



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

TRVANLIVOST ASFALTOVÝCH VOZOVEK

DURABILITY OF ASPHALT PAVEMENTS

HABILITAČNÍ PRÁCE

HABILITATION

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

BRNO 2021

ABSTRAKT

Habilitační práce je zaměřena na problematiku trvanlivosti asfaltových vozovek. V teoretické části práce je popsán systém předpisů pro technologii stavby vozovek v ČR. Dále je popsáno složení a vlastnosti asfaltových pojiv s důrazem kladeným na jejich stárnutí a na možnosti laboratorní simulace tohoto stárnutí. Následně je rozebrána problematika funkčního zkoušení asfaltových pojiv a asfaltových směsí. Experimentální část práce popisuje možnosti rozšíření souboru využitelných moderních zkušebních metod, které mají potenciál výstižnějšího popisu chování stavebních silničních materiálů se zaměřením na jejich trvanlivost ve vozovce. Primární pozornost je věnována hodnocení empirických i funkčních vlastností silničních asfaltů a jejich disperzní (koloidní) stability a funkčních vlastností asfaltových směsí. Výsledky laboratorních zkoušek jsou prakticky ověřeny na pokusných úsecích, jejichž stav je pravidelně monitorován. V závěru jsou shrnuty výsledky habilitační práce a představeny hlavní praktické výstupy – metodika umožňující hodnotit disperzní stabilitu silničních asfaltů, metodika hodnotící silniční asfalty z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí a metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltové pojivo, silniční asfalt, asfaltová směs, asfaltový beton, stárnutí, disperzní stabilita, flokulační toluenový index.

ABSTRACT

The habilitation work is focused on the issue of durability of asphalt pavements. The theoretical part of the thesis describes a system of regulations for road construction technology in the Czech Republic. Furthermore, the compositions and properties of asphalt binders are described with emphasis on their aging and the possibility of laboratory simulation of this aging. Subsequently, the issue of performance testing of asphalt binders and asphalt mixtures is discussed. The experimental part of the work describes the possibilities of expanding the set of usable modern test methods, which have the potential for a more concise description of the behaviour of road construction materials with a focus on their durability in the pavement. Primary attention is paid to the evaluation of empirical and performance properties of paving bitumens and their dispersion (colloidal) stability and performance properties of asphalt mixtures. The results of laboratory tests are practically verified on test sections, the condition of which is regularly monitored. The thesis concludes with summarizing the results and with presenting the main practical outcomes – methodology for evaluating the dispersion stability of paving bitumens, methodology for evaluating paving bitumens in terms of susceptibility to thermooxidative aging and methodology describing laboratory aging of asphalt mixtures.

KEYWORDS

Asphalt binder, paving bitumen, asphalt mixture, asphalt concrete, aging, dispersion stability, flocculation toluene index.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

DAŠEK, Ondřej. *Trvanlivost asfaltových vozovek*. Brno, 2021. 150 s., 52 příl. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená habilitační práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, a že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně dne 11. 1. 2021

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svým nejbližším za podporu a trpělivost, kterou se mnou měli při zpracování habilitační práce.

Obsah

1.	ÚVOD.....	9
2.	PROBLEMATIKA ŽIVOTNOSTI ASFALTOVÝCH VOZOVEK	11
3.	SYSTÉM PŘEDPISŮ PRO TECHNOLOGII STAVBY VOZOVEK V ČR.....	13
4.	SLOŽENÍ A VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH POJIV	17
4.1.	Složení a struktura asfaltového pojiva.....	17
4.1.1.	Nasyčené uhlovodíky	20
4.1.2.	Aromáty	20
4.1.3.	Pryskyřice	20
4.1.4.	Asfaltény.....	20
4.2.	Charakterizace asfaltového pojiva.....	20
4.3.	Kvantifikace změn ve struktuře asfaltového pojiva	21
4.4.	Visbreaking.....	23
4.5.	Proces stárnutí asfaltového pojiva	24
4.5.1.	Chemické stárnutí	24
4.5.2.	Strukturální stárnutí	27
4.5.3.	Exsudační stárnutí	28
4.6.	Náchylnost ke stárnutí v současnosti vyráběných asfaltových pojiv	28
4.7.	Laboratorní metody simulující stárnutí asfaltových pojiv.....	28
4.7.1.	Tepelná stálost v tenké pohybuující se vrstvě (RTFOT).....	29
4.7.2.	Tepelná stálost tenkého filmu (TFOT).....	30
4.7.3.	Krátkodobé stárnutí metodou rotující baňky (RFT).....	30
4.7.4.	Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT)	31
4.7.5.	Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV).....	32
4.8.	Další metody simulující stárnutí asfaltových pojiv	32
4.9.	Metody simulující stárnutí asfaltového pojiva zabudovaného v asfaltové směsi.....	33
4.9.1.	Braunschweigska metoda stárnutí – Braunschweiger Alterung (BSA).....	34
4.9.2.	Metody programu SHRP	34
4.9.3.	Metody technické komise RILEM	34
4.9.4.	Návrh evropské normy prEN 12697-52	35
5.	FUNKČNÍ ZKOUŠENÍ ASFALTOVÝCH POJIV	36
5.1.	Reologie asfaltových pojiv	36
5.2.	Stanovování reologických vlastností asfaltových pojiv	39
5.2.1.	Rotační zkoušky	39
5.2.2.	Oscilační zkoušky.....	40

5.2.3.	Krípové zkoušky.....	44
5.2.4.	Relaxační zkoušky.....	45
5.3.	Využití funkčních zkoušek pojiv v Evropě a v ČR	46
6.	FUNKČNÍ ZKOUŠENÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ	48
6.1.	Zhutnitelnost asfaltových směsí	49
6.2.	Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových směsí	50
6.3.	Odolnost vůči trvalým deformacím asfaltových směsí	51
6.4.	Tuhost asfaltových směsí	53
6.5.	Odolnost vůči únavě asfaltových směsí	54
7.	CÍLE HABILITAČNÍ PRÁCE.....	56
8.	VÝSLEDNÉ EMPIRICKÉ A FUNKČNÍ PARAMETRY SOUBORU SILNIČNÍCH ASFALTŮ	57
8.1.	Penetrace jehlou podle ČSN EN 1426.....	58
8.2.	Bod měknutí podle ČSN EN 1427	60
8.3.	Dynamická viskozita podle ČSN EN 13702	61
8.4.	Komplexní smykový modul a fázový úhel podle ČSN EN 14770.....	63
8.5.	Modul tuhosti za ohybu podle ČSN EN 14771	69
8.6.	Metodika pro hodnocení disperzní stability silničních asfaltů	72
8.6.1.	Princip metody.....	72
8.6.2.	Postup zkoušky	73
8.6.3.	Detekce flokulačního bodu.....	73
8.6.4.	Vyjádření výsledků.....	74
8.6.5.	Interpretace výsledků a obor použitelnosti metody	75
8.7.	Hodnoty flokulačního toluenového indexu souboru silničních asfaltů	76
8.8.	Závislosti mezi výsledky vybraných zkoušek pojiv	76
9.	VLASTNOSTI ROZŠÍŘENÉHO SOUBORU SILNIČNÍCH ASFALTŮ	84
9.1.	Výsledky zkoušek rozšířeného souboru silničních asfaltů	84
9.2.	Závislosti mezi výsledky zkoušek rozšířeného souboru pojiv	92
9.3.	Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí	95
9.3.1.	Podstata metody.....	96
9.3.2.	Postup zkoušky	96
9.3.3.	Měřené veličiny	97
9.3.4.	Požadavky na změnu měřených veličin pro silniční asfalt třídy 50/70 a 70/100	97
10.	POKUSNÉ ÚSEKY	98
10.1.	Pokusný úsek v obci Lukavice (okres Rychnov nad Kněžnou)	98
10.2.	Pokusný úsek na komunikaci II/317 Borohrádek.....	99
10.3.	Pokusný úsek na komunikaci I/34 Polička, ulice Hegerova.....	100

10.4.	Kontrolní zkoušky asfaltových směsí z pokusných úseků	102
10.5.	Vlastnosti asfaltových vrstev pokusných úseků	103
10.6.	Podrobná analýza materiálů získaných při provádění pokusných úseků	103
10.6.1.	Empirické zkoušky asfaltových pojiv	105
10.6.2.	Dynamická viskozita asfaltových pojiv.....	106
10.6.3.	Komplexní smykový modul a fázový úhel v DSR.....	109
10.6.4.	Flokulační toluenový index	115
10.6.5.	Tuhost asfaltových směsí	116
10.6.6.	Závislosti mezi výsledky vybraných zkoušek pojiv a směsí	118
10.7.	Zhodnocení stavu pokusných úseků	126
10.8.	Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí	132
10.8.1.	Podstata metody.....	132
10.8.2.	Postup zkoušky	133
10.8.3.	Hodnocení změn vlastností asfaltové směsi způsobené stárnutím metodou BSA	133
10.8.4.	Popis hodnocení změn vlastností asfaltové směsi způsobených stárnutím	133
11.	ZÁVĚRY HABILITAČNÍ PRÁCE	134
12.	POUŽITÁ LITERATURA	137
13.	SEZNAM OBRÁZKŮ	145
14.	SEZNAM TABULEK	150

PŘÍLOHY HABILITAČNÍ PRÁCE

- A. Metodika pro hodnocení disperzní stability silničních asfaltů
- B. Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí
- C. Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí

1. ÚVOD

Stát prostřednictvím samosprávy financuje výstavbu a údržbu pozemních komunikací a recipročně daňový poplatník jako jejich uživatel vyžaduje kvalitní síť pozemních komunikací. Kvalita je spojena s prostorovou hustotou silniční sítě, její průchodností a především se stavem horní pojízdné vrstvy vozovky (obrusné vrstvy). Právě obrusná vrstva bez poruch zajišťuje jízdní komfort pohybujících se vozidel, a spolu s kapacitou komunikace tvoří hlavní posuzovanou složku kvality.

Rostoucí stupeň automobilizace vede ke zrychlenému vývoji poruch vozovek, zvláště vývoji trvalých deformací, trhlin a výtluků, což negativně ovlivňuje provozní způsobilost vozovek a vede ke snižování doby jejich životnosti. Tento trend je možné řešit dvěma základními přístupy. Buď bude docházet ke zkrácení cyklu údržby, oprav a rekonstrukcí vozovek silniční sítě nebo bude nutné používat kvalitnější materiály a metody výstavby, zajišťující vyšší trvanlivost. Součástí tohoto procesu je inovace postupů materiálové charakterizace těchto materiálů se snahou proniknout k fyzikálně-mechanické podstatě všech základních procesů, které ovlivňují chování a celkovou dopravně-technickou hodnotu vozovek. Empirická metodika návrhu a zkoušení asfaltových směsí poskytuje rezervy v podobě nevyužití plného potenciálu materiálů. Použitím funkčních zkušebních metod dochází k zefektivnění kontrolního a zkušebního systému používaného při aplikaci stavebních silničních materiálů, který by měl vést k prodloužení životnosti vyráběných asfaltových vrstev.

Například vlastnosti silničních asfaltů se v současné době v silničním stavitelství hodnotí nejčastěji pouze empirickými zkouškami penetrace jehlou podle ČSN EN 1426 [37], bodem měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427 [38] a bodem lámavosti dle Fraasse podle ČSN EN 12593 [12], což se jeví jako nedostatečné pro popis funkčního chování asfaltových pojiv a jejich změn v průběhu užívání ve vozovce. Rovněž v případě kameniva se při ověřování parametrů asfaltových směsí zjišťuje často pouze čára zrnitosti kameniva obsaženého v asfaltové směsi. Některé další zkušební metody jsou vyjmenovány ve výrobové normě ČSN EN 13043 [34]. Tyto charakteristiky se ovšem běžně u kameniva mimo počáteční zkoušky typu nestanovují.

Z těchto důvodů se v současnosti stále častěji pro hodnocení vlastností asfaltových pojiv uplatňují nové funkční zkušební metody, které mají potenciál nahradit tyto jednoduché empirické zkoušky. Podobnou snahu je možné vysledovat i v případě zkoušení kameniva používaného pro výrobu asfaltových směsí a v neposlední řadě i v oblasti funkčního zkoušení těchto asfaltových směsí.

Zvýšení trvanlivosti asfaltových směsí a vrstev je možné řešit i použitím moderních stavebních materiálů a samotným složením asfaltových směsí. Například zvýšení obsahu pojiva v asfaltové směsi může být výhodné z hlediska omezení vzniku trhlin, což se v poslední době uplatňuje u směsí typu asfaltový beton se zvýšeným obsahem pojiva pro podkladní vrstvy. Pokud se použije modifikované pojivo, dojde zpravidla rovněž k prodloužení životnosti asfaltové vrstvy. V současnosti se stále častěji používají polymerem vysoce modifikovaná pojiva, případně asfalty modifikované pryžovým granulátem. Dále je možné použít různé

přísady do asfaltového pojiva i přímo do asfaltové směsi (například přilnavostní přísady, výztužná vlákna, vápenný hydrát atd.). Samozřejmostí ovšem musí být dodržení veškerých předepsaných technologických postupů.

V této habilitační práci je věnována pozornost inovativním zkušebním postupům, které mají potenciál zvýšit životnost (trvanlivost) asfaltových vozovek a které byly řešeny v rámci výzkumných projektů, jichž se autor práce účastnil jako řešitel nebo spoluřešitel. V předkládané habilitační práci jsou tedy popsány činnosti autora, které souvisejí s jeho snahou o rozšíření souboru využitelných moderních zkušebních metod, které si kladou za cíl výstižněji popsat chování stavebních silničních materiálů, zejména asfaltového pojiva, se zaměřením na zvýšení jeho trvanlivosti ve vozovce.

Tyto činnosti lze zjednodušeně rozdělit na:

- vývoj laboratorních zkušebních metod pro hodnocení vlastností asfaltových pojiv se zaměřením na jejich koloidní (disperzní) stabilitu a odolnost vůči stárnutí, který byl prováděn s podporou výzkumného projektu Technologické agentury ČR (TA03030381 „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“ [141]), jehož byl autor habilitační práce hlavním řešitelem,
- vývoj laboratorních zkušebních metod pro hodnocení stárnutí asfaltových pojiv, obsažených v asfaltových směsích, který byl prováděn s podporou výzkumného projektu Technologické agentury ČR (TA03030381 „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“ [141]),
- realizaci pokusných úseků pro ověření laboratorního výzkumu,
- legislativní a normotvornou činnost, související s prosazením závěrů výzkumu do silniční stavební praxe.

2. PROBLEMATIKA ŽIVOTNOSTI ASFALTOVÝCH VOZOVEK

Při hodnocení nákladů za konstrukci vozovky lze zvolit v zásadě dva přístupy: buď se bere v potaz pouze pořizovací cena, nebo lépe náklady životního cyklu celé konstrukce. Náklady životního cyklu zahrnují nejen pořizovací náklady, ale také náklady na provoz v rámci celého životního cyklu, který je u asfaltových vozovek možné uvažovat jako návrhové období (25 let). Je samozřejmě výhodné, aby náklady životního cyklu vozovky byly co nejnižší.

Obecně používaná metoda pro návrh konstrukcí asfaltových vozovek je v České republice uvedena v technických podmínkách s označením TP 170 [134] včetně dodatku č. 1 [57] a upraveného dotisku [135]. Předpis uvažuje předpokládanou dobu životnosti 25 let (návrhové období). Po tuto dobu by měly být četnosti a charaktery poruch vozovky pouze takového rozsahu („návrhová úroveň porušení“), aby umožňovaly plnou funkčnost vozovky a zajišťovaly dostatečný jízdní komfort všem vozidlům. Netuhé vozovky se vyznačují vysokou přizpůsobivostí dopravnímu zatížení. Obrusné vrstvy mají obvykle dobu životnosti nižší než je návrhové období, ale vyznačují se snadnou udržovatelností a opravitelností. Trvanlivost vozovky je tedy možné chápat jako schopnost povrchu vozovky odolávat účinkům dopravního zatížení a klimatických vlivů. Při navrhování konstrukce vozovky se vyjadřuje předpokládanou dobou životnosti obrusné vrstvy a celé konstrukce. [126]

V současné době se v ČR řeší problematika navrhování konstrukcí vozovek pomocí zavedení návrhových úrovní porušení. Úroveň porušení zavádí předpokládaný vývoj porušování, který je při navrhování vyjádřen přípustnou plochou výskytu konstrukčních poruch na konci návrhového období (nebo přesněji vyjadřuje pravděpodobnost porušení konstrukce nebo spolehlivost konstrukce). Podle technického předpisu TP 170, který zároveň definuje pojem porucha, je návrhová úroveň porušení pro vozovky na komunikacích nejvyššího zatížení klasifikován jako D0, tedy pouze jedno procento povrchu komunikace může na konci své životnosti vykazovat konstrukční poruchy. Za konstrukční poruchu je možné považovat trhlinu, výtluk, trvalou deformaci (vyjeté koleje), erozi povrchu, síťový rozpad a změnu povrchových vlastností (například koeficientu tření) nebo rovinatosti. Návrhová úroveň porušení D1 předpokládá na konci návrhového období konstrukční poruchy v rozsahu maximálně do 5 % plochy a úroveň D2 do plochy 25 %. [134]

Vyšší spolehlivost návrhu konstrukce vozovky je zaručena použitím kvalitnějších materiálů, vyššími kvalitativními požadavky pro zabudované materiály do vozovky a podloží a větší tloušťkou vrstev vozovek. Následně bez ohledu na vyšší účinek zatížení a prostředí dochází k nižšímu poškozování a porušování vozovky a nižším nákladům na údržbu a opravy. Lepším stavem povrchu a krátce trvajícím údržbou a případně opravou se omezí ztráty uživatelů a správců pozemní komunikace. Naopak při nižší spolehlivosti návrhu se použijí levnější materiály a technologie v nižších tloušťkách s celkově nižšími náklady na výstavbu, s nižšími charakteristikami provozní způsobilosti, s rychlejším poškozováním a porušováním, častější a levnější údržbou a opravou a díky nízkému počtu vozidel ztráty uživatelů nedosáhnou rozhodujícího vlivu na celkové náklady spojené s výstavbou a dlouhodobou funkcí pozemní

komunikace. Zásadní vliv na životnost asfaltových vozovek má mimo jiné předpisová základna, která určuje kvalitu materiálů a staveb. [94]

3. SYSTÉM PŘEDPISŮ PRO TECHNOLOGII STAVBY VOZOVEK V ČR

Každá země vytváří (nebo někdy přebírá) vlastní soustavu předpisů, pomocí které se zajišťuje kvalita použitých stavebních materiálů i jakost prováděných stavebních děl. V České republice se pro stavbu vozovek a specifikaci jejich materiálů a postupů s nimi spojenými používají české technické normy (ČSN) a evropské či mezinárodní normy (EN, ISO). Pokud jsou tyto evropské a mezinárodní normy převzaty a zahrnuty do soustavy českých norem, stávají se normami českými (ČSN EN, ČSN ISO, ČSN EN ISO). Evropskou (mezinárodní) normu je možné převzít překladem (v české normě za národními titulními stranami s potřebnými informačními údaji v českém jazyce následuje vlastní text v českém jazyce), převzetím originálu (za národními titulními stranami se nachází text anglického originálu) nebo schválením mezinárodní normy k přímému používání (tímto je vyhlášeno přímé používání evropské normy). [144]

Obecně je technická norma dokument, který stanovuje požadavky na konkrétní předměty, materiály, komponenty, systémy nebo služby, nebo podrobně popisuje konkrétní metody a postupy. Normy jsou vytvářeny na základě konsenzu a schváleny uznanými normalizačními orgány. Technické normy poskytují jednotlivcům, podnikům a různým organizacím společný základ pro vzájemné porozumění. Užitečné jsou zejména pro komunikaci, měření, obchod a výrobu. [136]

Právní úprava technické normalizace je obsažena v Zákonu č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění Zákona č. 71/2000 Sb. a Zákona č. 102/2001 Sb. Cílem vypracování zákona č. 22/1997 Sb. bylo vytvořit základ k právní úpravě odpovídající čl. 75 Evropské dohody, která obsahuje závazek České republiky "dosáhnout ve spolupráci s EU plné shody s technickými předpisy ES, evropskou normalizací a postupy posuzování shody". Následné změny zákona uvádějí jeho znění do plného souladu s legislativou Evropského společenství. [81, 82]

Národní normalizační orgány (např. v České republice Česká agentura pro normalizaci, dříve Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví) vytvářejí národní normy, případně se podílejí na vypracování a přijímání norem evropských či mezinárodních. Národní normalizační orgány sdružují zástupce průmyslu a obchodu a ostatní zainteresované strany, jako například spotřebitelské organizace, environmentální skupiny a organizace zabývající se problematikou bezpečnosti a ochrany zdraví. Konkrétní práci na definování a vypracování textů norem provádí odborníci v technických komisích, kteří jsou jmenováni jednotlivými zainteresovanými stranami. Technické normalizační komise (TNK) jsou odbornými poradními orgány Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví a jsou zřizovány vždy k určité konkrétní oblasti. Členové TNK zastupují jednotlivé zainteresované strany v dané oblasti. [136, 75]

V rámci Evropské unie mají před národními normami přednost přejeté evropské normy, které jsou vypracovávány a vydávány evropskými normalizačními organizacemi (Evropský výbor pro normalizaci (CEN), Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice (CENELEC) a Evropský ústav pro telekomunikační normy (ETSI)). Evropská komise pro

normalizaci sídlí v Bruselu, byla založena v roce 1961 a v současné době je jejím členem 33 států zastoupených národními normalizačními orgány. Vytváření mezinárodních norem a dalších dokumentů je prováděno prostřednictvím technických komisí (TC), mezi které jsou rozděleny jednotlivé oblasti, ve kterých normy vznikají. Česká republika se, jako člen CEN, musí povinně vyjadřovat ke všem předkládaným dokumentům ze všech technických komisí CEN. [75]

Mezinárodní normy jsou vypracovávány a vydávány mezinárodními normalizačními organizacemi (Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO), Mezinárodní elektrotechnická komise (IEC) a Mezinárodní telekomunikační unie (ITU)). Mezinárodní normy jsou zvláště významné jako prostředek k usnadnění obchodu mezi různými zeměmi. [136]

České technické normy se aplikují pouze tehdy, když daná problematika není řešena normou evropskou, případně když evropská norma požaduje specifikovat požadavky až v místě použití, přičemž státní norma nesmí být s požadavky evropské normy v rozporu a dokonce nesmí být specifikovány ani dodatečné požadavky. Je to zejména z důvodu umožnění jednotného trhu na úrovni členských států. Evropské normy nahrazují ve všech členských státech Unie potenciálně kolidující vnitrostátní normy a usnadňují tak přístup na trh pro ty, kdo je používají. Úroveň požadavků se však v každé zemi může lišit, protože každá země si z harmonizované specifikační normy může vybrat vhodné parametry. [140, 144, 69]

Některé evropské normy jsou připravovány na základě požadavků (nebo mandátů), které jsou Evropskou komisí směřovány k evropským normalizačním organizacím. Pokud česká norma převezme zcela požadavky stanovené evropskou normou nebo harmonizačním dokumentem (uznáno orgány Evropského společenství za harmonizovanou evropskou normu nebo normu, která byla jako harmonizovaná evropská norma stanovena dohodou notifikovaných osob), stane se harmonizovanou českou technickou normou. Evropské harmonizované normy se vydávají na určité skupiny stavebních výrobků (např. normy na asfaltová pojiva, asfaltové emulze, kamenivo atp.). Tyto normy obsahují popis procesu, jak se pro danou skupinu výrobků prokazuje shoda s příslušným předpisem EU. V případě, že na daný výrobek neexistuje harmonizovaná norma, využije se normy určené. [140, 144, 69]

Od 1. července 2013 nabylo účinnosti nařízení EP a Rady č.305/2011, kterým se stanoví harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh. Nově vydaný předpis má zkratku CPR (Construction Products Regulation). V souladu s tímto nařízením musí výrobce pro všechny stavební výrobky, pro které existují harmonizované normy, vypracovat prohlášení o vlastnostech (dříve prohlášení o shodě) a opatřit tyto výrobky označením CE. Vypracováním prohlášení o vlastnostech nese výrobce odpovědnost za shodu stavebního výrobku s vlastnostmi uvedenými v tomto prohlášení. Prohlášení o vlastnostech uvádí vlastnosti stavebních výrobků ve vztahu k základním charakteristikám dotčených výrobků, přičemž jednotné metody zkoušení, výpočty a systémy posuzování a ověřování stálosti vlastností jsou uvedeny v příslušných harmonizovaných technických specifikacích. V souladu s harmonizovanou technickou specifikací se zvolí systém posuzování a ověřování stálosti vlastností: 1, 1+, 2+, 3 nebo 4. Úkoly třetí nezávislé strany v těchto systémech plní oznámené subjekty. [78, 103]

Obecně v silničním stavitelství existují evropské normy specifikační (výrobní) a normy zkušební. Specifikační normy uvádějí požadavky na určitou skupinu materiálů, které se v silničním stavitelství používají nejčastěji do konstrukčních vrstev vozovky. Požadavky na tyto finální produkty jsou uvedeny v českých technických normách (dříve v národních přílohách specifikačních norem). Evropské specifikační normy zpravidla obsahují pouze volitelné kategorie (třídy / úrovně požadavků / limitní hodnoty) a rozsahy odpovídajících hodnot, ze kterých si jednotlivé členské státy vybírají požadavky, které jsou uvedeny ve vlastních národních normách. Evropské specifikační normy tedy neudávají na jednotlivé materiály přímo požadavky, ale pouze vhodné zkušební metody a kategorie, ze kterých si jednotlivé členské státy vyberou hodnoty a vydají je v národních normách jako požadavky. Oproti tomu normy zkušební popisují zkušební postupy, pomocí kterých se provádí laboratorní nebo polní zkoušky tak, aby bylo možné standardizovaným postupem dosáhnout výsledky zatříditelné zejména pomocí specifikačních norem. [144]

Kromě technických norem existují i další předpisy, které se označují v případě silničního stavitelství jako rezortní. Pro specifické technologie vydává Ministerstvo dopravy Technické podmínky ministerstva dopravy. Tyto předpisy jsou vypracovány na základě nejnovějších poznatků vědy, techniky a praxe ve snaze o optimální řešení problémů vyskytujících se při stavbě pozemních komunikací a jsou většinou volně dostupné. Tyto předpisy popisují metody a materiály, pro které neexistují předpisy vyšší úrovně (zejm. technické normy). [71]

Ředitelství silnic a dálnic vydává Technické kvalitativní podmínky, což je souhrn základních požadavků zadavatele stavby na její provedení, kontrolu a převzetí. Tyto předpisy obsahují požadavky na technologické postupy a organizační a obchodní požadavky, přičemž jsou zde uvedeny odkazy na normy a jiné technické předpisy. Tyto předpisy, jmenované v Technických kvalitativních podmínkách, jsou pak pro danou stavbu právně závazné z titulu uzavření smlouvy o dílo. V případech, kdy jsou požadovány jiné práce, než práce obsažené v Technických kvalitativních podmínkách nebo je potřebné je změnit nebo doplnit nebo se jedná o ojedinělé technické řešení, stanoví objednatel potřebné zásady ve zvláštních technických kvalitativních podmínkách. Zvláštní technické kvalitativní podmínky jsou tedy pro danou stavbu zpravidla nadřazeny Technickým kvalitativním podmínkám staveb a upřesňují a doplňují jejich obecná ustanovení. Technické kvalitativní podmínky pro dokumentaci staveb pozemních komunikací jsou souhrnem požadavků zadavatele dokumentace stavby na její zpracování, kontrolu a převzetí. [70, 144]

Kromě výše uvedených dokumentů existují i další předpisy. Například předpis typu certifikovaná metodika vychází zpravidla z výsledků řešení výzkumných projektů. Jedná se o dokument, který byl příslušným orgánem státní správy nebo příslušným odborným certifikačním (akreditačním) orgánem schválen a doporučen pro využití v praxi. Certifikačním orgánem pro rezort dopravních staveb je Ministerstvo dopravy. Certifikace je udělena na základě vypracování dvou nezávislých oponentních posudků a po schválení textu Ředitelstvím silnic a dálnic. Certifikovanou metodiku mohou využívat orgány státní správy (například zavedením metody do Zvláštních technických kvalitativních podmínek) případně soukromé subjekty jako vnitropodnikové předpisy. Podmínkou certifikace je využití nových postupů,

takže tyto předpisy mohou doplňovat systém již zavedených norem a jiných předpisů případně mohou metodiky sloužit jako podklad pro vytvoření jiných předpisů. [131]

4. SLOŽENÍ A VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH POJIV

Netuhé asfaltové vozovky obsahují zpravidla kryt složený z asfaltových vrstev. Asfaltová vrstva vzniká zhutněním asfaltové směsi, která se skládá zejména ze směsi kameniva a asfaltového pojiva. Zhutněním asfaltové směsi vzniká třífazový systém, ve kterém kamenivo vytváří vzájemně zaklíněnou kostru a pojivo na povrchu zrn kameniva spojuje jednotlivá zrna kostry dohromady. Důležitou roli zde hrají částice kameniva přibližně do velikosti 2 mm, jež po obalení asfaltovým pojivem vytvoří asfaltovou maltu (tzv. mastix), která se významně podílí na fixaci hrubých zrn kameniva. Třetí fázi tohoto systému tvoří vzduchové mezery. Únosnost asfaltové vrstvy je dána třením mezi zrny kameniva a jejich vzájemným stmelením asfaltovým pojivem. [144]

Vlastnosti asfaltových vrstev jsou značně ovlivněny vlastnostmi asfaltového pojiva. Asfaltové pojivo jakožto organický materiál podléhá v průběhu životnosti různým degradačním vlivům. Z toho důvodu nelze posuzovat vlastnosti asfaltových pojiv, potažmo směsí, pouze v čerstvém stavu, ale je nutné hodnotit vlastnosti těchto materiálů i po simulaci stárnutí. Zároveň v případě asfaltových pojiv platí, že pokud má pojivo vynikající vlastnosti v nezestárlém, respektive čerstvém stavu, neznamená to, že si tyto vlastnosti uchová i po stárnutí. Podobně pojivo s horšími vlastnostmi po výrobě může mít lepší vlastnosti z dlouhodobého hlediska, protože vlastnosti u pojiva se s časem tolik nemusejí měnit. Aby bylo možné popsat procesy stárnutí, je nutné znát chemické vlastnosti a složení asfaltových pojiv [126, 50]. V této kapitole jsou sumarizovány poznatky o vlastnostech a složení asfaltových pojiv a o změnách jejich chování v průběhu doby užívání.

4.1. Složení a struktura asfaltového pojiva

K samotné chemické nebo materiálové podstatě asfaltového pojiva se v České republice nevztahuje přímo žádná zkušební metoda. Složení asfaltového pojiva je určeno jeho chemismem, které se mění v závislosti na druhu použité ropy a způsobu jejího zpracování [88]. Způsob zpracování ropy je nastaven na typ vstupní ropy v závislosti na specifické hmotnosti:

- velmi těžké (extra heavy, $\geq 1000 \text{ kg/m}^3$),
- těžké (heavy 920 kg/m^3 až 1000 kg/m^3),
- střední (medium, 870 kg/m^3 až 920 kg/m^3) a
- lehké (light $\leq 870 \text{ kg/m}^3$).

Z ropy vyrobená asfaltová pojiva pak mohou být dále charakterizována pomocí dominantního molekulového řetězce na:

- parafinická,
- naftenická nebo
- aromatická pojiva.

Toto rozdělení dále charakterizuje složení pojiva, které následně ovlivňuje fyzikální a visko-elastické vlastnosti. V závislosti na požadovaných výsledných vlastnostech může výrobní proces asfaltového pojiva zahrnovat atmosférickou a vakuovou destilaci, úpravu

foukáním, chemickou úpravu, míchání nebo jiné technologické procesy. Z toho důvodu je zřejmé, že složení každého asfaltového pojiva je rozdílné. [5, 46]

Na území ČR se díky otevřenému trhu můžeme setkat s celou řadou asfaltových pojiv, která se vyrábí například z ropy pocházející z Ruska, Afriky, zemí blízkého východu nebo z Venezuely. Obecně lze říci, že ropy vhodné pro výrobu asfaltového pojiva jsou ropy těžké [7]. Z jedné tuny surové ropy se běžně získává kolem 40 kg asfaltu, i když toto množství se může v závislosti na použité technologii zpracování měnit [63]. Získávání asfaltového pojiva ze surových rop je podrobněji popsáno například v [5].

Ropné asfalty jsou tvořeny zejména z uhlíku (80 % až 88 %) a vodíku (8 % až 12 %). V nižším množství je zastoupen ještě kyslík, síra a dusík a další prvky. Z tohoto pohledu lze asfaltové pojivo na molekulární úrovni označit za směs derivátů vysokomolekulárních uhlovodíků. Podle charakteru a typu vazeb mezi jednotlivými molekulami lze obsažené uhlovodíky rozdělit na alifatické a aromatické. Do struktury uhlovodíků jsou zabudovány tzv. heteroatomy, především atomy síry, dusíku a kyslíku. Tyto heteroatomy mají pouze minoritní zastoupení ve struktuře asfaltového pojiva, přesto jsou schopny vytvářet vazby mezi molekulami a významně ovlivnit fyzikální vlastnosti pojiva, mezi které patří bod varu, rozpustnost pojiva nebo viskozita. Asfaltové pojivo rovněž obsahuje stopové prvky kovů (vanad, nikl, chrom, železo nebo hořčík), které jsou významné z hlediska vlivu na průběh termooxidační reakce při stárnutí asfaltového pojiva [132, 89, 91]. Stopové prvky působí jako katalyzátory termooxidační reakce. Přibližné prvkové složení asfaltového pojiva je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1: Přibližné chemické složení asfaltového pojiva z hlediska prvků [96]

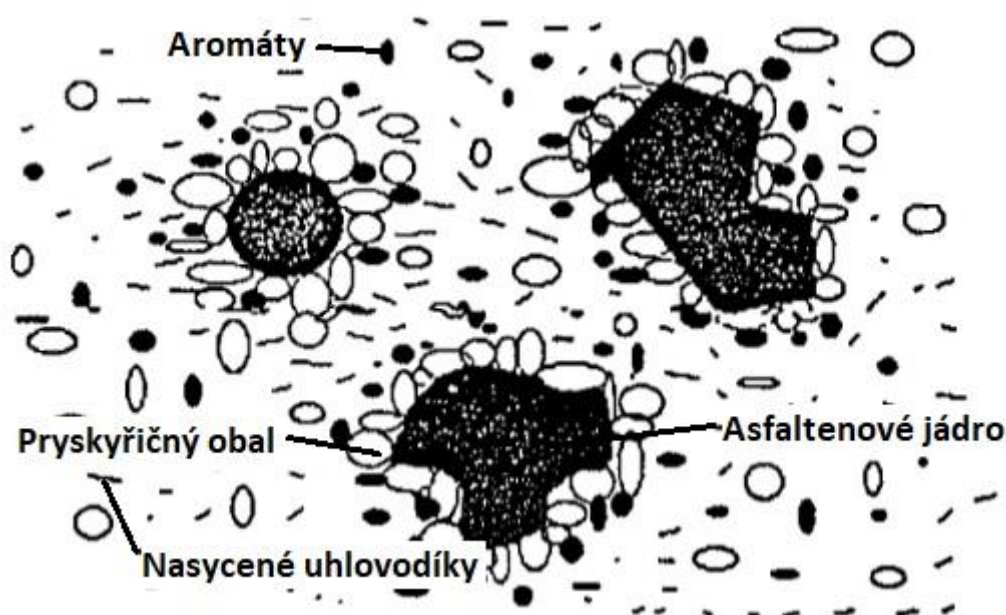
Složka	Uhlík	Vodík	Kyslík	Dusík	Síra
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Asfaltové pojivo	80-88	8-12	0-2	0-2	0-9
Nasycené uhlovodíky	78-84	12-14	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Aromáty	80-86	9-13	0,2	0,4	0-4
Pryskyřice	67-88	9-12	0,3-2	0,2-1	0,4-5
Asfaltény	78-88	7-9	0,3-5	0,6-4	0,3-11

Pouhá znalost skupinového složení ropy má velmi omezenou korelaci s vlastnostmi silničních asfaltů. Mnohem důležitější je kvalita a chemická podstata jednotlivých složek asfaltových pojiv včetně jejich vzájemné kompatibility. Tyto strukturální skutečnosti zásadně rozhodují o fázové stabilitě systému, jenž se všeobecně označuje jako koloidní (případně disperzní) stabilita. [125]

Chemické složení asfaltového pojiva je mimořádně složité, neboť pojivo obsahuje tisíce chemicky různorodých molekul, jejichž jednotlivá kvantifikace by byla nesmírně komplikovaná. Z tohoto důvodu se přistoupilo při hodnocení chemického složení ke skupinové (grupové) analýze. V tomto případě se nejčastěji provádí dělení jednotlivých skupin molekul na základě jejich polarit [99, 122]. Existují však další metody, které je možno úspěšně

aplikovat, jedná se například o dělení na základě aromaticity nebo molekulové hmotnosti [123].

První pokusy o charakterizaci asfaltového pojiva vyústily v popis asfaltového pojiva jako koloidní disperze [104]. Pojivo bylo popsáno jako směs skládající se z uhlovodíků s vysokou molekulovou hmotností (asfaltény) jež jsou dispergovány ve fázi malténové [145]. Mezi maltenickou složku pojiva řadíme podle Corbettovy skupinové separace olejových destilačních zbytků nasycené uhlovodíky (Saturates), aromáty (Aromates) a pryskyřice (Resins). Odtud vychází zkratka SARA. Pryskyřice tvoří „ochranný obal“ asfaltenů působící jako stabilizační prvek systému. Asfaltény mohou být podle Corbetta ze systému odděleny na základě jejich nerozpustnosti v n-heptanu, přičemž dělení malténů je prováděno na základě jejich polaritu pomocí chromatografických metod. Na obrázku 1 je schematicky zobrazena koloidní struktura asfaltového pojiva. [46]



Obrázek 1: Koloidní struktura asfaltového pojiva [90]

Další možné dělení složek asfaltového pojiva je možno provést na základě klasifikace podle Rostlera, který dělí maltenickou fázi na pryskyřice (Polar compounds), polární aromáty (First Acidifins), naftenické aromáty (Second Acidifins) a nasycené uhlovodíky (Saturated hydrocarbons). Rostler dělí pojivo na základě reaktivity jednotlivých komponent s kyselinou sírovou poté, co jsou z pojiva odstraněny asfaltény pomocí n-pentanu. [46, 91]

Zjištění procentuálního zastoupení jednotlivých skupin u asfaltových pojiv (SARA analýza) se běžně provádí pomocí chromatografických metod. Skupinové složení se zjišťuje pomocí separace jednotlivých skupin na principu rozdílné afinity dělených látek ke stacionární a mobilní fázi [115]. Podrobnější popis jednotlivých složek asfaltového pojiva, jež se stanovuje pomocí chromatografických metod, je uveden níže.

4.1.1. Nasycené uhlovodíky

Nasycené uhlovodíky většinou tvoří 5 % až 15 % hmotnosti asfaltového pojiva. Za pokojové teploty mají tekutou konzistenci a jsou bezbarvé. Teplota skelného přechodu se pohybuje okolo -70 °C, což je asi o 40 °C nižší než v případě asfaltového pojiva. Jejich hustota při teplotě 20 °C se pohybuje okolo 900 kg/m³. Nasycené uhlovodíky působí v asfaltovém pojivu jako dilutanty [96].

4.1.2. Aromáty

Aromáty, někdy nazývané naftény, patří spolu s pryskyřicemi mezi nejhojněji zastoupenou skupinu (běžně 30 % až 45 % hmotnosti asfaltového pojiva). Při porovnání s nasycenými uhlovodíky jsou za pokojové teploty více viskózní, jelikož mají vyšší teplotu skelného přechodu. Ta se pohybuje okolo -20 °C, což je teplota přibližující se teplotě skelného přechodu asfaltového pojiva. Barva aromátů je žluto-červená a jejich hustota při teplotě 20 °C se blíží 1000 kg/m³ [96].

4.1.3. Pryskyřice

Pryskyřice mohou (stejně jako aromáty) zaujímat 30 % až 45 % hmotnosti asfaltového pojiva v závislosti na pojivu a použité technice měření, tj. použitím rozpouštědla. Pryskyřice jsou za pokojové teploty červenohnědé až černé vysoce viskózní až tuhé látky. Není známo, zda vykazují bod skelného přechodu. Složení pryskyřic se blíží asfaltům, ovšem mají nižší molární hmotnost. Jejich hustota při teplotě 20 °C je přibližně 1070 kg/m³. Pryskyřice tvoří přechod z olejového prostředí na asfalt [96].

