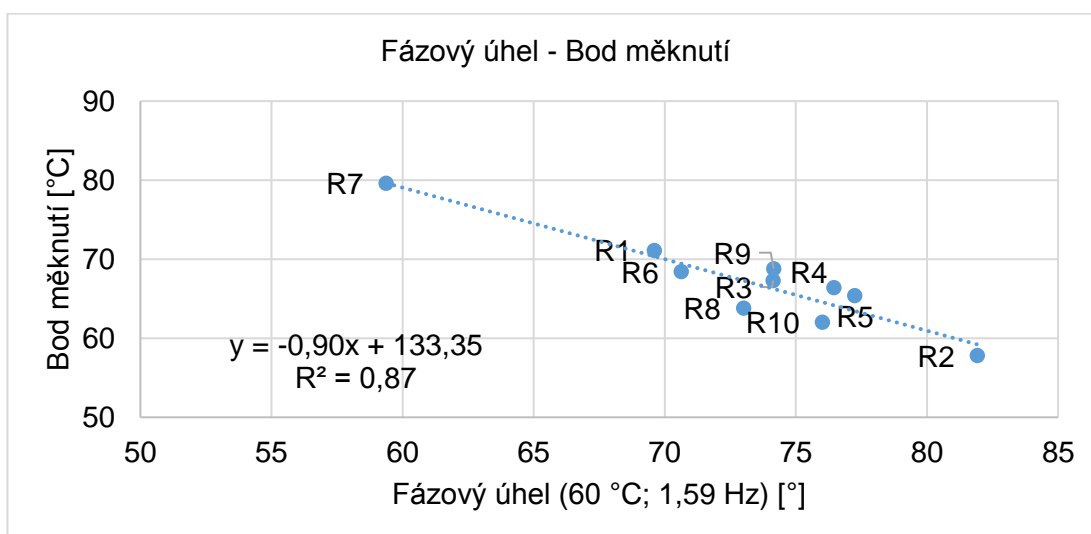
Graf 7 zachycuje závislost komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) a bodu měknutí. Koeficient determinace se blíží 1, z tohoto důvodu lze označit závislost mezi proměnnými za velmi silnou.



Graf 7: Závislost komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) a bodu měknutí

6.2.5.3 Závislost fázového úhlu a bodu měknutí

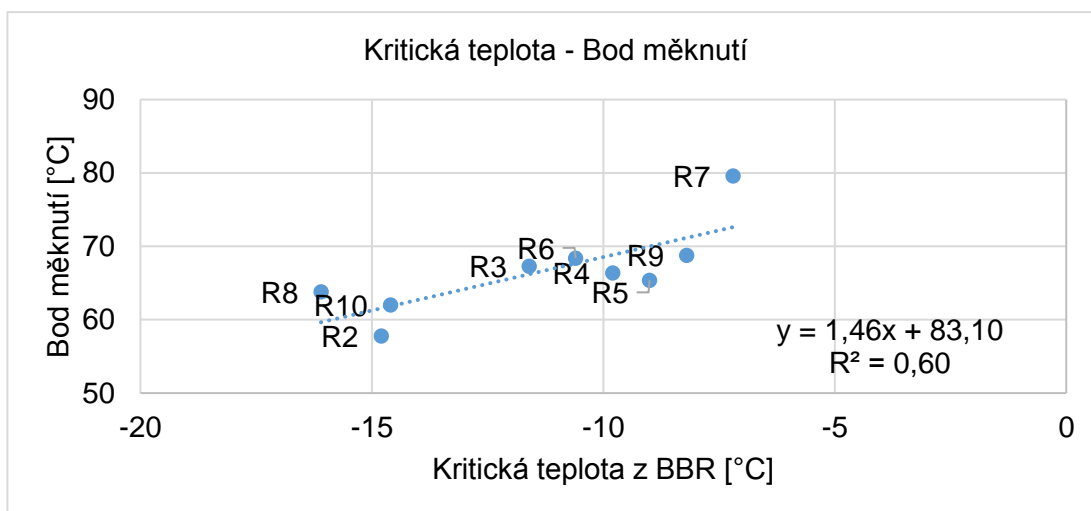
V grafu 8 je graficky popsána závislost mezi fázovým úhlem (60 °C; 1,59 Hz) a bodem měknutí. Dle koeficientu determinace $R^2 = 0,87$, lze označit závislost za silnou.



Graf 8: Závislost fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) a bodu měknutí

6.2.5.4 Závislost kritické teploty a bodu měknutí

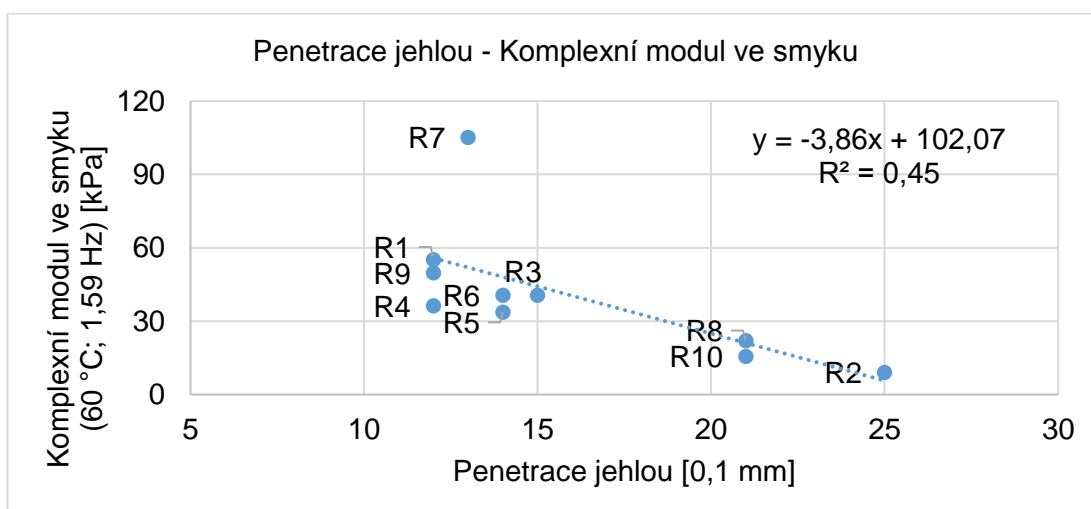
Závislost kritické teploty z BBR a bodu měknutí, která je zobrazena v grafu 9, nabývá hodnoty koeficient determinace $R^2 = 0,60$. Jedná se o spíše slabou závislost.



Graf 9: Závislost kritické teploty a bodu měknutí

6.2.5.5 Závislost penetrace jehlou a komplexního modulu ve smyku

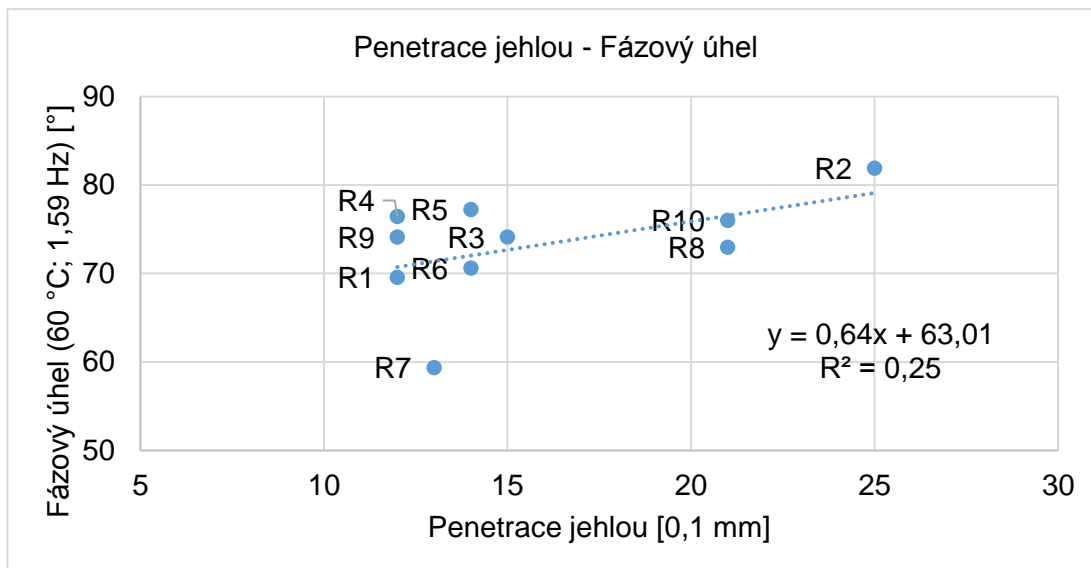
Graf 10 znázorňuje závislost penetrace jehlou a komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz). Koeficient determinace zde nabývá hodnoty $R^2 = 0,45$. Jako ve výše zobrazeném grafu, tak i zde může označit závislost za slabou.



Graf 10: Závislost penetrace a komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)

6.2.5.6 Závislost penetrace jehlou a fázového úhlu

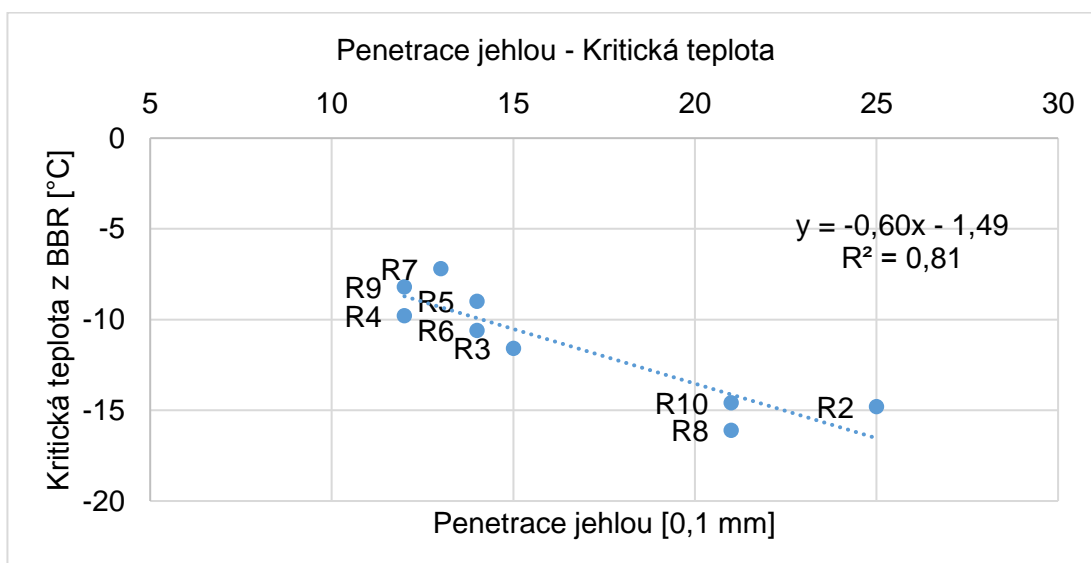
Závislost mezi penetrací jehlou a fázovým úhlem (60 °C; 1,59 Hz), vyplývající z grafu 11, můžeme označit za zanedbatelnou. Důvodem je nízký koeficient determinace $R^2 = 0,25$.



Graf 11: Závislost penetrace jehlou a fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz)

6.2.5.7 Závislost penetrace jehlou a kritické teploty

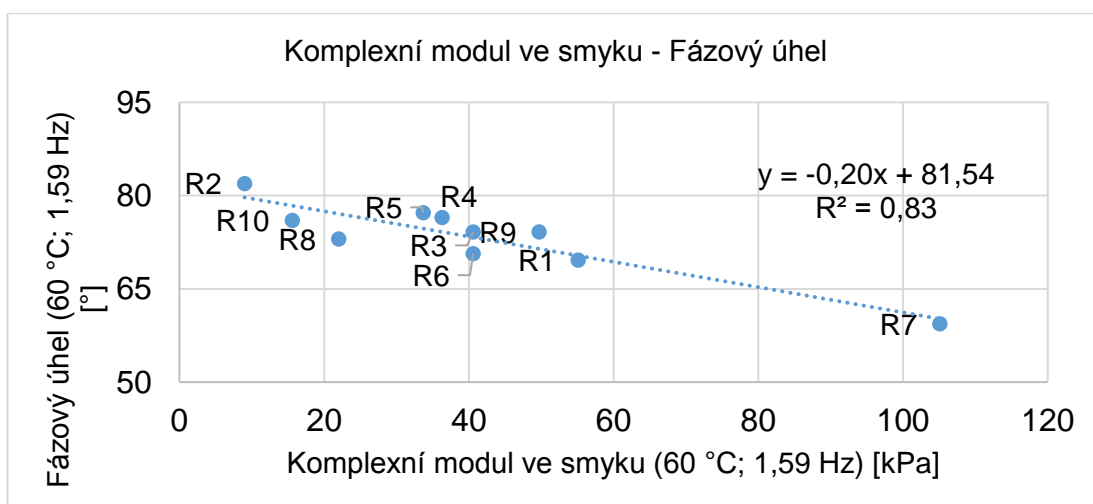
Dle grafického zobrazení závislosti penetrace jehlou a kritické teploty z BBR, která je patrna z grafu 12, lze usuzovat, že se jedná o silnou závislost. Koeficient determinace je $R^2 = 0,81$.



Graf 12: Závislost penetrace jehlou a kritické teploty

6.2.5.8 Závislost komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu

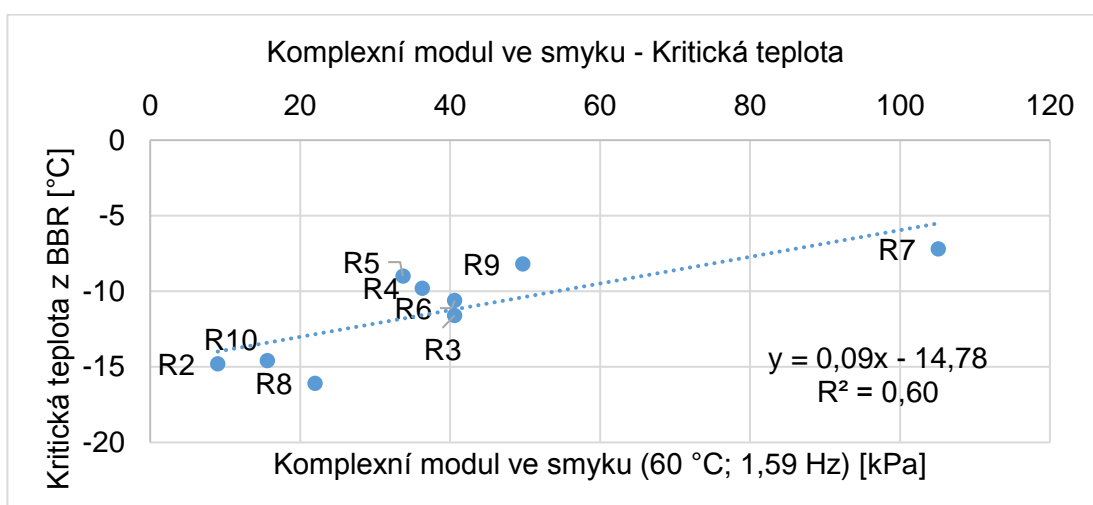
Opět jako u předcházejícího grafu, tak i v případě závislosti komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu, jejichž hodnoty jsou měřeny při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz, se jedná o silnou korelaci mezi proměnnými. Z grafu 13 vyplývá, že koeficient determinace je $R^2 = 0,83$.