4.1.4. Asfaltény

Asfaltény jsou v asfaltovém pojivu zastoupeny v množství 5 % až 25 % hmotnosti. Asfaltény jsou na rozdíl od předchozích složek tuhé částice, které mají zásadní vliv na výslednou viskozitu asfaltového pojiva. Asfaltény jsou zároveň považovány za nerozpustnou část asfaltového pojiva, protože jsou nerozpustné v n-heptanu, ale jsou rozpustné například v toluenu. Asfaltény mají tmavě hnědou až černou barvu a za pokojové teploty mají formu prášku. Jejich přítomnost v asfaltovém pojivu způsobuje jeho výslednou černou barvu. Jejich hustota při teplotě 20 °C se pohybuje kolem 1150 kg/m³ [96, 123].

4.2. Charakterizace asfaltového pojiva

V průběhu času dochází ke zpochybňování popisu pojiva jako koloidní soustavy [6, 118]. Jiné studie [107, 114] nahlíží na asfaltové pojivo jako na homogenní materiál, jehož vlastnosti jsou závislé na interakci mezi jednotlivými molekulami. Interakce mezi jednotlivými molekulami je určena jejich vazbami. Vzájemné interakce poté ovlivňují i fyzikální chování asfaltového pojiva.

Přestože stále existují rozpory v charakterizaci a popisu, je na asfaltové pojivo stále nahlíženo jako na koloidní systém. Koloidní systém je tvořen soustavou dvou oddělených fází (dispergované a kontinuální) přičemž velikost dispergovaných částic se pohybuje od 1 nm do

1000 nm. Kontinuální fáze je souhrnně v literatuře označována jako malténická. Molekuly s vysokou molekulovou hmotností a polaritou (asfaltény) jsou rozptýleny v malténové fázi, která je tvořena molekulami s nižší molekulovou hmotností a polaritou. Obsah asfalténů a jejich interakce s maltény, především s pryskyřicemi, jsou klíčovými vlastnostmi, které ovlivňují chování asfaltového pojiva. Pryskyřice v tomto systému disponují peptizační schopností, díky které zabraňují shlukování asfalténů. [95]

Polarita systému se snižuje ze středu micely směrem do malténové fáze. Při dostatečném obsahu pryskyřic a aromátů dochází k rovnoměrnému rozptýlení asfalténů uvnitř systému. Tento stav (typ) uspořádání vnitřní struktury asfaltového pojiva se v odborné literatuře označuje jako sol. Materiály, které mají sol strukturu, vykazují převážně Newtonovské chování. V opačném případě, pokud není peptizační schopnost pryskyřic dostatečná, mají micely tendenci se shlukovat a tvořit clustery, v tomto případě se jedná o typ gel. Koncentrace micel pak ovlivňuje fyzikální vlastnosti, mezi které patří například viskozita. Ovšem i tyto vlastnosti jsou závislé na teplotě. Se stoupající teplotou mají micely tendenci se zmenšovat a maltény se zvětšovat. Materiály s převažující gelovou strukturou se chovají jako ne-Newtonovské. [113, 124]

4.3. Kvantifikace změn ve struktuře asfaltového pojiva

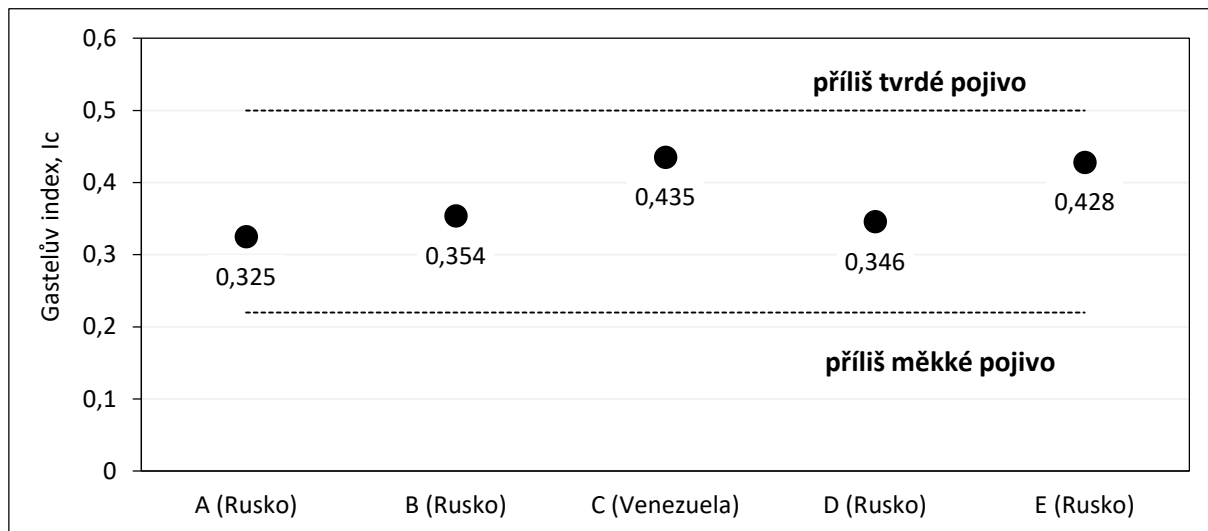
K popsání strukturních vlastností asfaltového pojiva mohou být využity známé poměrové (kompozitní) indexy jednotlivých funkčních skupin (pryskyřice, aromáty, nasycené uhlovodíky a asfaltény), které mohou být určeny na základě výsledků skupinové SARA analýzy. Jedná se o peptizační (Gastelův) index I_C , který stanovuje peptizační schopnost pryskyřic (rovnice 4.1), a asfalténový index I_A , který určuje sílu malténové fáze (rovnice 4.2). Toto skupinové složení se stanovuje nejčastěji preparační sloupcovou chromatografií nebo tenkovrstvou chromatografií. První metoda je přesnější a lépe reprodukovatelná, ale náročná na čas a vynaloženou laboratorní práci, takže analýza vzorku trvá poměrně dlouho a je nákladná. Druhá metoda je podstatně rychlejší a časově úspornější, ale může mít problémy s reprodukovatelností a optimalizací podmínek [101], přičemž trpí na poměrně velký rozptyl hodnot jednotlivého stanovení. Současně jsou peněžní nároky na počáteční investici do instrumentálního vybavení poměrně vysoké. Nepříjemností je i skutečnost, že obě metody využívají částečně odlišné chromatografické podmínky, které ovlivňují účinnost dělení (každá z metod dokáže lépe oddělit a identifikovat jiné skupiny asfaltového pojiva). [125]

$$I_C = \frac{\text{Asfaltény+Nasycené uhlovodíky}}{\text{Pryskyřice+Aromáty}} \quad (4.1)$$

$$I_A = \frac{\text{Asfaltény+Pryskyřice}}{\text{Nasycené uhlovodíky+Aromáty}} \quad (4.2)$$

Gastelův index může být v literatuře také označován jako index koloidní nestability. Čím je Gastelův index nižší, tím je považování pojivo za stabilnější. Při stárnutí se Gastelův index zvyšuje a struktura pojiva se přibližuje struktuře typu gel. Čím vyšší je Gastelův index,

tím nižší je stabilita koloidního systému. Bylo zjištěno, že koloidní systém asfaltového pojiva je nestabilní, když se Gastelův index pohybuje v rozmezí 0,5 až 2,7. Při $I_C \geq 1,2$ bylo zjištěno, že pojivo mělo výrazně gelové chování, zatímco chování typu sol bylo zjištěno při $I_C \leq 0,7$. Na obrázku 2 jsou zobrazeny hodnoty koloidního indexu pro pojiva kategorie 50/70 vyrobená z různých zdrojů ropy. Jsou zde rovněž zobrazeny hranice vymezující stabilitu struktury pojiva, pojivo má nestabilní strukturu, když je tvrdé i když je příliš měkké [106].



Obrázek 2: Gastelův koloidní index asfaltových pojiv z různých rop [106, 91]

K samotné chemické nebo materiálové podstatě, či k obdobnému popisu asfaltových pojiv, se v České republice nevztahuje přímo žádný technický předpis nebo oficiální zkušební metodika. Pro popis disperzní stability asfaltových pojiv je možné s výhodou použít některé metody vyvinuté a publikované v 60. letech minulého století. Jedná se o sériovou konduktometrickou nebo turbidimetrickou titraci, nazývanou v literatuře Heithausova titrace. V současnosti je metoda posouzení disperzní stability uvedena v americké normě ASTM D6703-14 [2] a používá se především pro posuzování ropných zdrojů. Tento postup je ovšem pracný a zdoluhavý. Základní myšlenkou kvantifikace disperzní stability asfaltového pojiva touto metodou je experimentální stanovení dvou parametrů, které charakterizují jednak solvatační schopnost maltenové fáze p_0 a jednak schopnost asfaltového podílu podléhat peptizaci p_a . Kombinací těchto parametrů je možné vypočítat souhrnný Heithausův parametr P, který vyjadřuje míru vnitřní kompatibility systému. Experimentálně se hodnoty p_0 a p_a určí z titrací koncentračních řad roztoku asfaltového pojiva v toluenu, přičemž platí, že poměr objemu přidávaného titrantu k celkovému objemu roztoku v bodě flokulace se označuje jako „Flokulační poměr FR“ („Flokulation ratio“). [125]

Bezrozměrné hodnoty Heithausova parametru P pro asfalty na bázi těžkých destilačních zbytků se pohybují v rozmezí 2,5 až 10. Vyšší hodnoty znamenají lepší vnitřní kompatibilitu, nižší hodnoty naopak horší. Tyto metody jsou v manuální variantě rovněž časově velmi náročné, a proto byl titrační proces v 80. letech zautomatizován tak, aby titrace probíhala kontinuálně při automatickém přidávání titrantu. [125]

4.4. Visbreaking

Ve středoevropském prostoru může být navíc dalším významným faktorem, ovlivňujícím chování asfaltových pojiv, přídavek visbreakingových zbytků. Visbreakingový zbytek, označovaný jako VFCR (Vacuum Flashed Cracked Residue), je zůstatek z mírného termického krakování při zpracování vakuového destilačního zbytku v rafineriích. Během krakování neboli štěpení, se termicky rozkládají dlouhé řetězce uhlovodíků na kratší. Štěpení řetězců lze provádět pomocí třech základních činitelů:

- teplotou,
- katalyzátorem nebo
- vodíkem.

Podle těchto činitelů lze následně krakování rozdělit na visbreaking (štěpení pomocí teploty), fluidní katalytické krakování (štěpení pomocí teploty za přítomnosti katalyzátoru) a hydrokrakování (štěpení pomocí teploty za přítomnosti katalyzátorů a vodíků). Jednotlivé druhy krakování jsou rozdílně účinné, nákladné a hodí se tedy pro jiné suroviny. Vakuový destilát se štěpí pomocí hydrokrakování a vakuový destilační zbytek pomocí visbreakingu. Visbreaking se původně používal ke zlepšení vlastností topných olejů ze zbytkových frakcí (snížení viskozity a bodu tuhnutí). Pokud se vakuový destilační zbytek nebo přímo mazut používají pro produkci topných olejů, je často nutné snížit jejich viskozitu, k čemuž se používaly níže vroucí frakce (např. plynový olej). Aby bylo možné tuto frakci ušetřit, používá se pro snížení viskozity právě visbreaking, během něhož vzniká omezené množství lehkých frakcí. [125, 56, 8]

Část přebytku VFCR se v rafineriích z ekonomických důvodů zpětně přidává do silničního asfaltu a způsobuje jeho vyšší citlivost na oxidativní stárnutí. Je známo, že přídavek vyššího množství visbreakingových zbytků labilizuje asfaltové pojivo, které se za určitých podmínek může stát fázově nestabilní. Dále příměs VFCR k asfaltovému pojivu může vést ke změně teplotní citlivosti pojiva, změně povrchového napětí a vnitřní koheze, snížení viskozity směsného pojiva, zvýšení přilnavosti a odolnosti proti působení vody v asfaltových směsích a ke změně teploty bodu skelného přechodu. Všechny tyto změny chování základního pojiva závisejí na množství podílu přidaného VFCR. Jako kritická hodnota se uvádí množství 8 %. [125, 8]

Visbreakingové zbytky se svým charakterem řadí do skupiny asfaltenů. Typickou vlastností visbreakingových materiálů je jejich poměrně nízká rozpustnost v některých typech uhlovodíkových rozpouštědel. Přítomnost visbreakingových zbytků tedy ještě více zhoršuje vzájemnou kompatibilitu asfaltenových a maltenových složek. Změny v disperzní stabilitě asfaltového pojiva, vyvolané přidáním visbreakingových zbytků, jsou proto velmi významné. [125, 56]

V českém silničním stavitelství se dlouhodobě vede diskuze o vlivu přidávání visbreakingových zbytků na kvalitu asfaltových pojiv. Ovšem pro jednoznačně kvalifikovaný odhad dopadu těchto příměsí nejsou v těchto případech k dispozici relevantní údaje o prokazatelném obsahu (a dávkovaném množství) visbreakingových zbytků v asfaltovém materiálu.

4.5. Proces stárnutí asfaltového pojiva

Asfaltové pojivo jako organický materiál podléhá degradačním procesům, které jsou způsobeny především vlivem působení vzdušného kyslíku, změnou okolních teplot nebo vlivem ultrafialového záření. Vzhledem k faktu, že asfaltové vozovky slouží svému účelu často i několik desítek let, je hodnocení stárnutí asfaltového pojiva jednou z klíčových vědních disciplín v silničním stavitelství [112, 60, 56, 9, 98].

Následkem změny vlastností asfaltového pojiva v čase totiž často dochází ke vzniku poruch asfaltových vozovek. Doposud bylo objeveno a popsáno přibližně 15 procesů, které způsobují změny ve struktuře pojiva, přičemž některé faktory působí pouze na směsi v obrusné vrstvě, zatímco některé jiné působí na vrstvy ložní a také podkladní [112].

Degradační procesy, které jsou souhrnně označovány jako stárnutí, ovlivňují vlastnosti pojiva i jeho odezvu na mechanické a teplotní namáhání. V tomto ohledu může mít stárnutí asfaltových pojiv efekt jak pozitivní, tak negativní. V pozitivním slova smyslu může být stárnutí považováno za výhodné z pohledu zvyšování tuhosti pojiva, resp. směsi a tím pádem tuhosti celé konstrukce. Výsledkem je lepší schopnost konstrukce roznášet zatížení a lepší schopnost vrstvy odolávat trvalým deformacím [119].

Stárnutí asfaltového pojiva je nicméně spojováno především s předčasným vznikem poruch. Jedná se zejména o výskyt únavových a nízkoteplotních trhlin. Vnější vlivy způsobují, že se u pojiva snižují hodnoty parametrů jako například penetrace jehlou, fázový úhel (indikující elasticitu pojiva) a m-hodnota (schopnost relaxace za nízkých teplot). Na druhou stranu dochází ke zvyšování hodnot bodu měknutí, komplexního smykového modulu, viskozity a modulu tuhosti za ohybu za nízkých teplot. Zároveň se zvyšuje i penetrační index, hodnotící teplotní citlivost a snižuje se duktilita (obecně platné chování u silničních asfaltů). Zjednodušeně lze říci, že pojivo se stává v průběhu času tvrdší a křehčí [49, 92, 100, 113].

Stárnutí asfaltového pojiva se také projevuje zúžením lineárně visko-elastické oblasti, což je oblast, ve které je vztah mezi napětím a deformací ovlivněn pouze teplotou a rychlostí, nikoli vlastní velikostí napětí nebo deformace a dále pak ve změnách únavového chování. Vždy však záleží na definici okrajových podmínek měření [121].

Proces stárnutí asfaltového pojiva je způsoben zejména vlivem [110]:

- působení vzdušného kyslíku,
- ultrafialového záření a
- zvýšené teploty.

V literatuře jsou rozeznávány především následující základní skupiny stárnutí [45]:

- chemické stárnutí,
- strukturální stárnutí a
- exsudační stárnutí.

4.5.1. Chemické stárnutí

Chemické stárnutí se dá označit za nevratný proces, vyznačující se sérií nevratných změn ve struktuře pojiva, které je způsobeno oxidačními reakcemi, polymerizací a v menší míře vypařováním lehkých složek asfaltového pojiva. Jedná se o nejvýznamnější druh stárnutí

pojiv. Výsledkem chemického stárnutí je především nárůst tuhosti pojiva. Procesy řízeného chemického stárnutí jsou ovšem i hojně využívány během zpracování vakuových destilačních zbytků za účelem úpravy vlastností asfaltových pojiv – získání tvrdších asfaltových pojiv nebo pojiv s nižší teplotní citlivostí. Nejčastěji se používá úprava tzv. foukáním. Foukání je v podstatě proces, kdy dochází k záměrnému cílenému stárnutí. Jedná se o oxidační proces, probíhající za teploty 220 °C až 320 °C, jehož výsledkem zjednodušeně je, že nízkomolekulární malténová složka pojiva je částečně konvertována do asfalténové složky [108]. Výsledkem je již zmíněné snížení teplotní citlivosti pojiva. Mimo změny chemických vlastností během výroby asfaltového pojiva se lze setkat s dvěma typy podmínek chemického stárnutí a to:

- krátkodobé stárnutí a
- dlouhodobé stárnutí.

Průběh stárnutí vyjádřený indexem stárnutí je popsán například v [113], kde je uvedeno, že hlavní změny ve vlastnostech pojiva se odehrávají již během výroby asfaltové směsi, přičemž je pojivo vystaveno teplotám většinou vyšším než 150 °C. Teplota pojiva při výrobě asfaltové směsi by pak měla být taková, aby viskozita pojiva během obalování byla v rozsahu 0,17 Pa·s až 0,28 Pa·s [143].

Krátkodobé stárnutí

Významná část procesu stárnutí se odehrává již během výroby, skladování a při pokládce a hutnění asfaltové směsi, neboť během těchto technologických procesů je asfaltové pojivo vystaveno vysokým teplotám za přítomnosti vzdušného kyslíku. V tomto případě představuje nejvýznamnější typ degradačního procesu termooxidační reakce. Průběh této reakce je ovlivněn zvláště teplotou a přístupem kyslíku. Změny, nastávající během těchto jednotlivých fází výroby a pokládky asfaltové směsi, se souhrnně označují jako krátkodobé stárnutí. Během krátkodobého stárnutí dochází k nejrychlejší a nejprudší změně vlastností pojiva z pohledu jeho životního cyklu. Změna vlastností asfaltového pojiva během krátkodobého stárnutí je ovlivněna zejména oxidací a ztrátou volatilních komponent pojiva.

Oxidace nastává během obalování kameniva v míchacím zařízení obalovny, kdy je pojivo vystaveno vysokým teplotám, přičemž tloušťka asfaltového filmu je malá a kontaktní plocha velká. Tloušťka asfaltového filmu se z pravidla pohybuje v rozmezí 5 μm až 15 μm. Běžně během výroby dojde ke ztrátě hodnoty penetrace jehlou přibližně o 30 %. Snížení penetrace nebo zvýšení viskozity pojiva je opět závislé na tloušťce asfaltového filmu, přičemž jejím snížením dochází k vyššímu nárůstu viskozity. Dále je nutno poznamenat, že například nárůst bodu měknutí u silničních asfaltů byl korelován s nárůstem výrobní teploty. Oxidativní stárnutí lze popsat Arrheniovou rovnicí, která vyjadřuje závislost mezi teplotou a kontaktní plochou pro přístup kyslíku [113].

Ztráta volatilních komponent se projevuje spolu s nárůstem teploty. Vyšší teploty způsobují štěpení uhlovodíkových molekul za vzniku nízkomolekulárních sloučenin nebo odpařováním olejovitých částic, zpravidla nasycených uhlovodíků. Z chemického hlediska se musí počítat s tím, že stárnutí v laboratoři a na obalovně je jiné s ohledem na vliv fileru a jemného kameniva, které mohou působit jako katalyzátory oxidační reakce [4, 138].

Dlouhodobé stárnutí

Pojem dlouhodobé stárnutí zahrnuje změny, které se odehrávají v průběhu životnosti vozovky, kdy se jedná o výrazně dlouhodobější proces při porovnání s krátkodobým stárnutím. Stárnutí je v tomto případě ovlivněno zejména polohou asfaltové směsi v konstrukci, tj. zda se jedná o směs v obrusné vrstvě nebo ve vrstvě ložní, popřípadě podkladní. Dlouhodobé stárnutí je dále ovlivněno především obsahem vzduchových mezer ve směsi a tloušťkou asfaltového filmu na povrchu kameniva. [113]

Čím vyšší je obsah vzduchových mezer v asfaltové směsi, tím jednodušeji proniká vzdušný kyslík do směsi, což jsou příznivější podmínky pro vznik termooxidační reakce. Snížení hodnoty penetrace jehlou bylo rovněž korelováno s obsahem vzduchových mezer. Například při pětiprocentním obsahu vzduchových mezer v asfaltové směsi bylo zjištěno, že penetrace po 5 letech provozu klesla z penetrace 100 (0,1 mm) (70 (0,1 mm) po výrobě) na výsledných 25 (0,1 mm), což je 25 %. Dalším faktorem je již zmíněná poloha vrstvy asfaltové směsi v konstrukci vozovky.

Bylo rovněž dokázáno, že oxidace pojiva se odehrává především do hloubky 4 μm . Čím nižší je tak průměrná tloušťka filmu pojiva na povrchu kameniva, tím rychleji pojivo ztrácí své vlastnosti. Dlouhodobé stárnutí je z výše zmíněných důvodů daleko složitější pro simulování v laboratorních podmínkách. Nejrozšířenější metodou pro zkoušky dlouhodobého stárnutí pojiv je metoda urychleného dlouhodobého stárnutí v tlakové nádobě (PAV), která je popsána v ČSN EN 14769 [39]. Zkouška by měla simulovat stárnutí asfaltového pojiva v době trvání 4 let až 8 let, avšak jak vyplývá z výše popsaných souvislostí, přibližná doba stárnutí nemůže být brána jako definitivní. Zejména dochází k podhodnocení efektu stárnutí pojiva nacházejícího se v horních 10 až 20 mm vrstvy asfaltové směsi [60].

Dále bylo zjištěno, že žádný z běžně používaných postupů laboratorního dlouhodobého stárnutí nesimuluje stárnutí, které nastalo u směsi s otevřenou strukturou (například asfaltové koberce drenážní). Stárnutí ve vozovce bylo totiž daleko rychlejší. Simulace stárnutí pojiv, prováděná konvenčním postupem, je pravděpodobně vhodná spíše pro méně mezerovité asfaltové směsi (přibližně 2,0 % až 4,0 %) [4].

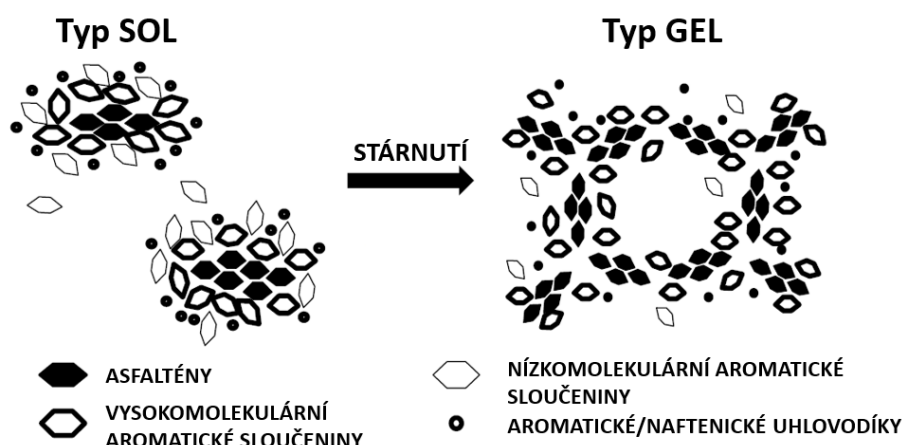
Oxidační stárnutí

Oxidační stárnutí patří mezi nejvýznamnější procesy, které ovlivňují chemické i fyzikálně-mechanické vlastnosti asfaltových pojiv. Jeho vliv způsobuje změny ve struktuře pojiva. Z pohledu složení pojiva lze říci, že pryskyřice se transformují do asfalténů a aromáty do pryskyřic a ty následně mohou pokračovat v transformaci do asfalténů. Obsah nasycených uhlovodíků zůstává prakticky neměnný, protože nasycené uhlovodíky vykazují nízkou reaktivitu, přičemž může dojít k jejich úbytku vlivem volatility. Všechny tyto změny ve výsledku vedou k mírnému zvýšení bodu skleného přechodu [96, 61].

Změna obsahu aromátů během stárnutí vykazuje lineární průběh. V literatuře je věnována nejdůležitější pozornost zvýšení obsahu asfalténů s ohledem na jejich vliv na viskozitu a další fyzikálně-mechanické vlastnosti. Ukázalo se, že je v podstatě lineární s rostoucí dobou stárnutí metodou stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu (RTFOT) při teplotě 163 °C [117]. Průměrné zvýšení obsahu asfalténů je 2,5 % až 5,5 % během

220 minut a 6 % až 7 % během 340 minut. Toto zvýšení bylo pozorováno i v reálných podmínkách například ve Francii, kde došlo ke zvýšení obsahu asfalténů o 2 % až 10 % v období 90 měsíců [96].

Konečným důsledkem procesu oxidativního stárnutí je tak zvyšující se polarita asfaltového pojiva. Jiným slovy vyšší obsah asfalténů a nižší obsah malténů. Protože polární složky asfaltového pojiva mají tendenci se shlukovat, dochází i k ovlivnění fyzikálních vlastností. Pojivo se stává více elastické za vysokých teplot a křehké za teplot nízkých. Během oxidativního stárnutí se mění struktura pojiva z typu sol na typ gel [64, 47]. Změna struktury je zobrazena na obrázku 3. Chování pojiva, které je charakterizováno jako typ sol, je přitom většinou považováno za Newtonovské, zatímco struktura pojiva typu gel způsobuje, že se chování pojiva změní na ne-Newtonovské. Ne-newtonovské chování je popisováno jako vysoce elastické a nelineární z pohledu vlastností pojiva. Zpravidla existuje konsensus říkající, že pojiva s příliš gelovou strukturou by neměla být používána pro aplikace do silničního stavitelství. Tato pojiva totiž mají omezenou schopnost relaxovat, což v konečném důsledku vede ke vzniku trhlin.



Obrázek 3: Změna struktury asfaltového pojiva během stárnutí [64]

4.5.2. Strukturální stárnutí

Jev fyzikálního stárnutí, potažmo změny vnitřního uspořádání molekul během zejména snižujících se teplot, je v literatuře spojován s teorií volného objemu, která byla původně aplikována na chování amorfních polymerů [127]. Bod skelného přechodu je pravděpodobně jedna z nejdůležitějších charakteristik, která ovlivňuje visko-elastické vlastnosti amorfních materiálů. Změna objemu asfaltového pojiva v závislosti na změně teploty je jednou z nejdůležitějších vlastností, indikujících vznik nízkoteplotních poruch [105, 62].

Na rozdíl od polymerů, kde se projevuje změna vlastností převážně pod bodem skelného přechodu, je situace u asfaltového pojiva poněkud složitější vlivem krystalizace vosků – vznik krystalických struktur [1]. Během ochlazování asfaltového pojiva z teplot vysoko nad teplotou skelného přechodu dochází k rovnoměrnému (postupnému) snížení schopnosti pohybu molekul spolu se snižujícím se volným objemem. U teplot blízkých se bodu skelného přechodu se snižuje schopnost pohybu molekul a změna volného objemu nerovnoměrně.

V literatuře je tato změna označována jako „free volume collapse“ a je považována za hlavní příčinu skokové změny visko-elastických vlastností. Například dochází k enormnímu nárůstu viskozity, čímž je asfaltové pojivo extrémně křehké a tuhé.

Ztráta volatilních komponent a oxidace způsobuje, že dochází k lineárnímu zvýšení bodu skelného přechodu [93]. Z tohoto pohledu je nutné poznamenat, že stárnutí způsobené změnou vnitřního molekulového uspořádání (strukturální stárnutí) může být odstraněno při opětovném zahřátí asfaltového pojiva, a tudíž reorganizací molekul. Oproti tomu je chemické stárnutí procesem trvalým.

4.5.3. Exsudační stárnutí

Nízkomolekulární složky pojiva exsudují (migrují) do pórů kameniva, což způsobuje, že asfaltový film, zůstávající na povrchu kameniva, se ztenčí. Tento proces stárnutí je přímo závislý na pórovitosti kameniva a tendenci složek k exsudaci, především v případě nižší molekulové hmotnosti – nasycené uhlovodíky [113].

4.6. Náchylnost ke stárnutí v současnosti vyráběných asfaltových pojiv

Každá rafinerie se nachází pod tlakem ekonomických ukazatelů, a proto mnohé z nich zavedly technologie, které umožňují co nejhlubší přepracování destilačních zbytků po frakcionaci ropy. Bilanční produktové schéma se tak posouvá více na stranu lehkých a středních frakcí, jako je například motorová nafta a střední topný olej (za vzniku i menšího množství LPG a benzínu). Impulzem pro zavedení těchto technologií je tedy ekonomický pohled rafinerií na výtěžnost frakcionace. Základem těchto postupů je především „visbreaker“ technologie (visbreaking), jejíž podstatou je termické (nekatalytické) štěpení velkých molekul těžkých destilačních zbytků během rychlého ohřevu v trubkových pecích s následným přeorganizováním uhlíkových štěpů. Průvodním jevem je pokles viskozity termicky konvertované výstupní suroviny, což se odráží v názvu technologie. [53]

Právě výstupní materiál visbreakingových reziduí se často přimíchává k asfaltovým produktům, protože svojí chemickou podstatou přibližně odpovídají tvrdým asfaltům. Pro stabilizaci visbreakingových reziduí v asfaltu a pro zlepšení jeho odolnosti vůči stárnutí je nutné, aby směsný materiál prošel procesem polofoukání. [53]

4.7. Laboratorní metody simulující stárnutí asfaltových pojiv

Aby bylo možné odhadnout termooxidační chování jednotlivých asfaltových pojiv na základě laboratorních zkoušek, jsou do laboratorní praxe zavedeny metody urychleného stárnutí. Mezi laboratorní metodou a skutečným degradačním procesem by měla být co nejtěsnější korelace, jež na základě urychlené, časově omezené zkoušky, umožňuje popsat výsledek skutečného stavu ve zvolených bodech životnosti materiálů.

Laboratorní simulaci stárnutí asfaltových pojiv je možné rozdělit na zrychlenou simulaci krátkodobého stárnutí a dlouhodobého stárnutí. Krátkodobé stárnutí modeluje stárnutí pojiva při obalování kameniva na obalovně asfaltových směsí a dlouhodobé stárnutí modeluje degradaci asfaltového pojiva zabudovaného ve ztuhlé asfaltové vrstvě. Mezi nejrozšířenější

postupy, učené pro hodnocení krátkodobého stárnutí asfaltových pojiv, je možné zařadit zkoušku tepelné stálosti v tenké pohybující se vrstvě (Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT), zkoušku tepelné stálosti tenkého filmu (Thin Film Oven Test – TFOT) a zkoušku krátkodobého stárnutí metodou RFT (Rotating Flask Test). Pro simulování dlouhodobého stárnutí se využívá zkouška urychleného dlouhodobého stárnutí v tlakové nádobě (Pressure Ageing Vessel – PAV) nebo urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (Rotating Cylinder Ageing Test – RCAT). Jednotlivé metody budou stručně představeny v tabulce 2 a v následujícím textu. [53, 97, 46]

Tabulka 2: Přehled nejběžněji používaných metod simulujících urychlené stárnutí asfaltových pojiv [126, 53, 84]

Číslo normy	Název normy	Označení metody
ČSN EN 12607-1	Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT	RTFOT
ČSN EN 12607-2	Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 2: Metoda TFOT	TFOT
ČSN EN 12607-3	Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 3: Metoda RFT	RFT
ČSN EN 15323	Asfalty a asfaltová pojiva – Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT)	RCAT
ČSN EN 14769	Asfalty a asfaltová pojiva – Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV)	PAV

4.7.1. Tepelná stálost v tenké pohybující se vrstvě (RTFOT)

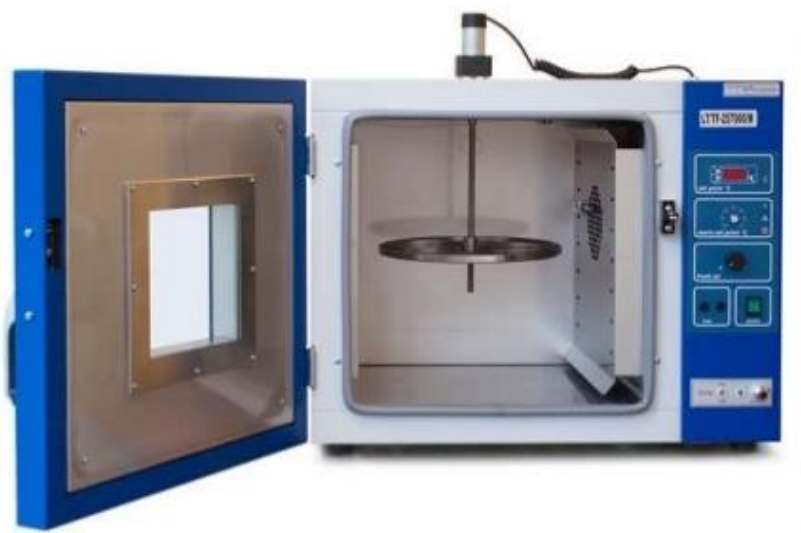
Zkouška tepelné stálosti v tenké pohybující se vrstvě je popsána v normě ČSN EN 12607-1 [14]. Stárnutí asfaltového pojiva je ovlivněno vzdušným kyslíkem pouze do malých tloušťek (přibližně 50 mikrometrů), proto se při zkoušce uplatňuje tenká pohybující se vrstva pojiva. Zkouška simuluje termooxidační stárnutí, kterému je pojivo vystaveno při obalování kameniva na obalovně asfaltových směsí. Při zkoušce se pro stárnutí pojiva používá sušárna s dvojitou stěnou a elektrickým ohřevem s teplotou 163 °C, která je patrná na obrázku 4. Pro umístění pojiva slouží osm válcových skleněných nádobek, do kterých se fouká ohřátý vzduch z trysky. Kombinovaný účinek tepla a vzduchu se stanoví změnou hmotnosti pojiva v nádobkách nebo změnou vlastností asfaltového pojiva, které jsou určovány před a po stárnutí. Pro popis změny vlastností se nejčastěji používají zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí nebo dynamické viskozity. Změny vlastností pojiva po stárnutí je rovněž možné vyjádřit reologickými vlastnostmi zjištěnými v dynamickém smykovém reometru. Tato zkouška je světově nejrozšířenější metodou hodnotící krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva. [53, 46]



Obrázek 4: Zařízení RTFOT (vlevo) [74] a skleněné nádoby (vpravo) [72]

4.7.2. Tepelná stálost tenkého filmu (TFOT)

Zkouška tepelné stálosti tenkého filmu se provádí podle normy ČSN EN 12607-2 [15]. Asfaltové pojivo se nalije na ploché misky tak, aby vytvořilo vrstvu o tloušťce 3,2 mm a vloží se do sušárny s nuceným prouděním vzduchu na poličky, které se otáčejí rychlostí 5,5 ot./min. (viz obrázek 5). Běžně se zkouška provádí po dobu pěti hodin při teplotě 120 °C popř. 163 °C. Zestárnutí pojiva se určí změnou hmotnosti pojiva nebo změnami jeho vlastností vzniklými v průběhu stárnutí. [53, 46]



Obrázek 5: Zařízení TFOT [79]

4.7.3. Krátkodobé stárnutí metodou rotující baňky (RFT)

Metoda stárnutí pojiva v rotující baňce popsána v normě ČSN EN 12607-3 [16] simuluje krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva při obalování kameniva na obalovně. Při zkoušce se asfaltové pojivo podrobí stárnutí v baňce rotačního vakuového destilačního zařízení (obrázek 6) při teplotě nejčastěji 165 °C po dobu 150 minut. Vliv tepla a vzduchu se určí

změnou hmotnosti nebo změnou charakteristik pojiva (např. penetrace, bod měknutí nebo dynamická viskozita před a po stárnutí). [53, 46]



Obrázek 6: Rotační vakuové destilační zařízení k provedení zkoušky krátkodobého stárnutí metodou RFT [68]

4.7.4. Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT)

Metoda popsaná v normě ČSN EN 15323 [42] simuluje dlouhodobé stárnutí asfaltového pojiva. Do horizontálně umístěného ocelového rotujícího válce s pojivem v laboratorní sušárně (obrázek 7) s teplotou 85 °C se vhání kyslík po dobu 140 hodin. Stárnutí pojiva se hodnotí změnou vlastností (např. penetrace nebo bod měknutí) před a po procesu simulovaného stárnutí. Po úpravě zkušebních podmínek lze metodu použít rovněž pro simulování krátkodobého stárnutí pojiva. [53, 46]



Obrázek 7: Zařízení pro urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (Rotating Cylinder Ageing Test – RCAT) [67]

4.7.5. Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV)

Zkouška urychleného dlouhodobého stárnutí podle ČSN EN 14769 [39] simuluje stárnutí, kterému je pojivo podrobena během své životnosti. Pojivo (zestárlé metodou RTFOT) v nepohyblivé se vrstvě tloušťky přibližně 3,2 mm se umístí v miskách (viz obrázek 8 vlevo) do tlakové nádoby PAV – Pressure Ageing Vessel (viz obrázek 8 vpravo) předehřáté na zkušební teplotu (běžně 85 °C, 90 °C, 100 °C nebo 110 °C) s pracovním tlakem vzduchu 2,1 MPa. Běžně používaná doba stárnutí je 20 hodin nebo 65 hodin. Na konci zkoušky se v komoře PAV sníží tlak na okolní hodnotu, čímž dojde k napěnění vzorků asfaltových pojiv v miskách vzduchem. Aby tento vzduch neovlivnil následné zkoušky, je nutné ho za zvýšené teploty odstranit ve vakuové komoře VDO (Vacuum Degassing Oven). Vliv urychleného dlouhodobého stárnutí se pak určí změnou vlastností asfaltového pojiva, které jsou stanoveny před a po stárnutí. [53, 46]



Obrázek 8: Zkušební miska s nalitým vzorkem asfaltu pro zkoušku v PAV (vlevo) [8] a zařízení PAV a VDO (vpravo) [73]

4.8. Další metody simulující stárnutí asfaltových pojiv

Kromě postupů simulace stárnutí uvedených v evropských normách existuje řada experimentálních postupů, vycházejících většinou z výzkumných projektů. Ve Velké Británii se používá varianta metody urychleného dlouhodobého stárnutí v tlakové nádobě, označovaná jako High Pressure Ageing Test (HiPAT/PAV₈₅), při které je teplota zkoušky snížena na 85 °C a expoziční doba je prodloužena ze standardních 20 hodin na 65 hodin. Zkouška SAFT (Stirred Air Flow test) byla vyvinuta kolem roku 2000 v Texasu (USA). Jedná se o zkoušku stárnutí s nuceným mícháním a saturací vzdušného kyslíku probubláváním, kterou je možné použít ke studiu polofoukání asfaltu.

Zkouška SAT (Simple aging test) je založena na procesu tenkovrstvého stárnutí, kde tloušťka filmu (300 μm) je podstatně snížena oproti rozšířenější metodě TFOT. Základní předpoklad je, že tloušťka filmu musí být velmi malá, aby se eliminoval její difuzní odpor pro kyslík, přičemž postup musí poskytovat dostatek vzorku pro následné postupy dlouhodobého stárnutí a zkoušky. Celý postup je tedy jednodušší, rychlejší a cenově efektivnější. Oproti postupu RTFOT se eliminuje čištění nádobek a použití rozpouštědla. Vlastnosti pojiva před a po stárnutí se vyhodnocují pouze dynamickým smykovým reometrem. [126]

Zkouška stárnutí označovaná jako 3xRTFOT není zatím běžně rozšířena. Postup pochází z rakouské oborové specifikace RVS 08.97.05 [130] a je s ním uvažováno jako o jedné z možných alternativ systému evropských norem v oblasti stárnutí asfaltových pojiv. Metoda leží svým expozičním degradačním zatížením mezi postupy RTFOT a PAV.

4.9. Metody simulující stárnutí asfaltového pojiva zabudovaného v asfaltové směsi

Vysoká mezerovitost, nekvalitní asfaltové pojivo nebo jeho nedostatečné množství v konkrétní asfaltové směsi (potažmo nedostatečná tloušťka asfaltového filmu) mohou vést k nadměrnému stárnutí a ztrátě elasticity pojiva (křehnutí). Ve svém důsledku mohou tyto parametry způsobovat předčasné poruchy asfaltové vrstvy vozovky. Čím je vyšší mezerovitost asfaltové směsi, tím snáze může do vrstvy pronikat vzdušný kyslík, což je jednou z příčin vyšší termooxidační zátěže (stárnutí) asfaltového pojiva. Rovněž v případě, že asfaltový film je na povrchu kameniva příliš tenký, může dojít k nadměrnému stárnutí této tenké vrstvy pojiva. Vyrůstá-li tloušťka asfaltového filmu, vyrůstá i exponenciálně difúzní odpor této vrstvy a pojivo nacházející se níže pod povrchem je méně ovlivněno stárnutím (degradací) a zachovává si původní vlastnosti. Stejný efekt vykazuje i snížení mezerovitosti asfaltové směsi. Na stárnutí asfaltového pojiva může mít vliv i druh a kvalita použitého kameniva. Termooxidační stárnutí je převládající typ procesu, který probíhá během životnosti asfaltového pojiva ve vozovce, zvláště pokud je pojivo vystaveno vyšším teplotám. Aby bylo možné hodnotit vliv těchto parametrů na rychlost a rozsah degradace asfaltového pojiva v reálné asfaltové směsi, je nutné v laboratoři modelovat stárnutí asfaltového pojiva zabudovaného přímo v asfaltové směsi (ne pouze na asfaltovém pojivu). [52, 84]

V České republice prozatím neexistuje platný technický předpis pro simulaci termooxidačního stárnutí asfaltových směsí (resp. asfaltového pojiva přímo zabudovaného v asfaltové směsi) v laboratoři. Výhodou simulovaného laboratorního stárnutí asfaltové směsi je možnost posoudit vliv druhu, kvality a obsahu pojiva v asfaltové směsi, tloušťky filmu pojiva na povrchu kameniva a eventuálně i použitých přísad na změnu vlastností asfaltového pojiva v asfaltové směsi. Takto jsou zohledněny pro dané asfaltové pojivo konkrétní podmínky použití, které se mohou od doposud používaných standardních testů akcelerovaného simulovaného stárnutí samotného pojiva odlišovat.

V těchto zkouškách jsou zahrnuty vlivy tloušťky asfaltového filmu, typu směsi, mezerovitosti a kvality použitých materiálů. Následné laboratorní zkoušky jsou prováděny přímo na zestárých směsích nebo na znovuzískaném zestárlém pojivu. Zároveň je například ve Spolkové republice Německo běžná kontrola zestárnutí pojiva po procesu výroby a pokládky, která se prokazuje vlastnostmi znovuzískaného pojiva z asfaltové směsi v rámci předávacích procedur. [52]

Existují různé postupy hodnotící stárnutí asfaltových směsí. Zásadní rozdíl je v tom, zda se simulaci stárnutí podrobuje vrstva nezthutněné asfaltové směsi nebo zda dochází k simulaci stárnutí zthutněných zkušebních těles daného tvaru. Zásadní je také postup, kterým se následně hodnotí stupeň zestárnutí asfaltového pojiva zabudovaného do asfaltové směsi. Buď

je možné asfaltové pojivo znovuzískat a provést zkoušky na pojivu jako takovém nebo je možné hodnotit zestárnutí pojiva nepřímo pomocí zkoušek asfaltové směsi respektive změn vlastností, které se získají před stárnutím a po stárnutí asfaltové směsi.

V následujícím textu jsou popsány nejčastěji používané postupy modelování stárnutí asfaltových směsí v laboratoři. Žádný z těchto postupů není doposud uveden v českých technických předpisech ani ve schválených harmonizovaných evropských normách.

4.9.1. Braunschweigska metoda stárnutí – Braunschweiger Alterung (BSA)

Při této metodě je nezhutněná asfaltová směs vystavena teplotě 80 °C po dobu 96 hodin. Nezhutněná asfaltová směs je umístěna v temperované zkušební komoře s nucenou cirkulací vzduchu. Následně jsou prováděny vybrané laboratorní zkoušky přímo na zkušebních vzorcích připravených z takto laboratorně zestárlé asfaltové směsi a výsledky jsou porovnávány s vlastnostmi nativní nezestárlé asfaltové směsi. Metoda má za cíl simulovat termooxidační stárnutí asfaltové směsi (vrstvy) jako v reálné vozovce. Postup byl teplotně optimalizován na podmínky, při kterých jsou omezeny štěpné reakce a destilační stárnutí, které vznikají při vyšších teplotách. Termooxidační zátěž leží mezi metodou RTFOT a PAV. [52, [47, 46]

4.9.2. Metody programu SHRP

V rámci amerického výzkumného programu, nazvaného Strategic Highway Research Program (SHRP), byly vyvinuty metodiky pro sledování stárnutí asfaltových pojiv přímo v asfaltových směsích, které jsou popsány ve zprávě SHRP-A-383 [3]. Postup SHRP#1025 simuluje krátkodobé stárnutí. Nezhutněná asfaltová směs je podrobena termooxidačnímu stárnutí v laboratorní sušárně s nuceným prouděním vzduchu po dobu 4 hodin při teplotě 135 °C. [52, [46]

Dlouhodobé stárnutí popisuje postup SHRP#1030. Pro směsi s nízkou mezerovitostí a plynulou čarou zrnitosti nebo pro směsi s vysoce viskózním pojivem se doporučuje jako dlouhodobé stárnutí použít uložení zhutněné asfaltové směsi (zkušební tělesa) do sušárny s teplotou 85 °C na pět dní a pro asfaltové směsi s vysokou mezerovitostí nebo asfaltové směsi s měkkým pojivem se doporučuje nízkotlaká oxidace zhutněných zkušebních těles v triaxiální komoře při teplotě 85 °C po dobu pěti dní. Následně je pojivo znovuzískáno a podrobeno funkčním zkouškám. [52, 46]

4.9.3. Metody technické komise RILEM

V rámci technické komise RILEM byl vyvinut postup stárnutí vrstvy asfaltové směsi, který má za úkol simulovat dvě fáze stárnutí (krátkodobé a dlouhodobé). Při krátkodobém stárnutí je nezhutněná vrstva asfaltové směsi umístěna na čtyři hodiny do laboratorní sušárny s nuceným prouděním vzduchu při teplotě 135 °C. Každou hodinu se asfaltová směs míchá po dobu jedné minuty. Při simulaci dlouhodobého stárnutí se nezhutněná vrstva krátkodobě zestárlé asfaltové směsi umístí na devět dní do sušárny s nuceným prouděním vzduchu

s teplotou 85 °C. Doporučuje se odebírat vzorky asfaltové směsi a směs zamíchat po 2, 5, 7 a 9 dnech stárnutí. Tento postup je prozatím ve fázi vývoje. [52, 84]

4.9.4. Návrh evropské normy prEN 12697-52

V současné době se tvoří první verze evropské normy s označením prEN 12697-52 [111], která by měla popisovat metody simulace stárnutí asfaltové směsi v laboratoři. Norma je ovšem prozatím ve stadiu návrhu a veřejného připomínkování. Vzhledem k tomu, že proces stárnutí asfaltových směsí při výrobě a během provozu zhutněných vrstev je komplexní problematika a doposud není uspokojivě vědecky popsána, nemohou být metody uvedené v této normě považovány za simulaci, popř. předpověď reálného stárnutí. Náplň normy by měl být chápana spíše jako nástroj pro porovnání různých asfaltových směsí ve fázi návrhu a optimalizace asfaltové směsi, pro analyzování vlivu přidání modifikačních přísad nebo pro porovnání různých postupů výroby asfaltových směsí z hlediska jejich vlivu na oxidativní stárnutí. [86, 54]

Norma popisuje dvě sady postupů urychleného termooxidačního stárnutí asfaltových směsí. První dva postupy (modelování krátkodobého stárnutí a modelování dlouhodobého stárnutí) mohou být aplikovány na nezhutněnou asfaltovou směs a zbývající dva postupy se použijí pro zestárnutí zhutněných laboratorních těles. Zkušební tělesa mohou být vyrobena v laboratoři nebo odebrána z hotové vrstvy.

Při stárnutí nezhutněné směsi se asfaltová směs rozprostře na plochou desku v tloušťce cca 25 mm a udržuje se při zvýšené teplotě v laboratorní sušárně s nuceným proudem vzduchu po danou dobu (nejčastěji 4 hodiny při teplotě 135 °C v souladu s předpisem SHRP-A-383 pro krátkodobé stárnutí nebo 336 hodin při teplotě 60 °C podle předpisu BRRC nebo 216 hodin při teplotě 85 °C podle předpisu RILEM nebo 96 hodin při teplotě 80 °C – Braunschweigská metoda pro dlouhodobé stárnutí). Kromě toho může být aplikován zvýšený tlak pro urychlení stárnutí – nejčastěji v přístroji PAV (20 hodin při teplotě 90 °C a tlaku 2,1 MPa).

V případě stárnutí zhutněných těles jsou popsány dva postupy stárnutí. První metoda popisuje uložení zkušebních těles s mezerovitostí nad 8 % na ploché desce do laboratorní sušárny se zvýšenou teplotou s nuceným proudem vzduchu po danou dobu (nejčastěji 120 hodin při teplotě 85 °C). Druhý postup stárnutí předepisuje uložení zhutněných zkušebních těles do triaxiální komory, přičemž skrz těleso nuceně proudí okysličovadlo (ozonem obohacený stlačený vzduch) po danou dobu při dané teplotě (nejčastěji 72 hodin až 168 hodin).

Zestárlá asfaltová směs nebo zestárlá zkušební tělesa jsou pak použita pro další laboratorní zkoušky, které umožní popsat vliv termooxidačního stárnutí na vlastnosti asfaltových směsí. Alternativou může být znovuzískání pojiva ze zestárlých směsí a zhodnocení stárnutí asfaltové směsi na změnu vlastností asfaltového pojiva. [52, 86, 54, 84]

5. FUNKČNÍ ZKOUŠENÍ ASFALTOVÝCH POJIV

Obecně lze zkoušení asfaltových pojiv rozdělit do dvou skupin [83, 144]:

- zkoušky konvenční, mezi které lze zařadit zejména stanovení penetrace jehlou, bodu měknutí metodou kroužek a kulička, dále pak stanovení bodu lámavosti, duktility a další méně často používané zkoušky jako jsou stanovení viskozity, rozpustnosti, bodu vzplanutí atd.
- zkoušky funkční. Jedná se o moderní metody, jejichž cílem je podrobit asfaltové pojivo zkoušení v podmínkách jejich užívání. Tyto metody byly převážně vyvinuty v rámci výzkumného projektu SHRP (Strategic Highway Research Project), který probíhal ve Spojených státech amerických v letech 1988 až 1993. Po úspěšném ověření těchto metod v USA došlo k jejich postupnému pronikání do Evropy a v současné době se začínají uplatňovat v evropských normách pro specifikace a zkoušení asfaltových pojiv. Jednotlivé metody zkoušení se vždy vztahují k určité užitné vlastnosti pojiva, mezi které patří především:
 - chování při nízkých teplotách,
 - únavové vlastnosti,
 - přetvárné vlastnosti a
 - zpracovatelnost pojiva.

Běžné konvenční zkoušky, které se provádějí v každodenní praxi v silničních laboratořích, nejsou schopny podat o asfaltovém pojivu všechny potřebné informace. Zkoušky penetrace jehlou či bodu měknutí sice umožňují pojivo zatřídit do určité třídy, ale neobjasní například náchylnost k tvorbě trvalých deformací vlivem dopravy. Zkouška bodu lámavosti podle Fraasse je zase silně ovlivněna postupem přípravy vzorku a dosahuje značného rozptylu výsledků. V neposlední řadě je nutné uvést u klasických empirických zkoušek nedostatky v popisu závislosti (korelace) mezi sledovanými vlastnostmi asfaltového pojiva a vlastnostmi asfaltových směsí a vrstev. Proto vyvstala nutnost pokusit se popsat vlastnosti asfaltových pojiv, které se nejčastěji projevují v podobě nežádoucích poruch na vozovce. Zájem byl tedy zaměřen na reologické vlastnosti asfaltových pojiv. [137]

5.1. Reologie asfaltových pojiv

V současné době se vlastnosti silničních asphaltů v českém silničním stavitelství hodnotí nejčastěji zkouškou penetrace jehlou podle ČSN EN 1426 [37], bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427 [38] a bodu lámavosti dle Fraasse podle ČSN EN 12593 [12], což se jeví jako nedostatečné pro popis vlastností asfaltových pojiv a jejich změn. [46]

Reologie asfaltových pojiv je v poslední době progresivně rozvíjející se věda, která se zabývá studiem deformace hmoty, čili reakce látek na působení vnějších sil (deformovatelnost a tokové vlastnosti). Slovo „reologie“ vzniklo z řeckého slova „rheos“, což v překladu znamená řeka, tok nebo proudění. Reologie je tedy doslova věda zabývající se tokem. Řeší se problematika přetváření hmoty, která je částečně pružná a částečně přetvárná a hledají se vztahy mezi napětím, deformací a rychlostí deformace. Reologie tedy slouží k popisu

konzistence látky pomocí dvou složek – viskozity a elasticity. Viskozita je základní veličinou v reologii, která charakterizuje tokové chování a určuje míru vnitřního odporu látky vůči vnějšímu zatížení, jinak řečeno odpor proti toku. Viskozitu je možné rozlišit na dynamickou a kinematickou, které jsou vzájemně závislé. [45, 102]

Dynamická viskozita je fyzikální veličinou, která vyjadřuje míru odporu k toku kapaliny. Kvantitativně ji lze popsat poměrem mezi tečným napětím a smykovou rychlostí (rychlostním gradientem) mezi dvěma teoretickými sousedními vrstvami. Viskozita kapaliny namáhané smykem mezi dvěma rovnoběžnými destičkami, které se vzájemně pohybují rovnoměrným přímočarým pohybem, je možné popsat Newtonovou rovnicí. Kinematická viskozita je definována jako podíl dynamické viskozity a hustoty hodnocené látky. [45]

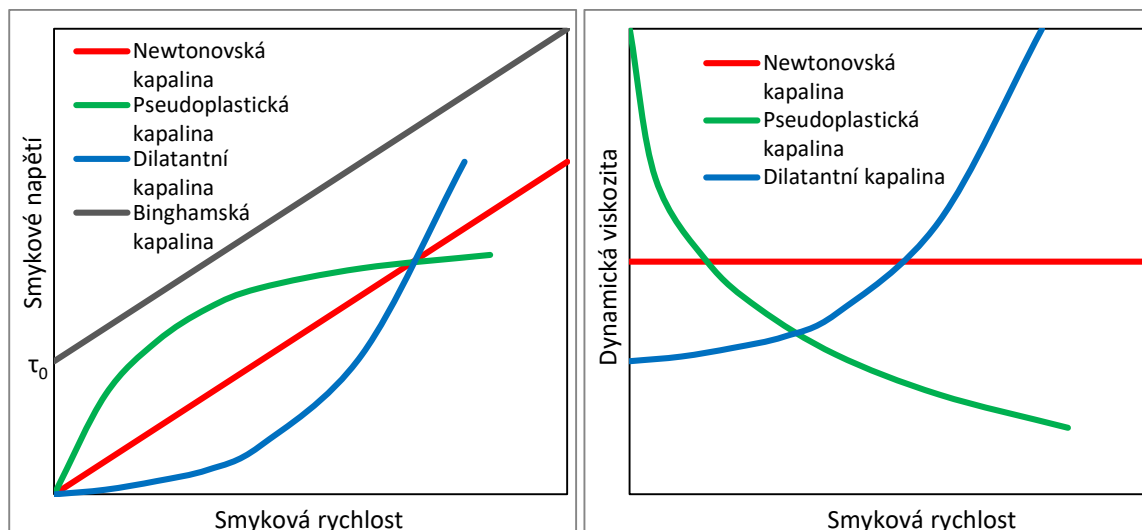
Snahou reologie je najít reologický model, který by kvalitně vystihoval chování různých látek. Například Hookův zákon předpokládá přímou úměrnost mezi napětím a deformací. Tento model dobře vystihuje chování řady kovových materiálů při nepříliš velkých napětích a je základem klasické teorie pružnosti. Pro nejjednodušší viskózní kapaliny – Newtonské kapaliny se předpokládá platnost Newtonova viskózního zákona, tj. zákona o přímé úměrnosti mezi napětím a rychlostí deformace. Dynamická viskozita je tedy konstantou, která není závislá na velikosti tečného napětí ani na smykové rychlosti. [102]

Dále existují ne-Newtonské kapaliny, pro něž je vztah mezi napětím a rychlostí deformace složitější. Poměr smykového napětí a smykové rychlosti není u těchto látek konstantní, ale závisí na hodnotě smykové rychlosti a označuje se jako zdánlivá viskozita nebo ne-Newtonská viskozita. Proto je nutné uvádět spolu s hodnotou viskozity i metodu měření a hodnotu smykové rychlosti. Mezi tyto látky se za určitých okolností řadí i asfaltová pojiva. [45]

Ne-newtonské kapaliny je možné rozdělit na [45]:

- Pseudoplastické kapaliny (smykem řidnoucí kapalina – shear thinning) – jejich zdánlivá viskozita se s rostoucí smykovou rychlostí snižuje a lze je rozdělit na pseudoplastické kapaliny a strukturně viskózní kapaliny (lze u nich stanovit dvě limitní hodnoty zdánlivé viskozity).
- Dilatantní kapaliny – jejich zdánlivá viskozita roste s rostoucí smykovou rychlostí, toto chování je možné pozorovat velice zřídka.
- Binghamské kapaliny mají plastickou složku deformace a dochází u nich k toku až po překročení prahového smykového napětí (mez toku).

Tokové křivky popsaných kapalin jsou uvedeny v obrázku 9.

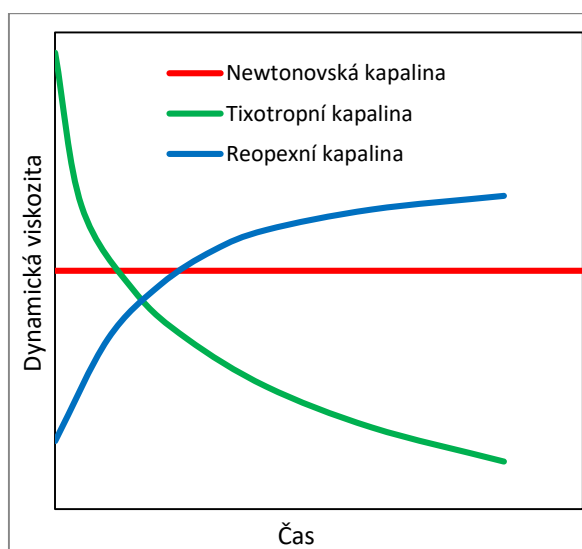


Obrázek 9: Srovnání tokové křivky Newtonské kapaliny, pseudoplastické kapaliny, dilatantní kapaliny a Binghamské kapaliny [45]

Kapaliny s časově závislou složkou přetváření mění svou zdánlivou viskozitu s dobou působení napětí. Jejich chování je hysterezní (výstupní veličina nezávisí jen na nezávisle proměnné vstupní veličině, ale i na předchozím stavu systému) – průběh viskozity se při zvyšování napětí liší od průběhu při jeho snižování. Rozlišují se dva základní typy látek s časově závislou složkou deformace:

- Tixotropní látky – jejich zdánlivá viskozita klesá s prodlužující se dobou působení napětí (narušení struktury řetězců molekul).
- Reopexní látky – jejich zdánlivá viskozita během smykového napětí s časem roste, toto chování je možné pozorovat zřídka (vyšší stupeň uspořádání řetězců molekul).

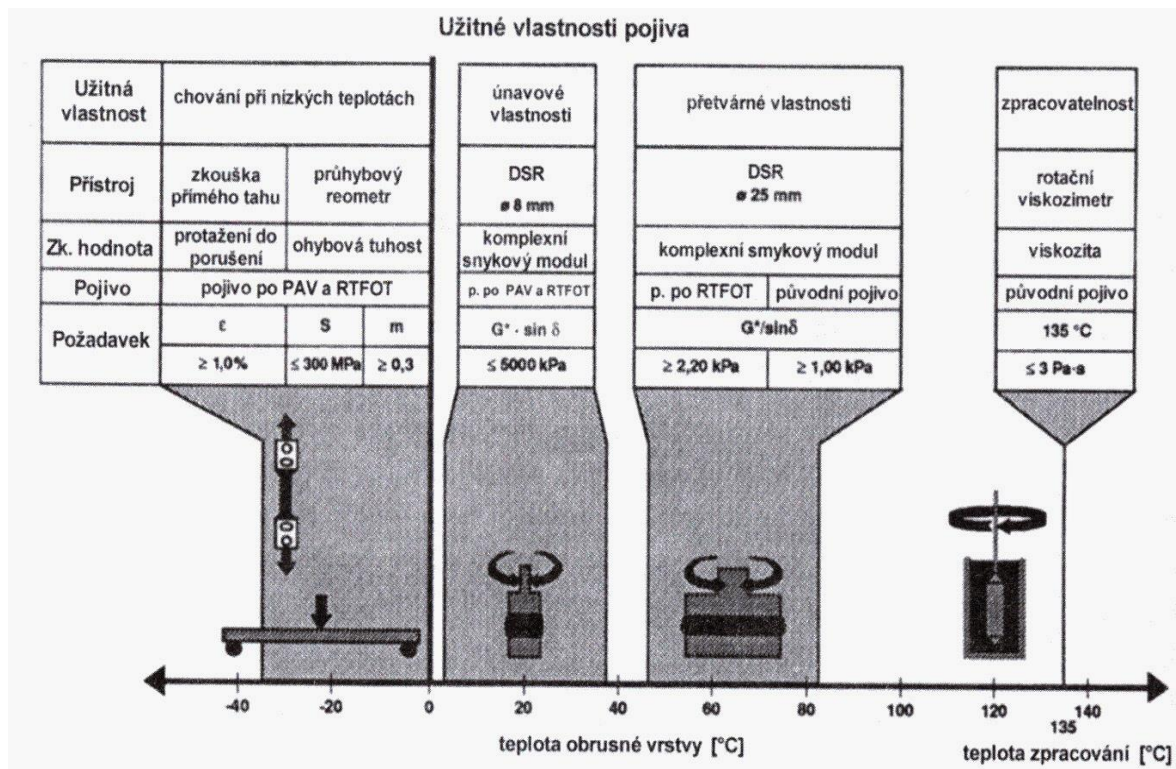
Uvedené jevy mohou nastat přeuspořádáním struktury molekul látky nebo například vlivem chemické reakce. Časová závislost uvedených látek je schematicky uvedena v obrázku 10.



Obrázek 10: Závislost dynamické viskozity na čase Newtonské, tixotropní a reopexní kapaliny [45]

5.2. Stanovování reologických vlastností asfaltových pojiv

Reologické (funkční) zkoušky asfaltových pojiv se vždy vztahují k určité užitné vlastnosti asfaltového pojiva. Tyto vlastnosti jsou dle potřeby stanovovány na původním (nově vyrobeném, nezestárlém) pojivu nebo na pojivu uměle zestárlém. Systém funkčních zkoušek asfaltových pojiv s definováním užitných vlastností, pocházející z programu SHRP, je uveden na obrázku 11.



Obrázek 11: Systém funkčních zkoušek asfaltových pojiv s definováním užitných vlastností [137]

Reologické vlastnosti látek lze měřit několika způsoby v závislosti na okrajových podmínkách měření. V případě rozdělení podle způsobu namáhání vzorku lze zkoušky rozdělit na [91]:

- rotační,
- oscilační,
- krípkové a
- relaxační.

5.2.1. Rotační zkoušky

Rotační zkoušky se používají nejčastěji k měření viskozity asfaltového pojiva, čili hodnocení jeho zpracovatelnosti při vysokých teplotách. Dynamická viskozita asfaltových pojiv se nejčastěji určuje geometrií válec – válec vřetenovými viskozimetry (např. typu Brookfield, obrázek 12), protože toto zařízení je finančně dostupnější než rotační reometr. Druhou nejčastěji používanou možností je zjišťování dynamické viskozity pomocí geometrie kužel – deska v dynamickém smykovém reometru. Značnou výhodou tohoto typu geometrie je, že

rychlost smykového přetvoření i smykové napětí jsou nezávislé na pozici mezi kuželem a deskou. [46]



Obrázek 12: Brookfieldův viskozimetr s jednotkou thermosel [77]

5.2.2. Oscilační zkoušky

Pro dynamicko-mechanickou analýzu reologických vlastností visko-elastických materiálů, jako například asfaltových pojiv, se běžně používají oscilační zkoušky, které umožňují hodnotit viskózní a elastickou povahu materiálu při široké škále teplot a frekvencí zatěžování.

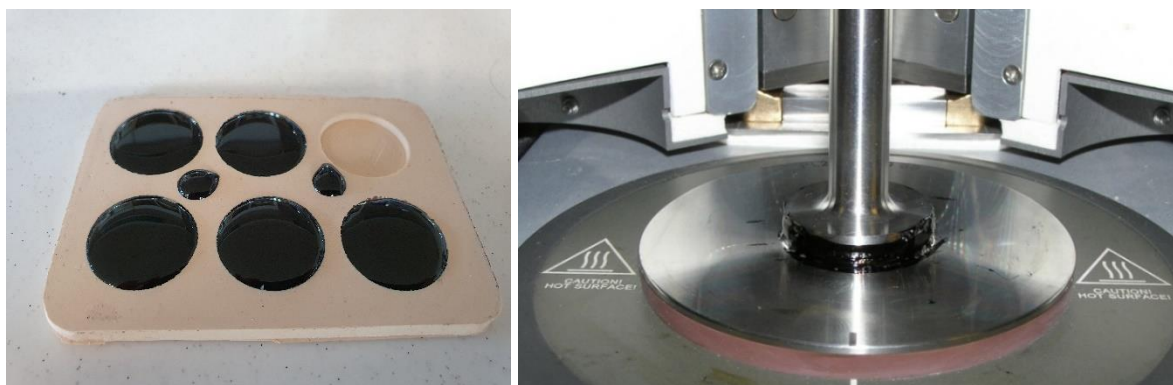
Protože chování asfaltového pojiva závisí zejména na teplotě a rychlosti zatížení, vhodná zkouška pro asfaltové pojivo by měla zahrnovat oba tyto faktory. Popsané vlastnosti je možné stanovit reologickými postupy v přístrojích nazývaných reometr (v silničním stavitelství označovaný jako dynamický smykový reometr, DSR) případně viskozimetr. Příklad dynamického smykového reometru je zachycen na obrázku 13. Reometry jsou adaptabilní pro použití s asfaltovými pojivy, takže je možné hodnotit vlivy času i teploty. Dynamický smykový reometr měří dynamicko-mechanické reologické vlastnosti asfaltových pojiv při oscilaci (komplexní smykový modul a fázový úhel) nejčastěji při běžných až vysokých teplotách, případně rotačními zkouškami (dynamická viskozita) při vysokých teplotách nebo kríčovými testy. [46]



Obrázek 13: Rotační reometr Kinexus

DSR se nejčastěji používá pro charakterizování chování asfaltových pojiv při oscilaci měřením komplexního smykového modulu ($|G^*|$) a fázového úhlu (δ) pojiva. Komplexní smykový modul $|G^*|$ popisuje celkový odpor asfaltového pojiva proti deformaci při vystavení opakovaným pulzům smykového napětí. Je složen ze dvou složek: elastické (vratné) G' označované jako reálná část komplexního smykového modulu a viskózní (nevratné) G'' označované jako ztrátový modul. Fázový úhel δ je indikátorem relativní velikosti vratné a nevratné deformace. Veličiny G^* a δ pro asfaltové pojivo jsou vysoce závislé na teplotě a frekvenci zatěžování. Při vysokých teplotách se pojiva chovají jako viskózní kapaliny bez schopnosti navrácení do původního tvaru. V tomto případě převládá viskózní složka, přičemž $\delta = 90^\circ$. Při velice nízkých teplotách se asfalty chovají jako elastické materiály, které se navracejí z deformace zcela. Tato vlastnost je reprezentována elastickou složkou, přičemž $\delta = 0^\circ$. [46, 102]

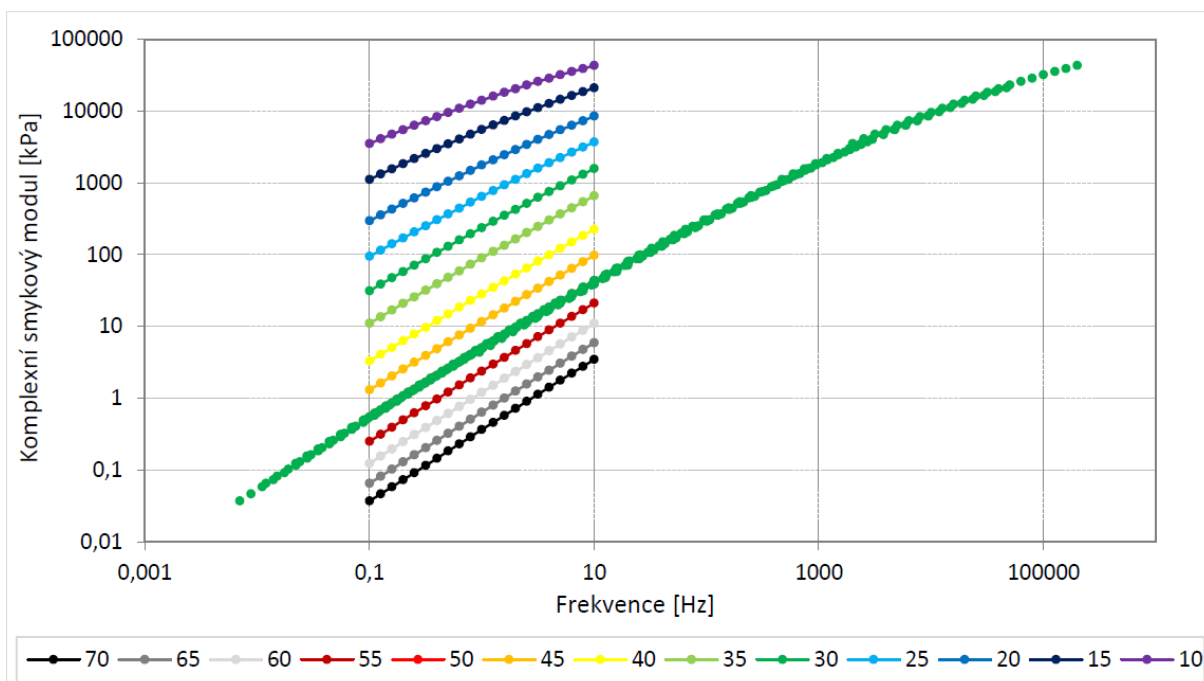
Při oscilační zkoušce v DSR se amplituda napětí měří na základě stanovení točivého momentu přenášeného vzorkem pojiva v reakci na aplikované napětí. Dynamický smykový reometr měří točivý moment a úhlové pootočení a z těchto hodnot dopočítává smykové napětí a přetvoření. Výhodou je, že se zkoušky provádí na poměrně malých zkušebních vzorcích tvaru válce s průměrem 25 mm nebo 8 mm a tloušťkou nejčastěji 1 mm nebo 2 mm. Vzorky připravené pro vložení do reometru a měřicí geometrie průměru 25 mm s vloženým vzorkem asfaltu jsou zaznamenány v obrázku 14. [46]



Obrázek 14: Vzorky asfaltového pojiva připravené pro vložení do DSR (vlevo) a vzorek umístěný mezi destičkami reometru (vpravo) [45]

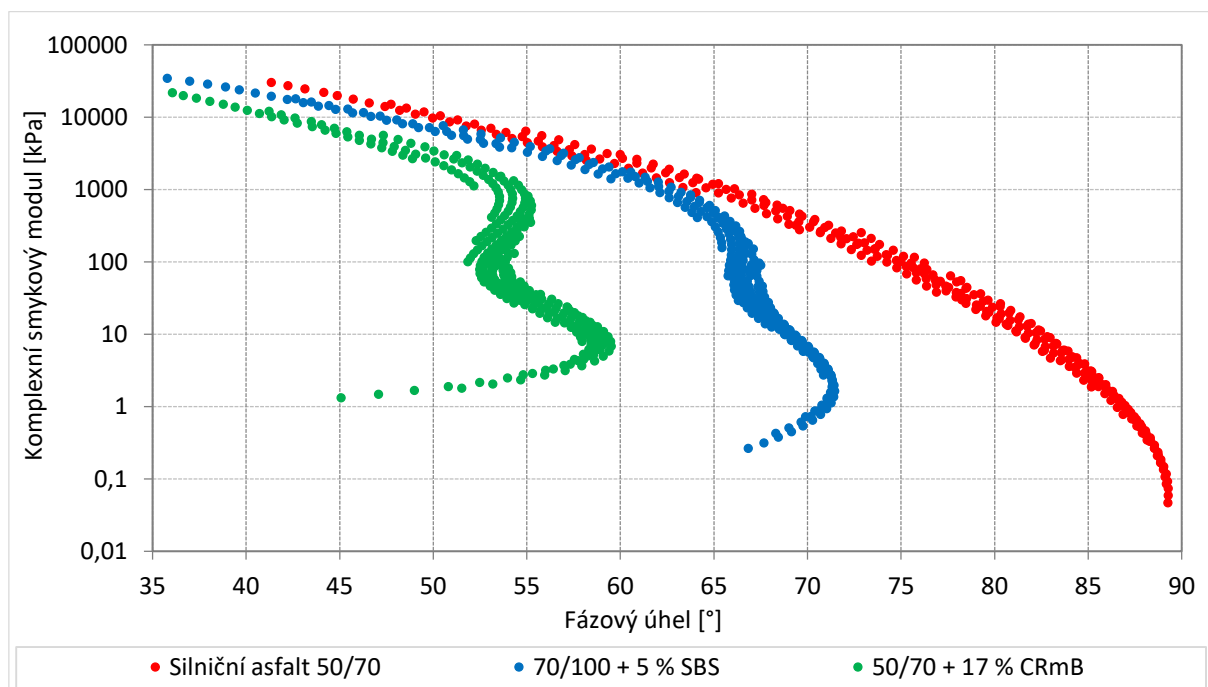
Výsledky dynamických smykových testů se nejčastěji reprezentují graficky. Je možné použít isochrony, což jsou křivky, vyjadřující chování látky při konstantní frekvenci nebo isotermy, což jsou křivky vyjadřující chování látky při konstantní teplotě. Protože frekvenční rozsah je u všech dynamických smykových reometrů omezen, je nemožné popsat široké rozpětí reologických vlastností materiálu isotermou. Proto se využívají hlavní (kmenové, komplexní) křivky (master curves), které zajistí prodloužení měřených charakteristik do širšího frekvenčního rozsahu pomocí principu superpozice teploty a času zatížení. Princip superpozice spočívá ve vzájemné závislosti mezi teplotou a frekvencí, kdy je možné získat informace o zkoušeném materiálu mimo zkoušený rozsah, což může být výhodné jednak z časové náročnosti nebo z omezeného rozsahu měřicího zařízení.

V odborné literatuře se lze nejčastěji setkat s případem, kdy je stanovena referenční teplota a pomocí frekvenčního posunu je možné určit chování v širokém rozsahu frekvencí. Posunem vznikne hlavní křivka tím způsobem, že je provedena série měření vždy při určité teplotě s měnící se frekvencí. Následně se vybere referenční křivka při určité teplotě a ostatní křivky jsou pomocí horizontálního posunu posunuty tak, že vznikne jedna hladká křivka. Princip horizontálního fázového posunu lze popsat pomocí matematických vztahů, kdy nejběžněji se používá tzv. Williams–Landel–Ferry model (WLF model). Příklad superpozice pro silniční asfalt 50/70 s referenční teplotou 50 °C je patrný z obrázku 15. Je zřejmé, že měření proběhlo v rámci frekvenčního rozsahu 0,1 Hz až 10 Hz a pomocí principu superpozice je modelováno chování ve frekvenčním rozsahu přibližně od 0,005 Hz do 100 000 Hz. [46, 8]



Obrázek 15: Příklad sestrojení hlavní křivky komplexního smykového modulu [8]

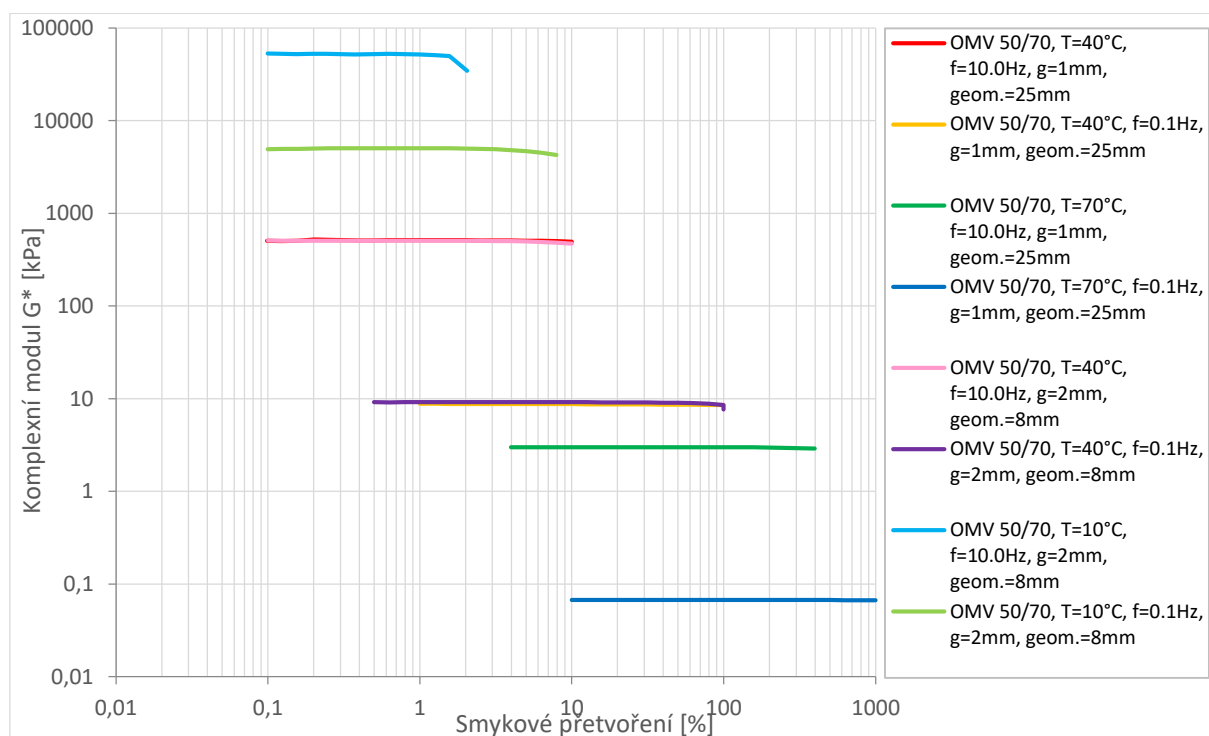
Další možností grafického vyjádření reologických dat je Blackův diagram, což je závislost mezi komplexním smykovým modulem a úhlem fázového posunu (viz obrázek 16) nebo diagram Cole-Cole, což je vyjádření vztahu mezi reálnou částí komplexního smykového modulu a viskózní složkou komplexního smykového modulu. [46]



Obrázek 16: Příklad průběhu Blackova diagramu pro různá asfaltová pojiva [51]

Při oscilačních měřeních komplexních smykových modulů $|G^*|$ je nutné zajistit, aby měření probíhalo v lineárně visko-elastické oblasti zkoušeného materiálu při daných okrajových podmínkách. V této oblasti je hodnota $|G^*|$ nezávislá na velikosti smykového

přetvoření. Při zjišťování lineárně visko-elastické oblasti zůstává konstantní teplota a frekvence zatěžování, přičemž se zvyšuje výchylka (smykové přetvoření) při oscilaci. Protože je komplexní modul a fázový úhel do určité hodnoty smykového přetvoření nezávislý na smykovém přetvoření, zůstává hodnota těchto veličin konstantní, než začne docházet k porušování vnitřní struktury materiálu. Smluvní hodnotou ukončení lineárně visko-elastické oblasti je pokles komplexního smykového modulu o 5 % ze své původní hodnoty. Tím je možné určit maximální možná smyková přetvoření na zkušební vzorky pro další zkoušky. Příklad určení lineárně visko-elastické oblasti pro silniční asfalt třídy 50/70 je uveden v obrázku 17. [46]



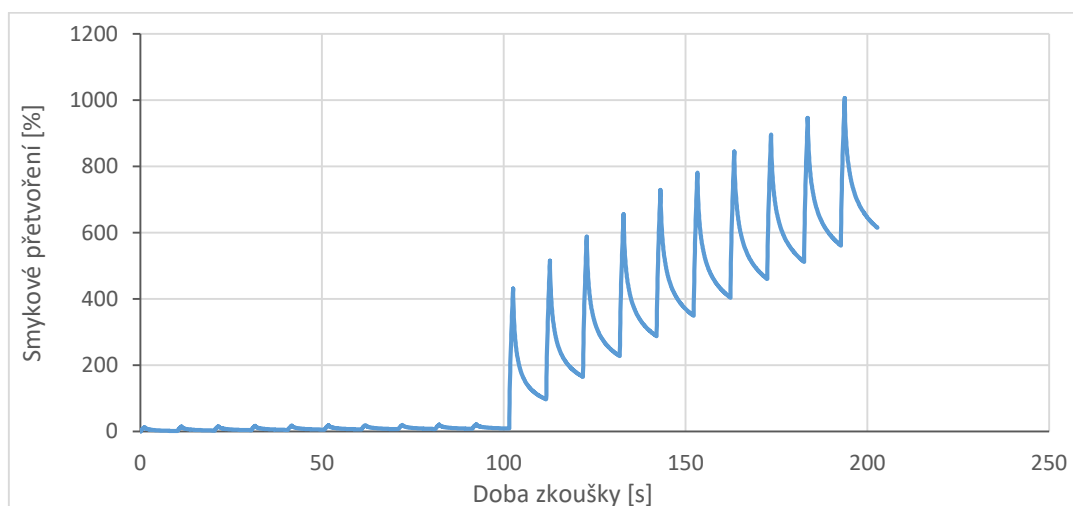
Obrázek 17: Určení lineárně visko-elastické oblasti vybraného pojiva [46]

5.2.3. Křipové zkoušky

Křipové zkoušky sledují chování materiálu po odtížení, na rozdíl od oscilačních zkoušek se však pojivo nachází mimo lineárně visko-elastickou oblast měření. Během těchto zkoušek tak často dochází k poškozování vzorku. Tyto zkoušky se používají například pro simulaci vzniku trvalých deformací, přičemž nejčastěji se používá zkouška MSCR dle ČSN EN 16659 [43, 91].