Graf 13: Závislost komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz

6.2.5.9 Závislost komplexního modulu ve smyku a kritické teploty

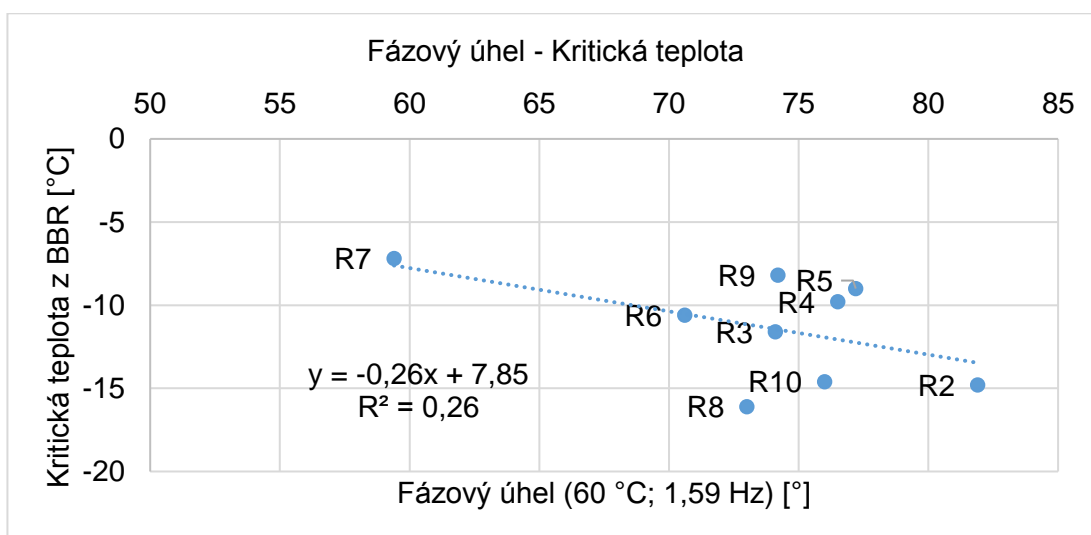
Graf 14 zachycuje závislost komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) a kritické teploty z BBR. Z hodnoty koeficientu determinace $R^2 = 0,60$, lze usuzovat, že se nejedná o nijak zvlášť výraznou závislost, avšak patrnou.



Graf 14: Závislost komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) a kritické teploty

6.2.5.10 Závislost fázového úhlu a kritické teploty

Z grafu 15, který graficky popisuje vztah mezi fázovým úhlem (60 °C; 1,59 Hz) a kritickou teplotou z BBR, lze usoudit, že téměř neexistuje žádná korelace mezi proměnnými, což také potvrzuje nízký koeficient determinace $R^2 = 0,26$.



Graf 15: Závislost fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) a kritické teploty

V tabulce 13 jsou souhrnně vypsány koeficienty determinace R^2 , kterými lze označit závislost výsledků zkoušek mezi sebou. V případě závislosti bodu měknutí a stanovení komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) se jedná o nejsilnější korelaci ve srovnání s ostatními závislostmi mezi proměnnými. Koeficient determinace se blíží hodnotě 1,00, proto lze závislost označit za velmi silnou. Na druhou stranu korelaci mezi penetrací jehlou a stanovením fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) můžeme díky velmi nízkému koeficientu determinace ($R^2 = 0,25$) označit za zanedbatelnou. Obdobně je tomu také u závislosti mezi stanovením fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) a stanovením modulu tuhosti za ohybu, z kterého vychází dolní kritická teplota.

Tabulka 13: Koeficienty determinace

	Penetrace jehlou	Bod měknutí	Komplexní modul ve sm. (60 °C; 1,59 Hz)	Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz)	Kritická teplota z BBR
Penetrace jehlou	-	0,56	0,45	0,25	0,81
Bod měknutí		-	0,96	0,87	0,60
Komplexní modul ve sm. (60 °C; 1,59 Hz)			-	0,83	0,60
Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz)				-	0,26
Kritická teplota z BBR					-

6.3 Dávkování oživovacích přísad do pojiv získaných z R–materiálů

Do deseti vydestilovaných asfaltových pojiv ze vzorků R-materiálů byla přidána oživovací přísada Sylvaroad RP1000 v koncentraci 4 % a 12 %. Stejný postup se aplikoval i při dávkování druhé oživovací přísady Storflux. Tímto vzniklo celkově 38 vzorků, na nichž byly provedeny následující laboratorní zkoušky. Stanovení penetrace jehlou, bodu měknutí, komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu (při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz). U vzorku R1 nedošlo k nadávkování oživovací přísady Storflux v důsledku nedostatku vydestilovaného asfaltového pojiva. Zvoleným optimálním množstvím oživovací přísady jsem se snažila vydestilované asfaltové pojivo z R-materiálů oživit na normované hodnoty pojiva gradace 50/70 dle normy ČSN 65 7204. V případě stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu hodnoty pro pojivo gradace 50/70 norma neuvádí. Z toho důvodu jsem pro výpočet optimálního dávkování oživovacích přísad použila hodnoty, které jsem získala vlastním měřením na pojivu gradace 50/70 v laboratoři. Na základě výsledků penetrace jehlou a stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička bylo možné stanovit optimální dávkování oživovacích přísad pro dosažení požadovaného znovuoživení.

6.3.1 Výpočet účinnosti oživovací přísady

Naměřené hodnoty všech výše jmenovaných zkoušek byly postupně vyneseny do grafů a proloženy spojnicí trendu, která je charakterizována rovnicí přímky a koeficientem determinace R^2 . Rovnici přímky lze popsat jejími parametry **a** a **b**. Pro určení účinnosti oživovací přísady je důležitý parametr **a**, který určuje směrnici přímky (její sklon). Čím je hodnota parametru **a** vyšší tím přímka strměji klesá resp. stoupá, a tedy má daná oživovací přísada vyšší účinnost. Z toho vyplývá, že pro požadované oživení asfaltového pojiva lze oživovací přísadu s vyšší účinností dávkovat v menším množství.

6.3.2 Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

Penetrace jehlou byla provedena dle ČSN EN 1426 a její princip je popsán v kapitole 4.5.

Se zvyšujícím se obsahem oživovací přísady můžeme penetraci jehlou charakterizovat exponenciální funkcí. Po zlogaritmování hodnoty penetrace lze získat lineární závislost mezi hodnotou penetrace jehlou a množstvím oživovací přísady. Z rovnice přímky pak získáme parametry **a** a **b**, z kterých lze odvodit účinnost oživovacích přísad. Čím je parametr **a** vyšší, tím je daná oživovací přísada účinnější a je možné ji dávkovat v menším množství.

Rozmezí optimálního množství oživovací přísady lze vypočítat dle rovnic 6.1 a 6.2. Z obou grafů (graf 16 a graf 17) je patrné, že dávkováním oživovací přísady bylo snahou dosáhnout oboru rozmezí penetrace pro pojivo gradace 50/70 tj. 50 – 70 [0,1 mm].

$$\text{Minimální množství oživovací přísady} = \frac{\ln(\text{penetrace}_{min}) - b}{a} \quad (6.1)$$

$$\text{Maximální množství oživovací přísady} = \frac{\ln(\text{penetrace}_{max}) - b}{a} \quad (6.2)$$

Pojivo gradace 50/70:

$$\text{penetrace}_{min} = 50 [0,1 \text{ mm}]$$

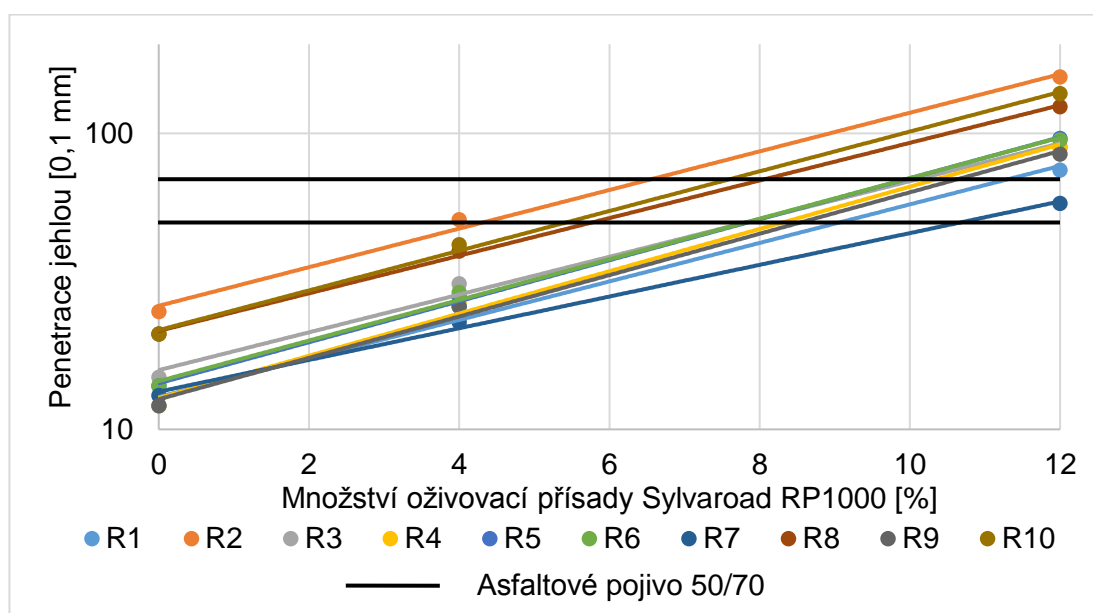
$$\text{penetrace}_{max} = 70 [0,1 \text{ mm}]$$

6.3.2.1 R-materiály s oživovací přísadou Sylvaroad RP1000

Z tabulky 14 je patrné, že přidáním oživovací přísady dochází ke zvýšení penetrace jehlou. Koeficient determinace R^2 nabývá u všech vzorků hodnoty 1,00. U oživovací přísady Sylvaroad RP1000 se její účinnost pohybuje kolem 0,12 – 0,16. Výpočtem dle rovnic 6.1 a 6.2 je odvozeno rozmezí optimálního množství oživovací přísady, které se u jednotlivých vzorků liší. Průměrné optimální dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000, které je nutné přidat pro oživení asfaltového pojiva z R-materiálů, je 8,7 % hmotnosti.

Tabulka 14: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 na základě penetrace jehlou

Označení R-mat.	Sylvaroad RP1000			Parametry přímký		Kofic. deter.	Optimální množství oživ. př. [%]	Průměr. opt. množst. oživ. př. [%]
	Penetrace jehlou dle množství oživ. př. [0,1 mm]			a	b			
	0 %	4 %	12 %					
R1	12	26	75	0,15	2,55	1,00	9,1 – 11,3	10,2
R2	25	51	155	0,15	3,26	1,00	4,3 – 6,6	5,5
R3	15	31	90	0,15	2,76	1,00	7,8 – 10,1	9,0
R4	12	27	89	0,16	2,55	1,00	8,3 – 10,4	9,4
R5	14	28	96	0,16	2,66	1,00	7,8 – 10,0	8,9
R6	14	29	95	0,16	2,68	1,00	7,8 – 9,9	8,9
R7	13	23	58	0,12	2,60	1,00	10,7 – 13,4	12,1
R8	21	40	123	0,15	3,07	1,00	5,8 – 8,1	7,0
R9	12	26	85	0,16	2,54	1,00	8,5 – 10,6	9,6
R10	21	42	136	0,15	3,07	1,00	5,4 – 7,6	6,5



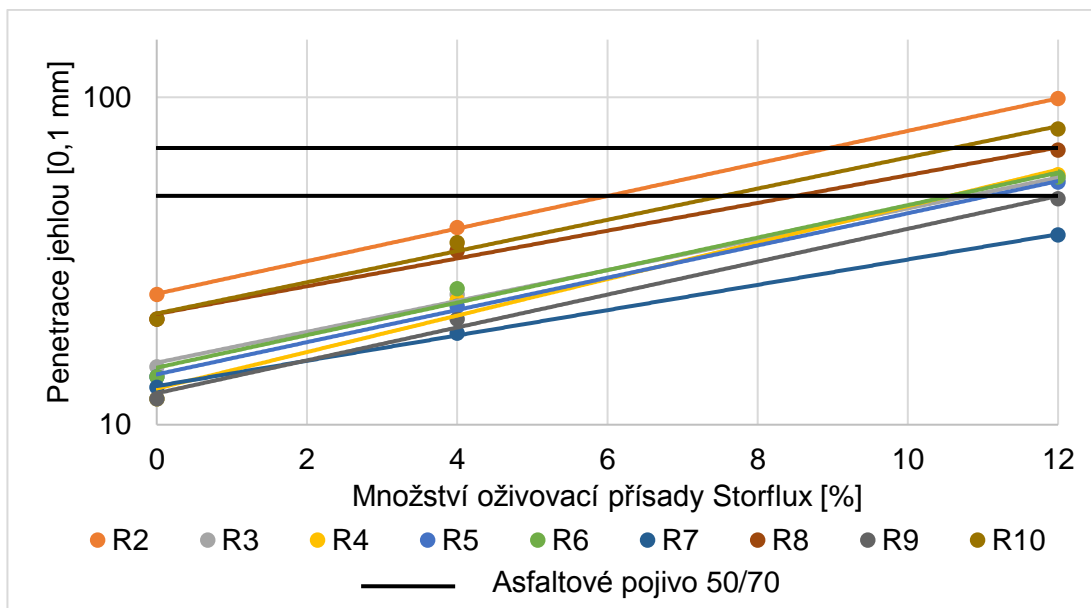
Graf 16: Závislost penetrace jehlou na množství oživovací přísady Sylvaroad RP1000

6.3.2.2 R-materiály s oživovací přísadou Storflux

Stejně jako u dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 je z tabulky 15 patrné, že i zde dochází s rostoucím obsahem přísady k nárůstu penetrace jehlou. Hodnota koeficientu determinace se pohybuje v rozmezí 0,99 - 1,00. Parametr přímky oživovací přísady Storflux *a* (0,09 – 0,12) nabývá nižší účinnosti než v případě oživení R-materiálů oživovací přísadou Sylvaroad RP1000. Z tohoto důvodu také vzrostlo množství optimálního dávkování oživovací přísady, které průměrně nabývá hodnoty 11,8 %.

Tabulka 15: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Storflux na základě penetrace jehlou

Označení R-mat.	Storflux			Parametry přímky		Koefic. deter.	Optimální množství oživ. př. [%]	Průměr. opt. množst. oživ. př. [%]
	Penetrace jehlou dle množství oživ. př. [0,1 mm]							
	0 %	4 %	12 %	a	b			
R1	12	-	-	-	-	-	-	-
R2	25	40	99	0,11	3,22	1,00	6,0 – 9,0	7,5
R3	15	25	56	0,11	2,74	1,00	10,8 – 13,9	12,4
R4	12	24	58	0,13	2,56	0,99	10,6 – 13,2	11,9
R5	14	23	55	0,11	2,66	1,00	11,1 – 14,1	12,6
R6	14	26	57	0,11	2,70	0,99	10,6 – 13,5	12,1
R7	13	19	38	0,09	2,57	1,00	15,0 – 18,8	16,9
R8	21	34	69	0,10	3,08	1,00	8,5 – 12,0	10,3
R9	12	21	49	0,12	2,52	1,00	12,0 – 14,9	13,5
R10	21	36	80	0,11	3,08	1,00	7,5 – 10,6	9,1



Graf 17: Závislost penetrace jehlou na množství oživovací přísady Storflox

6.3.3 Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427

Zkouška bodu měknutí byla provedena dle ČSN EN 1427 a její princip je popsán v kapitole 4.6.