U zkušební sekvence MSCR se předpokládá, že postihne vlastnosti pojiva i v nelineární oblasti zátěžové odezvy a umožňuje identifikovat pojiva, která jsou nadměrně citlivá na zatížení právě v této oblasti. Zkouška MSCR se skládá ze dvou sekvencí, z nichž každá obsahuje 10 cyklů jednosekundového smykového zatížení a následného devítisekundového odlehčení nejprve při smykovém napětí 100 Pa a potom bez přerušování při smykovém napětí 3200 Pa. Typický grafický záznam průběhu smykového přetvoření MSCR testu je znázorněn v obrázku 18.

Mezi Evropou a USA existují rozdíly týkající se teplot, za kterých se měření standardně provádí. V Evropě jsou MSCR zkoušky prováděny většinou v referenčních teplotách, při kterých je v dané zemi specifikována zkouška pojíždění kolem, nejčastěji při teplotě 50 °C, 55 °C nebo 60 °C. V USA se teplota zkoušky volí na základě výkonnostních tříd pojiva (Performance Grade – PG) a dopravního zatížení.



Obrázek 18: Grafický záznam průběhu smykového přetvoření při zkoušce MSCR [46]

5.2.4. Relaxační zkoušky

Relaxační zkoušky jsou vhodné pro popis vlastností asfaltových pojiv za nízkých teplot. Během této zkoušky je pojivo zatíženo během krátké doby, po které je zatížení opět odejmuto (typicky v řádech sekund) a následně se sleduje pokles napětí. Existuje předpoklad, že pokud asfaltové pojivo vykazuje rychlou relaxaci vneseného napětí, bude snížena tendence hotové asfaltové vrstvy ke vzniku a šíření trhlin. [91]

Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv jsou důležitým parametrem při predikci vzniku mrazových trhlin ve vozovkách pozemních komunikací. Náchylnost asfaltové směsi vůči vzniku mrazových trhlin roste se stárnutím asfaltových pojiv, jelikož ty se stávají tvrdší a jsou tudíž křehčí. Z těchto důvodů je vhodné hodnotit nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv po simulaci stárnutí asfaltového pojiva. [51]

Pro hodnocení nízkoteplotních vlastností se nejčastěji používá empirická zkouška bodu lámavosti podle Fraasse. Tato zkouška se ovšem průběžně dostává do ústraní a je nahrazována zkouškou modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru, která dokáže věrohodněji popsat nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv. Průhybový trámečkový reometr (BBR – z anglického Bending Beam Rheometer) byl vyvinut v polovině 90. let 20. století a slouží k popsání nízkoteplotních vlastností asfaltových pojiv. Měřicí systém BBR se skládá z dvojdílného zatěžovacího rámu, kde horní část je pohyblivá a je v ní umístěn zatěžovací kužel a čidla pro měření průhybu a působící síly. Dolní část je statická, obsahuje podpěry vzorku a nachází se ve zkušební lázni. Podpěry jsou polokulaté o průměru 25 mm s osovou vzdáleností ($102 \pm 0,5$) mm. Zařízení BBR je zachyceno na obrázku 19. [51]

Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru se provádí podle ČSN EN 14771 [41]. Zkouška probíhá na asfaltových zkušebních trámečcích předepsaných rozměrů (12,5 mm x 6,25 mm x 125 mm) při konstantní nastavitelné teplotě po dobu 240 sekund, kdy je tělísko namáháno středovou silou o velikosti $P = (980 \pm 50)$ mN, což odpovídá 100 g. Cílem zkoušky je nalézt takovou teplotu, při které se modul tuhosti za ohybu $S_{(60)}$ blíží hodnotě 300 MPa a $m_{(60)}$ se blíží hodnotě 0,3. Jako výsledná teplota se uvádí nepříznivější z těchto hodnot. Dle poznatků výzkumu SHRP se předpokládá, že při teplotě o 10 °C nižší hrozí na vozovce vznik mrazových trhlin. [51]



Obrázek 19: Příklad průhybového trámečkového reometru od firmy Cannon [8]

Další nízkoteplotní relaxační zkouškou, která se ovšem v Evropě příliš neuplatňuje, je pevnost v přímém tahu (Direct Tension Test – DTT). Při této zkoušce se určuje teplota meze tahové pevnosti, tj. maximální pevnost, při jejímž překročení již dochází k porušení asfaltového pojiva při nízkých teplotách. Dále se měří protažení, které je mírou tažnosti (duktilita) nebo křehkosti pojiva při nízkých teplotách. Zkouška má značnou vypovídací hodnotu především pro modifikovaná pojiva. [83]

5.3. Využití funkčních zkoušek pojiv v Evropě a v ČR

V současné době se reviduje evropská norma EN 14023 [59]. Nový návrh normy prEN 14023 [58] z dubna 2020 již kromě využití empirických zkoušek předpokládá využití funkčního zkoušení asfaltových pojiv. Základní myšlenkou zavedení funkčního zkoušení asfaltových pojiv v druhé generaci evropské normy je snaha důkladněji porozumět chování asfaltového pojiva v různých fázích jeho životnosti. Postup funkčního zkoušení asfaltových pojiv, uvedený v [58], je značně odlišný od klasifikace pojiv výkonnostními třídami (Performance Grade – PG), která byla vyvinuta v rámci výzkumného programu SHRP (Strategic Highway Research Program) ve Spojených státech amerických. Koncept výkonnostních tříd je v podstatě založen na tom, že každé pojivo musí splňovat stejné výkonnostní (užitné)

požadavky, přičemž se mění teplota během zkoušky, která se volí na základě maximálních a minimálních teplot v dané lokalitě. [55]

Metodika funkčního hodnocení vlastností pojiv, popsaná v [58], se inspirovala klasifikací pojiv, vycházející z programu SHRP. Klíčovým přístrojem je rovněž dynamický smykový reometr (DSR), kterým se určuje odolnost vůči deformaci zkouškou MSCR [43] a pět charakteristických teplot (T_0 až T_4), odpovídajících předepsaným hodnotám komplexního modulu ve smyku při různých úrovních zestárnutí pojiva. Dále tento předpis předpokládá pro hodnocení nízkoteplotního chování asfaltových pojiv využití průhybového trámečkového reometru (BBR). [120, 55]

Z výsledků výzkumu [55] je patrné, že koncept charakteristických teplot T_0 až T_4 je poměrně inovativní problematikou, pomocí které mohou být některé vlastnosti pojiv interpretovány zcela odlišně, než bylo doposud v okruhu odborné veřejnosti zvykem. Proto je nutné získávat s tímto konceptem hodnocení vlastností pojiv co nejvíce zkušeností, a to zejména v době, než vyjde druhá generace normy [59]. Návrh této normy zatím nepředpokládá uvedení požadavků na charakteristické teploty T_0 až T_4 pro jednotlivé třídy polymerem modifikovaných asfaltů, ale hodnoty se budou prozatím pouze deklarovat a budou považovány za doplňující charakteristiky. Pokud bude v [58] hodnocení charakteristických teplot T_0 až T_4 nově vyžadováno, je nutné vydat předpis, který bude přesně specifikovat postup jejich stanovování a okrajové podmínky zkoušení.

6. FUNKČNÍ ZKOUŠENÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

Metody návrhu asfaltových směsí lze rozdělit do šesti základních skupin [139]:

- složení receptury,
- empirický způsob návrhu,
- analytický způsob návrhu,
- volumetrický způsob návrhu,
- způsob návrhu vztažený k funkčnímu chování,
- způsob návrhu založený na funkčním chování.

Empirický způsob návrhu asfaltové směsi je většinou založen na stanovování fyzikálně-mechanických veličin podle Marshalla, který tento postup odvodil koncem 30. let 20. století. Zkoušení Marshallových těles neodpovídá způsobu zatěžování asfaltových směsí v reálné vozovce a vyhodnocované veličiny jako je stabilita, přetvoření, popř. tuhost, lze jen velmi hrubým a ne zcela přesným zjednodušením použít pro hodnocení odolnosti asfaltových směsí proti tvorbě trvalých deformací. [87]

Naproti tomu asfaltová směs navržená jakoukoli výše uvedenou návrhovou metodou je v rámci metody návrhu směsí založené na funkčním chování vystavena funkčním zkouškám s použitím algoritmu pro předpověď vývoje chování směsi v čase tak, aby bylo možné na základě tohoto odhadu směs předem schválit k použití nebo ji zamítnout. Vycházejí z informací o projektu (skladba vozovky, dopravní zatížení a klimatické podmínky), materiálových vlastností, odezvy vozovky a vývoje poruch pod účinkem dopravního zatížení se provádí předpověď chování vozovky s odhadem vývoje různých druhů poruch během doby životnosti konstrukce vozovky. Transformace výsledků laboratorních zkoušek do odhadu vývoje v reálné vozovce se získá pomocí shift-faktorů, které jsou nakalibrovány dle předchozích pozorování vývoje poruch. [139]

Funkční zkoušky asfaltových směsí jsou spojeny s výskytem základních druhů poruch na netuhých vozovkách. Prováděné zkoušky mají za cíl simulovat co možná nejvěrněji podmínky v reálné vozovce a odhadnout pokud možno co nejpresněji výskyt těchto poruch při daném dopravním zatížení a místních klimatických podmínkách. Variací skladby vstupních materiálů pak lze chování a výskyt poruch v konstrukci vozovky ovlivňovat. U netuhých vozovek s asfaltovým krytem se analýza poškozování všeobecně zaměřuje nejčastěji na tři základní typy poruch [139]:

- únava a s ní spojené únavové trhliny,
- trvalé deformace ve formě vyjetých kolejí,
- mrazové trhliny.

Stejně jako v případě funkčního zkoušení asfaltových poživ je při využití funkčních zkoušek asfaltových směsí snahou podrobit tyto asfaltové směsi zkoušení v podmínkách jejich reálného užívání. Proto by tyto zkoušky měly simulovat skutečné namáhání asfaltových směsí v průběhu jejich životnosti. Funkční zkoušky tedy simulují proces výroby, dopravy, pokládky a hutnění asfaltové směsi a dále chování směsi v různých podmínkách zatížení a prostředí. Funkční zkoušky jsou většinou složitější a náročnější na laboratorní vybavení než empirické

zkoušky. Pomocí těchto zkoušek se v laboratorních podmínkách zkoušejí většinou směsi, které jsou určeny pro vysoké dopravní zatížení nebo specifické podmínky. [144]

V první generaci normy ČSN EN 13108-1 [35] byly v národní příloze uvedeny empirické i funkční požadavky na specifikaci vlastností asfaltových směsí typu asfaltový beton. Byl to jediný typ asfaltové směsi, který bylo v ČR možné specifikovat funkčním způsobem. Zavedení funkčních požadavků upozaduje z větší části požadavky na složení asfaltových směsí dané oborem zrnitosti a druhem a množstvím pojiva, neboť funkční zkoušky mají vhodnost či nevhodnost směsí (i netradičně navržených) prokázat [139]. V únoru 2019 byla ovšem revidována česká zbytková norma ČSN 73 6121 [11], do jejíchž příloh byly přesunuty požadavky na v ČR nejčastěji používané asfaltové směsi. V příloze specifikující požadavky na směsi typu asfaltový beton se upustilo od funkčních požadavků na vlastnosti asfaltových směsí, protože se tato funkční specifikace téměř nevyužívala, a to i přes to, že se ve 2. generaci evropských norem očekával přechod k funkční specifikaci i ostatních typů asfaltových směsí.

Ostatní typy asfaltových směsí, jako je např. asfaltový koberec mastixový nebo asfaltový koberec drenážní, lze zařadit do skupiny směsí empirických, jejichž účel použití je poměrně úzce vymezen – asfaltový koberec mastixový se používá zejména pouze pro vysoká a extrémní dopravní zatížení, asfaltový koberec drenážní pro snížení nebezpečí aquaplaningu nebo hlukových emisí. Taktéž obory zrnitosti těchto empirických směsí jsou poměrně úzké, používají se téměř výhradně modifikované asfalty a jejich složení tedy nelze výrazněji měnit. [87]

Funkční vlastnosti asfaltových směsí je možné rozdělit na:

- zhutnitelnost [18],
- citlivost k segregaci [21],
- nízkoteplotní vlastnosti [33],
- odolnost vůči trvalým deformacím [24] a [26],
- odolnost vůči vodě [20],
- odolnost proti otěru pneumatikami s hroty [22],
- odolnost vůči pohonným hmotám [31],
- tuhost [27],
- únava [25],
- přílnavost asfaltového pojiva ke kamenivu [19],
- propustnost a drenážní schopnost [30] a [23].

V následujícím textu jsou stručně popsány funkční zkoušky, které se pro hodnocení funkčních vlastností uplatňují nejčastěji.

6.1. Zhutnitelnost asfaltových směsí

Zkouška spočívá v záznamu objemové hmotnosti zkušebního tělesa tvaru válce při zhutňování asfaltové směsi rázovým (Marshallovým) zhutňovačem, gyrátorem nebo vibračním zhutňovačem. Při hutnění je sledováno snižování tloušťky tělesa (změna objemové hmotnosti, mezerovitosti) v závislosti na zhutňovací energii. Získaným záznamem se proloží křivka, jejíž parametry charakterizují zhutnitelnost asfaltové směsi. Norma [18] popisuje tři metody pro

zjištění zhutnitelnosti. Je možné využít dvě nebo více zkušebních těles, která se zhutňují různými úrovněmi zhutňovací energie a měří se jejich objemové hmotnosti, nebo se využije jedno zkušební těleso, u kterého se stanovuje nárůst jeho objemové hmotnosti po každém úderu zhutňovače.

6.2. Nízkoteplotní vlastnosti asfaltových směsí

Nízkoteplotní charakteristiky asfaltových směsí se v Evropě hodnotí podle normy ČSN EN 12697-46 [33]. Tato norma popisuje následující metody stanovení nízkoteplotních charakteristik asfaltových směsí:

- pevnost v tahu při stanovené teplotě pomocí zkoušky jednoosým tahem (UTST),
- zkouška nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST),
- rezerva pevnosti v tahu při stanovené teplotě (kombinace zkoušek TSRST a UTST),
- doba relaxace pomocí relaxační zkoušky (RT),
- křivka dotvarování pro přepočítání reologických parametrů pomocí creepových zkoušek v tahu (TCT),
- odolnost vůči únavě při nízkých teplotách pomocí jednoosých cyklických zkoušek tahem (UCTST).

V ČR se nejvíce uplatňuje jednoosá zkouška tahem s rovnoměrným řízeným poklesem v zařízení označovaném jako TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test). Při zjišťování nízkoteplotního chování asfaltových vrstev vozovky pomocí zařízení TSRST se vychází z toho, že asfaltové vrstvy vozovky fungují jako nekonečný pás. Je-li vybrán element tohoto nekonečného pásu, na který působí smršťovací síly způsobené snížením teploty, pak každá další navazující část elementu pomáhá tato napětí přenášet, tudíž navazující části způsobují „vetknutí“ sledovaného elementu. Jestliže na element působí tahové napětí větší než je jeho pevnost, dojde k porušení mrazovou trhlinou. [51]

Účelem zkoušky je zjistit kritickou teplotu a velikost tahového napětí zkušebního tělesa z asfaltové směsi při porušení trhlinou, které vzniká při jeho ochlazení konstantní rychlostí z výchozí teploty za podmínky zamezení zkracování tělesa – tzn. při dodržení nulového podélného přetvoření. Při zkoušce se upevní zkušební těleso tvaru hranolu do zkušební komory tak, aby nemohlo docházet k délkové změně tělesa (obrázek 20). Ve zkušební komoře se řízenou rychlostí 10 °C/hodinu snižuje teplota a zkušebnímu tělesu není umožněna délková teplotní změna, čímž v tělese vzniká tahové kryogenní napětí. Při dosažení pevnosti v tahu se těleso poruší tahovou trhlinou, přičemž se zaznamená aktuální teplota a maximální tahové napětí. [51]

Odolnost vůči lomu asfaltové směsi pro hodnocení možného šíření trhlin je možné stanovit také podle normy ČSN EN 12697-44 [32].



Obrázek 20: Zkušební těleso upevněné do zařízení TSRST v silniční laboratoři VUT v Brně [44]

6.3. Odolnost vůči trvalým deformacím asfaltových směsí

Vznik trvalých deformací pod účinkem těžké nákladní dopravy je přirozeným jevem porušení asfaltových vozovek. Není možné zaručit, aby k tomuto jevu nedošlo, je možné jej pouze omezit na určitou úroveň. Příčinou vzniku trvalých deformací je většinou viskoplastické přetváření směsí pod účinkem vysokého zatížení a teploty, někdy též ztráta hmoty v jízdních stopách v důsledku používání pneumatik s hroty, popř. nedostatečná únosnost podkladních vrstev. [139]

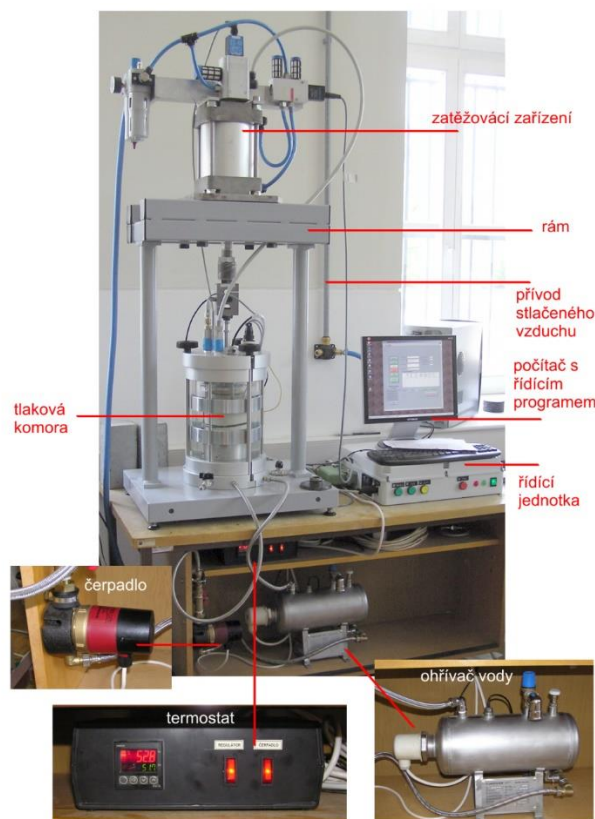
Nejčastěji vznikají trvalé deformace ve formě vyjetých kolejí. Tyto lze definovat jako vertikální odchylku povrchu vozovky od nivelety vedoucí k tvorbě příčných nerovností. Vyjeté koleje jsou speciálním druhem deformací příčného profilu, které se od ostatních druhů deformací (jako jsou prosedliny, vtlačená místa a podélné deformace ve formě vln) odlišují zejména v tom, že mají kontinuální, více či méně pravidelný průběh. Vyjeté koleje mohou vzniknout v důsledku dopravního zatížení buď v obrusné, ložní popř. i podkladní vrstvě nebo v podloží. Zatímco vyjeté koleje v krytu vozovky nebo podkladní vrstvě z asfaltových směsí vzniknou v kombinaci s vysokými teplotami, trvalé deformace v nestmelených podkladních vrstvách nebo podloží vznikají většinou v důsledku nedostatečného zhutnění a/nebo špatného odvodnění a tím snížené únosnosti. [139]

Nejčastěji se v ČR odolnost asfaltových směsí vůči deformacím zjišťuje zkouškou pojíždění kolem podle ČSN EN 12697-22 [24]. O této zkoušce se mluví jako o vztažené k funkčnímu chování. Pro zkoušení je možné použít tři typy zařízení, a to velká zkušební zařízení, extra velká zkušební zařízení a malá zkušební zařízení. Nejčastěji používaným zkušebním zařízením na stanovení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací je vyjížděč kolejí (obrázek 21), ve kterém se pojíždí ocelovým kolem s pryžovou obručí (popř. pneumatikou) po zhutněné asfaltové desce při teplotě 50 °C nebo 60 °C. Během zkoušky (20 000 pojezdů) se měří hloubka vyjeté koleje 50 mm od středu desky na každou stranu pojezdu. [139]



Obrázek 21: Vyjížděč kolejí [80]

Druhou možností stanovení odolnosti asfaltových směsí vůči deformaci je využití funkční zkoušky cyklickým zatěžováním válcových zkušebních těles v tlaku pomocí triaxiální komory (obrázek 22) podle ČSN EN 12697-25 [26]. Při zkoušce probíhající při teplotě 50 °C je válcové zkušební těleso (Marshallovo těleso nebo jádrový vývrt z vozovky) zatěžováno cyklickým axiálním tlakem a současně bočním komorovým tlakem (statickým nebo cyklickým), který simuluje hmotu a odezvu okolního materiálu v reálné vozovce. Ze záznamu závislosti axiálního přetvoření na počtu opakování zatížení je vyhodnocována odolnost zkoušené směsi proti tvorbě trvalých deformací (vyjetých kolejí). [87]



Obrázek 22: Triaxiální komora [85]

6.4. Tuhost asfaltových směsí

V literatuře se uvádí o asfaltových směsích, že jsou tyto materiály spojitě, izotropní a visko-elastické. Tyto předpoklady platí pouze za určitých podmínek a je zřejmé, že čím více materiálové charakteristiky odpovídají těmto podmínkám, tím více platí teoretická odvození ve spojení s těmito předpoklady. Při zkoušce je materiál (zhutněná asfaltová směs) vystaven harmonickému sinusovému zatěžování při různých frekvencích. Protože měření je prováděno v oblasti malých přetvoření, odezva na sinusové zatížení je taktéž ve tvaru sinusoidy. Komplexní modul tuhosti je komplexní číslo definované jako poměr mezi amplitudou budícího napětí a jím vynucené deformace při ustáleném harmonickém kmitání při dané frekvenci. Díky visko-elastické povaze asfaltového pojiva se opožďuje přetvoření za napětím o určitý fázový úhel. Komplexní modul závisí na frekvenci a teplotě. [139]

Tuhost asfaltových směsí se stanovuje podle normy ČSN EN 12697-26 [27]. Jde o moderní metody stanovení modulu tuhosti asfaltových směsí pomocí opakovaného dynamického zatěžování. Podle této normy je možno stanovovat moduly tuhosti u asfaltových směsí následujícími metodami:

- dvoubodová zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu nebo na tělesech tvaru trámečku,
- zkouška tříbodovým ohybem nebo čtyřbodovým ohybem na tělesech tvaru trámečku,
- zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech,
- zkouška jednoosým tahem a tlakem na válcových zkušebních tělesech,

- zkouška v přímém tahu na válcových zkušebních tělesech nebo na tělesech tvaru trámečku,
- zkouška opakovaným namáháním v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech.

Na základě měřených veličin (síla, deformace, fázový úhel) a známých rozměrů zkušebního tělesa je stanovován modul tuhosti ztuhlé asfaltové směsi při různých teplotách. Inovovaná česká návrhová metoda, uvedená v předpisu TP 170 [134], již počítá s funkčním stanovováním modulů tuhosti u asfaltu stmelovaných materiálů. Za výsledek zkoušky se považuje a do návrhové metody vstupuje hodnota tuhosti, stanovená dvoubodovou zkouškou ohybem při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz. Zařízení pro provedení dvoubodové zkoušky ohybem na komolých klínech je uvedeno na obrázku 23.



Obrázek 23: Zařízení pro provedení dvoubodové zkoušky ohybem (vlevo) [76] a zkušební těleso tvaru trapezoidu vlepěné do podložek (vpravo) [44]

6.5. Odolnost vůči únavě asfaltových směsí

Únavové charakteristiky se využívají při posuzování odolnosti vozovky proti opakovanému zatěžování. Toto namáhání způsobuje jisté mikro-porušení, které má za následek ztrátu tuhosti materiálu a vede v dlouhodobém horizontu k porušení, které se projeví vznikem únavové trhliny. Tento jev, označovaný jako únava, je rozhodující pro dimenzování konstrukce netuhých vozovek. Běžný způsob zkoušení únavy je založen na opakovaném zatěžování zkušebního tělesa a záznamu počtu cyklů při dosažení jeho porušení (únavová životnost, čili pokles tuhosti na polovinu své počáteční hodnoty). Křivka popisující únavovou životnost (vyjádřená počtem cyklů) versus amplituda vyvozeného zatížení (napětí σ nebo přetvoření ϵ) se označuje jako tzv. Wöhlerova křivka. Výsledky zkoušky se tedy vyjadřují ve formě Wöhlerova diagramu, z něhož do české návrhové metody vstupují charakteristika

sklonu únavové přímky B a přetvoření odpovídající jednomu milionu zatěžovacích cyklů ϵ_6 . Norma ČSN EN 12697-24 [25] umožňuje stanovovat únavové charakteristiky metodami odpovídajícími stanovování tuhosti asfaltových směsí. Předpis TP 170 [134] požaduje pro návrhovou metodu hodnocení únavových charakteristik dvoubodovou zkouškou ohybem na komolých klínech při teplotě 10 °C a frekvenci 25 Hz. [139, 87]

7. CÍLE HABILITAČNÍ PRÁCE

Jak již bylo uvedeno v předcházejících kapitolách habilitační práce, je v posledních letech v silničním stavitelství snahou zavádět moderní zkušební metody, pomocí kterých je možné výstižněji popsat chování silničních stavebních materiálů s důrazem kladeným na jejich funkční vlastnosti a předpokládanou trvanlivost těchto materiálů a z nich vyrobených vrstev vozovek.

Habilitační práce si klade za cíl popsat a shrnout činnosti autora práce, které souvisejí s jeho snahou rozšířit soubor využitelných moderních zkušebních metod, které budou mít potenciál výstižnějšího popisu chování stavebních silničních materiálů se zaměřením na jejich trvanlivost ve vozovce. Možnost posunu v této oblasti autor práce chápe jako komplexní problém, který se skládá z jednotlivých dílčích aktivit. Mezi tyto dílčí aktivity lze zahrnout:

- provedení komplexního laboratorního výzkumu, který zahrnoval hodnocení empirických i funkčních vlastností asfaltových pojiv (zejména silničních asfaltů),
- provedení laboratorních zkoušek asfaltových směsí, obsahujících silniční asfalty, popsané funkčními zkouškami, se zaměřením na jejich stárnutí,
- na základě výsledků laboratorních zkoušek vývoj laboratorních zkušebních metod pro hodnocení vlastností asfaltových pojiv se zaměřením na jejich disperzní (koloidní) stabilitu a odolnost vůči stárnutí, což je oblast, které doposud nebyla v České republice věnována dostatečná pozornost,
- vybudování pokusných úseků pro ověření laboratorního výzkumu in situ,
- tvorbu nových a úpravu stávajících legislativních a normových předpisů,
- publikační, školící, přednáškové a další činnosti zaměřené na informování odborné veřejnosti o možnostech využití výše uvedených inovativních zkušebních metod v silniční praxi.

8. VÝSLEDNÉ EMPIRICKÉ A FUNKČNÍ PARAMETRY SOUBORU SILNIČNÍCH ASFALTŮ

V této kapitole jsou popsány vlastnosti vybraných silničních asphaltů, výsledky zkoušek simulujících stárnutí těchto asphaltů v laboratoři a zkoušky hodnotící disperzní (koloidní) stabilitu těchto pojiv. Práce směřovaly k vývoji metodiky, pomocí které bude možné hodnotit disperzní (koloidní) stabilitu silničních asphaltů. Dalším cílem bylo vyvinout laboratorní metodu, pomocí které bude možné popsat stárnutí silničních asphaltů včetně kritické (prahové) hodnoty, při jejímž překročení už dochází k nadměrnému stárnutí tohoto pojiva. To bylo umožněno rozšířením zkušební souboru silničních asphaltů. Důraz byl kladen na hodnocení vlastností nemodifikovaných silničních asphaltů, protože se z nich v ČR vyrobí více než dvě třetiny asphaltových směsí [116], přičemž v drtivé většině se jedná o silniční asfalty třídy 50/70. Výsledky laboratorních zkoušek pojiv byly ověřeny na vybraných parametrech asphaltových směsí, obsahujících tato pojiva a v reálné situaci na pokusných úsecích in situ, které byly provedeny ve spolupráci se společností Skanska a.s.

Jak bylo již uvedeno v úvodu habilitační práce, práce v oblasti vlastností, stárnutí a stability asphaltových pojiv byly prováděny a níže uváděné výsledky byly získány s podporou výzkumného projektu technologické agentury ČR č. TA03030381 „Nové zkušební metody asphaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asphaltových vozovek“ [141], jehož byl autor habilitační práce hlavním řešitelem, a při jehož řešení byly dále využity diplomové práce [65, 129, 109, 128] a disertační práce [8].

Nejprve byl vybrán ucelený zkušební soubor silničních asphaltů, který je uveden v tabulce 3, přičemž názvy výrobců (dodavatelů) pojiv jsou nahrazeny římskými číslicemi. Na tomto uceleném souboru asphaltových pojiv byly provedeny následující empirické a funkční zkoušky s důrazem na hodnocení vlastností uvedených pojiv při různých stupních zestárnutí:

- penetrace jehlou podle ČSN EN 1426 [37],
- bod měknutí podle ČSN EN 1427 [38],
- dynamická viskozita metodou kužel a deska podle ČSN EN 13702 [36],
- komplexní smykový modul a fázový úhel v DSR podle ČSN EN 14770 [40],
- modul tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru podle ČSN EN 14771 [41],
- disperzní stabilita jednobodovou precipitační titrací,
- simulace stárnutí metodou RTFOT podle ČSN EN 12607-1 [14],
- simulace stárnutí metodou 3xRTFOT,
- simulace stárnutí metodou PAV podle ČSN EN 14769 [39].

Dále byly vybrány vzorky silničních asphaltů, ze kterých byly vyrobeny asphaltové směsi typu asphaltový beton. Na těchto asphaltových směsích byl pomocí zkoušky tuhosti podle ČSN EN 12697-26 [27] hodnocen vliv simulace stárnutí asphaltové směsi metodou BSA podle kapitoly 4.9.1 této práce. Byla využita dvoubodová zkouška ohybem na komolých klínech (trapezoidech). Zároveň byly vybrané asphaltové směsi využity při provedení pokusných úseků pro jejich následné dlouhodobé sledování.

Tabulka 3: Silniční asfalty vybrané pro provedení laboratorních zkoušek

Označení	Výrobce	Třída	Barevné zvýraznění
A	I	70/100	červená
B	II	70/100	červená
C	I	50/70	žlutá
D	III	50/70	žlutá
E	II	50/70	zelená
F	IV	50/70	zelená
G	V	50/70	modrá
H	VI	50/70	modrá
I	VII	50/70	tmavě modrá
J	VIII	50/70	černá
K	V	50/70	šedá
L	V	50/70	černá
M	I	50/70	hnědá
N	I	50/70	červená
O	I	50/70	žlutá

8.1. Penetrace jehlou podle ČSN EN 1426

Penetrace jehlou byla provedena při teplotě 25 °C podle normy ČSN EN 1426 [37]. V normě ČSN 65 7204 [10] je pro nezestárlé silniční asfalty gradace 50/70 uveden požadovaný rozsah hodnoty penetrace 50 (0,1 mm) až 70 (0,1 mm) a pro nezestárlé silniční asfalty gradace 70/100 uveden požadovaný rozsah hodnoty penetrace 70 (0,1 mm) až 100 (0,1 mm). Stejná norma požaduje pro silniční asfalty gradace 50/70 hodnotu zbylé penetrace po stárnutí metodou RTFOT větší než 50 % ze své původní hodnoty před stárnutím a pro silniční asfalty gradace 70/100 hodnotu zbylé penetrace po stárnutí RTFOT větší než 46 % ze své původní hodnoty před stárnutím. Výsledné hodnoty zkoušky penetrace jednotlivých pojev jsou uvedeny v tabulce 4, přičemž v závorce jsou uvedeny hodnoty zbylé penetrace po jednotlivých metodách stárnutí.

Tabulka 4: Hodnoty penetrace jehlou a zbylé penetrace jednotlivých pojiv

Označení	Penetrace			
	Před stárnutím	RTFOT	3xRTFOT	RTFOT + PAV
	[0,1 mm]	[0,1 mm (%)]	[0,1 mm (%)]	[0,1 mm (%)]
A	74	48 (64,9)	31 (41,9)	-
B	63	37 (58,7)	25 (39,7)	24 (38,1)
C	52	31 (59,6)	20 (38,5)	19 (36,5)
D	56	35 (62,5)	23 (41,1)	-
E	57	37 (64,9)	26 (45,6)	20 (35,1)
F	64	41 (64,1)	27 (42,2)	19 (29,7)
G	56	35 (62,5)	25 (44,6)	18 (32,1)
H	57	36 (63,2)	26 (45,6)	21 (36,8)
I	54	33 (61,1)	20 (37,0)	14 (25,9)
J	47	29 (61,7)	18 (38,3)	18 (38,3)
K	52	31 (59,6)	22 (42,3)	16 (30,8)
L	52	29 (55,8)	22 (42,3)	20 (38,5)
M	55	34 (61,8)	22 (40,0)	19 (34,5)
N	52	34 (65,4)	20 (38,5)	-
O	60	39 (65,0)	24 (40,0)	20 (33,3)

Z hodnocených pojiv nesplnila pojiva B a J požadovaný rozsah hodnoty penetrace dle ČSN 65 7204. Nižší hodnota penetrace u těchto pojiv může být způsobena dlouhodobým skladováním pojiva na obalovně při vysoké teplotě před jejich vzorkováním. Hodnoty penetrace se stárnutím metodou RTFOT snížily v rozmezí na 65,4 % až 55,8 % své původní hodnoty. Při modifikované metodě 3xRTFOT je tato hodnota dokonce až v rozmezí 45,6 % až 37,0 %.

V současných normách není uveden požadavek na změnu vlastností silničních asfaltů po simulaci dlouhodobého laboratorního stárnutí. Všeobecně laboratorní stárnutí asfaltového pojiva způsobuje, že pojivo se stává tvrdší, a tudíž je naměřená penetrace nižší. Lze říct, že vyhodnocením zkoušky penetrace je pojivo po stárnutí až třikrát tvrdší než pojivo před výrobou asfaltové směsi. Z toho vyplývá důležitost posouzení asfaltového pojiva nejen před výrobou a pokládkou asfaltové směsi, ale taktéž v průběhu jeho životnosti. Je patrné, že většina asfaltových pojiv má nižší hodnotu penetrace po laboratorním stárnutí metodou RTFOT+PAV než u metody 3xRTFOT. Zároveň je zřejmé, že silniční asfalty od jednotlivých výrobců jsou rozdílně náchylné ke změnám vlastností způsobeným stárnutím. Nejméně byly dlouhodobým stárnutím metodou RTFOT+PAV ovlivněny silniční asfalty s označením B, H, J a L (procentuální zbytková penetrace od 38,5 % do 36,8 %). Naopak nejvýraznější snížení hodnoty penetrace bylo zaznamenáno u silničních asfaltů s označením F, I a K (procentuální zbytková penetrace od 30,8 % do 25,9 %).

Pokud porovnáme výsledky po stárnutí metodou RTFOT+PAV a po modifikované metodě 3xRTFOT, zjistíme, že hodnota zbylé penetrace je u metody RTFOT+PAV ($33,8 \pm 3,9$)

% své původní hodnoty. U modifikované metody 3xRTFOT je to $(41,5 \pm 3,0)$ % své původní hodnoty.

8.2. Bod měknutí podle ČSN EN 1427

Na pojivech byl stanoven bod měknutí metodou kroužek a kulička podle normy ČSN EN 1427 [38]. Norma ČSN 65 7204 [10] pro nezestárlé silniční asfalty gradace 50/70 uvádí požadovaný rozsah hodnoty bodu měknutí 46 °C až 54 °C a pro nezestárlé silniční asfalty gradace 70/100 rozsah hodnoty penetrace 43 °C až 51 °C. Stejná norma požaduje pro silniční asfalty gradace 50/70 i 70/100 maximální zvýšení hodnoty bodu měknutí po stárnutí RTFOT o 9 °C ze své původní hodnoty před stárnutím. V rakouském předpise RVS 08.97.05 [130] je uveden i požadavek na maximální zvýšení hodnoty bodu měknutí po zkoušce 3xRTFOT a to o 15 °C. V současné době se v Rakousku vede diskuze o variantě limitní hodnoty bodu měknutí po 3xRTFOT, která je stanovena tak, že nárůst bodu měknutí musí ležet maximálně do 8 °C nad hranicí horního přípustného bodu měknutí. Pro gradaci silničního asfaltu 50/70 to tedy znamená do 62 °C ($54 \text{ °C} + 8 \text{ °C} = 62 \text{ °C}$). Výsledné hodnoty zkoušky bodu měknutí jednotlivých poživ jsou uvedeny v tabulce 5 včetně zvýšení bodu měknutí po stárnutí jednotlivých silničních asfaltů metodou RTFOT, 3xRTFOT a RTFOT+PAV (v závorkách).

Tabulka 5: Hodnoty bodu měknutí a zvýšení bodu měknutí jednotlivých poživ

Označení	Bod měknutí			
	Před stárnutím	RTFOT	3xRTFOT	RTFOT + PAV
	[°C]	[°C (°C)]	[°C (°C)]	[°C (°C)]
A	46,7	49,3 (2,6)	55,9 (9,2)	-
B	47,5	51,9 (4,4)	57,4 (9,9)	59,9 (12,4)
C	50,8	52,6 (1,8)	67,8 (17,0)	70,7 (19,9)
D	48,9	55,6 (6,7)	63,2 (14,3)	-
E	47,4	52,9 (5,5)	59,1 (11,7)	61,9 (14,5)
F	46,7	51,1 (4,4)	55,6 (8,9)	59,2 (12,5)
G	48,7	52,3 (3,6)	58,7 (10,0)	62,5 (13,8)
H	47,5	53,0 (5,5)	60,4 (12,9)	63,9 (16,4)
I	48,1	54,2 (6,1)	61,4 (13,3)	65,1 (17,0)
J	51,0	56,9 (5,9)	63,9 (12,9)	68,2 (17,2)
K	49,9	55,5 (5,6)	61,8 (11,9)	64,1 (14,2)
L	49,1	54,6 (5,5)	61,8 (12,7)	64,4 (15,3)
M	49,7	56,1 (6,4)	66,0 (16,3)	67,4 (17,7)
N	49,6	56,6 (7,0)	67,9 (18,3)	-
O	47,7	51,9 (4,2)	59,9 (12,2)	62,8 (15,1)

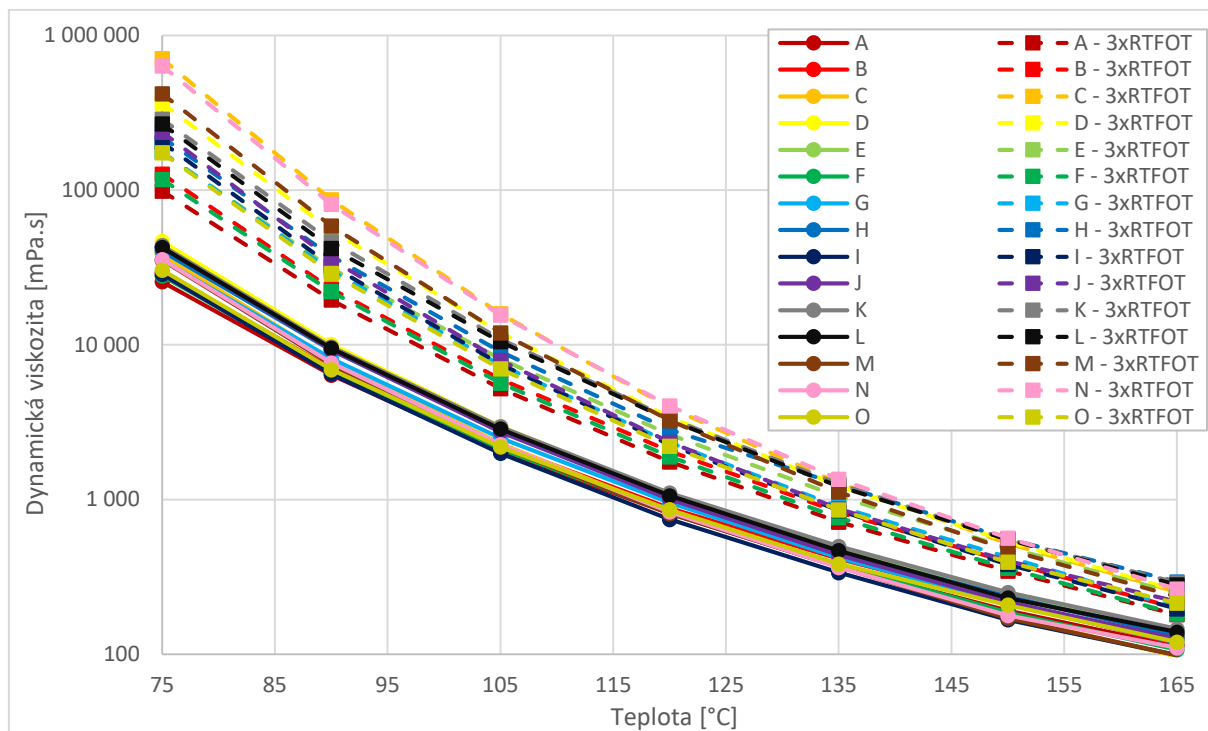
Z výsledků je patrné, že laboratorní stárnutí způsobuje zvýšení bodu měknutí, což může být na první pohled výhodné s ohledem na omezení vzniku trvalých deformací, ovšem zároveň se zhoršují únavové vlastnosti a hrozí vyšší riziko vzniku mrazových trhlin při nízkých teplotách.

Jednotlivé silniční asfalty jsou při stárnutí různě náchylné na změnu bodu měknutí. Z výsledků je zřejmé, že modifikovaná metoda 3xRTFOT způsobuje nižší stárnutí než konvenčně používaná metoda RTFOT+PAV. Při porovnání výsledků tohoto omezeného souboru poжив modifikovaná metoda 3xRTFOT způsobuje stárnutí průměrně o 3,1 °C nižší než konvenční metoda RTFOT+PAV. Zvýšení hodnoty bodu měknutí po 3xRTFOT bylo vyšší než 15 °C v případě poжив s označením C, M a N, kdy změna bodu měknutí po stárnutí metodou 3xRTFOT byla od 16,3 °C do 18,3 °C. Nejméně měnila při stárnutí své vlastnosti poживa A, B, F a G (při stárnutí metodou RTFOT+PAV o 12,4 °C a 13,8 °C).

8.3. Dynamická viskozita podle ČSN EN 13702

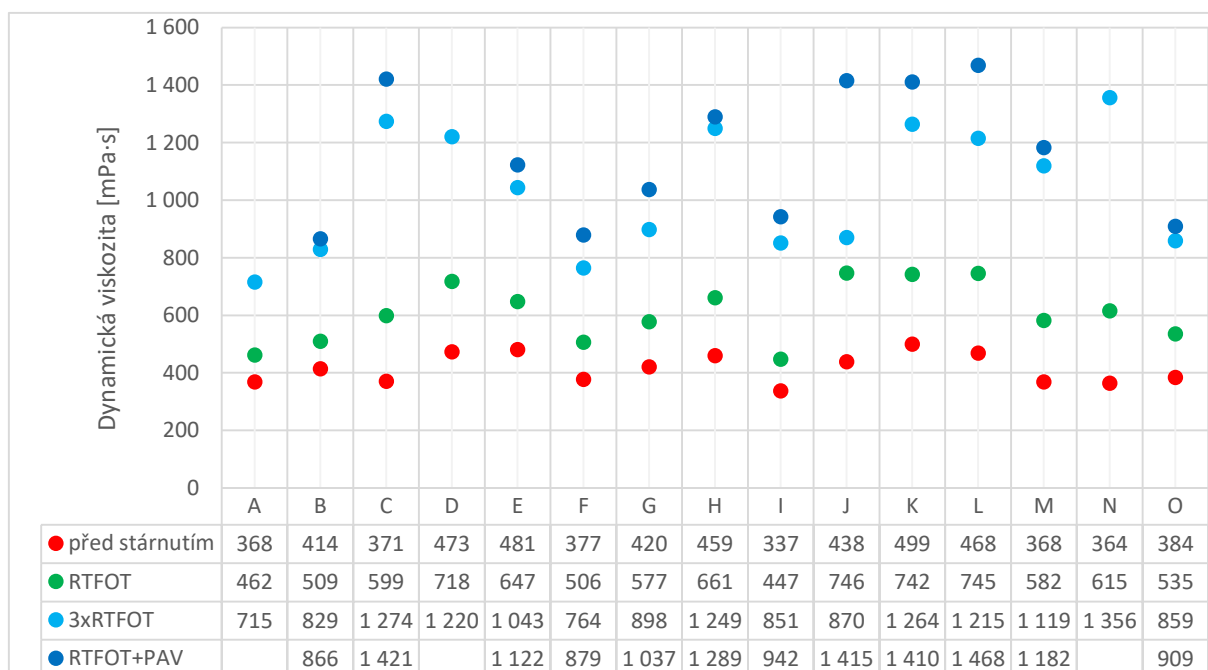
Dynamická viskozita skupiny vybraných silničních asfaltů byla stanovena v DSR geometrií kužel – deska v teplotním rozsahu 75 °C až 165 °C s krokem 15 °C a při smykové rychlosti 1 s⁻¹ až 100 s⁻¹ včetně určení vlivu modelování stárnutí metodou RTFOT, 3xRTFOT a RTFOT+PAV. Na základě vyhodnocení závislosti dynamické viskozity na smykové rychlosti je možné říct, že dynamická viskozita srovnávaných poжив je nezávislá na smykové rychlosti, tudíž tato poживa vykazují Newtonské chování. Pouze při teplotě 75 °C a částečně i 90 °C dochází při rostoucí smykové rychlosti od určité její hodnoty k poklesu dynamické viskozity poжив (ne-Newtonské chování), což je způsobeno postupným porušováním struktury vzorku asfaltu.

V obrázku 24 je zachycena závislost dynamické viskozity na teplotě jednotlivých poжив změřená při smykové rychlosti 1,0 s⁻¹. Pro větší přehlednost jsou vybrána poживa nezestárlá a poживa zestárlá pomocí metody 3xRTFOT. Teplotní závislost dynamické viskozity lze charakterizovat pomocí mocninné funkce, která je charakteristická pro chování asfaltových poжив. Z obrázku je patrné, že rozdíly ve vlastnostech srovnávaných poжив je možné výrazněji popsat pomocí simulace laboratorního stárnutí.



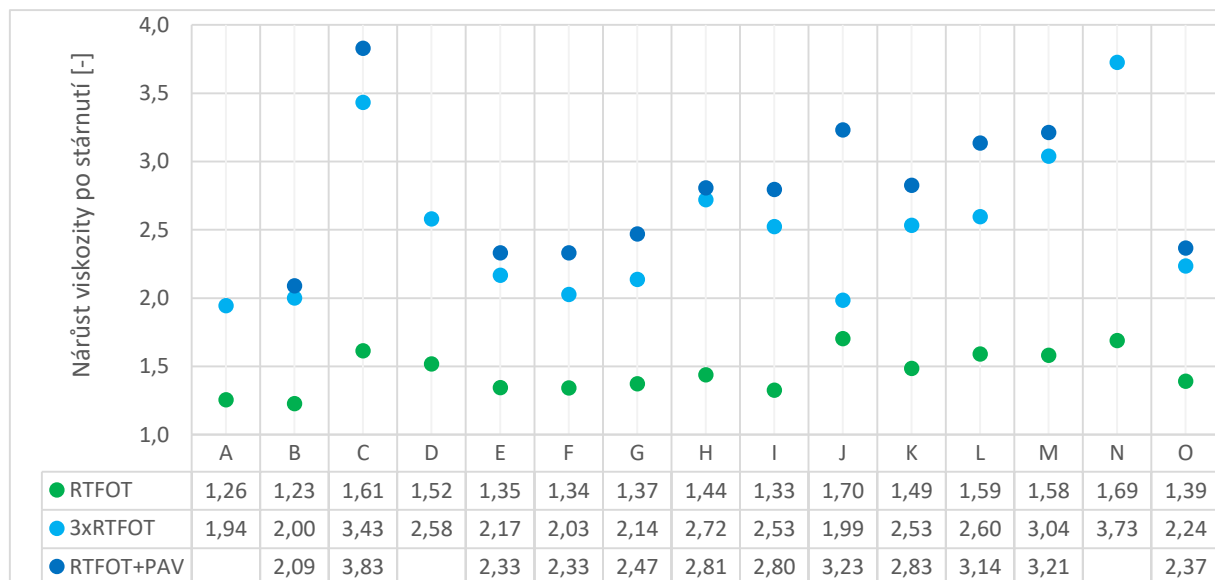
Obrázek 24: Srovnání závislosti dynamické viskozity na teplotě silničních asfaltů při smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$

Na obrázku 25 je zaznamenána hodnota dynamické viskozity stanovená při teplotě 135 °C a smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$. Z výsledků je patrné, že dynamická viskozita se stárnutím stoupá. Opět je patrné, že stárnutí RTFOT+PAV má na vlastnosti pojiv mírně větší vliv než stárnutí 3xRTFOT.



Obrázek 25: Vliv stárnutí na dynamickou viskozitu při teplotě 135 °C a smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$

V obrázku 26 je zachycena změna hodnoty dynamické viskozity stanovené při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s⁻¹ srovnávaných poživ po stárnutí metodou RTFOT, 3xRTFOT a RTFOT+PAV vyjádřená podílem oproti dynamické viskozitě odpovídajícího nezestárlého pojiva. Zvláště postup stárnutí 3xRTFOT a RTFOT+PAV dokáže dobře rozlišit náchylnost ke změně dynamické viskozity způsobené stárnutím. Při používání asfaltových poživ je výhodné, aby pojiva co nejméně stárla. To se v tomto případě projevuje co nejmenším nárůstem dynamické viskozity, čehož dosáhly vzorky A a B (asfaltová pojiva třídy 70/100). Z asfaltových poživ gradace 50/70 nejlépe dopadla pojiva F, G a O. Naopak výrazně nejvíce stárla pojiva C, N a M od výrobce označeného I. Zajímavý je fakt, že mezi pojiva s nejnižším nárůstem viskozity se zařadil vzorek s označením O, který je od stejného výrobce. Z toho je zřejmé, že asfaltová pojiva od stejného výrobce nemají vždy stejné vlastnosti a jejich kvalita může být značně proměnlivá.



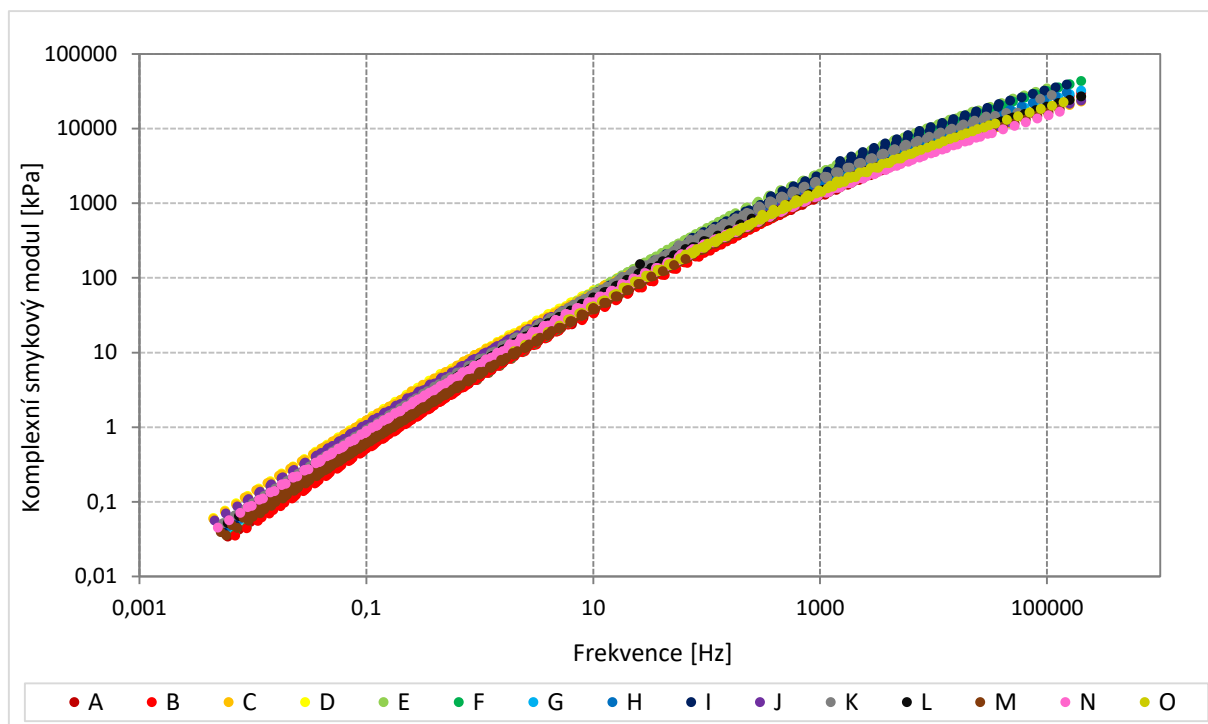
Obrázek 26: Nárůst hodnoty dynamické viskozity po stárnutí při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s⁻¹ srovnávaných poživ

8.4. Komplexní smykový modul a fázový úhel podle ČSN EN 14770

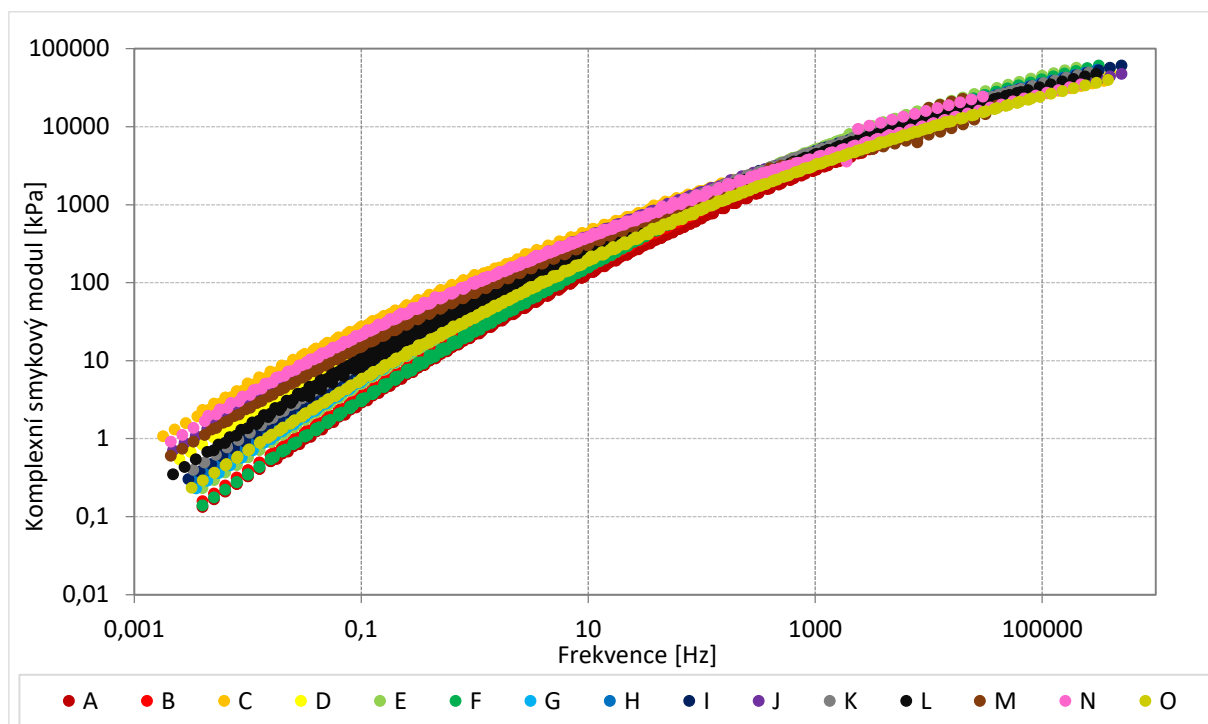
Na srovnávaných pojivech byla v zařízení DSR provedena reologická měření v oscilaci s řízeným smykovým přetvořením. Byl určen komplexní smykový modul a úhel fázového posunu poživ při teplotách 10 °C až 70 °C (s krokem 5 °C) a při sadách frekvencí zatěžování 0,1 Hz až 10 Hz. Průměr vzorku (tj. průměr měřících destiček) byl 25 mm s tloušťkou vzorku 1 mm (teploty 70 °C až 40 °C) a 8 mm s tloušťkou vzorku 2 mm (teploty 40 °C až 10 °C).

Při oscilačních zkouškách byly určeny komplexní smykové moduly a fázové úhly jednotlivých nezestárlých poživ i poživ zestárlých metodami RTFOT, 3xRTFOT a RTFOT+PAV. V obrázku 27 jsou zachyceny hlavní křivky komplexních smykových modulů jednotlivých nezestárlých poživ a v obrázku 28 jsou srovnány hlavní křivky komplexních smykových modulů poživ zestárlých metodou 3xRTFOT. Hlavní křivky byly vytvořeny časově teplotní superpozicí pro referenční teplotu 50 °C. Z křivek je možné vysledovat, že nezestárlý silniční asfalt má

v celém teplotně-frekvenčním rozsahu nejnižší komplexní smykové moduly. Stárnutí metodou RTFOT a zvláště pak 3xRTFOT zapříčinilo zvýšení komplexních smykových modulů všech pojiv. Lze konstatovat, že stárnutí asfaltových pojiv způsobuje, že se v asfaltových pojivech začíná více prosazovat elastická složka před viskózní.

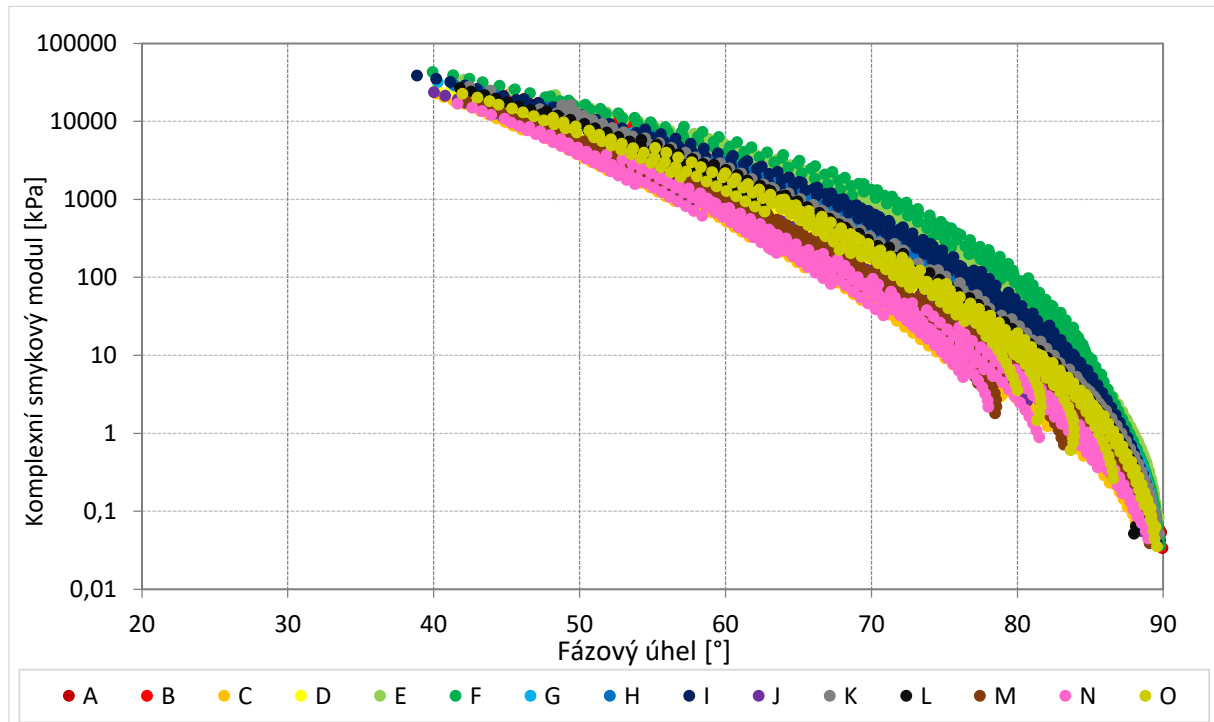


Obrázek 27: Srovnání hlavních křivek komplexních smykových modulů nezestárlých pojiv

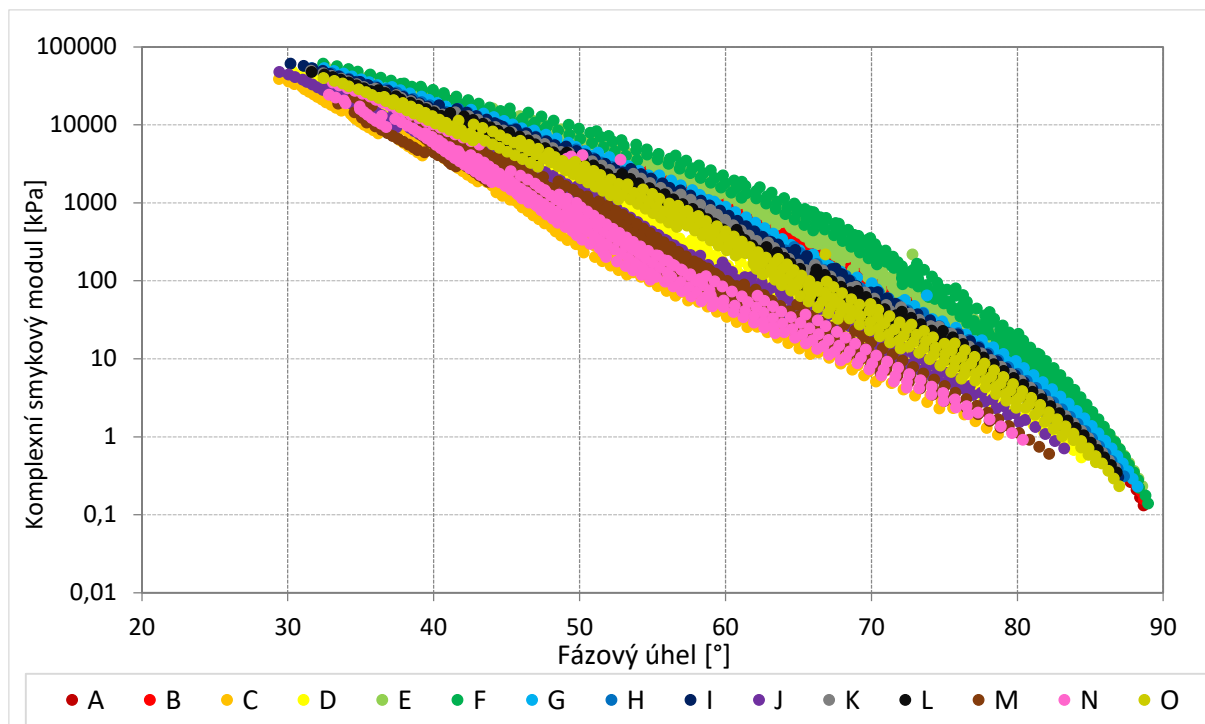


Obrázek 28: Srovnání hlavních křivek komplexních smykových modulů pojiv zestárlých metodou 3xRTFOT

Široké rozpětí průběhů Blackových diagramů (závislost komplexního smykového modulu a fázového úhlu daného pojiva) nezestárých pojiv je vidět v obrázku 29. Nejplošší průběh Blackova diagramu dosáhlo pojivo C a N a nejklenutější průběh pojivo F. Obrázek 30 shrnuje Blackovy diagramy pojiv zestárých metodou 3xRTFOT. Vlivem stárnutí dochází k napřímení průběhu Blackova diagramu a k posunu průběhu k nižším fázovým úhlům (doleva) a vyšším komplexním smykovým modulům (nahoru), zejména v oblasti vyšších zkušebních teplot. Podobné závěry platí i pro simulaci stárnutí metodou RTFOT a RTFOT+PAV.

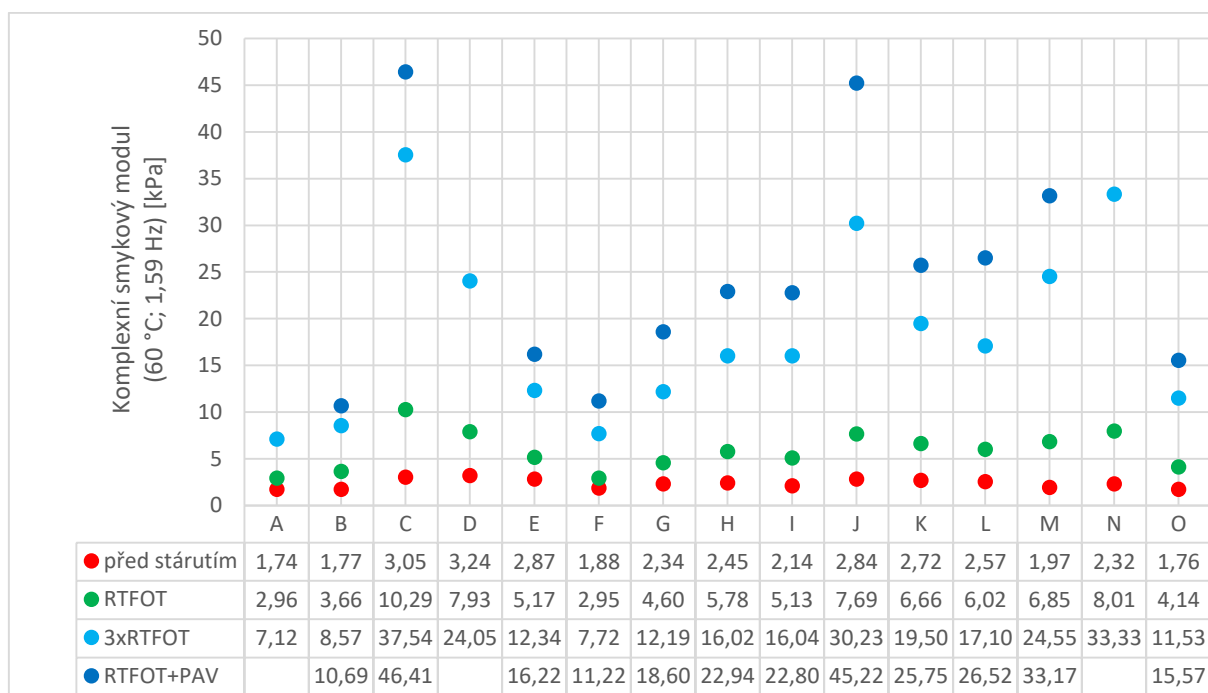


Obrázek 29: Blackovy diagramy nezestárých pojiv

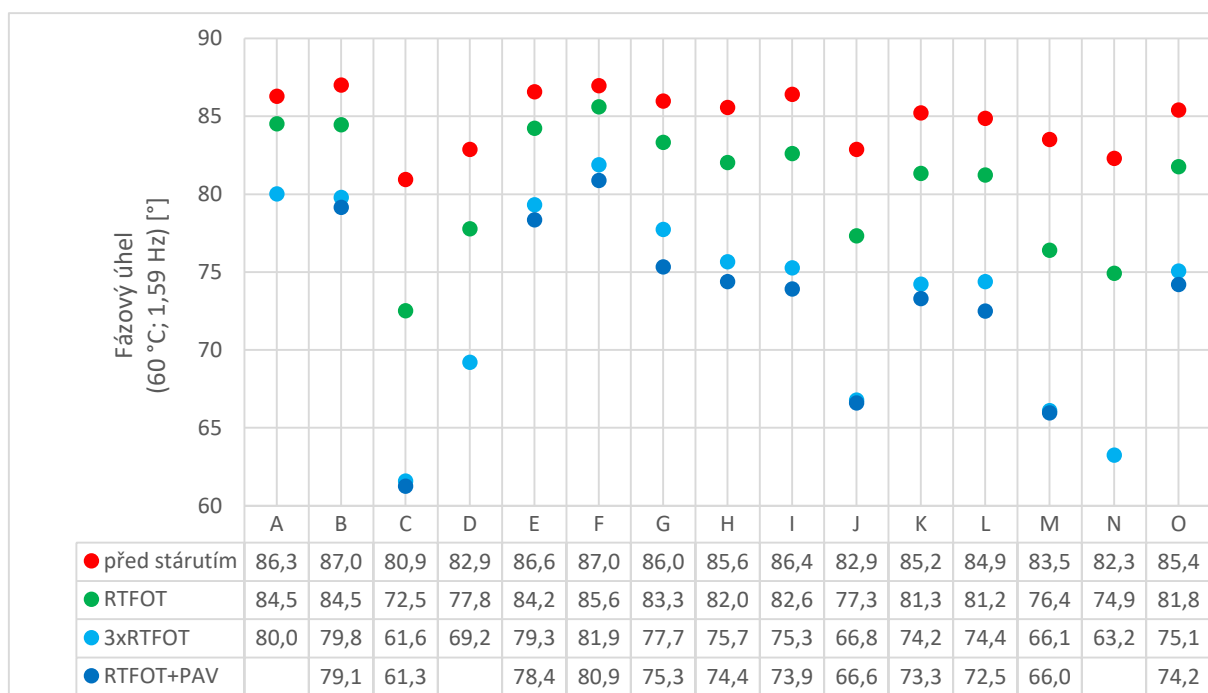


Obrázek 30: Blackovy diagramy pojiv zestárých metodou 3xRTFOT

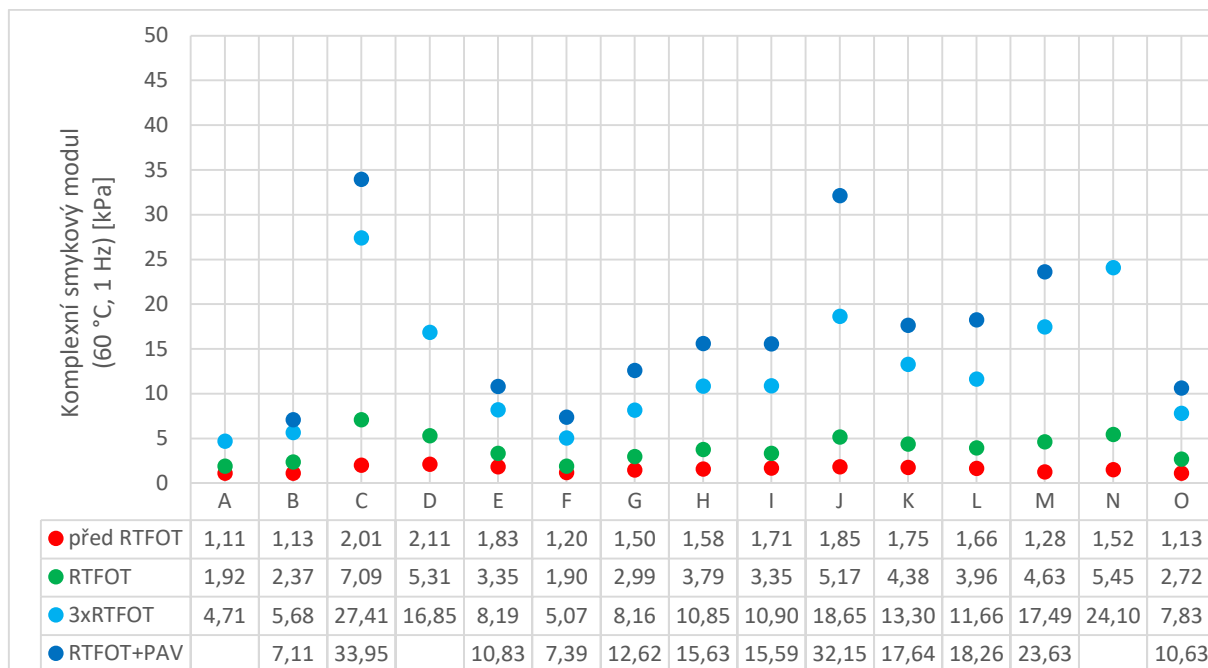
V obrázku 31 jsou zobrazeny komplexní smykové moduly jednotlivých pojiv v závislosti na stupni zestárnutí, stanovené při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz a v obrázku 32 jsou zaznamenány hodnoty fázového úhlu jednotlivých pojiv v závislosti na stupni zestárnutí, stanovené při stejných okrajových podmínkách. Obrázek 33 shrnuje komplexní smykové moduly při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz. Z porovnání je patné, že s rostoucím stupněm stárnutí dochází k nárůstu hodnot komplexních smykových modulů a poklesu hodnot fázových úhlů u všech srovnávaných pojiv. Při porovnání účinku stárnutí metodami 3xRTFOT a RTFOT+PAV bylo zjištěno, že konvenční metoda RTFOT+PAV způsobuje vyšší změnu komplexního smykového modulu, což je patné z obrázku 34, kde jsou zaznamenány indexy stárnutí jednotlivých pojiv. Toto zjištění souhlasí s výsledky empirických zkoušek (bod měknutí a penetrace jehlou) i s výsledky dynamické viskozity. Stárnutím metodou RTFOT+PAV je nejvíce ovlivněna hodnota komplexního smykového modulu pojiva s označením M. Vyšší citlivost na stárnutí byla taktéž zjištěna pro pojiva s označením C a J. Nejmenší změna komplexního smykového modulu po stárnutí metodou RTFOT+PAV byla pozorována u pojiv s označením B, E, F a G.



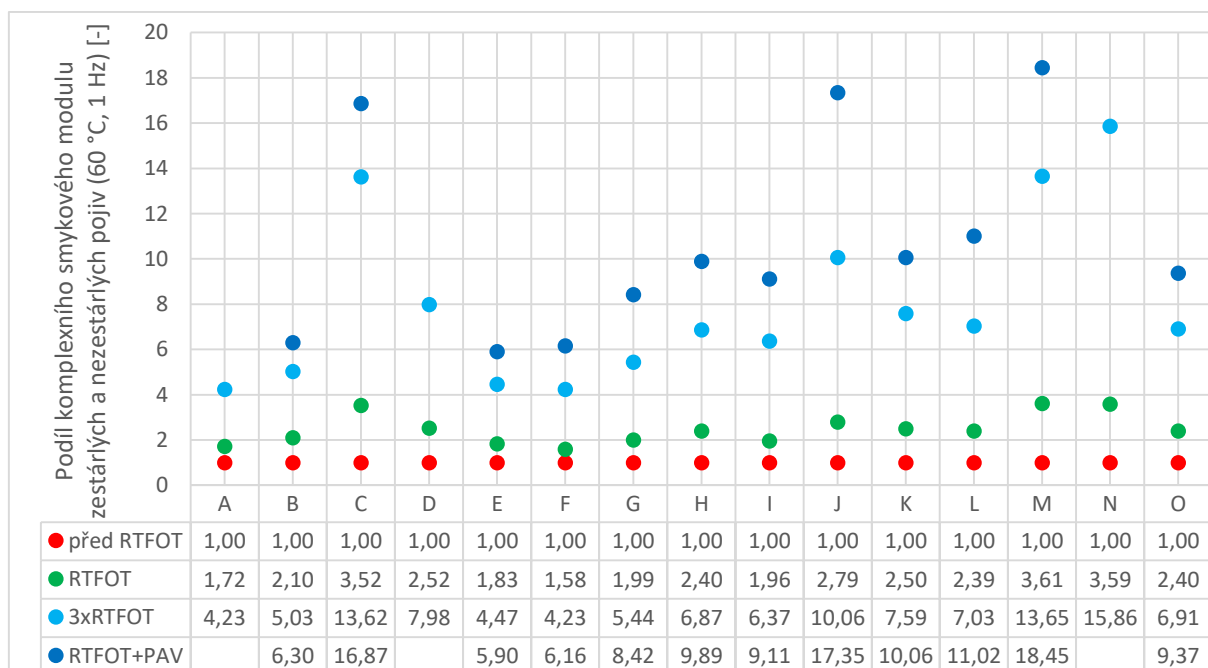
Obrázek 31: Vliv stárnutí na komplexní smykový modul stanovený při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz



Obrázek 32: Vliv stárnutí na fázový úhel stanovený při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz



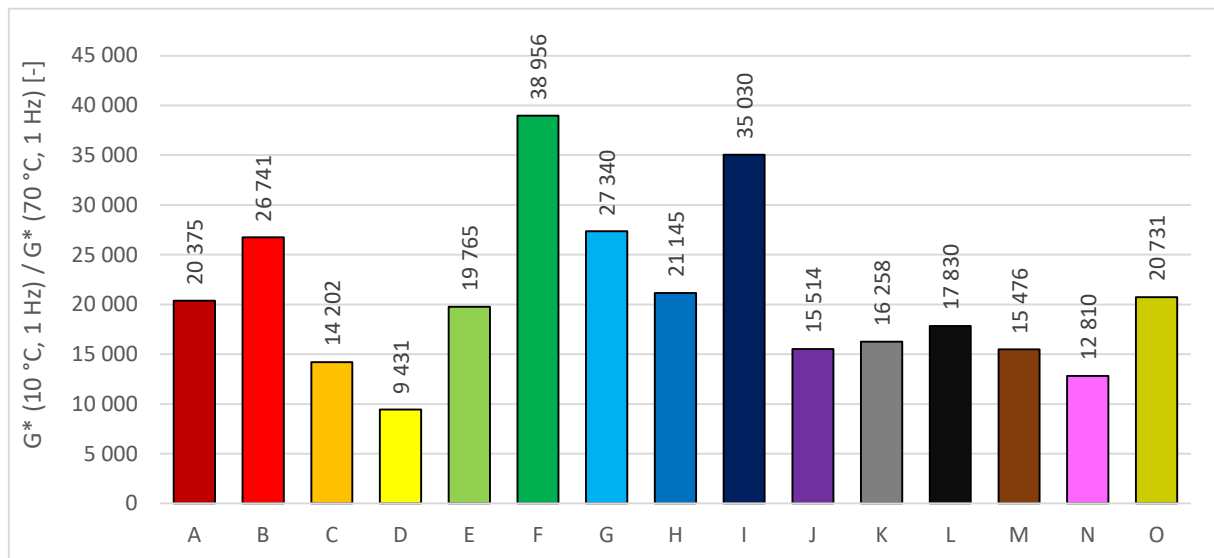
Obrázek 33: Vliv stárnutí na komplexní smykový modul stanovený při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz



Obrázek 34: Podíl komplexního smykového modulu zestárých a nezestárých pojiv stanovený při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz (index stárnutí)

Aby se při vysokých teplotách zamezilo vzniku plastických deformací a při nízkých teplotách zkřehnutí pojiva, což souvisí s možností tvorby trhlin, je výhodné, aby asfaltová pojiva měla co nejnižší teplotní citlivost, tedy změny vlastností způsobené změnou teploty. V obrázku 35 je zaznamenána teplotní citlivost nezestárých asfaltových pojiv vyjádřená

podílem komplexního smykového modulu stanoveného při teplotě 10 °C a 70 °C, vždy při frekvenci zatěžování 1 Hz. Z výsledků je patrné, že teplotní citlivost dosahuje pro tento omezený soubor silničních asfaltů značného rozpětí. Nejvyšší teplotní citlivost byla zjištěna u pojiva s označením F a I. Naopak nejnižší teplotní citlivost byla zjištěna u pojiva s označením D.