Se zvyšujícím se obsahem oživovací přísady lze bod měknutí charakterizovat lineární funkcí. Závislost bodu měknutí a množství oživovací přísady má lineární korelaci, to znamená, že koeficient determinace se blíží 1,00. Z toho důvodu lze dle hodnoty parametru přímky a hodnotit účinnost dané oživovací přísady.

Stejně jako u penetrace jehlou, tak i zde jsem se dávkováním optimálního množství oživovací přísady snažila docílit oboru bodu měknutí pro pojivo gradace 50/70 tj. 46 – 54 °C. Výpočet byl proveden dle rovnic 6.3 a 6.4. Rovnice jsou obdobné jako u předchozí zkoušky.

$$\text{Minimální množství oživovací přísady} = \frac{KK_{max} - b}{a} \quad (6.3)$$

$$\text{Maximální množství oživovací přísady} = \frac{KK_{min} - b}{a} \quad (6.4)$$

Pojivo gradace 50/70:

$$KK_{min} = 46 \text{ } ^\circ\text{C}$$

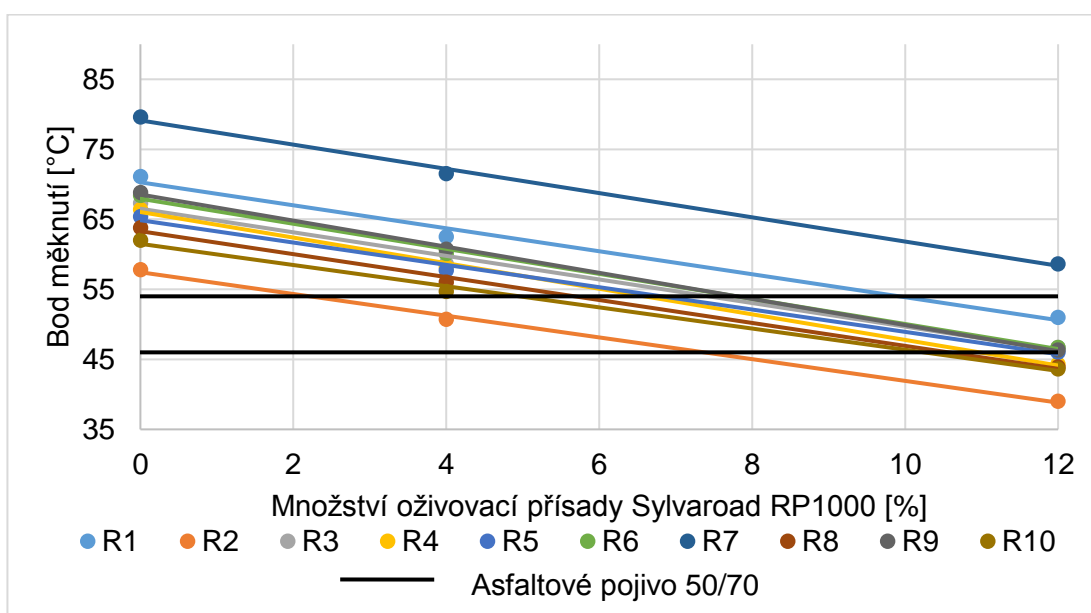
$$KK_{max} = 54 \text{ } ^\circ\text{C}$$

6.3.3.1 R-materiály s oživovací přísadou Sylvaroad RP1000

V tabulce 16 jsou vypsány naměřené hodnoty bodu měknutí před a po dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000. Z grafu 18 je patrný trend snižujícího se bodu měknutí v závislosti na zvyšujícím se množství dávkované oživovací přísady. Koeficient determinace se pohybuje v rozmezí 0,99 – 1,00. Účinnost dané oživovací přísady lze hodnotit dle parametru **a**, který se pohybuje v rozmezí -1,51 až -1,86. Pro oživení všech asfaltových pojiv z R-materiálů tak, aby stanovení bodu měknutí odpovídalo normovým hodnotám pro pojivo gradace 50/70 je nutné, aby bylo průměrně dávkováno množství 9,8 % oživovací přísady Sylvaroad RP1000.

Tabulka 16: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 na základě bodu měknutí

Označení R-mat.	Sylvaroad RP1000			Parametry přímky		Kofic. deter.	Optimální množství oživ. př. [%]	Průměr. opt. množst. oživ. př. [%]
	Bod měknutí dle množství oživ. př. [°C]							
	0 %	4 %	12 %	a	b			
R1	71,1	62,5	51,0	-1,64	70,29	0,99	9,9 – 14,8	12,4
R2	57,8	50,7	39,0	-1,55	57,44	1,00	2,2 – 7,4	4,8
R3	67,3	58,6	46,7	-1,68	66,51	0,99	7,4 – 12,2	9,8
R4	66,4	58,2	44,3	-1,83	66,04	1,00	6,6 – 11,0	8,8
R5	65,4	57,7	46,0	-1,59	64,87	0,99	6,8 – 11,9	9,4
R6	68,4	60,1	46,7	-1,79	67,94	1,00	7,8 – 12,3	10,1
R7	79,6	71,5	58,6	-1,73	79,13	1,00	14,5 – 19,2	16,9
R8	63,8	56,0	43,9	-1,64	63,30	1,00	5,7 – 10,5	8,1
R9	68,8	60,7	46,3	-1,86	68,54	1,00	7,8 – 12,1	10,0
R10	62,0	54,7	43,6	-1,51	61,50	0,99	5,0 – 10,3	7,7



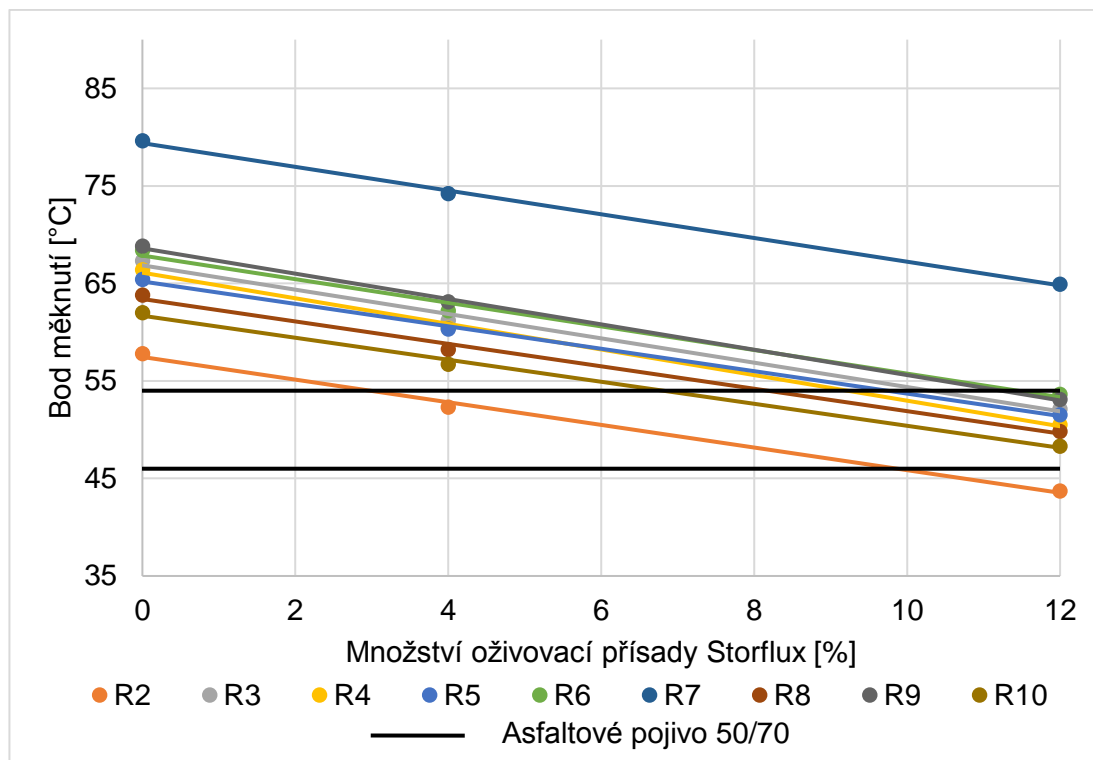
Graf 18: Závislost bodu měknutí na množství oživovací přísady Sylvaroad RP1000

6.3.3.2 R-materiály s oživovací přísadou Storflux

Z naměřených hodnot, které jsou vypsány v tabulce 17, lze stejně jako u dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000, usuzovat, že se zvyšujícím se obsahem oživovacích přísad dochází ke změkčování asfaltového pojiva. Z grafu 19 lze vyčíst, že koeficient determinace se stejně jako u dávkování předešlé oživovací přísady blíží 1,00. Co se týče účinnosti dané oživovací přísady, v tomto případě nabývá parametr a hodnot (-1,13 až -1,31). Absolutní hodnoty parametru a jsou nižší než u oživovací přísady Sylvaroad RP1000, z toho vyplývá, že oživovací přísada Storflux má nižší účinnost. Optimální množství oživovací přísady Storflux (průměrně 13,4 %) bude vyšší než v případě dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 (průměrně 9,8 %) do všech vzorků asfaltových pojiv z R-materiálů.

Tabulka 17: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Storflux na základě bodu měknutí

Označení R-mat.	Storflux			Parametry přímky		Koefi. deter.	Optimální množství oživ. př. [%]	Průměr. opt. množství oživ. př. [%]
	Bod měknutí dle množství oživ. př. [°C]							
	0 %	4 %	12 %	a	b			
R1	71,1	-	-	-	-	-	-	-
R2	57,8	52,3	43,7	-1,16	57,46	1,00	3,0 – 9,9	6,5
R3	67,3	61,2	52,1	-1,25	66,86	0,99	10,3 – 16,7	13,5
R4	66,4	60,4	50,5	-1,31	66,10	1,00	9,2 – 15,3	12,3
R5	65,4	60,3	51,5	-1,15	65,20	1,00	9,7 – 16,7	13,2
R6	68,4	62,2	53,6	-1,21	67,86	0,99	11,5 – 18,1	14,8
R7	79,6	74,2	64,9	-1,22	79,39	1,00	20,8 – 27,4	24,1
R8	63,8	58,2	49,8	-1,15	63,40	0,99	8,2 – 15,1	11,7
R9	68,8	63,1	53,1	-1,30	68,60	1,00	11,2 – 17,4	14,3
R10	62,0	56,7	48,3	-1,13	61,69	1,00	6,8 – 13,9	10,4



Graf 19: Závislost bodu měknutí na množství oživovací přísady Storflux

6.3.4 Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770

Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu vychází z normy ČSN EN 14770 a je prováděno na dynamickém smykovém reometru (DSR) při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz. Podstata zkoušky je popsána v kapitole 4.7.

Komplexní modul ve smyku má exponenciální průběh v závislosti na množství oživovací přísady a silnou korelaci, což potvrzuje vysoký koeficient determinace, který se blíží 1,00. Hodnoty modulu ve smyku po zlogaritmování lze proložit přímkou, která je charakterizována parametry **a** a **b**. Parametr **a** udává účinnost dané oživovací přísady.

Optimální množství dávkování oživovací přísady vychází z rovnice 6.5. Výchozí (originální) komplexní modul ve smyku (60 °C; 1,59 Hz), kterého chceme dávkováním oživovacích přísad dosáhnout, je na základě měření komplexního modulu ve smyku běžného vzorku pojiva gradace 50/70 2,3 kPa.

$$\text{Množství oživovací přísady} = \frac{\ln(G *_{\text{originální}}) - b}{a}$$

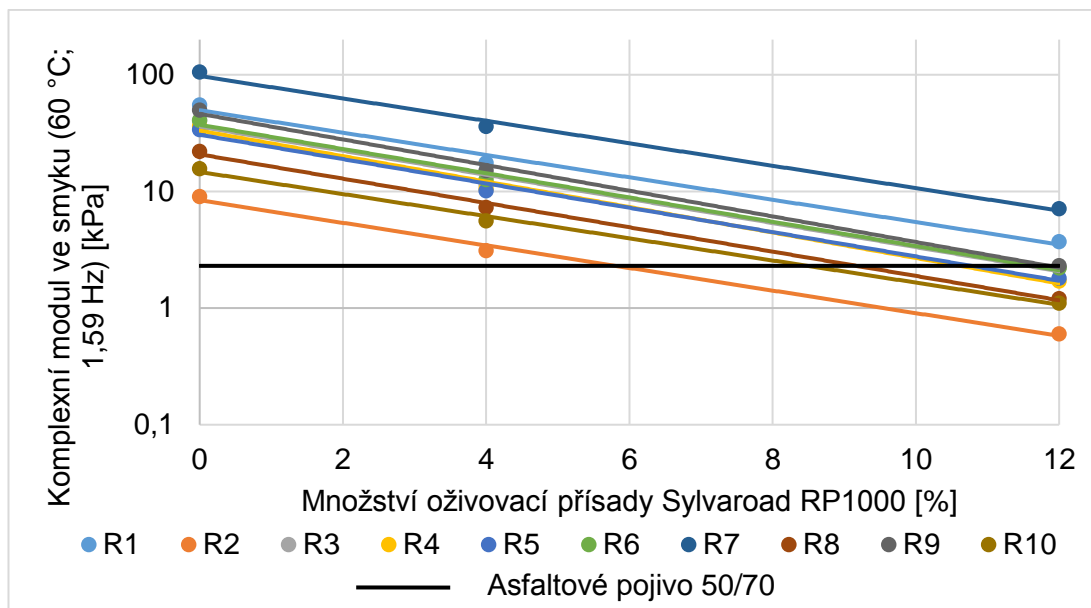
(6.5)

6.3.4.1 R-materiály s oživovací přísadou Sylvaroad RP1000

Pro oživovací přísadu Sylvaroad RP1000 je účinnost průměrně -0,23. Jak lze vyčíst z tabulky 18, koeficient determinace má silnou korelaci blížíící se 1,00. Z grafu 20 vyplývá, že po zlogaritmování hodnot komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) lze pozorovat snížení těchto hodnot v závislosti na zvyšujícím se obsahu oživovací přísady. Při srovnání optimálního množství dávkování oživovací přísady pro jednotlivé R-materiály je patrné, že pro dosažení stejné hodnoty komplexního modulu ve smyku jako u pojiva gradace 50/70 je nutné největší množství přísady dávkovat do vzorku R7. Průměrné dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 je 11,1 %.