Obrázek 35: Teplotní citlivost nezestárých pojiv stanovená jako podíl komplexního smykového modulu určeného při teplotě 10 °C a 70 °C a frekvenci 1,0 Hz

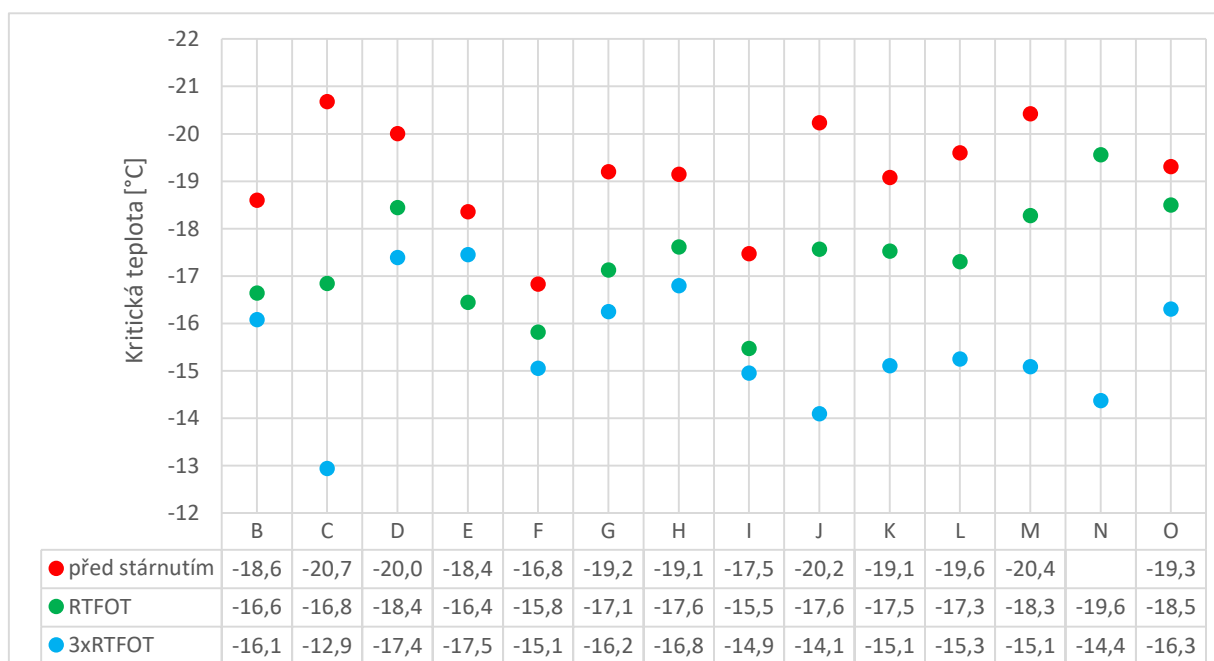
8.5. Modul tuhosti za ohybu podle ČSN EN 14771

Při zjišťování nízkoteplotních vlastností asfaltových pojiv pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR) byla pro jednotlivá pojiva zjišťována tzv. kritická teplota. Americký předpis SHRP předpokládá, že teplota o 10 °C nižší, než je kritická teplota zjištěná z BBR, způsobuje vznik mrazových trhlin ve vozovce. Kritická teplota se zjišťuje tak, že se v BBR při třech teplotách (v této práci -10, -16 a -22 °C) určí modul tuhosti za ohybu a m-hodnota a následně je interpolací zjištěna kritická teplota z hodnoty modulu tuhosti za ohybu $S_{m60} = 300$ MPa a m-hodnota = 0,3. Kritická teplota je pak horší (vyšší) z těchto dvou teplot. Kritická teplota byla zjišťována pro všechna hodnocená pojiva s výjimkou pojiva A. Hledání kritické teploty probíhalo na nezestárých pojivech (s výjimkou pojiva N) a na pojivech zestárých metodou RTFOT a 3xRTFOT tak, aby bylo možné určit vliv stupně stárnutí na hodnotu kritické teploty. U pojiv zestárých metodou RTFOT+PAV a u nezestárlého pojiva s označením N bylo z důvodu malého množství pojiva prováděno měření pouze při teplotě -16 °C, což je poměrně běžně používaná teplota pro hodnocení nízkoteplotního chování asfaltových pojiv pomocí BBR v Evropě.

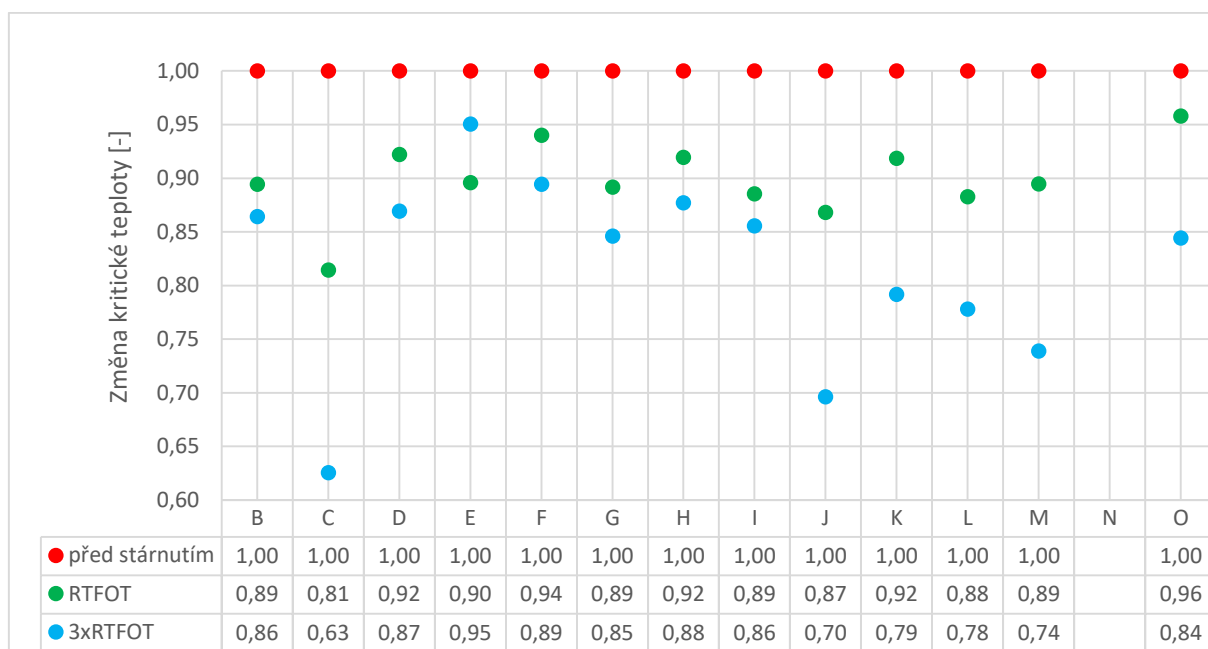
Z obrázku 36 je zřejmé, že stárnutí asfaltových pojiv zvyšuje (zhoršuje) hodnotu kritické teploty. Tento fakt způsobuje, že se posouvá obor použitelnosti pojiv směrem k vyšším teplotám, což může být příznivý fakt s ohledem na výskyt trvalých deformací, ale naopak

nepříznivá skutečnost pro odolnost asfaltové směsi vůči vzniku trhlin, zejména nízkoteplotních.

Důležitost posouzení asfaltových pojiv s ohledem na stárnutí dokazuje chování pojiva s označením C. U nezestárlého pojiva C byla zjištěna nejnižší kritická teplota, ovšem po dlouhodobém stárnutí metodou 3xRTFOT byla zjištěna nejvyšší kritická teplota ze všech zkoušených pojiv, což je patrné z obrázku 37. Na tomto obrázku je patrná změna kritické teploty jednotlivých silničních asfaltů při zkoušce BBR s ohledem na stárnutí jako podíl kritické teploty nezestárlých a zestárlých pojiv. Nejvyšší změna po stárnutí metodou 3xRTFOT nastala u pojiva s označením C (0,63násobek) a dále u pojiv s označením J (0,70násobek) a M (0,74násobek). Nejmenší změny byly zjištěny u pojiv s označením F (0,89násobek), H (0,87násobek) a D (0,87násobek).

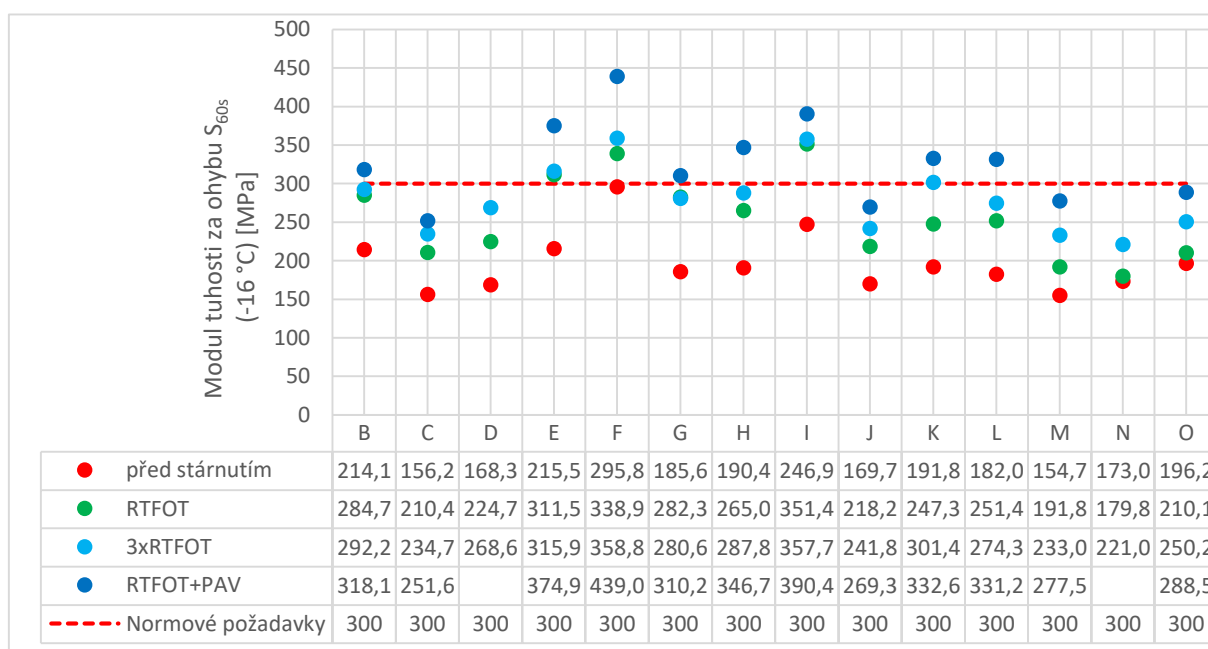


Obrázek 36: Kritická teplota jednotlivých nezestárlých silničních asfaltů a asfaltů zestárlých metodou RTFOT a 3xRTFOT

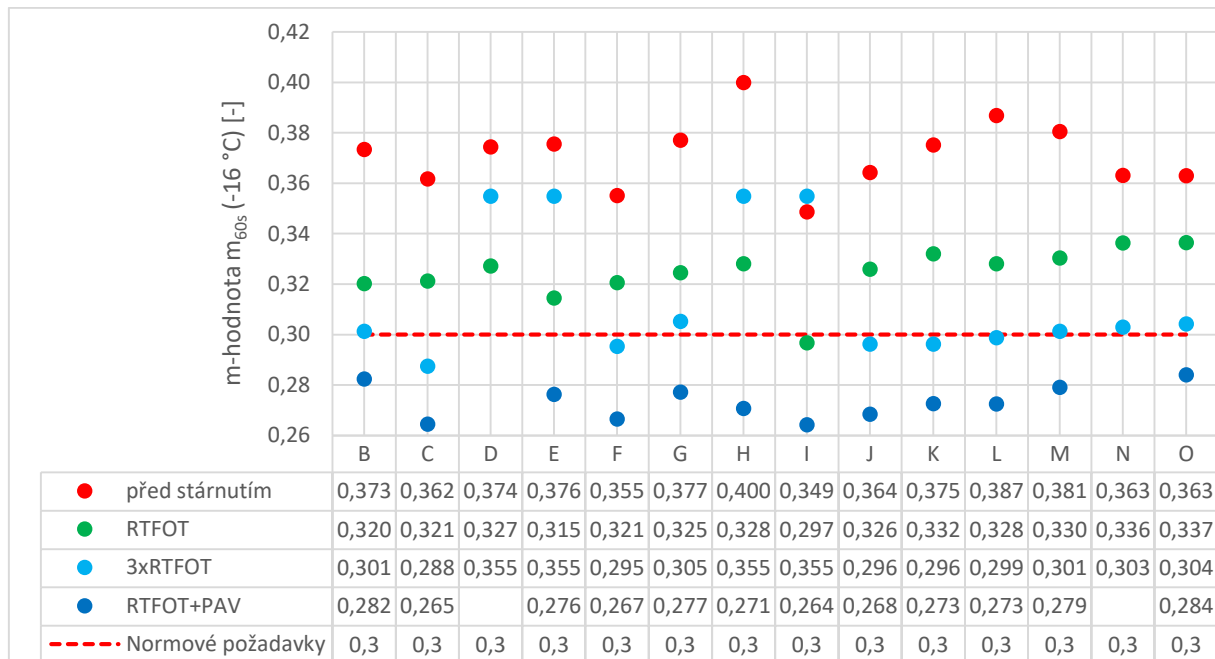


Obrázek 37: Podíl kritické teploty nezestárých a zestárých pojiv

Obrázek 38 srovnává hodnoty modulu tuhosti za ohybu skupiny asfaltových pojiv v čase zkoušky 60 s, stanovené při teplotě $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Obecně se předpokládá, že nižší hodnota je výhodnější vzhledem k náchylnosti k tvorbě trhlin. Červená čárkovaná čára zvýrazňuje hodnotu 300 MPa, kterou lze považovat za kritickou. V obrázku 39 jsou uvedeny m-hodnoty stejných pojiv získané při teplotě $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v čase 60 s, přičemž udaná hodnota 0,3 je považována za kritickou. Při jejím překročení (do nižších hodnot) se předpokládá vznik mrazových trhlin při teplotě o $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ nižší. Z obrázků je zřejmé, že laboratorní stárnutí nepříznivě ovlivňuje nízkoteplotní vlastnosti asfaltových pojiv.



Obrázek 38: Modul tuhosti za ohybu při teplotě $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro jednotlivé silniční asfalty s ohledem na stárnutí



Obrázek 39: Velikost m-hodnoty při teplotě -16 °C pro jednotlivé silniční asfaltů s ohledem na stárnutí

8.6. Metodika pro hodnocení disperzní stability silničních asfaltů

V rámci projektu TAČR č. TA03030381 „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“ [141], jehož byl autor habilitační práce hlavním řešitelem, byla mimo jiné na základě výsledků uvedených v kapitole 8.7 vyvinuta metodika pro hodnocení disperzní stability asfaltových pojiv. K samotné chemické nebo materiálové podstatě, či k obdobnému popisu asfaltových pojiv, se totiž v České republice nevztahuje přímo žádná zkušební metoda. Chemická podstata jednotlivých složek asfaltových pojiv včetně jejich vzájemné kompatibility přitom značně ovlivňuje chování a životnost pojiva v asfaltové směsi. Tyto strukturální skutečnosti zásadně rozhodují o fázové stabilitě systému, jenž se všeobecně označuje jako koloidní nebo někdy také disperzní stabilita pojiva.

Hlavním cílem metodiky je posouzení vnitřní disperzní stability asfaltového pojiva, která odráží míru vzájemné slučitelnosti jeho jednotlivých složek. Na základě této informace bude například možné odhadovat potenciální přítomnost visbreakingových zbytků v asfaltovém pojivu, popřípadě zhodnotit i jeho skutečné množství. Celé znění metodiky pro hodnocení disperzní stability silničních asfaltů [125], která je certifikována Ministerstvem dopravy, je uvedeno v příloze A a na stránce <https://www.pko.fce.vutbr.cz/>. Níže je pro přehlednost metodika stručně představena.

8.6.1. Princip metody

Podstatou jednobodové precipitační (srážecí) titrace, hodnotící vnitřní kompatibilitu skupinových složek asfaltového pojiva je, že se pomocí postupného přidávání srážecího organického činidla (izooktanu) k roztoku definovaného množství silničního asfaltu v toluenu

navodí takové podmínky, za kterých se daný roztok stává termodynamicky nestabilním. V tomto bodě dochází k fázovému vylučování nejméně rozpustných složek roztoku, tzv. flokulační bod. Míra přídavku srážecího roztoku je i mírou stability jeho roztoku za dané koncentrace, a tedy i mírou kompatibility jednotlivých složek asfaltového pojiva. V případě asfaltových pojiv jsou nejméně rozpustné, a tedy i nejdříve se srážející/vylučující sloučeniny, jež mají charakter „asfaltenů“.

Visbreakingové zbytky se svým charakterem řadí do skupiny asfaltenů. Typickou vlastností visbreakingových materiálů je jejich poměrně nízká rozpustnost v některých typech uhlovodíkových rozpouštědel. Přítomnost visbreakingových zbytků tedy ještě více zhoršuje vzájemnou kompatibilitu asfaltenových a maltenových složek. Změny v disperzní stabilitě asfaltového pojiva vyvolané přidáním visbreakingových zbytků jsou proto velmi významné.

8.6.2. Postup zkoušky

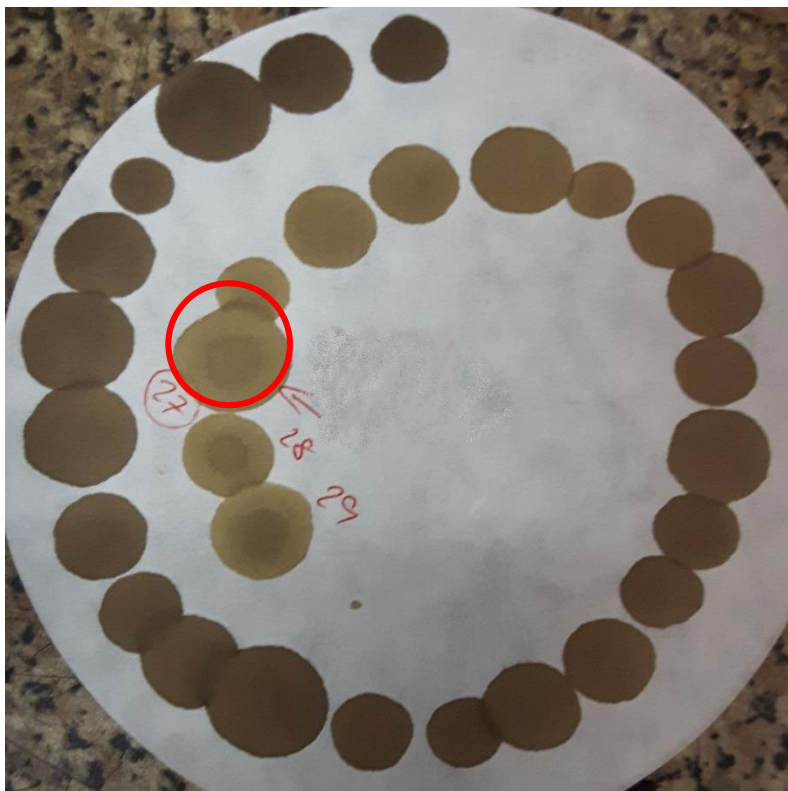
Do 100 ml Erlenmayerovy baňky je odváženo $1,000 \pm 0,005$ g asfaltového pojiva. Poté je uzavřená baňka na několik minut umístěna do laboratorní sušárny s teplotou cca $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ nad bod měknutí z důvodu rozehrátí pojiva a vytvoření tenké vrstvy pojiva na dně baňky. Po natavení, které trvá v tomto případě několik minut, se baňka vyjme a krouživým pohybem se vytvoří na dně a stěnách baňky asfaltový film. Tím je urychleno rozpouštění a jeho kvalita. Po ochlazení na laboratorní teplotu se přidá byretou celkem $10 \pm 0,1$ ml toluenu v kvalitě p.a. Krouživým pohybem se rozpouští vzorek do úplné solvatace alespoň 20 minut až 30 minut. Proces rozpouštění je velmi důležitý, neboť má zajistit úplnou solvataci jednotlivých komponent asfaltového pojiva. Nedokonalá solvatace může ovlivnit nutné množství srážedla k dosažení flokulačního bodu. Občasné promíchání vzorku krouživým pohybem je vhodné i během temperace vzorku ve vodní lázni.

Roztok se nechá cca 60 minut za občasného míchání spolu s rozpouštědly temperovat ve vodní lázni při teplotě $20 \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Před začátkem titrace se nanese skleněnou tyčinkou (dálky 200 mm a průměru 5 mm) kapka zkoušeného roztoku na filtrační papír, čímž se zjistí, zda nejsou přítomny nerozpuštěné podíly. Poté se titruje izooktanem ze skleněné byrety s dělením stupnice nejméně 0,2 ml tak, že na počátku se za stálého míchání přidá 2 ml izooktanového titrantu a při nepřerušovaném kroužení baňkou se počká cca 10 s. Poté se odebere skleněnou tyčinkou kapka roztoku a nanese se na filtrační papír. Tento postup se opakuje v pravidelném rytmu kolem 30 s v kroku přidání titrantu 1,0 ml, až se objeví zřetelná tmavší soustředná kružnice odloučeného precipitátu (sraženiny).

8.6.3. Detekce flokulačního bodu

Detekce počátku precipitace se provádí kapkovou metodou a tato kapková metoda se provádí obdobně jako v případě zkoušky posouzení jemných částic kameniva methylenovou modří. Flokulační bod je určen okamžikem, kdy je na filtračním papíře možné zřetelně identifikovat vznik sraženiny. Detekce počátku flokulačního děje může být ovlivněna u některých druhů asfaltů jeho nezřetelností, která závisí na kvalitě přítomných asfaltenů, jejich polaritě, distribuci molekulární hmotnosti a funkčnosti ochranných peptizačních činidel.

Jako referenční bod byl zvolen rozsah flokulace, kdy na rubové straně filtračního papíru lze rozeznat soustředné kružnice nebo skvrnu sraženiny. Příklad typického záznamu flokulačního bodu a vzniku sraženiny je zaznamenán na obrázku 40 červeným kroužkem.



Obrázek 40: Detekce flokulačního bodu – fotografie detailu precipitátu (sraženiny) na filtračním papíře

8.6.4. Vyjádření výsledků

Pro účely relativního srovnávání je možné vyjádřit výsledek jako poměr objemu přidaného srážedla k objemu rozpouštědla. Z hlediska korektnosti při výpočtu flokulačního bodu je nutné při stejné počáteční koncentraci asfaltu používat vztah, který zohledňuje objemovou změnu výsledného roztoku podle rovnice 8.1. Výslednou hodnotu tohoto poměru můžeme označit jako FR – „Flocculation Ratio“, která je mírou vnitřní kompatibility asfaltového pojiva.

$$FR = \frac{V_S}{V_S + V_T} \quad (8.1)$$

- FR Flokulační poměr v bodě počátku flokulace [-]
- V_S Počáteční objem titrovaného roztoku [ml]
- V_T Objem přidaného titrantu [ml]

Na základě zkušeností se ukazuje, že je z praktického hlediska výhodnější používat pouze jednu navážku asfaltového pojiva v konstantním množství rozpouštědla. Je smysluplné při použité koncentraci titrovat po celých mililitrech. Disperzní stabilitu asfaltového pojiva pak

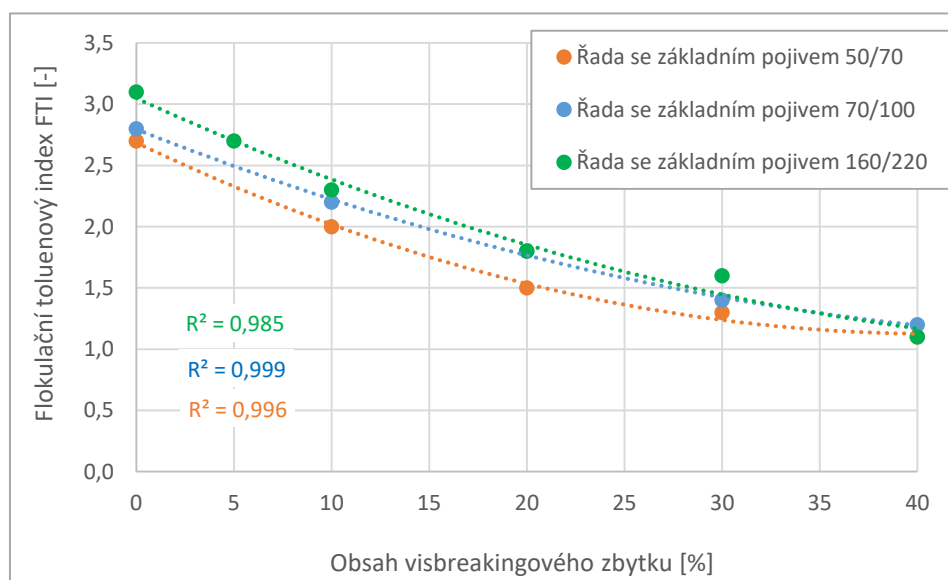
dostatečně určuje pouhý poměr objemu titrantu k výchozímu objemu titrovaného roztoku. Daný poměr se označuje jako *FTI* – „Flokulační toluenový index“ (rovnice 8.2). Z rovnice je patrné, že čím vyšší je hodnota *FTI*, tím je asfaltové pojivo schopno pojmout více titrantu a tím lze také usuzovat na vyšší disperzní stabilitu tohoto asfaltového pojiva.

$$FTI = \frac{V_T}{V_S} \quad (8.2)$$

- FTI* Flokulační Toluenový Index [-]
 V_T Objem přidaného titrantu [ml]
 V_S Počáteční objem titrovaného roztoku, obvykle 10 ml [ml]

8.6.5. Interpretace výsledků a obor použitelnosti metody

Uvedená titrační metoda jednoznačně vyjadřuje projevy změn vlastností pojiv vyvolaných přidávkem visbreakingových reziduí. Na obrázku 41 je patrné, jak se projevuje zvyšující se obsah visbreakingového zbytku na poklesu hodnoty *FTI* s různými výchozími asfaltovými pojivy obsahujícími různé množství visbreakingového zbytku. Tyto visbreakingové zbytky byly v rámci projektu [141] laboratorně přidávány do silničních asfaltů bez následné stabilizace na oxidačních kolonách. Z obrázku je patrné, že hodnota indexu disperzní stability *FTI* těchto modelových pojiv se nachází v rozsahu 1,1 až 3,1 a že s rostoucím množstvím visbreakingového zbytku dochází k poklesu hodnoty flokulačního toluenového indexu, což souvisí se snižováním (zhoršováním) disperzní stability pojiv. Hodnoty indexu disperzní stability *FTI* zvětšené skupiny vybraných komerčně dodávaných silničních asfaltů třídy 50/70 a 70/100 se nejčastěji pohybovaly v rozmezí 1,2 až 3,0 (obrázek 66).



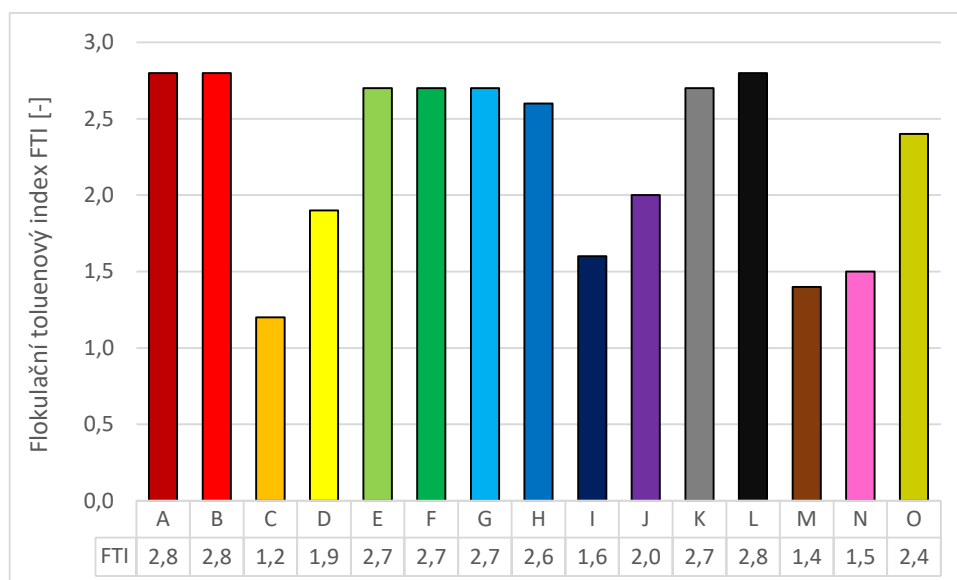
Obrázek 41: Korelace mezi obsahem visbreakingových zbytků a parametrem disperzní stability vyjádřeným hodnotou flokulačního toluenového indexu *FTI*

8.7. Hodnoty flokulačního toluenového indexu souboru silničních asfaltů

Pro výše uvedený soubor silničních asfaltů (A až O) byly pomocí jednobodové precipitační (srážecí) titrace určeny hodnoty flokulačního toluenového indexu, které jsou shrnuty v obrázku 42. Z výsledků je patrné, že rozsah hodnot *FTI* byl pro tento omezený soubor silničních asfaltů v rozmezí 1,2 až 2,8. Z obrázku je také patrné, že pojiva se rozdělila převážně do dvou skupin:

- pojiva s neporušenou disperzní stabilitou s hodnotou *FTI* vyšší než 2,0 (pojiva A, B, E, F, G, H, K, L a O),
- pojiva s problematickou disperzní stabilitou s hodnotou *FTI* nižší než 2,0 (pojiva C, D, I, M a N).

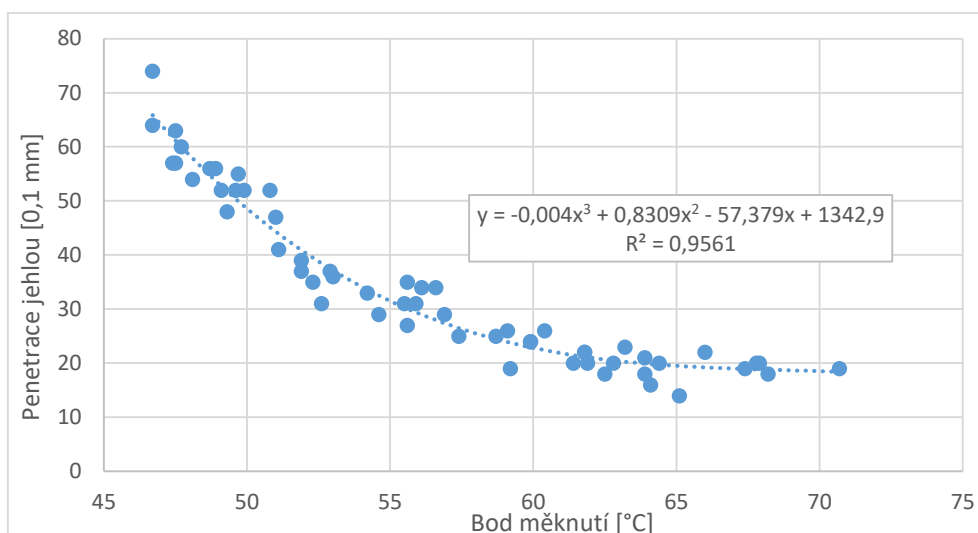
Nejnižší hodnoty *FTI*, tzn. nejhorší disperzní stabilitu, dosahovaly silniční asfalty C, M a N, přičemž všechna tato tři pojiva jsou od stejného výrobce (I).



Obrázek 42: Disperzní stabilita vyjádřená hodnotou flokulačního toluenového indexu *FTI*

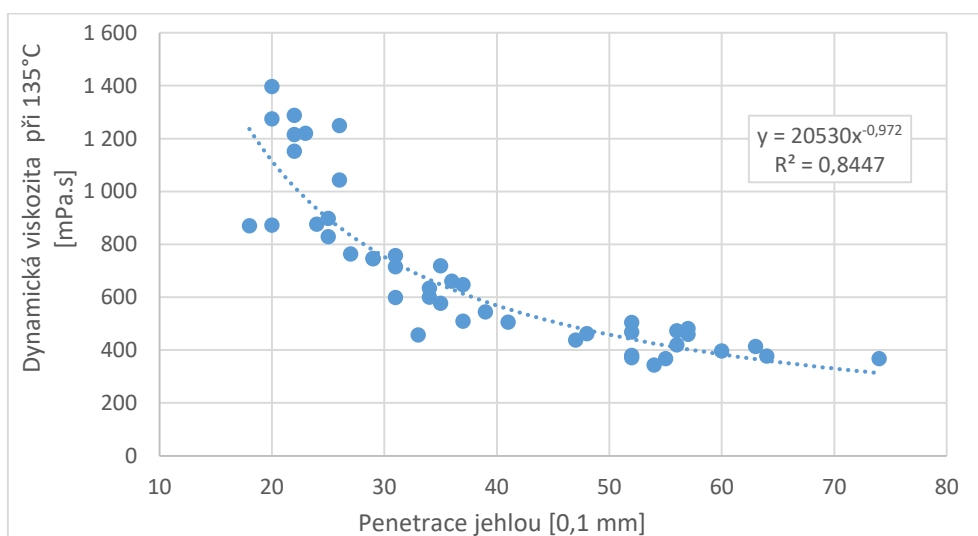
8.8. Závislosti mezi výsledky vybraných zkoušek pojiv

Tato kapitola shrnuje nejzajímavější vzájemné závislosti, které byly nalezeny mezi výsledky jednotlivých zkoušek pojiv. Obrázek 43 zobrazuje závislost mezi hodnotami penetrace jehlou a bodem měknutí, přičemž byly použity všechny výsledky včetně výsledků penetrace jehlou a bodu měknutí pojiv zestárlých různými metodami. Při použití polynomické spojnice trendu třetího stupně byl zjištěn koeficient determinace $R^2 = 0,956$, což je poměrně silná závislost. Vzhledem k tomu, že se ve srovnání nachází pouze silniční asfalty, bylo možné očekávat takto silnou korelaci. Jinak by tomu ovšem bylo při porovnání penetrace a bodu měknutí modifikovaných asfaltů.

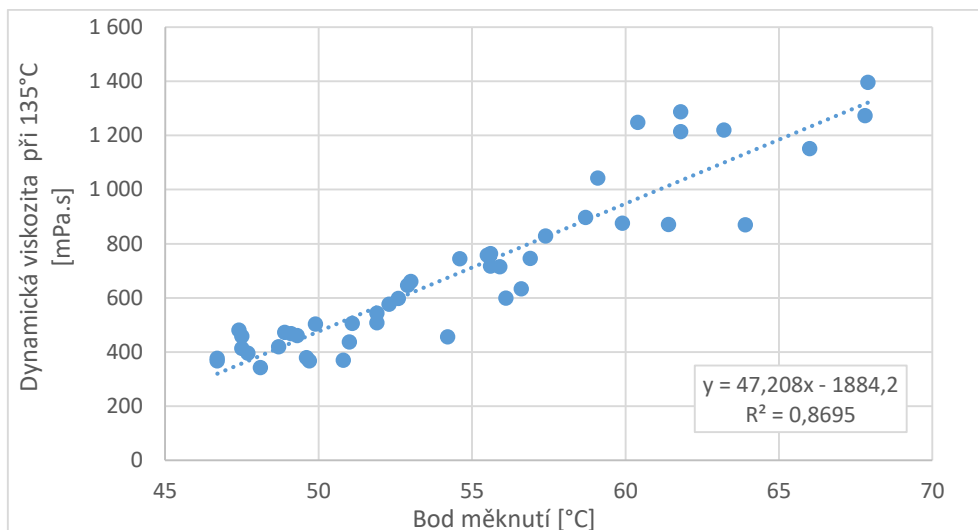


Obrázek 43: Závislost mezi výsledky zkoušky penetrace jehlou a bodu měknutí

Výsledky dynamické viskozity jednotlivých pojiv stanovené při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s⁻¹ byly porovnány s výsledky penetrace jehlou (obrázek 44) a s výsledky bodu měknutí (obrázek 45). Při provedení jedné ze zkoušek je tedy s vysokou pravděpodobností možné předpovědět hodnotu výsledku jiné zde uvedené zkoušky. Opět lze předpokládat, že při vložení modifikovaných asfaltů do zkušebního souboru by se kvalita korelace značně snížila.

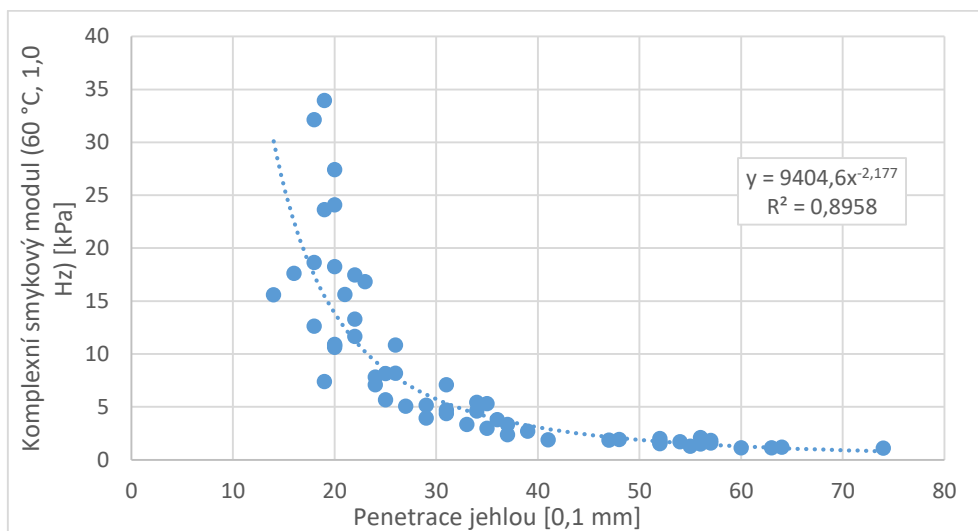


Obrázek 44: Závislost dynamické viskozity a penetrace jehlou

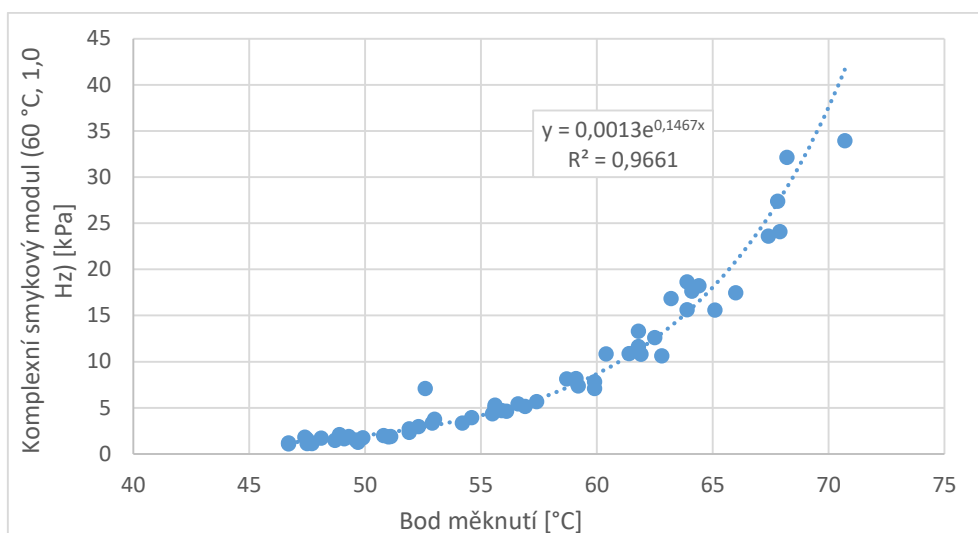


Obrázek 45: Závislost dynamické viskozity a bodu měknutí

Ještě silnější korelační vztahy bylo možné nalézt pro závislost mezi komplexním smykovým modulem a penetrací jehlou a komplexním smykovým modulem a bodem měknutí souboru nezestárých i zestárých (RTFOT, 3xRTFOT, RTFOT+PAV) poživ, což je vidět na obrázku 46 a 47.

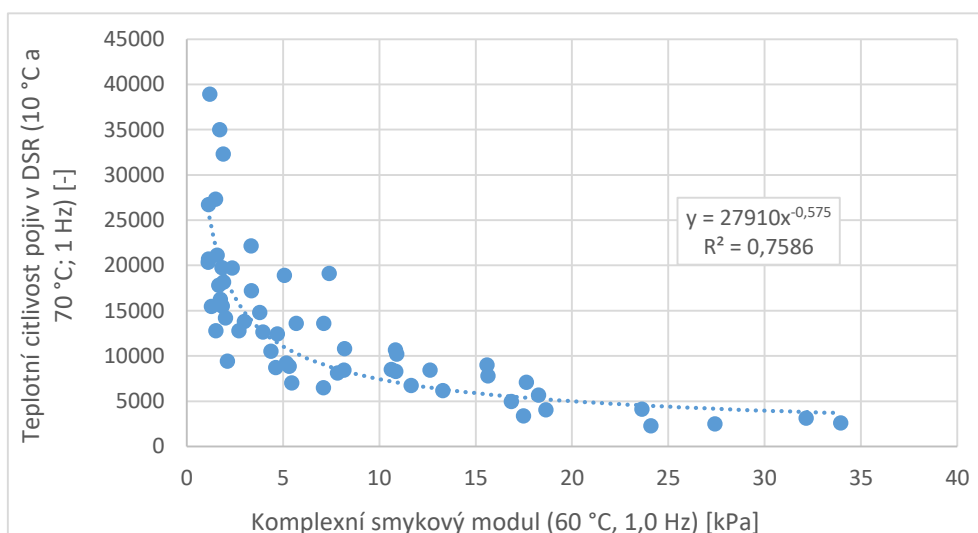


Obrázek 46: Závislost komplexního smykového modulu a penetrace jehlou



Obrázek 47: Závislost komplexního smykového modulu a bodu měknutí

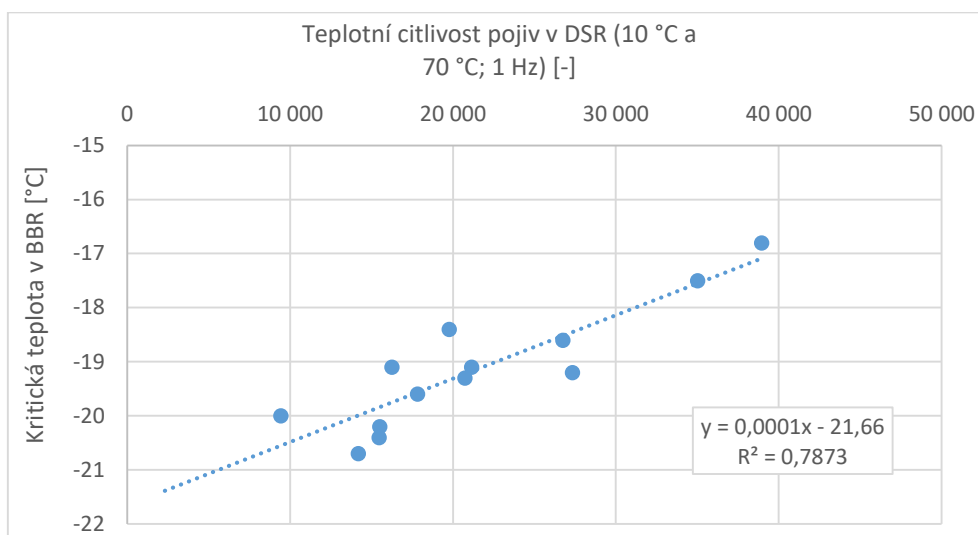
V obrázku 48 je zaznamenána poměrně znatelná závislost ($R^2 = 0,76$) teplotní citlivosti souboru nezestárých i zestárých pojiv (určené jako podíl komplexního smykového modulu stanoveného při teplotě 10 °C a 70 °C) a komplexního smykového modulu zjištěného při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz. Z obrázku vyplývá, že s rostoucí hodnotou komplexního smykového modulu nezestárého pojiva, stanovenou při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz, se zvyšuje teplotní citlivost pojiva. Zajímavé je, že mezi teplotní citlivostí pojiv a náchylností ke stárnutí, vyjádřenou podílem komplexního smykového modulu pojiv zestárých metodou 3xRTFOT a nezestárých pojiv, nebyla nalezena silná závislost (mocnná závislost s $R^2 = 0,45$). Z tohoto omezeného souboru silničních asfaltů je tedy možné usuzovat, že neexistuje vztah mezi teplotní citlivostí silničních asfaltů a jejich náchylností ke stárnutí.



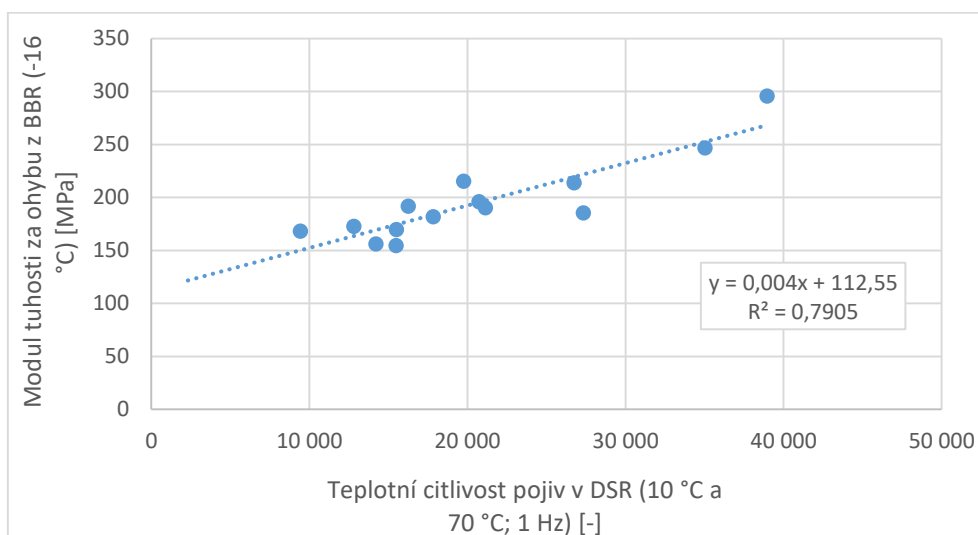
Obrázek 48: Závislost výsledků teplotní citlivosti a komplexních smykových modulů pojiv

Poměrně silnou lineární závislost ($R^2 = 0,79$) bylo možné nalézt i mezi výsledky dolní kritické teploty zjištěné v BBR a teplotní citlivostí pojiv stanovenou v DSR (obrázek 49), přičemž teplotní citlivost byla stanovena jako podíl komplexního smykového modulu stanoveného při

teplotě 10 °C a komplexního smykového modulu stanoveného při teplotě 70 °C (vždy při frekvenci 1,0 Hz). Z toho lze usuzovat, že nízkoteplotní chování pojiv je ovlivněno jejich teplotní citlivostí neboli změnami vlastností pojiva způsobenými změnami teploty – čím je vyšší teplotní citlivost, tím je vyšší (horší) dolní kritická teplota. Rovněž mezi uvedenou teplotní citlivostí pojiv a jejich modulem tuhosti za ohybu stanoveným v BBR při teplotě -16 °C bylo možné nalézt znatelnou lineární korelaci ($R^2 = 0,79$), která je patrná z obrázku 50. S rostoucí teplotní citlivostí pojiv roste i jejich modul tuhosti za ohybu.



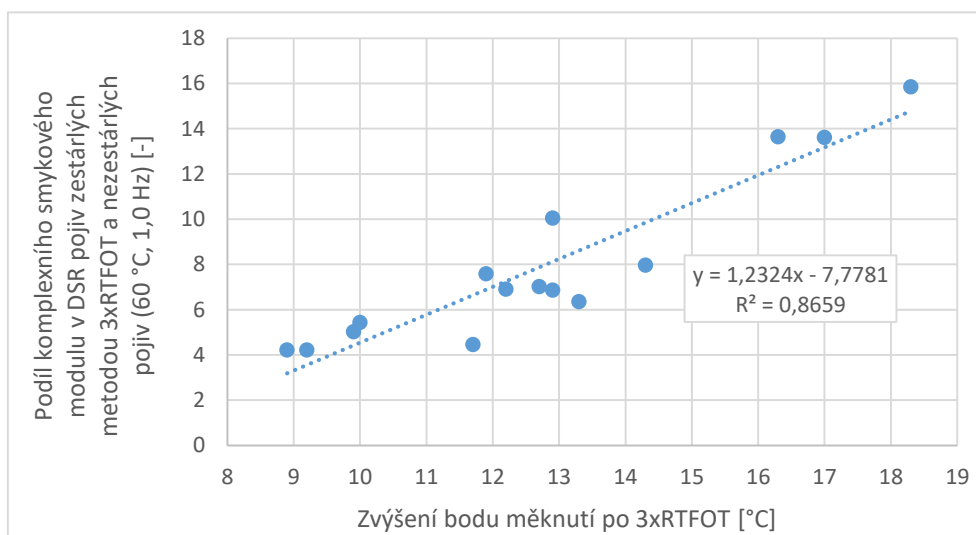
Obrázek 49: Závislost teplotní citlivosti pojiv (stanovené v DSR jako podíl komplexního smykového modulu stanoveného při teplotě 10 °C a 70 °C a frekvenci 1 Hz) a dolní kritické teploty zjištěné v BBR



Obrázek 50: Závislost teplotní citlivosti pojiv a modulu tuhosti za ohybu zjištěného v BBR při teplotě -16 °C

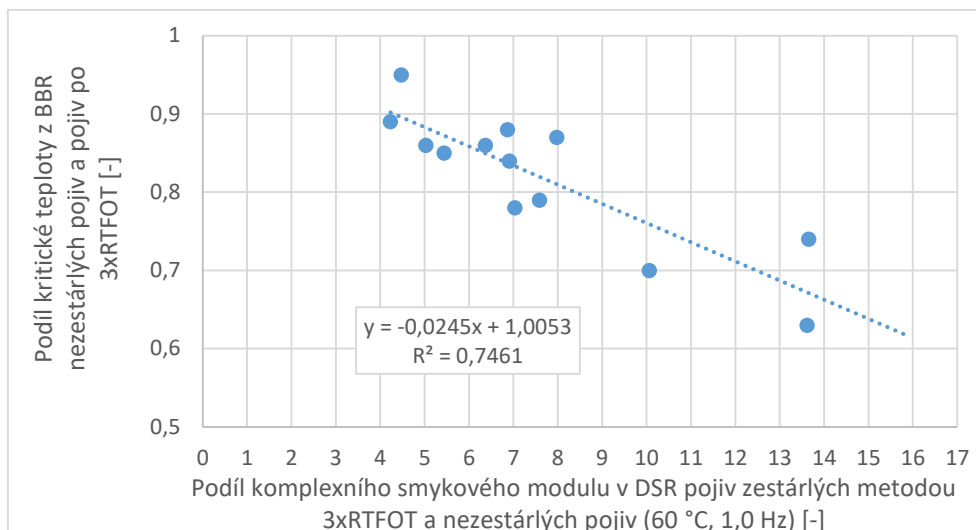
Lineární závislost mezi indexem stárnutí (určeným v DSR při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz jako podíl komplexního smykového modulu pojiv zestárých metodou 3xRTFOT a nezestárých pojiv) a zvýšením bodu měknutí po 3xRTFOT je patrná na obrázku 51 ($R^2 = 0,87$).

Čím je větší změna bodu měknutí zapříčiněná stárnutím, tím více je stárnutím ovlivněn i komplexní smykový modul. Při hodnocení závislosti indexu stárnutí určeného jako podíl komplexního smykového modulu poživ zestárých metodou 3xRTFOT a komplexního smykového modulu nezestárých poživ a indexu stárnutí určeného jako podíl komplexního smykového modulu poživ zestárých metodou RTFOT+PAV a komplexního smykového modulu nezestárých poživ byla získána poměrně vysoká hodnota koeficientu determinace ($R^2 = 0,92$), takže je možné říct, že podobné závislosti by platily i pro stárnutí metodou RTFOT+PAV.



Obrázek 51: Závislost indexu stárnutí (podíl komplexního smykového modulu v DSR poživ zestárých metodou 3xRTFOT a nezestárých poživ, 60 °C, 1,0 Hz) a zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT

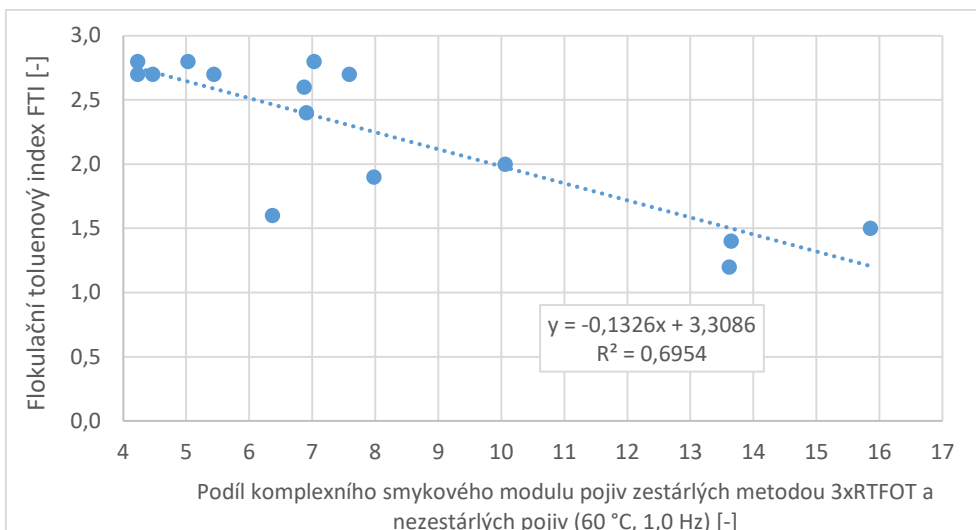
Na obrázku 52 je graficky znázorněna lineární závislost ($R^2 = 0,75$) mezi výsledky změny kritické teploty určené v BBR zapříčiněné stárnutím metodou 3xRTFOT (tzn. podílu kritických teplot nezestárých poživ a poživ zestárých metodou 3xRTFOT) a indexem stárnutí, určeným v DSR při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz jako podíl komplexního smykového modulu poživ zestárých metodou 3xRTFOT a nezestárých poživ. Čím je vyšší index stárnutí, tím je nižší podíl kritických teplot čili větší vliv stárnutí na změnu nízkoteplotního chování. Graf tedy zobrazuje, že pojiva, která jsou stárnutím větší měrou ovlivněna při vysokých teplotách, jsou citlivější na stárnutí i při teplotách nízkých.



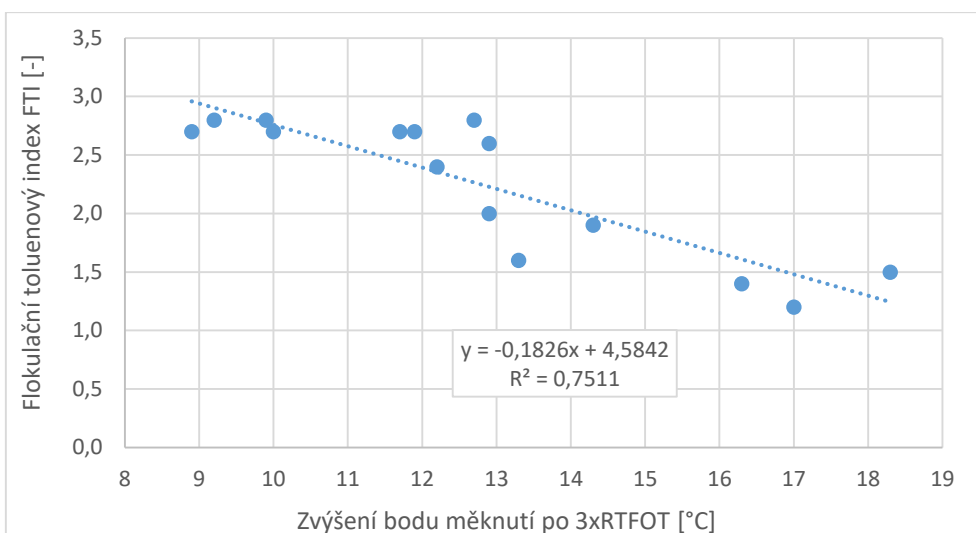
Obrázek 52: Závislost změny kritické teploty určené v BBR zapříčiněné stárnutím metodou 3xRTFOT a indexu stárnutí (podíl komplexního smykového modulu v DSR poživ zestárých metodou 3xRTFOT a nezestárých poživ, 60 °C, 1,0 Hz)

Obrázek 53 prezentuje zajímavou lineární korelační závislost ($R^2 = 0,70$) mezi disperzní stabilitou patnácti silničních asfaltů vyjádřenou hodnotou flokulačního toluenového indexu *FTI* a indexem stárnutí, určeným v DSR při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz jako podíl komplexního smykového modulu poživ zestárých metodou 3xRTFOT a nezestárých poživ. Čím je vyšší (lepší) hodnota flokulačního toluenového indexu nezestárého pojiva, tím je nižší (lepší) index stárnutí (tj. nižší změna vlastností pojiva zapříčiněná stárnutím). Pokud by se navíc ze srovnání odstranila odlehlá hodnota pojiva I, bylo by dosaženo koeficientu determinace v hodnotě 0,85.

Na obrázku 54 je dokumentována lineární závislost s koeficientem determinace 0,75 hodnot flokulačního toluenového indexu a zvýšení bodu měknutí po stárnutí metodou 3xRTFOT. Čím nižší (horší) je hodnota flokulačního toluenového indexu, tím více je stárnutím ovlivněna hodnota změny bodu měknutí, takže lze říct, že pojivo více stárne.



Obrázek 53: Závislost flokulačního toluenového indexu a indexu stárnutí (podíl komplexního smykového modulu v DSR pojev zestárých metodou 3xRTFOT a nezestárých pojev, 60 °C, 1,0 Hz)



Obrázek 54: Závislost flokulačního toluenového indexu a zvýšení bodu měknutí pojev po 3xRTFOT

9. VLASTNOSTI ROZŠÍŘENÉHO SOUBORU SILNIČNÍCH ASFALTŮ

Z důvodu ověření závislosti mezi disperzní stabilitou silničních asphaltů vyjádřenou hodnotami flokulačního toluenového indexu a jejich náchylností ke stárnutí a dále z důvodu nutnosti nastavení kritického parametru do sestavované certifikované metodiky hodnotící náchylnost silničních asphaltů k termooxidačnímu stárnutí [55] byl rozšířen zkušební soubor testovaných silničních asphaltů na celkem 47 poživ. Jednalo se o 43 silničních asphaltů třídy 50/70 a 4 silniční asfalty třídy 70/100.

9.1. Výsledky zkoušek rozšířeného souboru silničních asphaltů

Na pojivech rozšířeného souboru poživ byly provedeny zkoušky stanovení penetrace jehlou, bodu měknutí a komplexní smykové moduly a fázové úhly v DSR. Všechny vzorky byly dále zestárnuty metodou 3xRTFOT a uvedené zkoušky se zopakovaly i na těchto zestárklých pojivech. Seznam poživ je uveden v tabulce 6 včetně výsledků zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí a komplexních smykových modulů a fázových úhlů, stanovených v DSR při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz.

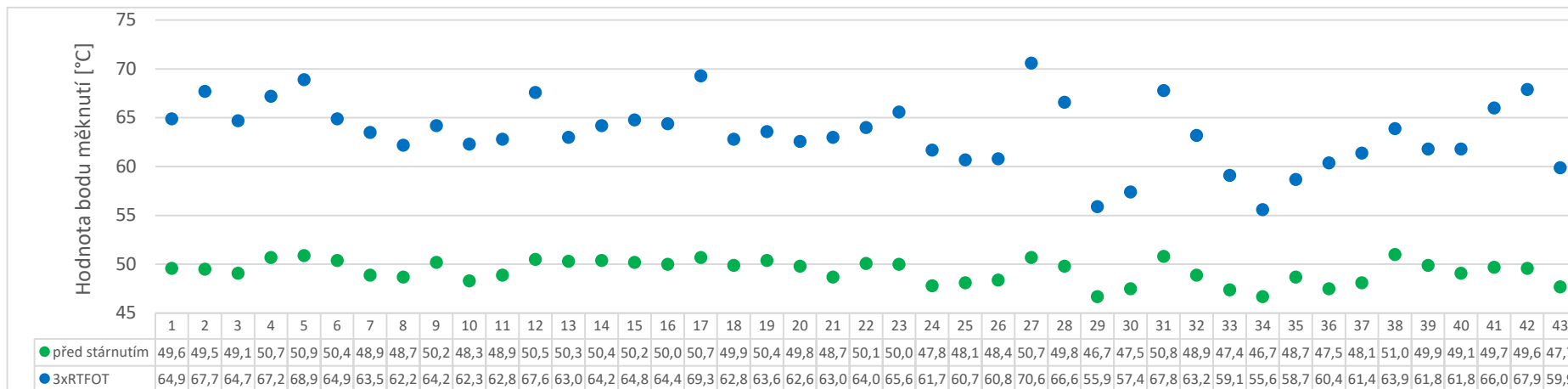
V průběhu řešení projektu [141] byla odebírána asfaltová pojiva na obalovnách spoluřešitele projektu Skanska a.s. a navíc byly největší zpracovatelské společnosti vyrábějící asfaltové směsi požádány o dodání asfaltových poživ, která se při skladování, výrobě asfaltové směsi nebo pokládce nebo hutnění vrstvy chovala nestandardně. Tato problémová pojiva jsou v tabulce vyznačena červeně (pojiva číslo 25, 27, 28, 42, 43). Žlutou barvou jsou zvýrazněny výsledky penetrace jehlou a bodu měknutí, které neodpovídají požadavku normy ČSN 65 7204 [10]. Z tabulky je patrné, že všechna pojiva, chovající se při pokládce asfaltové směsi nestandardně, splnila požadavky uvedené normy na hodnotu penetrace jehlou i bodu měknutí.

Tabulka 6: Rozšířený soubor vzorků silničních asfaltů

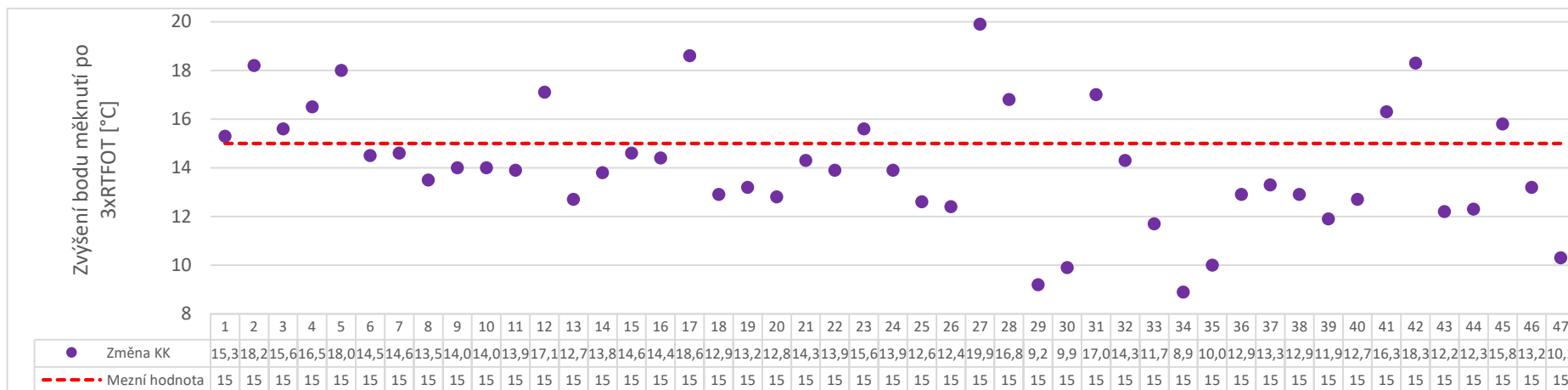
Číslo	Třída	Penetrace jehlou [0,1 mm]	Bod měknutí [°C]	Komplexní smykový modul (60 °C, 1,0 Hz) [kPa]	Fázový úhel (60 °C, 1,0 Hz) [°]
1	50/70	55	49,6	1,72	85,0
2	50/70	57	49,5	1,63	83,7
3	50/70	60	49,1	1,43	84,3
4	50/70	52	50,7	1,72	83,9
5	50/70	52	50,9	1,84	83,5
6	50/70	47	50,4	1,99	85,3
7	50/70	56	48,9	1,49	86,2
8	50/70	58	48,7	1,39	87,0
9	50/70	54	50,2	1,81	85,1
10	50/70	59	48,3	1,47	86,5
11	50/70	58	48,9	1,43	87,0
12	50/70	54	50,5	1,73	84,2
13	50/70	49	50,3	1,87	86,7
14	50/70	55	50,4	1,71	85,4
15	50/70	56	50,2	1,57	85,0
16	50/70	56	50,0	1,63	83,9
17	50/70	54	50,7	1,98	83,0
18	50/70	51	49,9	1,93	85,8
19	50/70	48	50,4	1,90	85,2
20	50/70	52	49,8	1,67	85,8
21	50/70	60	48,7	1,64	85,6
22	50/70	53	50,1	1,80	84,8
23	50/70	52	50,0	1,81	84,9
24	50/70	62	47,8	1,40	87,1
25	50/70	55	48,1	1,41	86,9
26	50/70	54	48,4	1,42	86,8
27	50/70	55	50,7	1,48	83,1
28	50/70	58	49,8	1,44	84,2
29	70/100	74	46,7	1,11	87,0
30	70/100	63	47,5	1,13	87,6
31	50/70	52	50,8	2,01	81,9
32	50/70	56	48,9	2,11	83,8
33	50/70	57	47,4	1,83	87,2
34	50/70	64	46,7	1,20	87,5
35	50/70	56	48,7	1,50	86,7
36	50/70	57	47,5	1,58	86,3
37	50/70	54	48,1	1,71	87,0
38	50/70	47	51,0	1,85	83,8
39	50/70	52	49,9	1,75	86,0
40	50/70	52	49,1	1,66	85,6
41	50/70	55	49,7	1,28	84,4
42	50/70	52	49,6	1,52	83,3
43	50/70	60	47,7	1,13	86,1
44	50/70	46	50,7	1,89	86,4
45	50/70	56	54,9	2,78	76,9
46	70/100	75	52,4	1,80	78,7
47	70/100	69	46,0	0,95	88,7

Z hodnocených poživ nesplnila pojiva číslo 6, 13, 19, 30, 38, 44 a 47 požadovaný rozsah hodnoty penetrace jehlou. Nižší hodnoty penetrace u těchto poživ mohou být způsobeny skladováním pojiva na obalovně při vysoké teplotě před odběrem vzorků. V normě ČSN 65 7204 [10] je pro nezestárlé silniční asfalty třídy 50/70 uveden požadovaný rozsah hodnoty bodu měknutí 46 °C až 54 °C a pro asfalty třídy 70/100 je uveden požadovaný rozsah hodnoty bodu měknutí 43 °C až 51 °C. Tomuto požadavku nevyhověla pojiva číslo 45 a 46, což může být opět způsobeno dlouhodobým skladováním pojiva na obalovně při vysoké teplotě před odběrem vzorků.

Na obrázku 55 je zaznamenáno srovnání hodnot bodu měknutí nezestárlých poživ a poživ zestárlých metodou 3xRTFOT rozšířeného souboru silničních asfaltů a na obrázku 56 jsou srovnány hodnoty zvýšení bodu měknutí rozšířeného souboru silničních asfaltů po stárnutí metodou 3xRTFOT. Průměrná hodnota bodu měknutí silničních asfaltů byla 49,5 °C a průměrná hodnota poživ zestárlých metodou 3xRTFOT byla 63,5 °C. Hodnota bodu měknutí se stárnutím 3xRTFOT zvýšila v poměrně širokém rozmezí (8,9 °C až 19,9 °C), přičemž průměrná hodnota byla 14,0 °C. Na základě těchto výsledků a výsledků uvedených v předcházející kapitole byla zpracována metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí [53], která byla vytvořena v rámci projektu [141]. Uvedená metodika požaduje pro silniční asfalty třídy 50/70 a 70/100 hodnotu zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT menší než 15 °C. Tomuto požadavku nevyhovovalo 14 poživ ze 47 hodnocených poživ, což je 29,8 %. Tato vysoká hodnota je s největší pravděpodobností zapříčiněna tím, že řešení projektu se zaměřilo na pojiva, která se již při výrobě asfaltových směsí chovala nestandardně. Uvedená metodika je stručně představena v kapitole 9.3.

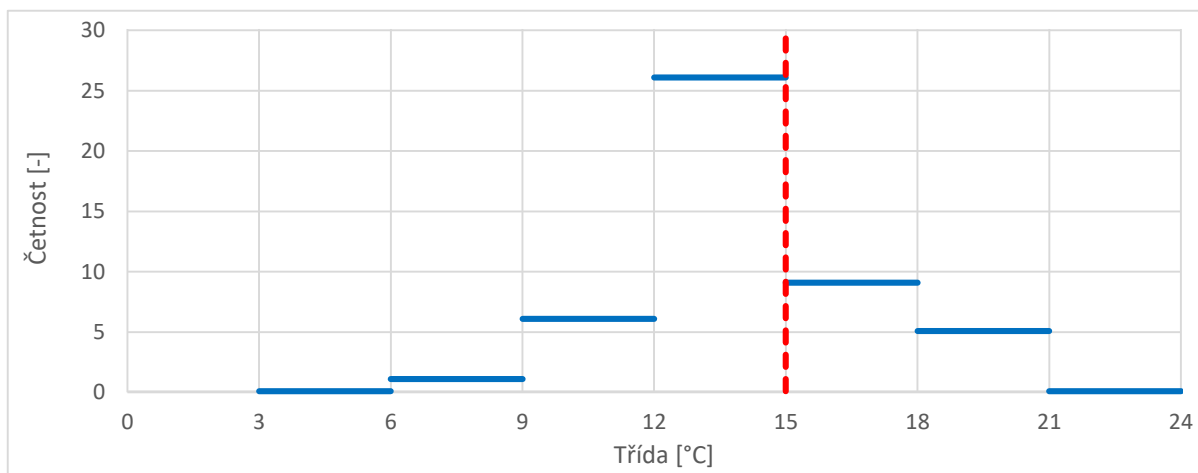


Obrázek 55: Hodnota bodu měknutí nezestárých silničních asfaltů rozšířeného souboru a asfaltů zestárých metodou 3xRTFOT



Obrázek 56: Hodnota zvýšení bodu měknutí silničních asfaltů rozšířeného souboru po stárnutí metodou 3xRTFOT

V obrázku 57 jsou uvedeny četnosti hodnoty zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT pro třídy rozdělené po 3 °C, ze kterých je vidět, že nejvíce pojiv je umístěno ve třídě 12 °C až 15 °C. Graf má přibližně tvar normálního rozdělení. Čárkovanou čarou je zvýrazněn požadavek zvýšení bodu měknutí 15 °C, který podle výše uvedené metodiky rozlišuje pojiva odolná vůči stárnutí od pojiv náchylných ke stárnutí.



Obrázek 57: Četnost hodnoty zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT pro třídy rozdělené po 3 °C

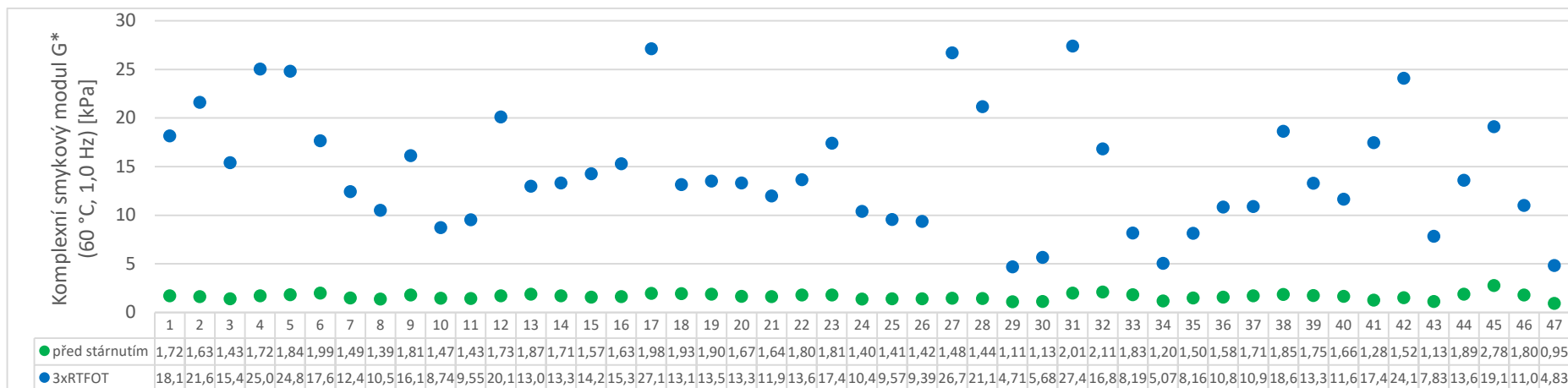
Při hodnocení pojiv, která vykazovala problematické chování již při pokládce asfaltové směsi s tímto pojivem a hutnění vrstvy (číslo 25, 27, 28, 42, 43), dosáhla tři z těchto pojiv (číslo 27, 28, 42) vyšší hodnoty zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT než 15 °C. Průměrné zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT těchto pěti pojiv bylo 16,0 °C. Zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT je ovšem vhodné spíše pro hodnocení životnosti pojiva než pro hodnocení jeho zpracovatelnosti.

V obrázku 58 je uveden souhrn výsledků hodnoty komplexního smykového modulu stanoveného při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz nezestárých pojiv i pojiv po 3xRTFOT a v obrázku 59 jsou uvedeny výsledky fázových úhlů stejných pojiv. Průměrná hodnota komplexního smykového modulu nezestárých pojiv byla 1,64 kPa a pojiv zestárých metodou 3xRTFOT 14,53 kPa. Průměrná hodnota fázového úhlu nezestárých pojiv byla 85,1 ° a pojiv zestárých metodou 3xRTFOT 73,6 °.

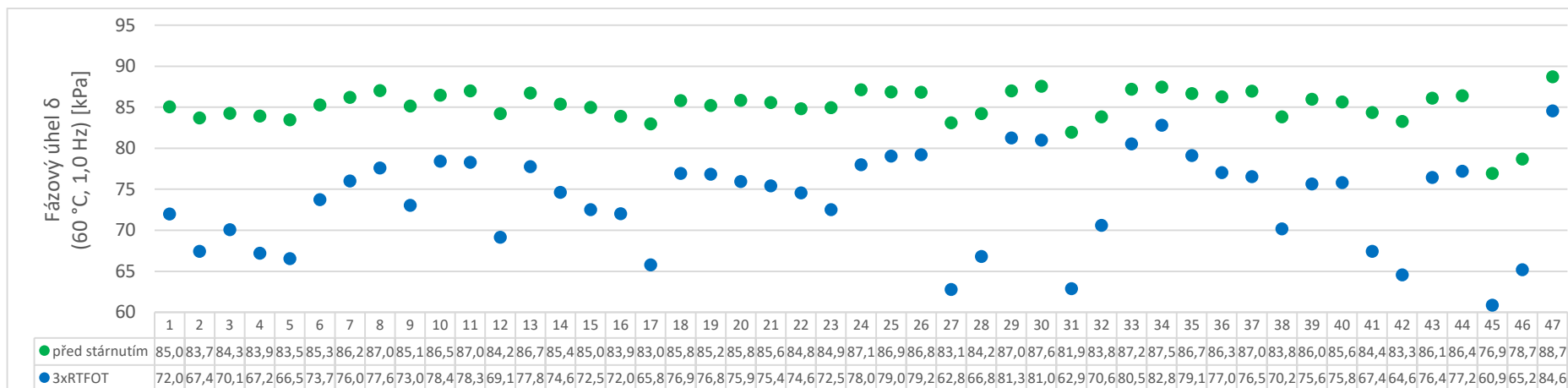
V obrázku 60 je uvedeno srovnání podílů komplexních smykových modulů pojiv zestárých metodou 3xRTFOT a nezestárých pojiv, které byly stanoveny při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz a obrázek 61 shrnuje hodnoty podílu fázového úhlu pojiv po 3xRTFOT a nezestárých pojiv, který se pohyboval v rozmezí 0,76 až 0,95 s průměrnou hodnotou 0,86. Z výsledků je patrné, že komplexní smykový modul se stárnutím 3xRTFOT zvýšil 4,2krát až 18,0krát, což je značné rozpětí výsledků a je možné říct, že pojiva mají značně rozdílnou náchylnost ke stárnutí. Průměrná hodnota tohoto zvýšení je 8,8násobek. Také lze říct, že zkouška komplexního smykového modulu v DSR má silnou rozlišovací schopnost vhodnou pro hodnocení stárnutí pojiv. Pouze dvě pojiva (číslo 27 a 42) nesplnila maximální požadovaný nárůst komplexního smykového modulu (15tinásobek), který je uveden v metodice [53] a je tudíž patrné, že tento požadavek by bylo možné dalším výzkumem upřesnit (např. snížit na 10tinásobek). V tom případě by tomuto upravenému požadavku nevyhovělo 13 pojiv –

stejných, která nevyhověla požadavku na zvýšení bodu měknutí po laboratorní simulaci stárnutí metodou 3xRTFOT (15 °C).

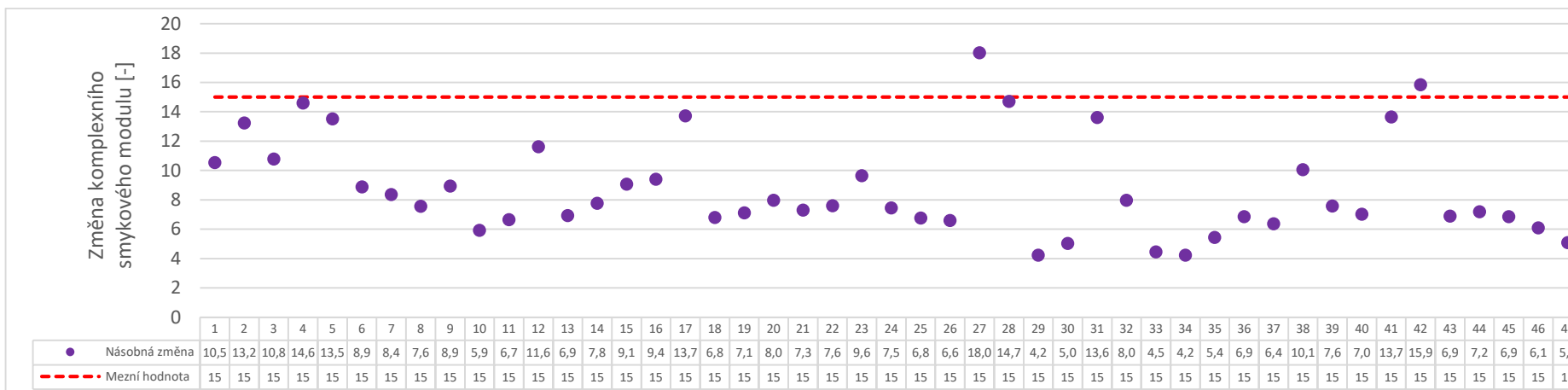
Při hodnocení pojiv, která vykazovala problematické chování již při pokládce asfaltové směsi s tímto pojivem a hutnění vrstvy (číslo 25, 27, 28, 42, 43) dosáhla dvě z těchto pojiv (číslo 27, 42) vyšší nárůst komplexního smykového modulu po 3xRTFOT než 15násobek. Průměrné zvýšení komplexního smykového modulu po 3xRTFOT těchto pěti pojiv bylo 12,5násobek. Sledování hodnoty zvýšení komplexního smykového modulu po 3xRTFOT je ovšem vhodné spíše pro hodnocení životnosti pojiva než pro hodnocení jeho zpracovatelnosti.