Tabulka 18: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 na základě komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)

Označení R-mat.	Sylvaroad RP1000			Parametry přímky		Koeficient determinace	Optimální množství oživ. př. [%]
	Komplex. modul ve sm. (60 °C; 1,59 Hz) dle množství oživ. př. [kPa]						
	0 %	4 %	12 %	a	b		
R1	55,1	17,5	3,7	-0,22	3,90	0,99	13,9
R2	9,0	3,1	0,6	-0,22	2,13	1,00	5,9
R3	40,6	11,5	2,2	-0,24	3,58	0,99	11,4
R4	36,3	10,6	1,7	-0,25	3,50	1,00	10,7
R5	33,7	10,1	1,8	-0,24	3,42	1,00	10,8
R6	40,6	12,6	2,2	-0,24	3,62	1,00	11,6
R7	105,1	36,0	7,1	-0,22	4,58	1,00	17,0
R8	22,0	7,3	1,2	-0,24	3,03	1,00	9,2
R9	49,7	15,1	2,3	-0,25	3,83	1,00	12,0
R10	15,6	5,6	1,1	-0,22	2,69	1,00	8,4



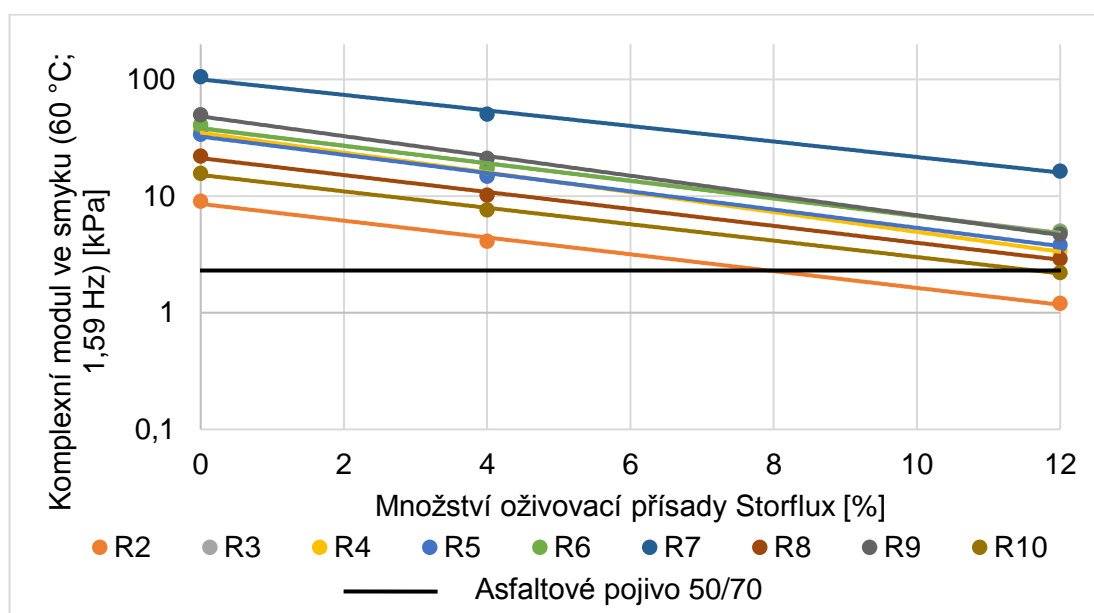
Graf 20: Závislost komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) na množství oživovací přísady Sylvaroad RP1000

6.3.4.2 R-materiály s oživovací přísadou Storflux

V tabulce 19 jsou vypsány hodnoty, které byly naměřeny na vzorcích deseti R-materiálů oživených oživovací přísadou Storflux. Ta má dle průměrné absolutní hodnoty parametru přímky ($a = -0,14$) nižší účinnost než oživovací přísada Sylvaroad RP1000 a tedy i vyšší optimální dávkování oživovacích přísad. Například výše zmíněný vzorek R7 je potřeba oživit 24,7 % oživovací přísady pro dosažení požadovaného komplexního modulu ve smyku. Průměrné dávkování oživovací přísady Storflux je 14,9 %, což je o 3,8 % více než v případě dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000, pokud se snažíme docílit stejných vlastností u oživeného asfaltového pojiva. Z grafu 21 je patrné, že pouze dva vzorky dosáhnou optimálního dávkování oživovací přísady před hranicí 12 %.

Tabulka 19: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Storflux na základě komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)

Označení R-mat.	Storflux			Parametry přímky		Koeficient determinace	Optimální množství oživ. př. [%]
	Komplex. modul ve sm. (60 °C; 1,59 Hz) dle množství oživ. př. [kPa]						
	0 %	4 %	12 %	a	b		
R1	55,1	-	-	-	-	-	-
R2	9,0	4,1	1,2	-0,17	2,15	1,00	7,9
R3	40,6	17,3	5,0	-0,17	3,64	1,00	16,3
R4	36,3	15,0	3,4	-0,20	3,55	1,00	13,9
R5	33,7	14,8	3,8	-0,18	3,48	1,00	14,7
R6	40,6	17,4	4,9	-0,17	3,64	1,00	16,2
R7	105,1	50,3	16,3	-0,15	4,61	1,00	24,6
R8	22,0	10,2	2,9	0,17	3,05	1,00	13,3
R9	49,7	21,1	4,7	-0,20	3,88	1,00	15,6
R10	15,6	7,6	2,2	-0,16	2,72	1,00	11,6



Graf 21: Závislost komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) na množství oživovací přísady Storflux

Fázový úhel byl měřen pomocí dynamického smykového reometru společně s komplexním modulem ve smyku při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz. V závislosti na množství přidávané oživovací přísady dochází k lineárnímu stoupaní fázového úhlu, které je popsáno parametry přímky **a** a **b**. Dle parametru **a** je možné určit účinnost dané oživovací přísady.

Dávkování optimálního množství oživovací přísady bylo stanoveno dle požadovaného fázového úhlu výchozího (originálního) asfaltového pojiva gradace 50/70 (86 °) a bylo odvozeno z rovnice 6.6.

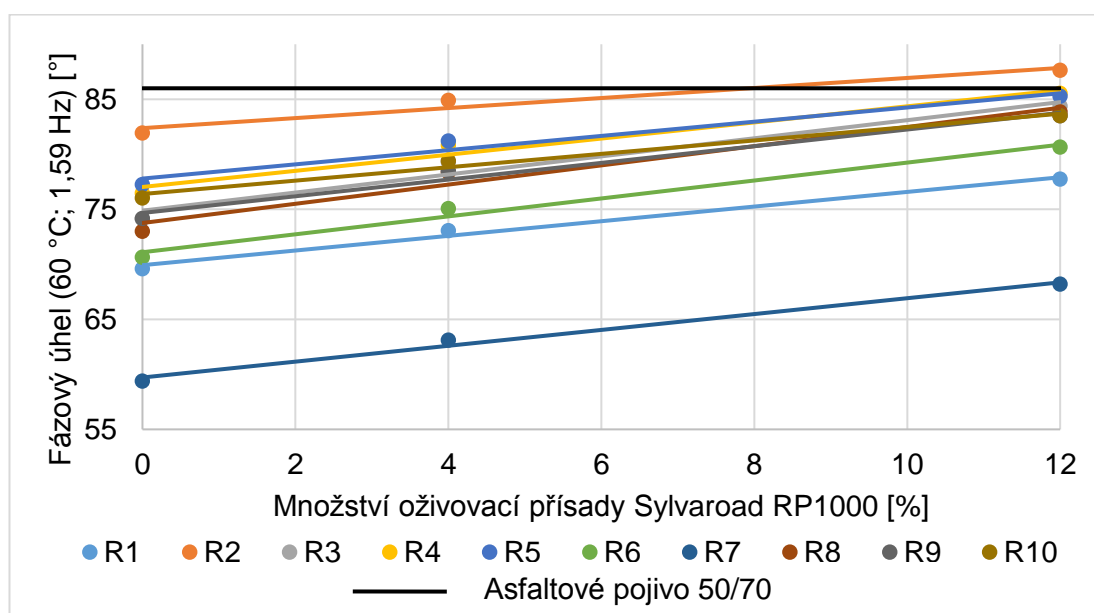
$$\text{Množství oživovací přísady} = \frac{\delta_{\text{originální}} - b}{a} \quad (6.6)$$

6.3.4.3 R-materiály s oživovací přísadou Sylvaroad RP1000

Z grafu 22 je patrné, že v závislosti na množství přidané oživovací přísady dochází k lineárnímu nárůstu hodnot fázového úhlu. Silná závislost proměnných je potvrzena vysokým koeficientem determinace, který se pohybuje v rozmezí 0,95 - 0,99. V tabulce 20 jsou uvedeny parametry přímky **a** pro jednotlivé R-materiály, podle nichž lze ohodnotit účinnost oživovací přísady Sylvaroad RP1000. Jejich průměrná hodnota je 0,72. Co se týče optimálního dávkování oživovací přísady pouze pro vzorek asfaltového pojiva z R-materiálu R2 je možné jej dávkovat pod hranici 12 %. Pro ostatní vzorky musí být dávkování nepřiměřeně velké (průměrně 16,9 %).

Tabulka 20: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 na základě fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz)

Označení R-mat.	Sylvaroad RP1000			Parametry přímky		Koeficient determinace	Optimální množství oživ. př. [%]
	Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz) dle množství oživ. př. [°]						
	0 %	4 %	12 %	a	b		
R1	69,60	73,07	77,75	0,67	69,92	0,99	24,0
R2	81,92	84,89	87,62	0,46	82,38	0,95	7,9
R3	74,13	79,29	84,37	0,82	74,88	0,96	13,6
R4	76,45	80,83	85,54	0,73	77,03	0,97	12,3
R5	77,24	81,21	85,27	0,65	77,79	0,97	12,6
R6	70,63	75,06	80,64	0,81	71,10	0,98	18,4
R7	59,37	63,11	68,19	0,72	59,71	0,99	36,5
R8	73,00	78,38	83,85	0,87	73,76	0,97	14,1
R9	74,15	78,48	83,51	0,87	73,76	0,97	14,1
R10	76,01	79,39	83,50	0,61	76,39	0,98	15,8



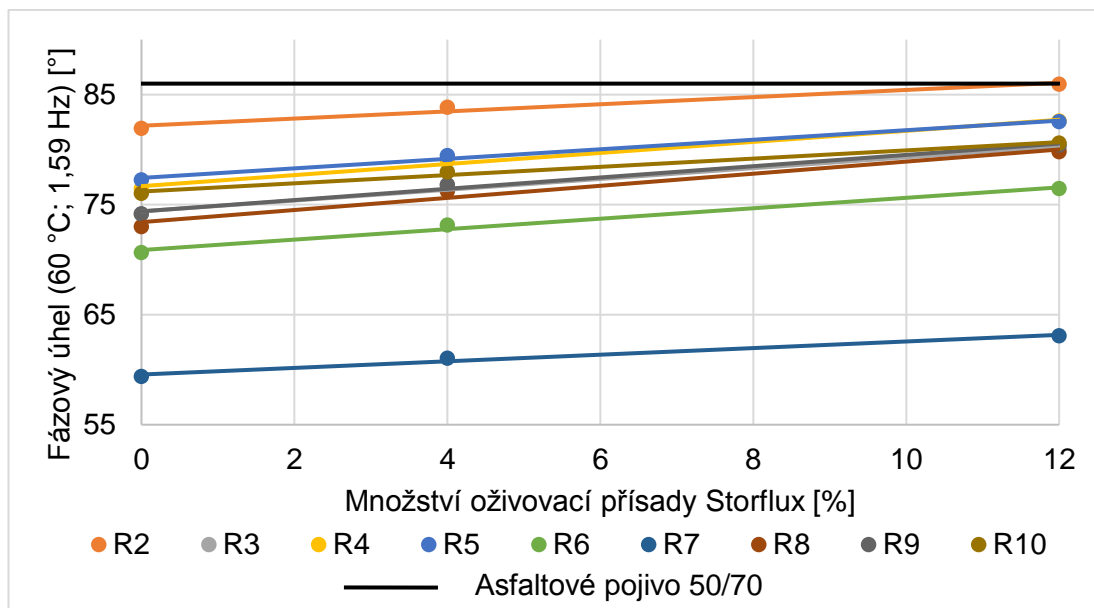
Graf 22: Závislost fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) na množství oživovací přísady Sylvaroad RP1000

6.3.4.4 R-materiály s oživovací přísadou Storflux

Průměrná účinnost oživovací přísady Storflux ($a = 0,44$) je menší než účinnost předchozí oživovací přísady. Z grafu 23 vyplývá, že stejně jako u oživovací přísady Storflux RP1000, tak i zde lze pouze do vzorku R2 dávkovat optimální množství oživovací přísady pod 12 %, abychom získali fázový úhel výchozího (originálního) asfaltového pojiva gradace 50/70. Co se týče všech vzorků asfaltových pojiv z R-materiálů, je nutné do nich přidat vysoké množství oživovací přísady Storflux (průměrně 29,6 %). V tabulce 21 jsou uvedeny hodnoty koeficientu determinace (0,97 – 0,99), které znázorňují závislost mezi množstvím přidané oživovací přísady a hodnotou fázového úhlu.

Tabulka 21: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Storflux na základě fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz)

Označení R-mat.	Storflux			Parametry přímky		Koeficient determinace	Optimální množství oživ. př. [%]
	Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz) dle množství oživ. př. [°]						
	0 %	4 %	12 %	a	b		
R1	69,60	-	-	-	-	-	-
R2	81,92	83,85	85,95	0,33	82,17	0,97	11,6
R3	74,13	76,75	80,15	0,49	74,39	0,99	23,7
R4	76,45	79,04	82,60	0,50	76,68	0,99	18,6
R5	77,24	79,45	82,54	0,43	77,43	0,99	19,9
R6	70,63	73,14	76,45	0,47	70,87	0,99	32,2
R7	59,37	61,05	63,07	0,30	59,56	0,98	88,1
R8	73,00	76,23	79,81	0,55	73,41	0,97	22,9
R9	74,15	76,80	80,43	0,51	74,39	0,99	22,8
R10	76,01	77,96	80,59	0,37	76,19	0,99	26,5



Graf 23: Závislost fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) na množství oživovací přísady Storflux

6.3.5 Určení optimálního dávkování oživovacích přísad

V kapitolách 6.3.2 a 6.3.3 bylo odvozeno optimální dávkování pro jednotlivé oživovací přísady. Snahou bylo oživit vydestilované asfaltové pojivo z R-materiálu tak, abychom získali vlastnosti asfaltového pojiva gradace 50/70. Pro každý vzorek R-materiálu byl odvozen rozsah optimálního množství oživovací přísady, který se u penetrace jehlou a bodu měknutí liší. Aby došlo u R-materiálu k požadovaným oživovacím změnám, je výsledný rozsah množství oživovací přísady průnikem obou rozsahů (penetrace a bodu měknutí). V případě vzorku R7 nedošlo k průniku rozsahů ani u jedné oživovací přísady. Lze tudíž předpokládat, že původní asfaltová směs, z které je vzorek odebrán, obsahovala jiný druh asfaltového pojiva, než je asfaltové pojivo gradace 50/70 – např. asfaltové pojivo, jehož vlastnosti jsou vylepšeny modifikátory.

V tabulce 22 jsou u každého vzorku R-materiálu vypsány rozsahy optimálního množství oživovací přísady Sylvaroad RP1000 dle penetrace jehlou a bodu měknutí. Podle rozsahů je patrné, že přísnější požadavek na množství oživovací přísady je dán zkouškou penetrace jehlou. Aby byly asfaltovým

pojivům z R-materiálů navraceny vlastnosti výchozího (originálního) asfaltového pojiva gradace 50/70 je nutné do nich průměrně dávkovat 8,4 % oživovací přísady Sylvaroad RP1000.

Tabulka 22: Hledání optimálního dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 na základě penetrace jehlou a bodu měknutí pro pojivo gradace 50/70

Označení R-mat.	Sylvaroad RP1000			
	Optimální množství oživ. přísady dle penetrace jehlou [%]	Optimální množství oživ. přísady dle bodu měknutí [%]	Průnik opt. množ. oživ. př. dle penetrace jehlou a bodu měknutí [%]	Průměrné opt. množ. oživ. př. dle penetrace jehlou a bodu měknutí [%]
R1	9,1 – 11,3	9,9 – 14,8	9,9 – 11,3	10,6
R2	4,3 – 6,6	2,2 – 7,4	4,3 – 6,6	5,5
R3	7,8 – 10,1	7,4 – 12,2	7,8 – 10,1	9,0
R4	8,3 – 10,4	6,6 – 11,0	8,3 – 10,4	9,4
R5	7,8 – 10,0	6,8 – 11,9	7,8 – 10,0	8,9
R6	7,8 – 9,9	7,8 – 12,3	7,8 – 9,9	8,9
R7	10,7 – 13,4	14,5 – 19,2	-	-
R8	5,8 – 8,1	5,7 – 10,5	5,8 – 8,1	7,0
R9	8,5 – 10,6	7,8 – 12,1	8,5 – 10,6	9,6
R10	5,4 – 7,6	5,0 – 10,3	5,4 - 7,6	6,5

Z předchozího zpracování výsledků vyplývá, že oživovací přísada Storflux má nižší účinnost. Z tohoto důvodu je nutné ji dávkovat ve větším množství (průměrně 11,2 %) než oživovací přísadu Sylvaroad RP1000 (8,4 %), což je patrné z tabulky 23.

Tabulka 23: Hledání optimálního dávkování oživovací přísady Storflux na základě penetrace jehlou a bodu měknutí pro pojivo gradace 50/70

Označení R-mat.	Storflux			
	Optimální množství oživ. přísady dle penetrace jehlou [%]	Optimální množství oživ. přísady dle bodu měknutí [%]	Průnik opt. množ. oživ. př. dle penetrace jehlou a bodu měknutí [%]	Průměrné opt. množ. oživ. př. dle penetrace jehlou a bodu měknutí [%]
R1	-	-	-	-
R2	6,0 – 9,0	3,0 – 9,9	6,0 – 9,0	7,5
R3	10,8 – 13,9	10,3 – 16,7	10,8 – 13,9	12,4
R4	10,6 – 13,2	9,2 – 15,3	10,6 – 13,2	11,9
R5	11,1 – 14,1	9,7 – 16,7	11,1 – 14,1	12,6
R6	10,6 – 13,5	11,5 – 18,1	11,5 – 13,5	12,5
R7	15,0 – 18,8	20,8 – 27,4	-	-
R8	8,5 – 12,0	8,2 – 15,1	8,5 – 12,0	10,3
R9	12,0 – 14,9	11,2 – 17,4	12,0 – 14,9	13,5
R10	7,5 – 10,6	6,8 – 13,9	7,5 – 10,6	9,1

6.4 Dávkování oživovacích přísad do silničního asfaltu 50/70 zestárlého metodou 3xRTFOT

Dávkování oživovacích přísad bylo prováděno do asfaltového pojiva gradace 50/70, které bylo zestárlé metodou 3xRTFOT. Metoda RTFOT simuluje stárnutí asfaltového pojiva při obalování kameniva na obalovně asfaltových směsí. Kvůli dosažení simulace, která odpovídá dlouhodobému stárnutí asfaltového pojiva v konstrukci vozovky, byl čas expozice zkoušky prodloužen na trojnásobek. Do laboratorně zestárlého pojiva gradace 50/70 byly dávkovány oživovací přísady v množství 4 %, 8 % a 12 % hmotnosti, čímž vzniklo 6 vzorků. Ty byly následně podrobeny empirickým a funkčním zkouškám, jejichž výsledky jsou uvedeny v podkapitolách. Dle výsledků koncentračních řad bylo možné stanovit optimální dávkování oživovacích přísad pro požadované znovuoživení.

6.4.1 Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

Penetrace jehlou byla provedena dle normy ČSN EN 1426, jejíž princip je popsán v kapitole 4.5. Nejprve byla zkouška provedena na silničním asfaltu gradace 50/70 (56 [0,1 mm]) a následně na laboratorně zestárlém asfaltovém pojivu o stejné výchozí gradaci. Pojivo bylo zestárlé metodou 3xRTFOT (23 [0,1 mm]). Dle výsledku penetrace jehlou výchozí pojivo vyhovuje požadavku normy ČSN EN 12591.

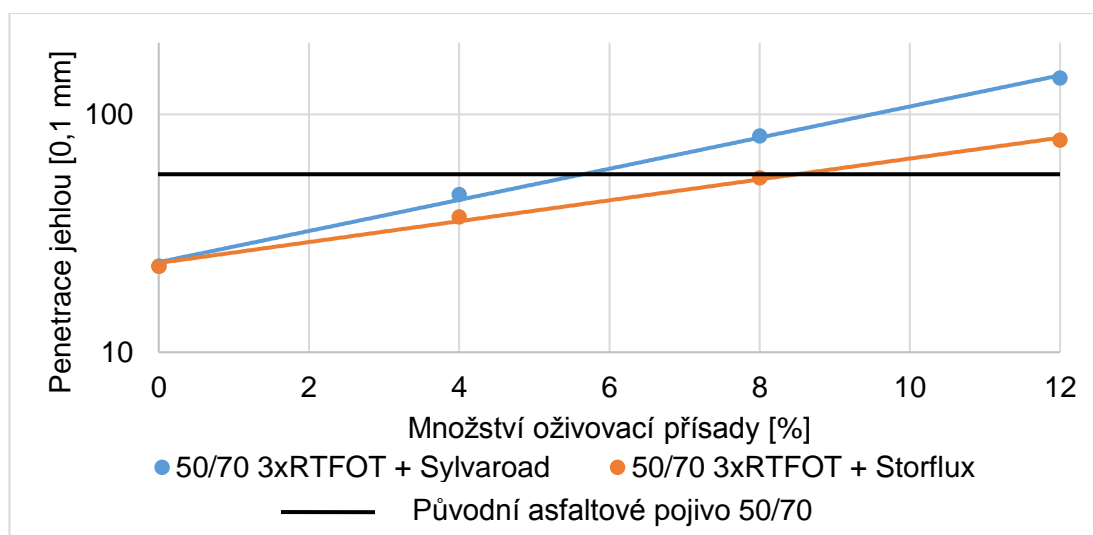
V tabulce 24 jsou vypsány naměřené hodnoty penetrace jehlou, které mají dle zvyšující se koncentrace oživovací přísady narůstající charakter. Tento stav lze charakterizovat pomocí exponenciální funkce, čemuž také odpovídá vysoká hodnota koeficientu determinace, který je roven 1,00. Zlogaritmováním hodnot penetrace je možné získat lineární závislost mezi množstvím oživovací přísady a penetrací jehlou, což vyplývá z grafu 24. Z rovnice přímky získáme parametry **a** a **b** a pomocí parametru **a** určíme účinnost oživovacích přísad. Oživovací přísada má větší účinnost se zvyšujícím se parametrem **a**. Účinnost oživovacích přísad má velký vliv na jejich optimální dávkování, avšak nelze objektivně říci, zda je lepší vyšší či nižší účinnost. Záleží především na možnostech obalovny asfaltových směsí, která je často limitována technologickým minimem a maximem. Důležitým aspektem při výběru oživovací přísady o dané účinnosti je také její ekonomické zhodnocení. [3]

Oživovací přísada Sylvaroad RP1000 má vyšší účinnost (**a** = 0,15) než oživovací přísada Storflux (**a** = 0,10). Z tohoto důvodu je nutné nadávkovat větší množství méně účinnější oživovací přísady Storflux (8,5 %) než v případě oživovací přísady Sylvaroad RP1000 (5,6 %). Optimální množství oživovací přísady je odvozeno z rovnice 6.7 a předpokládá, že chceme dosáhnout stejné penetrace jehlou jako u výchozího (originálního) asfaltového pojiva gradace 50/70 před stárnutím (56 [0,1 mm])

$$\text{Množství oživovací přísady} = \frac{\ln(\text{penetrace}_{\text{originální}}) - b}{a} \quad (6.7)$$

Tabulka 24: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady na základě penetrace jehlou

Oživovací přísady	Penetrace jehlou dle množství oživ. př. [0,1 mm]				Parametry přímky		Koeficient determinace	Opt. množství oživ. př. [%]
	0 %	4 %	8 %	12 %	a	b		
Sylvaroad RP1000	23	46	81	142	0,15	3,17	1,00	5,6
Storflux		37	54	78	0,10	3,17	1,00	8,5



Graf 24: Závislost penetrace jehlou na množství oživovací přísady

6.4.2 Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427

Stanovení bodu měknutí bylo provedeno dle normy ČSN EN 1427, jejíž princip je popsán v kapitole 4.6. Nejprve byla zkouška provedena na silničním asfaltu gradace 50/70, u kterého byl zjištěn bod měknutí 48,0 °C. Po zestárnutí asfaltového pojiva metodou 3xRTFOT se zvýšil bod měknutí na hodnotu 61,1 °C.

Se zvyšujícím se obsahem oživovací přísady dochází k postupnému snižování bodu měknutí, což lze vyjádřit pomocí lineární funkce. Z grafu 25

vyplývá, že závislost mezi proměnnými má silnou korelaci a koeficient determinace se rovná 1,00. V tabulce 25 jsou vypsány parametry přímky **a** a **b**, parametrem **a** lze učit účinnost dané oživovací přísady. Čím je absolutní hodnota parametru **a** vyšší, tím je oživovací přísada účinnější.

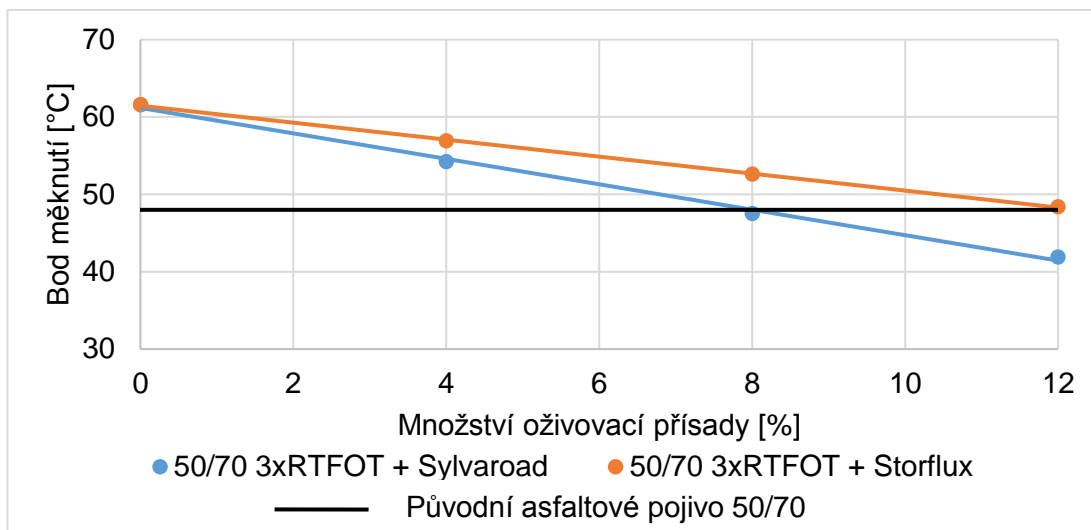
Stejně jako u penetrace jehlou, tak i v případě bodu měknutí má oživovací přísada Sylvaroad RP1000 (**a** = -1,65) vyšší účinnost než oživovací přísada Storflux (**a** = -1,10), z toho také vyplývá, že účinnější oživovací přísadu je žádoucí dávkovat v menším množství (8 %) než oživovací přísadu s nižší účinností (12,3 %). Optimální dávkování je odvozeno z rovnice 6.8. To vychází z předpokladu, že chceme docílit stejného bodu měknutí jako u výchozího (originálního) asfaltového pojiva gradace 50/70 před stárnutím (48 °C).

$$\text{Množství oživovací přísady} = \frac{KK_{\text{originální}} - b}{a}$$

(6.8)

Tabulka 25: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady na základě bodu měknutí

Oživovací přísady	Bod měknutí dle množství oživ. př. [°C]				Parametry přímky		Koeficient determinace	Optimální množství oživ. př. [%]
	0 %	4 %	8 %	12 %	a	b		
Sylvaroad RP1000	61,6	54,2	47,5	41,9	-1,65	61,17	1,00	8,0
Storflux		56,9	52,6	48,4	-1,10	61,46	1,00	12,3



Graf 25: Závislost bodu měknutí na množství oživovací přísady

6.4.3 Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770

Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle normy ČSN EN 14770 je podrobně popsáno v kapitole 4.7. Hodnoty komplexního modulu ve smyku G^* a fázového úhlu δ byly zjišťovány při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz.

Nejprve byla zkouška pro stanovení komplexního modulu ve smyku prováděna pro asfaltové pojivo gradace 50/70 (2,30 kPa) a následně pro zestárlé asfaltové pojivo metodou 3xRTFOT (16,6 kPa).

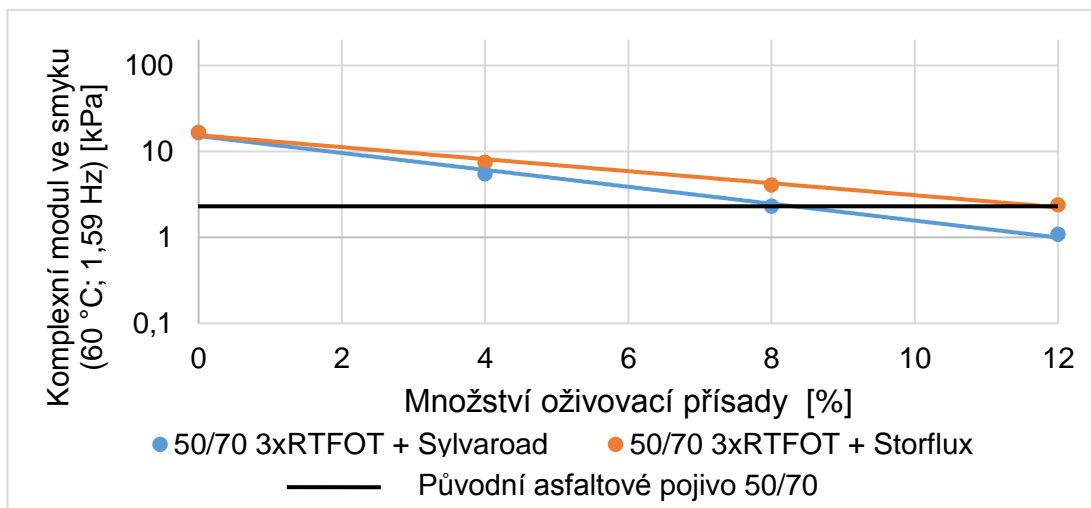
Komplexní modul ve smyku lze charakterizovat pomocí exponenciální funkce, jejíž koeficient determinace má vysokou hodnotu 0,99 u obou sledovaných vzorků. Z grafu 26 vyplývá, že po zlogaritmování hodnot komplexního modulu ve smyku, lze získat lineární závislost mezi množstvím oživovací přísady a již zmíněnými zlogaritmovanými hodnotami. Závislost je charakterizována parametry přímky **a** a **b**, z nichž parametr **a** vyjadřuje účinnost dané oživovací přísady. Se zvyšující se absolutní hodnotou parametru **a** nabývá daná oživovací přísada vyšší účinnosti.

Oživovací přísada Sylvaroad RP1000 má vyšší účinnost ($a = -0,23$), z toho důvodu je možné ji nadávkovat v menším množství (8,3 %) než oživovací přísadu Storflux. Ta má účinnost ($a = -0,16$) a dle tabulky 26 její optimální množství pro znovuoživení zestárlého asfaltového pojiva je 11,9 %, což vychází z předpokladu, že se snažíme dosáhnout výchozí (originální) hodnoty komplexního modulu ve smyku G^* (2,30 kPa). Výpočet optimálního dávkování vychází z rovnice 6.9.

$$\text{Množství oživovací přísady} = \frac{\ln(G^*_{\text{originální}}) - b}{a} \quad (6.9)$$

Tabulka 26: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady na základě komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)

Oživovací přísady	Komplexní modul ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) dle množ. oživ. př. [kPa]				Parametry přímky		Koeficient determinace	Opt. množství oživ. př. [%]
	0 %	4 %	8 %	12 %	a	b		
Sylvaroad RP1000	16,6	5,46	2,31	1,08	-0,23	2,71	0,99	8,3
Storflux		7,47	4,07	2,38	-0,16	2,74	0,99	11,9



Graf 26: Závislost komplexního modulu ve smyku ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $1,59\text{ Hz}$) na množství oživovací přísady

Při měření komplexního modulu ve smyku G^* na výchozím (originálním) pojivu gradace 50/70 při teplotě $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a frekvenci $1,59\text{ Hz}$ byl také měřen fázový úhel δ ($86,0\text{ }^{\circ}$). Po simulaci laboratorního stárnutí metodou 3xRTFOT došlo ke snížení fázového úhlu ($74,7\text{ }^{\circ}$).

Hodnoty fázového úhlu ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$; $1,59\text{ Hz}$) přibližně lineárně rostou v závislosti na množství oživovacích přísad a koeficient determinace se pohybuje v rozmezí $0,97 - 0,98$. Asfaltové pojivo se stává více viskózní. Z grafu 27 je patrné, že ani jedna z oživovacích přísad po dávkování 12% , nedosáhne požadované hodnoty fázového úhlu, která byla zjištěna u výchozího (originálního) asfaltového pojiva gradace 50/70. Tento jev může být způsoben tím, že během stárnutí silničního pojiva se v něm zvyšuje podíl asfaltenů, čímž dochází k zvyšování elasticity pojiva. Je možné, že vybrané oživovací přísady nedokáží dostatečně obnovit chemickou strukturu pojiva a z tohoto důvodu nestoupá velikost fázového úhlu tak rychle. [21]

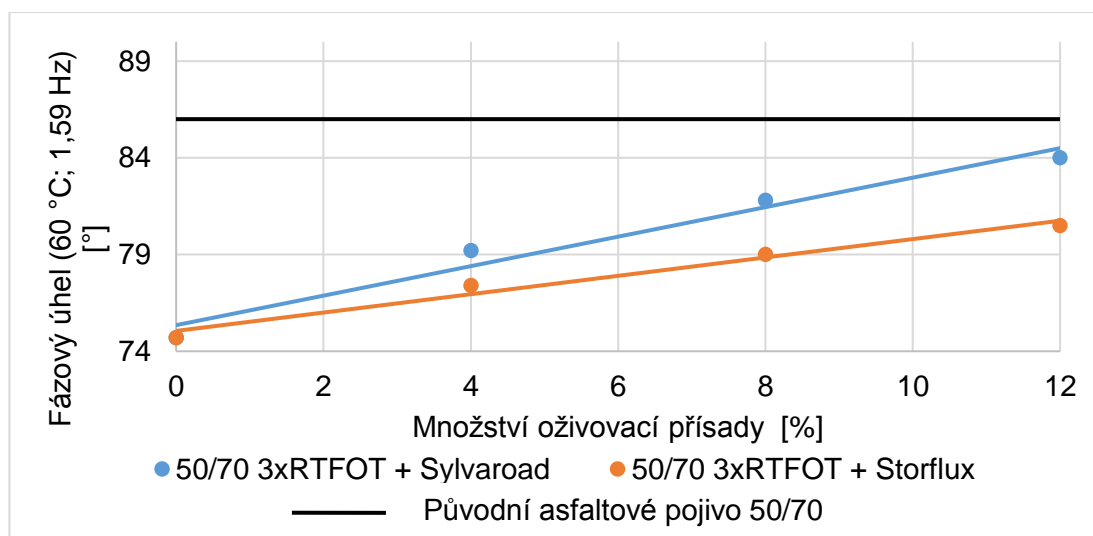
Účinnost pojiv je jako u předchozích zkoušek charakterizována parametry přímky **a**, které jsou vypsány v tabulce 27. Oživovací přísada Sylvaroad RP1000 má větší účinnost ($a = 0,76$) než Storflux ($a = 0,47$). Optimální množství oživovacích přísad vychází z rovnice 6.10. Fázový úhel, kterého chceme dosáhnout, odpovídá naměřené hodnotě u výchozího (originálního) pojiva gradace 50/70 ($86,0\text{ }^{\circ}$).

$$\text{Množství oživovací přísady} = \frac{\delta_{\text{originální}} - b}{a}$$

(6.10)

Tabulka 27: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady na základě fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz)

Oživovací přísady	Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz) dle množství oživ. př. [°]				Parametry přímky		Koeficient deter.	Opt. množství oživ. př. [%]
	0 %	4 %	8 %	12 %	a	b		
Sylvaroad RP1000	74,7	79,2	81,8	84,0	0,76	75,36	0,97	13,9
Storflux		77,4	79,0	80,5	0,47	75,08	0,98	23,2



Graf 27: Závislost fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) na množství oživovací přísady

6.4.4 Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771

Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru vychází z normy ČSN EN 14771 a je podrobně popsáno v kapitole 4.8. Výběrem nevhodné oživovací přísady pro asfaltové pojivo může dojít

ke zhoršení jeho nízkoteplotních vlastností. Ty se mohou projevit tvorbou mrazových trhlin ve vozovce, čímž se snižuje její životnost.

Při zjišťování nízkoteplotních vlastností u asfaltového pojiva gradace 50/70 bylo cílem určit teplotu, při které je modul tuhosti za ohybu $Sm(60) = 300$ MPa a m-hodnota $m(60) = 0,3$. Větší z obou hodnot ($Sm(60)$ a m-hodnota) je označována jako kritická teplota ($-19,1$ °C). Po provedení laboratorního stárnutí metodou 3xRTFOT na asfaltovém pojivu 50/70 došlo ke zvýšení kritické teploty ($-17,0$ °C).

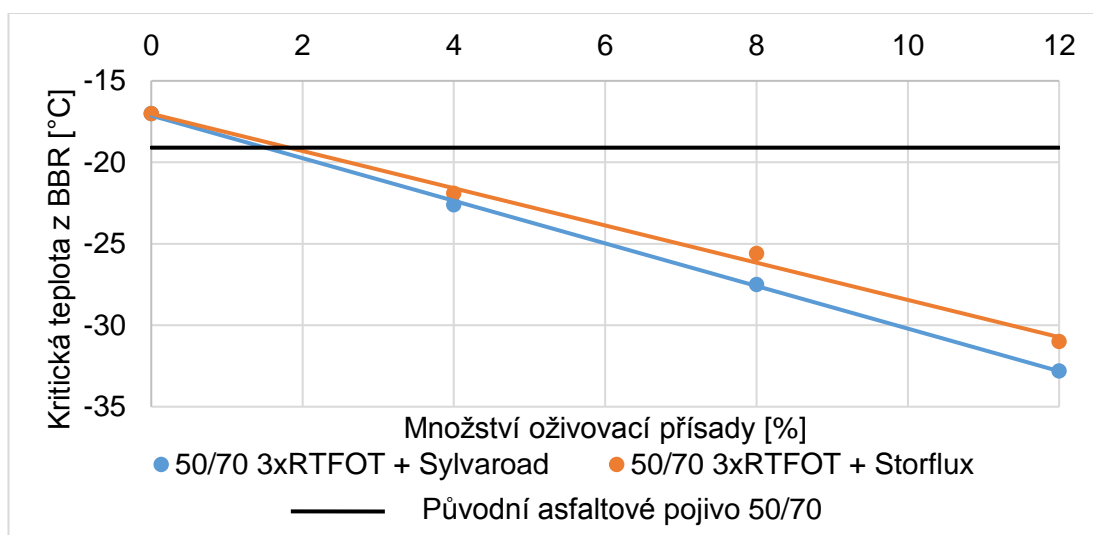
Přidávání oživovací přísady způsobuje pokles kritické teploty a tudíž i odolnost vůči vzniku mrazových trhlin ve vozovce. Ty se dle amerického předpisu SHRP začínají ve vozovce objevovat při teplotě o 10 °C nižší než je kritická teplota. Z grafu 28 je patrné, že pokles kritické teploty, odvozené z $Sm(60)$ a závislé na množství oživovací přísady, lze popsat lineární funkcí, která má koeficient determinace roven $1,00$. Parametry rovnic **a**, určující účinnost oživovacích přísad, jsou vypsány v tabulce 28.

Parametr **a** oživovací přísady Sylvaroad RP1000 opět nabývá vyšší absolutní hodnoty ($a = -1,31$) než u oživovací přísady Storflux ($a = -1,14$), tudíž má vyšší účinnost a jeho optimální dávkování je nižší ($1,5$ %). Storflux o nižší účinnosti bude dávkován v optimálním množství $1,8$ % hmotnosti. Z rovnice 6.11 je odvozeno optimální množství oživovací přísady, které vychází z předpokladu, že je snahou docílit hodnoty kritické teploty, která byla zjištěna u výchozího (originálního) asfaltového pojiva gradace 50/70 ($-19,1$ °C). Kritická teplota byla odvozena z modulu tuhosti za ohybu $Sm(60)$.

$$\text{Množství oživovací přísady} = \frac{T_{cr,Sm(60)} - b}{a} \quad (6.11)$$

Tabulka 28: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady na základě kritické teploty z BBR

Oživovací přísady	Kritická teplota z BBR dle množství oživ. př. [°C]				Parametry přímky		Koeficient deter.	Opt. množství oživ. př. [%]
	0 %	4 %	8 %	12 %	a	B		
Sylvaroad RP1000	-17,0	-22,6	-27,5	-32,8	-1,31	-17,15	1,00	1,5
Storflux		-21,9	-25,6	-31,0	-1,14	-17,02	1,00	1,8



Graf 28: Závislost kritické teploty z BBR na množství oživovací přísady

6.5 Srovnání účinností oživovacích přísad

Účinnost oživovacích přísad je charakterizována parametrem přímky **a**. Ten byl zjištěn dvěma způsoby. Nejprve byly oživovací přísady Sylvaroad RP1000 a Storflux přidávány k deseti vzorkům vydestilovaného pojiva z R-materiálů a snahou bylo pomocí množství oživovací přísady dosáhnout stejných vlastností jako má asfaltové pojivo gradace 50/70. Poté se postup opakoval, ale nyní byly oživovací přísady přidávány k zestárlému asfaltovému pojivu gradace 50/70 metodou 3xRTFOT.

Při porovnání hodnot parametru **a**, které jsou vypsány v tabulce 29, je patrné, že oživovací přísada Sylvaroad RP1000 nabývá téměř stejné účinnosti při oživovacím procesu v R-materiálech, tak také v laboratorně zestárlém asfaltovém pojivu.

Tabulka 29: Srovnání účinností oživovací přísady Sylvaroad RP1000

	Sylvaroad RP1000	
	Ověření na R-materiálech	Ověření na zestárlém pojivu 50/70
Parametr přímky	a	a
Penetrace jehlou	0,15	0,15
Bod měknutí	-1,68	-1,65
Komplexní modul ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)	-0,23	-0,23
Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz)	0,72	0,76
Kritická teplota z BBR	-	-1,31

V tabulce 30 jsou vypsány hodnoty parametru přímky **a** pro oživovací přísadu Storflux, které opět vycházejí téměř stejně pro obě zvolené metody. Největší rozdíl je mezi účinnostmi oživovací přísady, které byly zjištěny při zkoušce bodu měknutí. Jak už bylo dříve potvrzeno oživovací přísada Storflux má nižší účinnost než oživovací přísada Sylvaroad RP1000.

Tabulka 30: Srovnání účinnosti oživovací přísady Storflux

	Storflux	
	Ověření na R-materiálech	Ověření na zestárlém pojivu 50/70
Parametr přímky	a	a
Penetrace jehlou	0,11	0,10
Bod měknutí	-1,21	-1,10
Komplexní modul ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)	-0,14	-0,16
Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz)	0,44	0,47
Kritická teplota z BBR	-	-1,14

6.6 Pokusný úsek

Pokusný úsek, nacházející se v obci Siřem v okrese Louny, byl realizován na podzim roku 2017 spoluřešitelem projektu firmou Froněk, spol. s r.o. Řešená oblast je viditelná na obrázku 20. Jedná se o místní komunikaci, na které v rámci rekonstrukce byla provedena nová asfaltová obrusná vrstva.



Obrázek 20: Lokalita pokusného úseku [24]

Pro účely diplomové práce byly vybrány dvě oživovací přísady (Sylvaroad RP1000 a Storflux), které byly postupně nadávkovány do asfaltové směsi typu ACO 11 se silničním asfaltem 50/70 a dávkou 50 % R-materiálu. Vlastnosti asfaltového pojiva z R-materiálu jsou popsány v tabulce 31. Tyto dvě vyrobené asfaltové směsi s odlišným typem a dávkou oživovací přísady byly aplikovány firmou Froněk, spol. s r.o. na pokusný úsek.

Tabulka 31: Vlastnosti asfaltového pojiva z R-materiálu, který byl použit v rámci pokusného úseku

Bod měknutí [°C]	58,1
Penetrace [0,1 mm]	31
Obsah pojiva v R-materiálu [%]	5,42

Dle vlastností R-materiálu a kalibračních křivek bodu měknutí a penetrace jehlou jsem nastavila optimální dávkování obou oživovacích přísad. Dávkování oživovacích přísad bylo nastaveno tak, aby výsledná penetrace asfaltového pojiva, obsaženého v R-materiálu, byla 55 [0,1 mm]. Množství dávkovaných oživovacích přísad je vypsáno v tabulce 32.

Tabulka 32: Stanovení dávkování oživovací přísady

Oživovací přísada	Procentuální obsah oživ. přísady na pojivo v R-mat	Hmotnost oživ. přísady na 1 t nové asfaltové směsi	Hmotnost oživ. přísady na 1 t R-mat	Potřebné množství nového pojiva na 1 t asf. směsi	
	[%]	[kg]	[kg]	[%]	[kg]
Sylvaroad RP1000	4,38	1,19	2,38	2,68	26,81
Storflux	6,50	1,76	3,52	2,62	26,24

Celková délka pokusného úseku je 1,442 km. Úsek, jehož vývoj v čase je sledován v této diplomové práci, má délku 0,111 km. V ostatních úsecích byla provedena pokládka vrstvy ACO 11 s dalšími druhy oživovacích přísad, které nejsou zahrnuty v diplomové práci. V délce 71 m byl realizován úsek, kde byla použita oživovací přísada Sylvaroad RP1000. Oživovací přísada Storflux byla dávkována do asfaltové směsi v úseku délky 40 m. Na obrázku 21 je zachycen pokusný úsek těsně po pokládce obrusné vrstvy.



Obrázek 21: Fotografie po pokládce zkušební úseku [3]

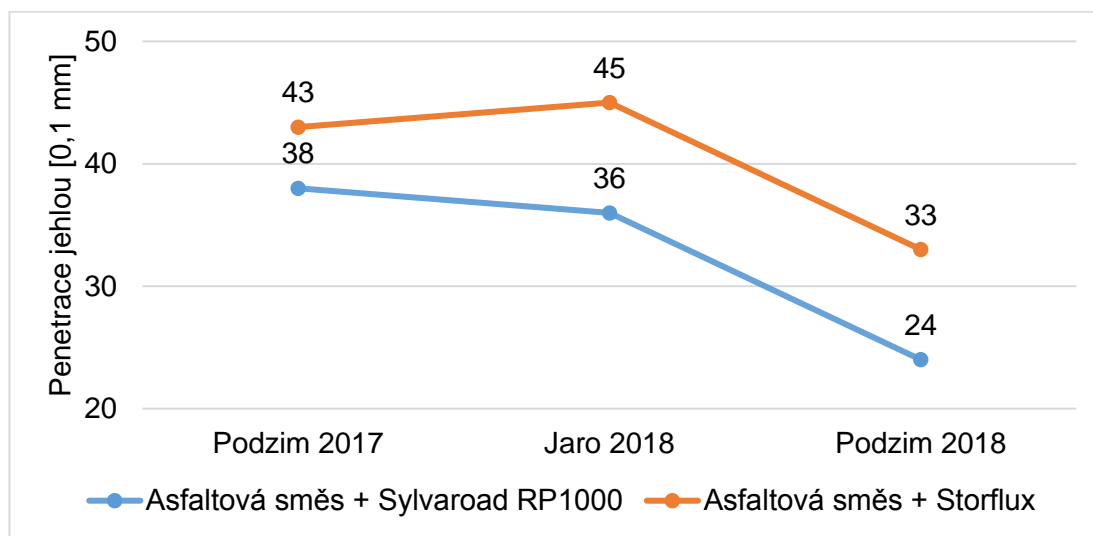
Po pokládce asfaltové směsi na podzim roku 2017 byl proveden odběr jádrových vývrtů v předepsaných staničeních. Dále pak se odběry ve stejných staničeních opakovaly na jaře a podzim roku 2018. Z vývrtů byla znovuzískána asfaltová pojiva, na kterých byly provedeny empirické a funkční zkoušky, jejichž výsledky jsou vypsány v tabulce 33.

Tabulka 33: Sledování parametrů zkušebního úseku v čase

Oživovací přísada	Sylvaroad RP1000			Storflux		
	Podzim 2017	Jaro 2018	Podzim 2018	Podzim 2017	Jaro 2018	Podzim 2018
Penetrace jehlou [0,1 mm]	38	36	24	43	45	33
Bod měknutí [°C]	54,4	55,5	61,1	54,7	54,0	58,1
Kom. modul ve sm. (60 °C; 1,59 Hz) [kPa]	5,24	5,23	13,61	5,61	4,55	8,06
Fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz) [°]	80,81	81,39	77,09	76,98	80,74	77,88
Kritická teplota z BBR [°C]	-20,1	-19,2	-15,4	-22,4	-21,4	-18,5

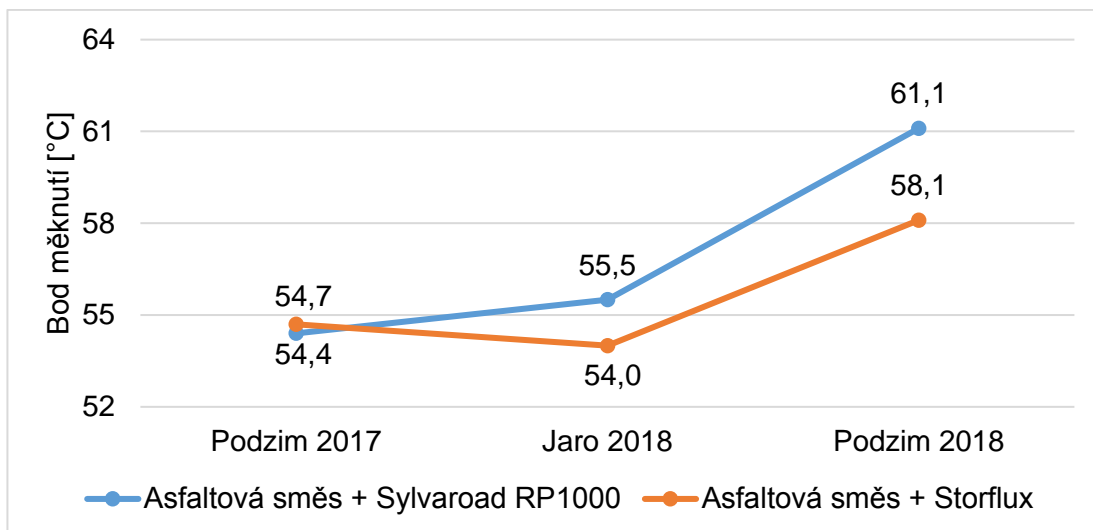
V grafu 29 je znázorněn vývoj penetrace jehlou v čase pro asfaltovou směs s příměsí oživovací přísady Sylvaroad RP1000 a oživovací přísady Storflux. Hodnoty penetrace jehlou se postupem času převážně snižují, pojivo se stává tvrdším. V průběhu prvního sledovaného období (zima 2017/18) ovšem penetrace v případě pojiva obsahujícího přísadu Storflux mírně vzrostla, což může být způsobeno doreagováním asfaltového pojiva s oživovací přísadou. Při sledování každé asfaltové směsi odděleně, největší rozdíl hodnot je patrný mezi jarem 2018 a podzimem 2018. Důvodem můžou být vysoké teploty, které panovaly v letním období a došlo tak k urychlení stárnutí asfaltového pojiva obsaženého v obrusné vrstvě vozovky. Počáteční penetrace asfaltové směsi s příměsí oživovací přísady Sylvaroad RP1000 je 43 [0,1 mm]. Asfaltová směs, která obsahuje dávku oživovací přísady Storflux, má nižší

počáteční penetraci (38 [0,1 mm]). Navzdory těmto odlišnostem je grafický průběh obou směsí takřka totožný.



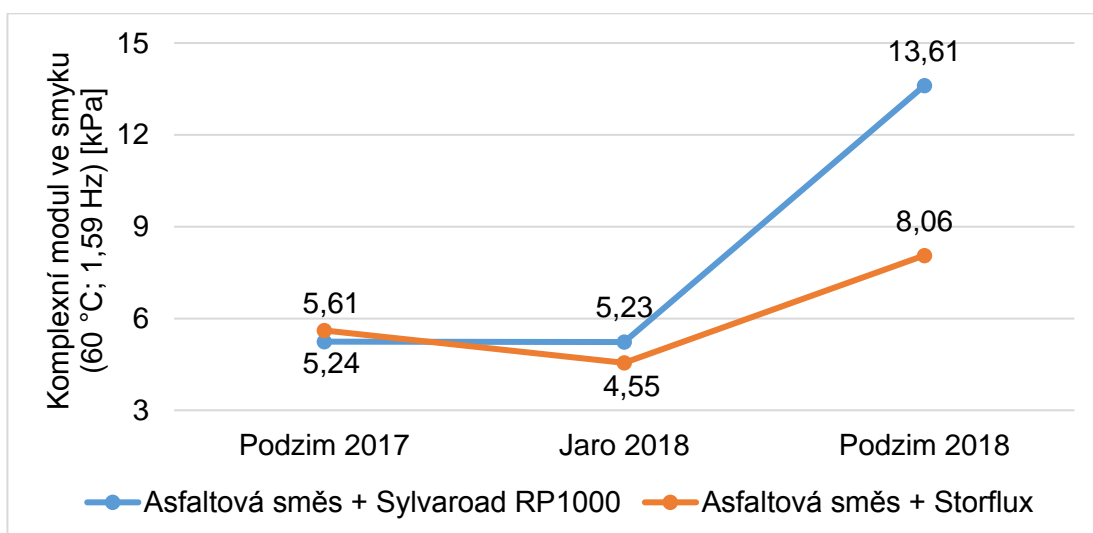
Graf 29: Vývoj penetrace jehlou v čase

Co se týče sledování hodnot bodu měknutí v závislosti na čase, má průběh vzestupný charakter. Tvrdnutí asfaltového pojiva v závislosti na čase se projevuje zvyšující se teplotou bodu měknutí. Z grafu 30 vyplývá, že počáteční hodnoty bodu měknutí z podzimu 2017 jsou u obou asfaltových směsí téměř totožné. Po prvním sledovaném období došlo překvapivě k mírnému poklesu bodu měknutí pojiva obsahujícího Storflux, což je v souladu s výsledky zkoušky penetrace jehlou.



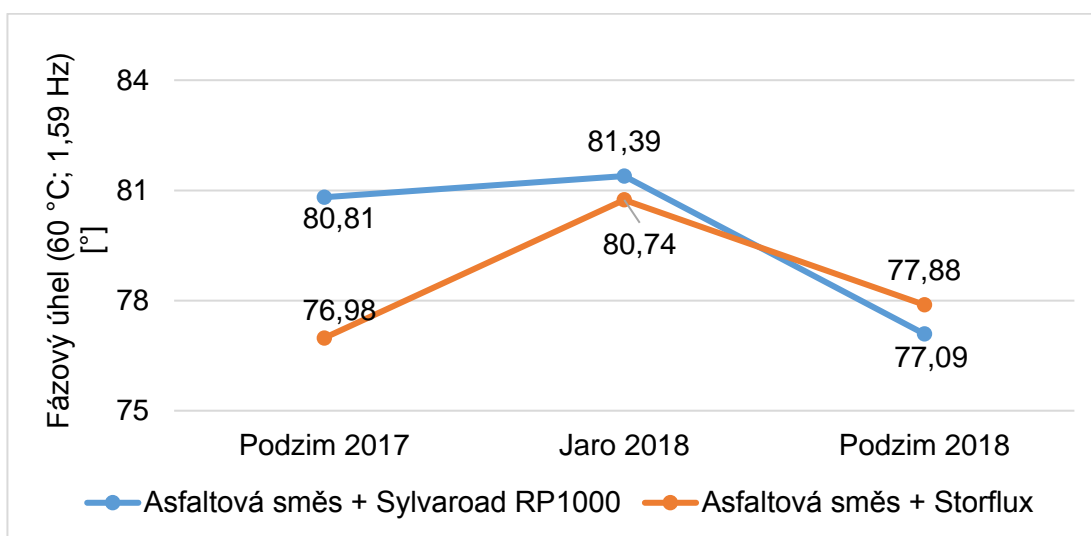
Graf 30: Vývoj bodu měknutí v čase

Sledovaný komplexní modul ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) se v závislosti na čase převážně zvyšuje. Asfaltové pojivo časem tvrdne, a tudíž zvyšuje svůj odpor proti deformaci, která je vyvolána opakovanými pulzy smykového napětí při měření v dynamickém smykovém reometru. Z grafu 31 vyplývá, že počáteční komplexní modul ve smyku je pro obě asfaltové směsi skoro stejný. Rozdílnost asfaltových směsí je patrná v sledovaném časovém období podzim 2018, kdy se hodnoty komplexního modulu ve smyku liší o 5,55 kPa.



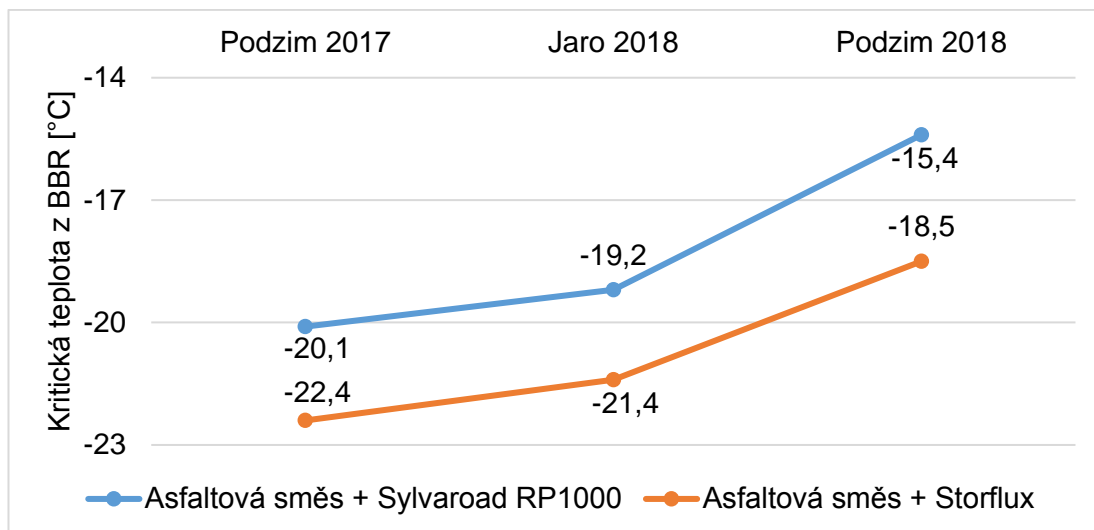
Graf 31: Vývoj komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) v čase

Při měření komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) je zároveň stanovován také fázový úhel (60 °C; 1,59 Hz), který má dle grafu 32 převážně klesající charakter. V případě asfaltové směsi s příměsí oživovací přísady Storflux je počáteční hodnota fázového úhlu znatelně nižší než u asfaltové směsi s příměsí oživovací přísady Sylvaroad RP1000. Při zanedbání tohoto faktu lze říci, že grafický průběh fázového úhlu obou směsí, které jsou sledovány v čase, se příliš neliší.



Graf 32: Vývoj fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) v čase

Poslední sledovanou charakteristikou asfaltových směsí jsou jejich nízkoteplotní vlastnosti, které byly stanoveny dle modulu tuhosti za ohybu. Zkouška probíhala na průhybovém trámečkovém reometru a z naměřených modulů tuhosti byly odvozeny kritické teploty, jejichž hodnoty jsou znázorněny v grafu 33. U obou asfaltových směsí je vidět, že v závislosti na čase dochází ke zvyšování kritické teploty, což vede k vyšší náchylnosti ke vzniku mrazových trhlin. Při porovnání s ostatními grafy, které jsou okomentovány výše, je nutné zmínit, že u této funkční zkoušky je grafické znázornění výsledků obou asfaltových směsí vzájemně geometricky nejpodobnější. Tento fakt lze přisuzovat rovnoměrnému vývoji nízkoteplotních vlastností (zhoršování) u obou asfaltových směsí.



Graf 33: Vývoj kritické teploty z BBR v čase

Kromě zkušebních vývrtů byl také pokusný úsek podroben vizuální prohlídce. Z výše vyhodnocených zkoušek je patrné, že v sledovaném období (podzim 2017 – podzim 2018) sice dochází k degradaci asfaltového pojiva obsaženého v asfaltové směsi, avšak ta zatím není příčinou žádných poruch v sledované obrusné vrstvě.

7 Závěr

Asfaltové pojivo obsažené v asfaltové směsi v závislosti na čase stárne a mění své vlastnosti. Stává se tužším a křehčím. Při výrobě asfaltové směsi s vyšším obsahem R-materiálu je tedy nutné oživit zestárlé asfaltové pojivo dávkou měkčího asfaltového pojiva vyšší gradace nebo oživovací přísadou.

Pro určení vlivu oživovacích přísad na změnu vlastností asfaltových pojiv byly vybrány dvě oživovací přísady – Sylvaroad RP1000 a Storflux a deset znovuzískaných pojiv z R-materiálů. Dále bylo metodou 3xRTFOT laboratorně zestárnující pojivo gradace 50/70 a v neposlední řadě byly vyhodnoceny vlastnosti dvou asfaltových pojiv odebraných z pokusných úseků, obsahujících asfaltové směsi ACO 11 s 50 % obsahem R-materiálu a oživovacími přísadami Sylvaroad RP1000 a Storflux.

Vlastnosti oživovacích přísad byly hodnoceny pomocí dynamické viskozity dle ČSN EN 13702 a bodu vzplanutí dle ČSN EN ISO 2592. Podle hodnoty viskozity, která je vyšší u oživovací přísady Storflux lze usuzovat, že oživovací přísada Sylvaroad RP1000 má při zkušební teplotě 25 °C tekutější konzistenci. Měřením bodu vzplanutí bylo potvrzeno, že u obou oživovacích přísad je jejich dávkování během výroby asfaltových směsí na obalovnách, kde dochází k vysokým manipulačním teplotám, bezpečné.

Z deseti vybraných vzorků R-materiálů byla získána asfaltová pojiva, na kterých byly posléze provedeny zkoušky stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426, bodu měknutí dle ČSN EN 1427, komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770 a modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru dle ČSN EN 14771. Pokud předpokládáme, že výchozí asfaltové pojivo obsažené v asfaltových směsích bylo gradace 50/70, pak dle vyhodnocení zkoušky penetrace jehlou došlo k zestárnutí asfaltového pojiva všech vzorků R-materiálů na gradaci 10/20 nebo 20/30. Vyhodnocením ostatních laboratorních zkoušek byl stupeň degradace jen potvrzen.

Co se týče oživovacího procesu vzorků pojiv získaných z R-materiálů, bylo zvoleno dávkování 4 % a 12 % oživovací přísady (Sylvaroad RP1000 a Storflux) do každého vydestilovaného asfaltového pojiva. Na připravených vzorcích byly provedeny zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí a komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu. Vyhodnocením zkoušek byl potvrzen změkčovací efekt obou oživovacích přísad, který se projevil zvýšením hodnot penetrace jehlou, fázového úhlu a snížením bodu měknutí, komplexního modulu ve smyku a dolní kritické teploty. Co se týče oživení fázového úhlu, z výsledků vyplývá, že je nutné dávkovat výrazně vyšší množství oživovací přísady. To znamená, že oživovací přísady nenavrátí poměr mezi elastickou a viskózní složkou. Domnívám se, že tedy nedochází k rejuvencii v pravém slova smyslu. Při optimalizaci dávkování oživovací přísady bylo cílem dosáhnout u vzorků zestárlého asfaltového pojiva vlastností nezestárlého asfaltového pojiva gradace 50/70 dle normy ČSN 65 7204. Tím byl stanoven optimální interval dávkování oživovací přísady.

Z grafů vyjadřujících vztah mezi množstvím oživovací přísady a hodnotami zvolené laboratorní zkoušky lze vyjádřit pomocí parametru (sklonu) přímky účinnost dávkované oživovací přísady. Z výsledků vyplývá, že optimální dávkování vybraných oživovacích přísad se u každého vzorku liší a zároveň shodné dávkování nenajdeme ani u všech prováděných zkoušek pro jeden vybraný vzorek R-materiálu.

Určení optimálního dávkování oživovací přísady (Sylvaroad RP1000 a Storflux) bylo provedeno na základě zkoušek penetrace jehlou a bodu měknutí. Pro každý vzorek byl stanoven rozsah optimálního dávkování zjištěný pomocí zkoušky penetrace jehlou a bodu měknutí. Následným průnikem obou intervalů byl stanoven optimální rozsah dávkovaného množství dané oživovací přísady pro konkrétní vzorek R-materiálu. Stanovení penetrace jehlou klade přísnější požadavek na optimum dávkované oživovací přísady, z tohoto důvodu je rozsah menší než u stanovení bodu měknutí.

Účinnost oživovacích látek byla také stanovována na zestárlém asfaltovém pojivu gradace 50/70 metodou 3xRTFOT. Do laboratorně zestárlého

asfaltového pojiva byly dávkovány oživovací přísady v množství 4 %, 8 % a 12 % hmotnosti. Jejich dávkováním došlo k vytvoření šesti vzorků, na kterých byly následně provedeny zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí, komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu a modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru. Snahou bylo docílit oživení laboratorně zestárlého pojiva, které by zlepšilo zpět jeho vlastnosti, jež byly zjištěny u originálního (výchozího) asfaltového pojiva. Při porovnání hodnot optimálního dávkování oživovacích přísad dochází opět k odlišnostem mezi použitými oživovacími přísadami a zároveň také mezi použitými laboratorními zkouškami.

Při porovnání účinností zjištěných při jejich dávkování do vybraných vzorků R-materiálů a do laboratorně zestárlého asfaltového pojiva je patrné, že oživovací přísada Sylvaroad RP1000 má vyšší účinnost než oživovací přísada Storrflux.

Zkušenosti nabyté předešlým výzkumem byly reálně využity ve výrobě dvou asfaltových směsí ACO 11 s 50 % obsahem R-materiálu a dvěma oživovacími přísadami. V rámci projektu TAČR ZÉTA TJ01000248 byly tyto asfaltové směsi aplikovány firmou Froněk, spol. s r.o. Pokusný úsek byl sledován v čase se třemi odběry jádrových vývrtů s půlročním intervalem. Výsledky zkoušek na vydestilovaných pojivech naznačují, že v závislosti na čase dochází ke snížení penetrace jehlou, fázového úhlu a zvýšení bodu měknutí, komplexního modulu ve smyku a kritické teploty. Při porovnání výsledků z prvních dvou období u jednotlivých zkoušek není rozdíl tak markantní, což může být způsobeno doznívající účinností oživovací přísady. Rozdíl mezi druhým a třetím sledovaným obdobím je mnohem viditelnější. Oživovací přísada už byla zcela pohlcena zestárlým pojivem obalujícím kamenivo R-materiálu a zároveň byla obrusná vrstva vozovky vystavena v letním období teplotnímu zatížení.

Jak už bylo v diplomové práci zmíněno dříve, je žádoucí, aby v České republice byl vytvořen vhodnější pobídkový program ze strany státu v oblasti využívání R-materiálů do asfaltových směsí.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] About EAPA - EAPA. Home - EAPA [online]. Copyright © 2018 EAPA. European Asphalt Pavement Association. All rights reserved. [cit. 11. 12. 2018]. Dostupné z: <https://eapa.org/eapa/>
- [2] ZAJÍČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [3] Kolektiv autorů, Příloha k odborné zprávě o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017 projektu TJ01000248
- [4] Bc. Jan Mastný *Vliv syntetických vosků a rejuvenátorů na vlastnosti asfaltové směsi s R-materiálem*. Praha, 2017. 106 s., 106 s. příl. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Jan Valentin, Ph.D.
- [5] *Recyklace asfaltových směsí na obalovně*. Varaus, Michal. Brno: Konference Projektování pozemních komunikací, 2013. Pragoprojekt.
- [6] Co jsou to rejuvenátory | Revujenator. Rejuvenátor | Revujenator [online]. Copyright © [cit. 11. 12. 2018]. Dostupné z: <http://web.rejuvenator.eu/co-jsou-to-rejuvenatory.html>
- [7] Tran, Nam H., Taylor, Adam a Willis, Richard. *Effect of Rejuvenator on Performance properties of HMA Mixtures with High RAP and RAS Contents*. NCAT Report 12-05. Auburn, Alabama: National Center for Asphalt Technology at Auburn University, June 2012.
- [8] Bc URBANEC, Luboš. *Problematika zvyšování podílu R-materiálu v asfaltových směsích*. Brno, 2013. 121 s., 10 s. příloh. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav pozemních komunikací. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [9] Uteeni | Opulent Marketing in Phaya Thai, Bangkok, 094 -492-4004. [online]. Dostupné z: <https://www.uteeni.com/en/listings/1932684>

- [10] Martin A. E., Zhou F., Arambula E., Park E., Chowdhury A., Kaseer F., Carvajal J., Hajj J., Daniel J., Glover Ch., *The Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios*, Transportation Reserach Board of the National Academies, Phase I, Interim Report, No. 9-58, 2015.
- [11] Home - EAPA [online]. Copyright ©v [cit. 09. 12. 2018]. Dostupné z: <https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/08/EAPA-Position-Paper-Rejuvenators-August-2018-1.pdf>
- [12] ČSN EN12697-1. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka Část 1: Obsah rozpuštěného pojiva*. Praha: ČNI, 2006, 52 s.
- [13] ČSN EN12697-3. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka Část 3: Znovuzískávání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení*. Praha: ČNI, 2006, 16 s.
- [14] Bc. Dominik Zima *Problematika R-materiálu v asfaltových směsích*. Brno, 2017. 109 s., 109 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [15] DAŠEK, Ondřej, COUFALÍK, Pavel. *Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek*. Příloha k odborné zprávě o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2013. 2013, 85 stran.
- [16] ČSN EN 14770 *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)*. Praha: 2012, 16 s.
- [17] Rheotec: Introduction to Rheology[online]. 49 stran [cit. 2015-12-01]. Dostupné <http://www.dongjins.com/service/file/Introduction%20to%20rheology.pdf>; viskozita
- [18] Bc. Monika Střasáková. *Stárnutí asfaltových pojiv*. Brno, 2016. 82 stran, 98 s přílohami. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta

- stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [19] ČSN EN ISO 2592 *Stanovení bodu vzplanutí a bodu hoření – Metoda otevřeného kelímku podle Clevelanda*. Praha: ČNI, 2004, 20 s.
- [20] Markéta Čumíčková *Nízkoteplotní chování asfaltových pojiv*. Brno, 2017. 64 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
- [21] Kolektiv autorů, Příloha k odborné zprávě o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2018 projektu TJ01000248
- [22] COUFALÍK, Pavel. *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Brno, 2017. 213 s., 28 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [23] ČSN EN 12607-1. *Asfalty a asfaltová pojiva: Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu (RTFOT)*. Praha: Český normalizační institut, 2007, 16 stran.
- [24] Mapy.cz. Mapy.cz [online]. Dostupné z: <https://en.mapy.cz/zakladni?x=13.5114107&y=50.2318058&z=14&source=ward&id=5708&q=si%C5%99em>
- [25] ČSN EN 13702 *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska*. Praha, 2010.
- [26] Veronika Dzurková *Vlastnosti asfaltových pojiv ze směsí typu SMA s R-materiálem*. Brno, 2018. 92 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

9 Seznam obrázků

Obrázek 1: Životní cyklus asfaltové směsi [3]	15
Obrázek 2: Schéma šaržové obalovny s paralelním sušícím bubnem [5]	17
Obrázek 3: Rozdíl mezi působením rejuvenační a změkčující přísady [3]	18
Obrázek 4: Vývojový diagram postupu prací	27
Obrázek 5: Průtoková laboratorní odstředivka	29
Obrázek 6: Popis vakuového destilačního zařízení	30
Obrázek 7: Zkušební geometrie typu kužel – deska [17]	32
Obrázek 8: Pohyb zkušebním plamenem nad vzorkem	35
Obrázek 9: Vpich jehly do vzorku [20].....	37
Obrázek 10: Propad kuliček [20]	40
Obrázek 11: Dynamický smykový reometr.....	41
Obrázek 12: Zkušební geometrie typu deska – deska [22]	42
Obrázek 13: Tříbodový ohyb [20].....	44
Obrázek 14: Průhybový trámečkový reometr [20]	45
Obrázek 15: Prázdňá forma [20]	46
Obrázek 16: Naplněná forma [20]	46
Obrázek 17: Vzorek po seříznutí [20].....	46
Obrázek 18: Závislost logaritmu modulu tuhosti na logaritmu času [20]	48
Obrázek 19: Laboratorní sušárna	49
Obrázek 20: Lokalita pokusného úseku [24]	98
Obrázek 21: Fotografie po pokládce zkušebního úseku [3]	99

10 Seznam tabulek

Tabulka 1: Komerčně využívané rejuvenátory dle NCHRP [7].....	20
Tabulka 2: Maximální rozdíl platných stanovení [20]	38
Tabulka 3: Kapalinová lázeň pro stanovení bodu měknutí [20].....	38
Tabulka 4: Zkoušené oživovací přísady	51
Tabulka 5: Seznam vybraných R-materiálů	52
Tabulka 6: Výsledky dynamické viskozity oživovacích přísad	53
Tabulka 7: Výsledky bodu vzplanutí oživovacích přísad	54
Tabulka 8: Hodnoty penetrace jehlou R-materiálů	55
Tabulka 9: Hodnoty bodu měknutí R-materiálů.....	56
Tabulka 10: Hodnoty komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) R-materiálů	57
Tabulka 11: Hodnoty fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) R-materiálů.....	59
Tabulka 12: Hodnoty kritické teploty z BBR R-materiálů.....	60
Tabulka 13: Koeficienty determinace	68
Tabulka 14: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 na základě penetrace jehlou	71
Tabulka 15: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Storflux na základě penetrace jehlou	72
Tabulka 16: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 na základě bodu měknutí	75
Tabulka 17: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Storflux na základě bodu měknutí	76
Tabulka 18: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 na základě komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz).....	78
Tabulka 19: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Storflux na základě komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz).....	80
Tabulka 20: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 na základě fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz).....	82
Tabulka 21: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady Storflux na základě fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz).....	83

Tabulka 22: Hledání optimálního dávkování oživovací přísady Sylvaroad RP1000 na základě penetrace jehlou a bodu měknutí pro pojivo gradace 50/70	85
Tabulka 23: Hledání optimálního dávkování oživovací přísady Storflux na základě penetrace jehlou a bodu měknutí pro pojivo gradace 50/70	86
Tabulka 24: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady na základě penetrace jehlou	88
Tabulka 25: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady na základě bodu měknutí	89
Tabulka 26: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady na základě komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)	91
Tabulka 27: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady na základě fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz)	93
Tabulka 28: Odvození optimálního dávkování oživovací přísady na základě kritické teploty z BBR	95
Tabulka 29: Srovnání účinností oživovací přísady Sylvaroad RP1000	96
Tabulka 30: Srovnání účinností oživovací přísady Storflux	97
Tabulka 31: Vlastnosti asfaltového pojiva z R-materiálu, který byl použit v rámci pokusného úseku	98
Tabulka 32: Stanovení dávkování oživovací přísady	99
Tabulka 33: Sledování parametrů zkušebního úseku v čase	100

11 Seznam grafů

Graf 1: Hodnoty penetrace jehlou R-materiálů.....	55
Graf 2: Hodnoty bodu měknutí R-materiálů	56
Graf 3: Hodnoty komplexního modulu ve smyku R-materiálů při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz.....	58
Graf 4: Hodnoty fázového úhlu R-materiálů při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz	59
Graf 5: Hodnoty kritické teploty z BBR R-materiálů	61
Graf 6: Závislost penetrace jehlou a bodu měknutí.....	62
Graf 7: Závislost komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) a bodu měknutí	63
Graf 8: Závislost fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) a bodu měknutí	63
Graf 9: Závislost kritické teploty a bodu měknutí.....	64
Graf 10: Závislost penetrace a komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz)	64
Graf 11: Závislost penetrace jehlou a fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz).....	65
Graf 12: Závislost penetrace jehlou a kritické teploty	65
Graf 13: Závislost komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu při 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz.....	66
Graf 14: Závislost komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) a kritické teploty	66
Graf 15: Závislost fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) a kritické teploty	67
Graf 16: Závislost penetrace jehlou na množství oživovací přísady Sylvaroad RP1000.....	71
Graf 17: Závislost penetrace jehlou na množství oživovací přísady Storflux	73
Graf 18: Závislost bodu měknutí na množství oživovací přísady Sylvaroad RP1000.....	75
Graf 19: Závislost bodu měknutí na množství oživovací přísady Storflux	77
Graf 20: Závislost komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) na množství oživovací přísady Sylvaroad RP1000	79
Graf 21: Závislost komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) na množství oživovací přísady Storflux	80

Graf 22: Závislost fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) na množství oživovací přísady Sylvaroad RP1000	82
Graf 23: Závislost fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) na množství oživovací přísady Storflux	84
Graf 24: Závislost penetrace jehlou na množství oživovací přísady	88
Graf 25: Závislost bodu měknutí na množství oživovací přísady	90
Graf 26: Závislost komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) na množství oživovací přísady	92
Graf 27: Závislost fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) na množství oživovací přísady	93
Graf 28: Závislost kritické teploty z BBR na množství oživovací přísady	95
Graf 29: Vývoj penetrace jehlou v čase	101
Graf 30: Vývoj bodu měknutí v čase	102
Graf 31: Vývoj komplexního modulu ve smyku (60 °C; 1,59 Hz) v čase	102
Graf 32: Vývoj fázového úhlu (60 °C; 1,59 Hz) v čase	103
Graf 33: Vývoj kritické teploty z BBR v čase	104