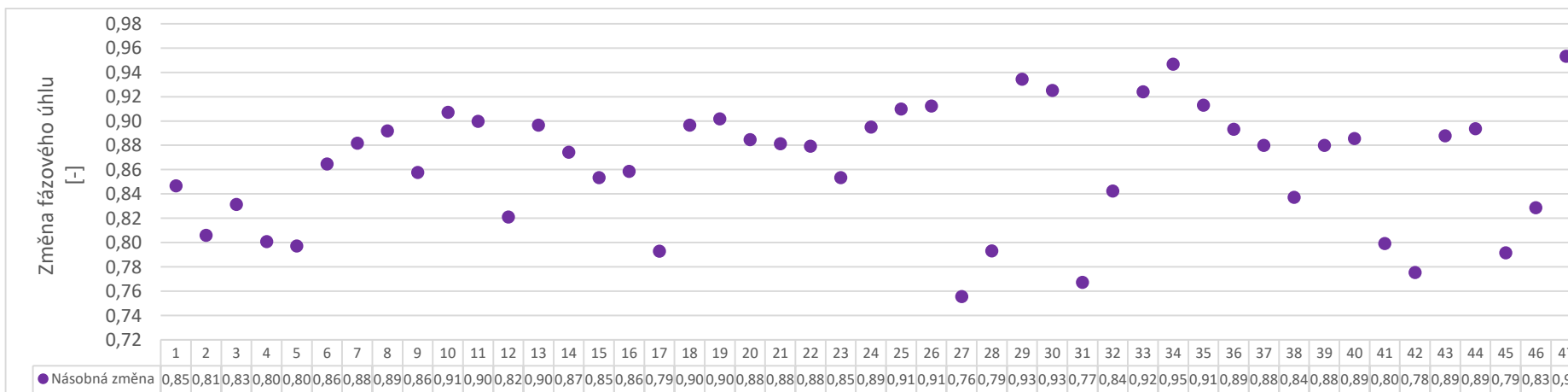
Obrázek 58: Hodnota komplexního smykového modulu nezestárých pojiv a pojiv po 3xRTFOT při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz



Obrázek 59: Hodnota fázového úhlu nezestárých pojiv a pojiv po 3xRTFOT při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz



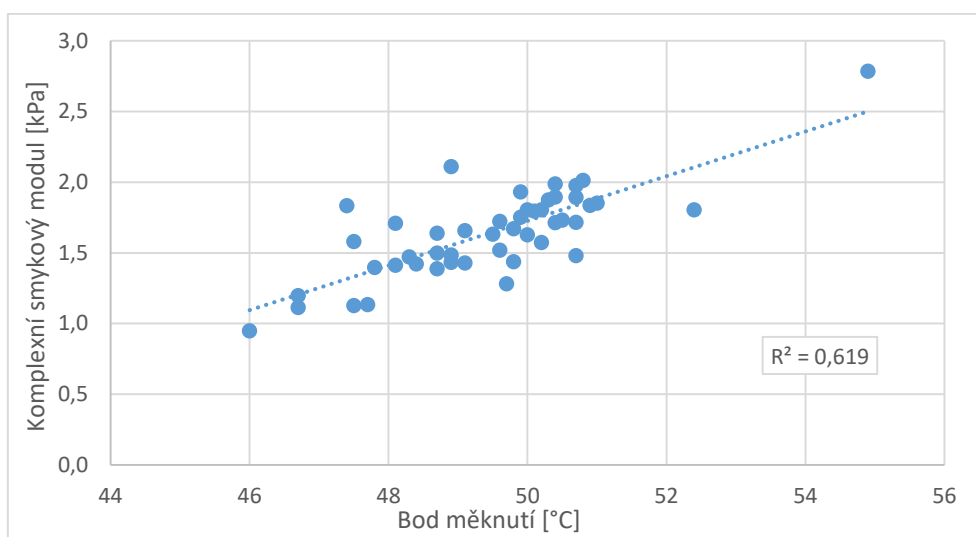
Obrázek 60: Podíl komplexního smykového modulu pojiv po 3xRTFOT a nezestárých pojiv při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz



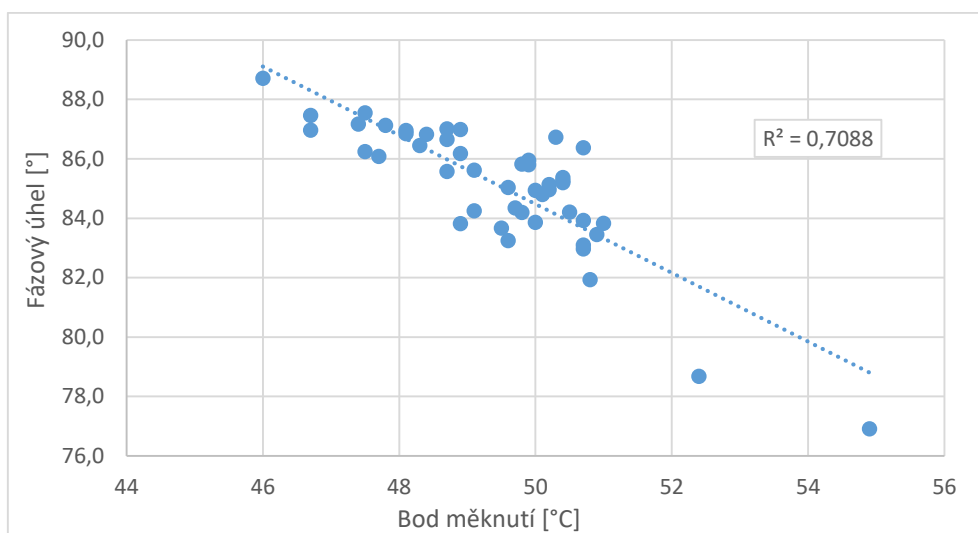
Obrázek 61: Podíl fázového úhlu pojiv po 3xRTFOT a nezestárých pojiv při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz

9.2. Závislosti mezi výsledky zkoušek rozšířeného souboru pojiv

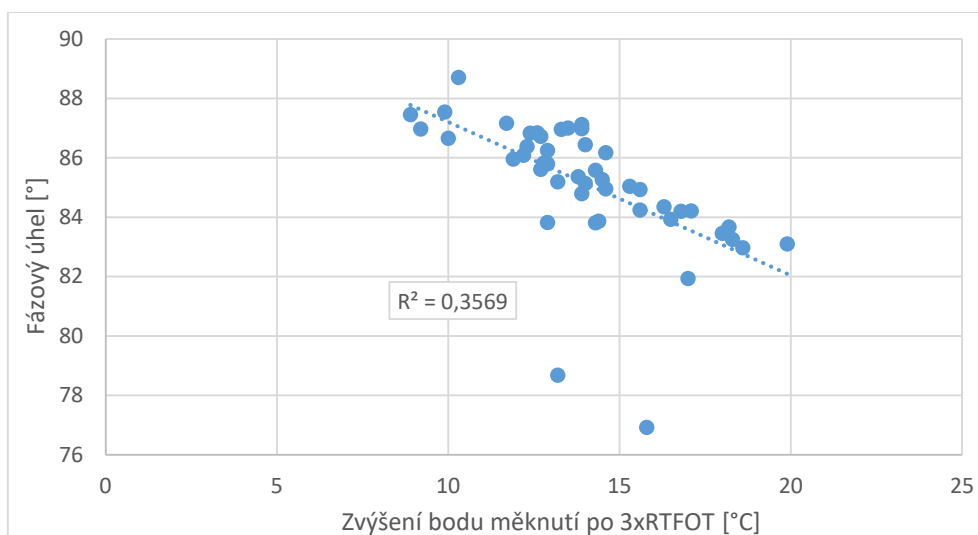
Mezi některými výsledky jednotlivých zkoušek rozšířeného souboru pojiv byly zjištěny korelační závislosti. Znatelnou lineární korelaci ($R^2 = 0,62$) bylo možné nalézt mezi hodnotami bodu měknutí a komplexních smykových modulů (60 °C a 1,0 Hz), která je uvedena v obrázku 62. Obrázek 63 shrnuje lineární závislost mezi fázovým úhlem (60 °C a 1,0 Hz) a bodem měknutí ($R^2 = 0,71$). V obrázku 64 je uvedena závislost mezi fázovým úhlem a zvýšením bodu měknutí po 3xRTFOT s nízkou hodnotou koeficientu korelace ($R^2 = 0,36$). Pokud se ovšem ze závislosti odeberou dvě pojiva (45 a 46), která byla s největší pravděpodobností vyrobena z jiné ropy než všechna ostatní pojiva, dojde ke zvýšení koeficientu korelace na $R^2 = 0,69$. Z toho lze usuzovat, že závislosti jsou platné pouze pro asfaltová pojiva vyrobená z ropy russian export blend, která se v ČR vyskytují nejčastěji. Naproti tomu mezi komplexním smykovým modulem, zjištěným na nezestárlých pojivech v DSR při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz a hodnotami zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT nebyla nalezena závislost ($R^2 = 0,13$).



Obrázek 62: Závislost mezi komplexním smykovým modulem (60 °C, 1,0 Hz) a bodem měknutí

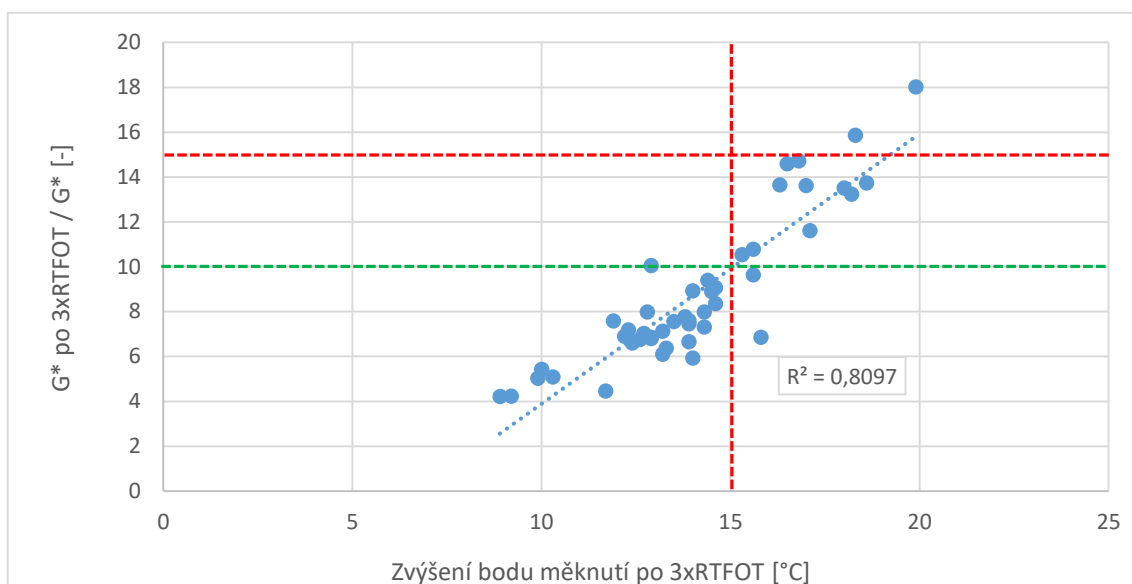


Obrázek 63: Závislost mezi fázovým úhlem (60 °C, 1,0 Hz) a bodem měknutí



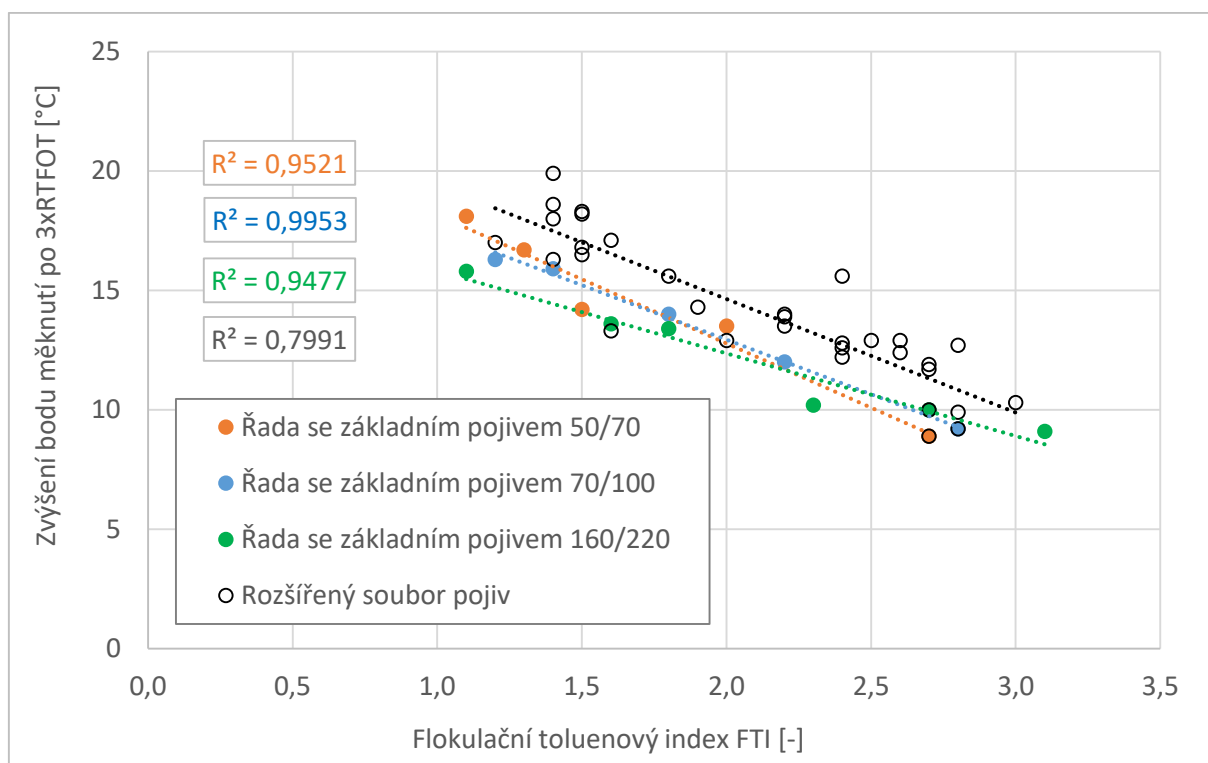
Obrázek 64: Závislost mezi fázovým úhlem (60 °C, 1,0 Hz) a zvýšením bodu měknutí po 3xRTFOT

V obrázku 65 je uvedena silná závislost mezi podílem komplexního smykového modulu po stárnutí metodou 3xRTFOT a komplexního smykového modulu nezestárlých pojiv stanovených při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz a zvýšením bodu měknutí po 3xRTFOT ($R^2 = 0,81$). Červeně jsou zvýrazněny požadavky metodiky [53] a zeleně možná úprava požadavku nárůstu hodnoty komplexního smykového modulu (na desetinásobek oproti své původní hodnotě). Tato závislost je ještě těsnější po odstranění pojiv č. 45 a 46 ($R^2 = 0,85$). Podobně silné korelace bylo možné vysledovat mezi podílem fázového úhlu po stárnutí metodou 3xRTFOT a fázového úhlu nezestárlých pojiv (při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz) a zvýšením bodu měknutí po 3xRTFOT ($R^2 = 0,82$), přičemž po odstranění pojiv č. 45 a 46 dojde ke zvýšení koeficientu determinace na $R^2 = 0,85$.



Obrázek 65: Závislost mezi podílem komplexního smykového modulu po 3xRTFOT a před stárnutím (60 °C, 1,0 Hz) a zvýšením bodu měknutí po 3xRTFOT

Zajímavé je srovnání mezi disperzní stabilitou, vyjádřenou hodnotou flokulačního toluenového indexu *FTI* a zvýšením bodu měknutí zapříčiněným stárnutím metodou 3xRTFOT rozšířeného souboru silničních asfaltů, které je patrné z obrázku 66. Spojnice trendu vykazuje lineární průběh s koeficientem determinace $R^2 = 0,80$, což opět potvrzuje, že silniční asfalty s porušenou disperzní stabilitou (nízká hodnota *FTI*) stárnou intenzivněji, než pojiva dosahující vyšších hodnot *FTI*. Ve středoevropském prostoru je porušení disperzní stability všeobecně spojováno především s vlivem visbreakingových zbytků. V obrázku jsou dále uvedeny tři řady pojiv s variujícím obsahem visbreakingového zbytku, přičemž tyto tři řady byly v rámci projektu [141] laboratorně vytvořeny ze tří různých základních silničních asfaltů (50/70, 70/100 a 160/220) bez následné stabilizace na oxidačních kolonách. Spojnice trendu těchto tří směsných pojiv dosahuje srovnatelný sklon (směrnici), jako spojnice trendu rozšířeného souboru silničních asfaltů, jejichž vzorky byly odebrány převážně na obalovnách asfaltových směsí. Spojnice trendu těchto směsných pojiv jsou ovšem umístěny mírně směrem k nižším hodnotám zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT (přibližně o 2 °C) než spojnice trendu rozšířeného souboru silničních asfaltů. To může být způsobeno právě laboratorní výrobou těchto vzorků.



Obrázek 66: Závislost mezi hodnotami flokulačního toluenového indexu a zvýšením bodu měknutí po 3xRTFOT

Porovnání výsledků zkoušky disperzní stability s hodnotami základních reologických parametrů získanými po zkoušce urychleného stárnutí 3xRTFOT tedy ukazují, že existuje výrazná korelace mezi změnami těchto parametrů po provedené zkoušce stárnutí 3xRTFOT a nominální velikostí flokulačního toluenového indexu *FTI*. Podobně silná lineární korelační závislost se vztahuje také například na flokulační toluenový index a změnu komplexního smykového modulu zapříčiněnou stárnutím 3xRTFOT ($R^2 = 0,79$). Tento poznatek tedy platí obecně pro všechny typy asfaltových pojiv, buď připravené mísením s visbreakingovými zbytky, nebo odebrané z běžně používaných silničních asfaltů.

Na základě výše uvedených výsledků bylo možné zpracovat metodiku hodnotící náchylnost silničních asfaltů k termooxidačnímu stárnutí [53], která je stručně představena v následující kapitole.

9.3. Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí

V rámci projektu TAČR č. TA03030381 „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“ [141], jehož byl autor habilitační práce hlavním řešitelem, a na základě výsledků uvedených výše, byla vyvinuta metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí [53]. Cílem metodiky je zavést jednoduchý zkušební postup simulovaného stárnutí silničních asfaltů a současně nastavit požadavky na limitní hodnoty signálních veličin. Zvolené parametry jsou snadno stanovitelné laboratorními zkouškami a zároveň překročení zvolených hraničních

hodnot indikuje problematické chování asfaltového pojiva. Celé znění metodiky, která je certifikována Ministerstvem dopravy, je uvedeno v příloze B a na stránce <https://www.pko.fce.vutbr.cz/>. Níže je pro přehlednost metodika stručně představena.

9.3.1. Podstata metody

Stárnutí asfaltového pojiva metodou RTFOT s trojnásobnou dobou trvání (3xRTFOT) vychází z postupu popsáno v normě ČSN EN 12607-1 [14] a z rakouské oborové specifikace RVS 08.97.05 [130]. Navržená metodika, vhodná pro laboratorní simulaci termooxidační stability asfaltových pojiv, využívá modifikovaný postup stárnutí asfaltového pojiva RTFOT, ve kterém je prodloužena celková doba simulovaného stárnutí na trojnásobek. Proto se tato metoda označuje jako metoda 3xRTFOT. Postup 3xRTFOT poměrně dobře identifikuje náchylnost ke zrychlenému stárnutí (například způsobenému vyšším podílem visbreakingových zbytků v asfaltovém pojivu). Metoda leží svým expozičním degradačním zatížením mezi postupy RTFOT a RTFO+PAV.

9.3.2. Postup zkoušky

Před vlastním procesem stárnutí metodou 3xRTFOT se připraví vzorek asfaltu podle normy ČSN EN 12594 [13]. Vzorek asfaltového pojiva se po zahřátí v nádobě s víkem na teplotu o 10 °C nižší, než je zkušební teplota, zhomogenizuje mícháním. V případě speciálních asfaltových pojiv nebo polymerem modifikovaných pojiv může být nezbytné připravit vzorek při vyšší teplotě. Poté se stanoví počáteční vlastnosti asfaltového pojiva před stárnutím – penetrace jehlou podle ČSN EN 1426 [37], bod měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427 [38] a komplexní smykový modul a fázový úhel podle ČSN EN 14770 [40] při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz. Pro určení komplexního smykového modulu a fázového úhlu se použije tloušťka vzorku (velikost mezery mezi destičkami dynamického smykového reometru) 1 mm a průměr destiček 25 mm. Pokud by byla při určení komplexních smykových modulů a fázových úhlů pojiva po 3xRTFOT nedostatečná tuhost měřicí soustavy přístroje, použije se tloušťka vzorku 2 mm a průměr destiček 8 mm. Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu musí být provedeno v rámci lineárně visko-elastické oblasti asfaltového pojiva. Zkouška komplexního smykového modulu a fázového úhlu je prozatím jen doporučena, protože většina silničních laboratoří v ČR není doposud vybavena zařízením DSR.

Sušárna RTFOT se přehřejí na zkušební teplotu 163 °C po dobu 60 minut. Do skleněných nádobek se nalije 35,0 g ± 0,5 g vzorku asfaltového pojiva. Počet skleněných nádobek musí být dostatečný k provedení všech plánovaných zkoušek. Nádobky s asfaltovým pojivem se vloží do držáku sušárny vyhřáté na zkušební teplotu, dvířka se uzavřou a počká se na dosažení zkušební teploty 163 °C ± 1 °C. Jestliže se do 15 min nedosáhne zkušební teploty, zkouška se přeruší. Poté se spustí otáčení držáku s frekvencí otáčení 15,0 min⁻¹ ± 0,2 min⁻¹. Nastaví se průtok vzduchu 4,0 l/min ± 0,2 l/min. Zkouška trvá 225 min ± 1 min od doby, kdy teplota v sušárně dosáhla hodnoty o 1 °C nižší, než je zkušební teplota 163 °C. Na konci zkušební doby se nádobky vyjmou ze sušárny.

Veškeré zestárlé pojivo se ihned přelije do jedné sběrné nádoby bez ochlazení a opětovného zahřívání nádobek. Směs pojiva se homogenizuje mícháním tak, aby se nevmíchaly vzduchové bubliny. Pro odstranění pojiva z nádobek je možné použít uzpůsobené špachtle nebo jiné vhodné nástroje.

9.3.3. Měřené veličiny

Vlastnosti pojiva po zkoušce stárnutí se stanovují do 72 hodin v souladu s příslušnými zkušebními metodami, aniž by se vzorek znovu ohřívá více než jednou. Na zestárlém asfaltovém pojivu metodou 3xRTFOT se určí penetrace jehlou podle ČSN EN 1426 [37], bod měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427 [38] a případně komplexní smykový modul a fázový úhel podle ČSN EN 14770 [40] s okrajovými podmínkami zkoušky stejnými, jako byly nastaveny pro měření na pojivu před simulací stárnutí metodou 3xRTFOT.

Vliv stárnutí 3xRTFOT na změnu vlastností asfaltových pojiv se pak hodnotí změnou hodnot uvedených laboratorních zkoušek před stárnutím a po stárnutí metodou 3xRTFOT.

9.3.4. Požadavky na změnu měřených veličin pro silniční asfalt třídy 50/70 a 70/100

V tabulce 7 jsou uvedeny požadavky na maximální přípustnou změnu vlastností silničních asfaltů třídy 50/70 a 70/100 po stárnutí metodou 3xRTFOT, konkrétně se jedná o zvýšení bodu měknutí zapříčiněné simulací stárnutí metodou 3xRTFOT a podíl komplexního smykového modulu pojiva zestárlého metodou 3xRTFOT a komplexního smykového modulu nezestárlého pojiva.

Tabulka 7: Požadované vlastnosti silničních asfaltů třídy 50/70 a 70/100 po stárnutí metodou 3xRTFOT

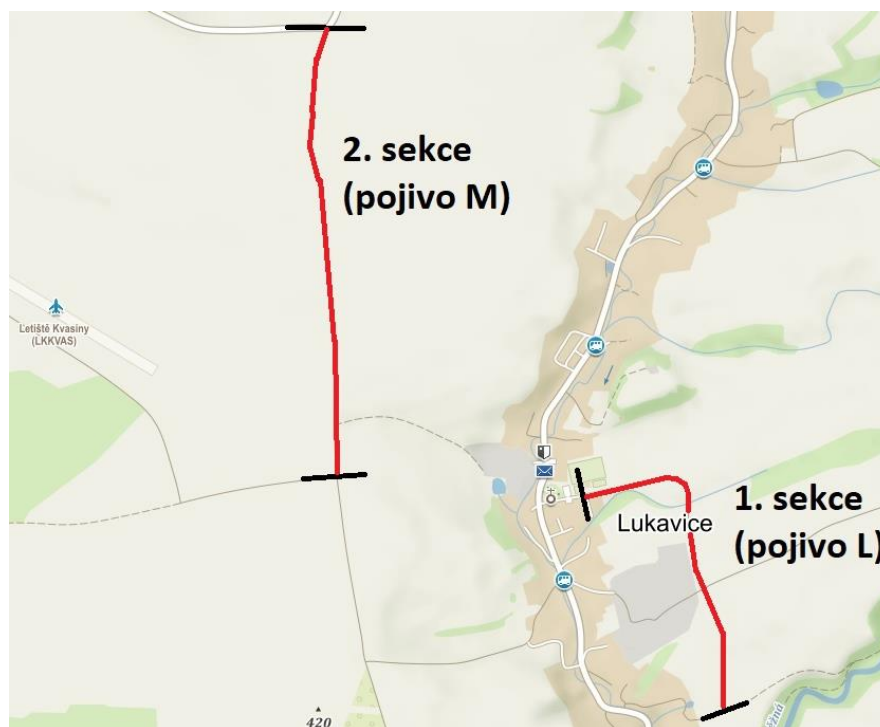
Vlastnost	Metoda zkoušení	Jednotka	Hodnota
Zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT	ČSN EN 1427	°C	≤ 15
Podíl komplexního smykového modulu po 3xRTFOT a nezestárlého pojiva	ČSN EN 14770 (60 °C, 1,0 Hz)	-	≤ 15tinásobek

10. POKUSNÉ ÚSEKY

Aby bylo možné ověřit výsledky výše uvedených laboratorních zkoušek in situ, byly ve spolupráci se společností Skanska a.s. provedeny v letech 2013 a 2014 tři pokusné úseky, z nichž dva obsahovaly dvě sekce asfaltové směsi typu asfaltový beton (bez přidaného R-materiálu) se silničním asfaltem třídy 50/70 různých výrobců a třetí pokusný úsek byl složen ze tří sekcí asfaltové směsi typu asfaltový beton (bez přidaného R-materiálu) se silničním asfaltem třídy 50/70 různých výrobců. Z každé sekce všech pokusných úseků byla odebrána asfaltová směs a zároveň i použitý silniční asfalt pro následné provedení laboratorních zkoušek pojiv i asfaltových směsí. Tyto pokusné úseky jsou doposud pravidelně sledovány a průběžně je vyhodnocován jejich stav. Jednotlivé pokusné úseky jsou stručně popsány níže.

10.1. Pokusný úsek v obci Lukavice (okres Rychnov nad Kněžnou)

Pokusný úsek Lukavice byl rozdělen do dvou sekcí, na kterých byla do obrusné vrstvy použita asfaltová směs ACO 11 S se silničním asfaltem třídy 50/70 od dvou výrobců. Na první části stavby byl použit silniční asfalt, který je v tabulce 3 označen L a na druhé sekci byl použit silniční asfalt M. Situace pokusného úseku Lukavice je schematicky zaznamenána v obrázku 67 a fotografický pohled na 1. sekci je zachycen v obrázku 68.



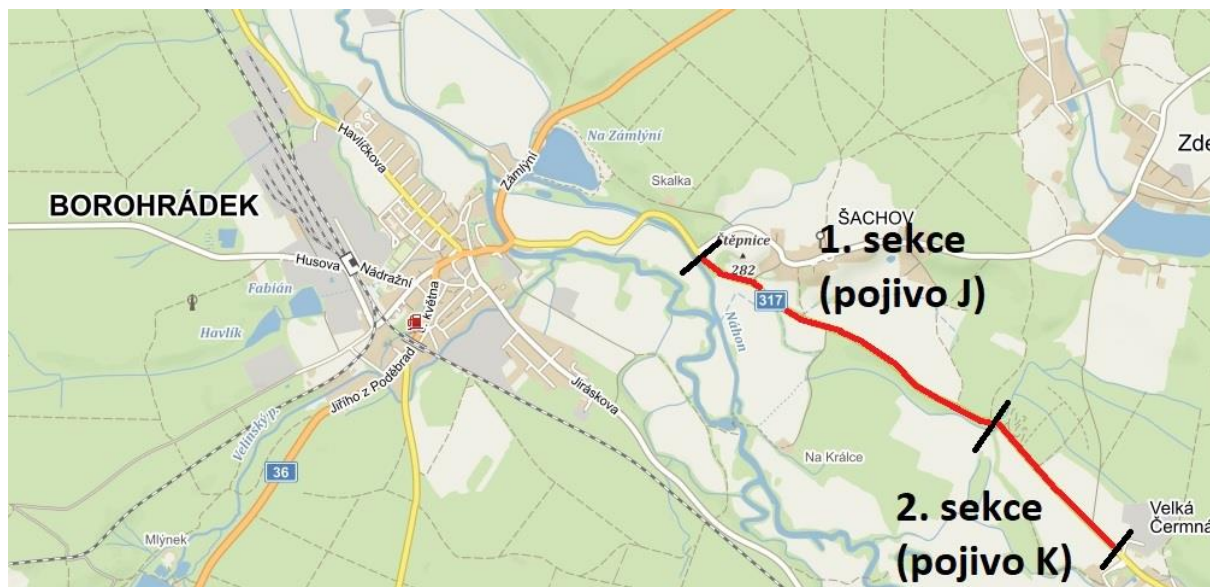
Obrázek 67: Pokusný úsek Lukavice [142]



Obrázek 68: Pohled na 1. sekci úseku Lukavice [126]

10.2. Pokusný úsek na komunikaci II/317 Borohrádek

Na této stavbě byla do obrusné vrstvy použita asfaltová směs ACO 11+ se silničním asfaltem třídy 50/70. Stavba byla rozdělena do dvou částí (sekcí), přičemž každá část byla provedena s odlišným asfaltovým pojivem. První část stavby byla provedena za použití silničního asfaltu, který je v tabulce 3 označen jako J a na druhé sekci bylo použito pojivo označené jako K. Situace stavby pokusného úseku II/317 Borohrádek je zaznamenána v obrázku 69 a fotografie úseku je vložena do obrázku 70.



Obrázek 69: Pokusný úsek II/317 Borohrádek [142]

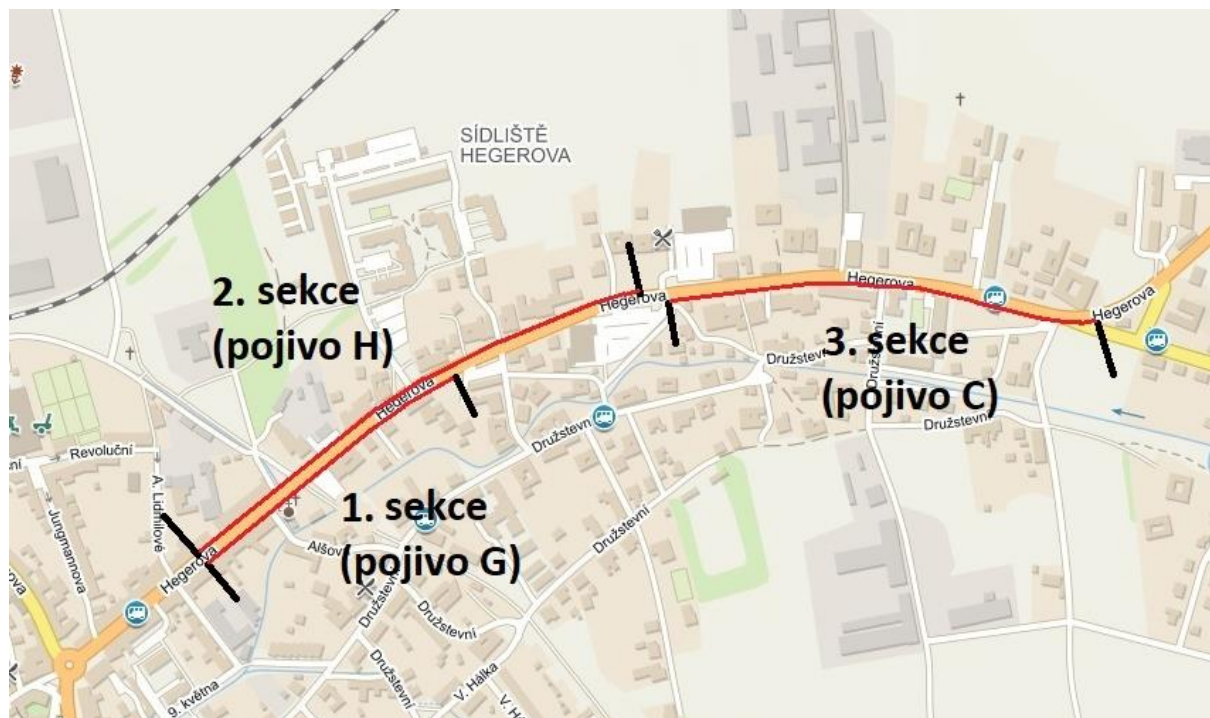


Obrázek 70: Pohled na pokusný úsek Borohrádek [126]

10.3. Pokusný úsek na komunikaci I/34 Polička, ulice Hegerova

Pokusný úsek I/34 Polička byl rozdělen do tří sekcí, přičemž na každé z nich byla provedena ohrusná vrstva směsi typu asfaltový beton ACO 11 S se silničním asfaltem třídy 50/70. Silniční asfalty byly dodány od různých výrobců a tyto asfalty jsou v tabulce 3 označeny

G (1. sekce), H (2. sekce) a C (3. sekce). Situace stavby pokusného úseku I/34 Polička je zaznamenána v obrázku 71 a pohled na čerstvě položenou ohrusnou vrstvu je zachycen v obrázku 72.



Obrázek 71: Pokusný úsek I/34 Polička [142]



Obrázek 72: Pohled na pokusný úsek I/34 Polička [126]

10.4. Kontrolní zkoušky asfaltových směsí z pokusných úseků

Ze všech sekcí pokusných úseků byly odebrány vzorky asfaltových směsí a provedeny kontrolní zkoušky, jejichž výsledky jsou uvedeny v tabulce 8. Položené směsi mají poměrně úzký interval obsahu pojiva (5,7 % až 6,1 %) i mezerovitosti. Mírně vyšší mezerovitost byla zjištěna pouze u směsi odebrané z 1. sekce úseku Borohrádek. Veškeré zjištěné údaje splňují požadavky na vedení čáry zrnitosti, obsah pojiva i mezerovitost směsi typu asfaltový beton určené kontrolními zkouškami, které jsou uvedeny v normě ČSN 73 6121 [11].

Tabulka 8: Výsledky kontrolních zkoušek směsí asfaltového betonu pro obrusné vrstvy odebraných při realizaci pokusných úseků

Úsek	Lukavice		Borohrádek		Polička		
Sekce	1	2	1	2	1	2	3
Asfaltová směs	ACO 11 S		ACO 11 +		ACO 11 S		
Označení	1	2	3	4	5	6	7
Označení pojiva	L	M	J	K	G	H	C
Zrnitost [mm]	16	100	100	100	100	100	100
	11	97	99	100	96	99	99
	8	78	78	72	80	73	76
	4	48	48	42	51	43	45
	2	35	36	30	37	31	34
	0,125	8	8	7	8	8	7
	0,063	6,6	6,4	5,6	6,3	7,3	5,7
Obsah pojiva [%]	5,9	5,9	5,8	6,1	5,7	5,9	5,9
Mezerovitost směsi [%]	2,2	2,2	4,6	2,0	2,3	2,1	2,0
Tloušťka filmu pojiva [10 ⁻³ mm]	5,70	5,83	6,50	6,08	5,13	6,48	5,60

10.5. Vlastnosti asfaltových vrstev pokusných úseků

Z obrusných vrstev jednotlivých sekcí srovnávaných pokusných úseků byly odebrány jádrové vývrty, na kterých byla hodnocena míra zhutnění a skutečná mezerovitost vrstvy. Údaje jsou souhrnně uvedeny v tabulce 9. Z výsledků je patrné, že míra zhutnění vrstev jednotlivých sekcí pokusných úseků se pohybovala v poměrně úzkém rozmezí (98,4 % až 99,1 %) a mezerovitost vrstev dosahovala intervalu 3,0 % až 5,7 %. Veškeré zjištěné údaje splňují požadavky normy ČSN 73 6121 [11] na míru zhutnění vrstvy a mezerovitost vrstvy odpovídající asfaltové směsi typu asfaltový beton.

Tabulka 9: Míra zhutnění a mezerovitost obrusných vrstev jednotlivých sekcí pokusných úseků

Úsek	Lukavice		Borohrádek		Polička		
Sekce	1	2	1	2	1	2	3
Asfaltová směs	ACO 11 S		ACO 11 +		ACO 11 S		
Označení	1	2	3	4	5	6	7
Míra zhutnění [%]	98,5	98,4	98,9	99,0	98,6	99,1	98,1
Mezerovitost vrstvy [%]	3,7	3,8	5,7	3,0	3,7	3,0	3,9

10.6. Podrobná analýza materiálů získaných při provádění pokusných úseků

Vlastnosti materiálů (nativní silniční asfalty, asfaltové směsi, zpětně získané asfalty), získaných při provádění pokusných úseků, byly podrobně analyzovány. Pro hodnocení vlastností asfaltových pojiv použitých v asfaltových směsích pokusných úseků (s důrazem na

hodnocení jejich stárnutí) bylo na obalovnách asfaltových směsí odebráno sedm silničních asfaltů stejné třídy 50/70 od různých výrobců (pro zjednodušení označeny A1 až A7). Tato pojiva byla v rámci provádění pokusných úseků použita pro výrobu sedmi asfaltových směsí typu asfaltový beton se zrnitostí do 11 mm (označení B1 až B7), z nichž byly odebrány vzorky pro určení tuhosti asfaltových směsí dvoubodovou zkouškou ohybem na komolých klínech podle ČSN EN 12697-26 [27]. Ze zbylého množství asfaltových směsí byla po extrakci zpětně získána asfaltová pojiva vakuovou destilací v rotačním vakuovém destilačním zařízení postupem podle ČSN EN 12697-3 [16] pro další zkoušky poživ (označení C1 až C7).

Na nezestárlých silničních asfaltech A1 až A7 byla provedena laboratorní simulace stárnutí metodou RTFOT (označení poživ A1-RTFOT až A7-RTFOT) a metodou 3xRTFOT (označení poživ A1-3xRTFOT až A7-3xRTFOT). Asfaltové směsi, použité pro provedení jednotlivých sekcí pokusných úseků, byly podrobeny laboratorní simulaci stárnutí Braunschweigskou metodou stárnutí, označovanou jako BSA podle [52]. Z těchto zestárlých směsí byla pojiva vyextrahována a zpětně získána vakuovou destilací v rotačním vakuovém destilačním zařízení podle ČSN EN 12697-3 [16], čímž vznikly vzorky asfaltových poživ, označené jako C1-BSA až C7-BSA. Pro přehlednost je označování jednotlivých vzorků uvedeno v tabulce 10.

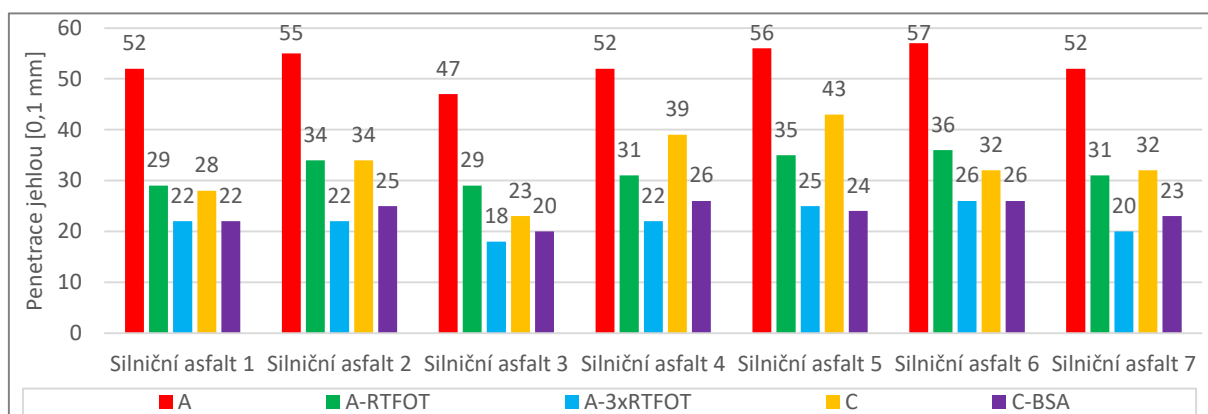
Tabulka 10: Označení laboratorních vzorků materiálů získaných při provádění pokusných úseků

Úsek	Lukavice		Borohrádek		Polička		
	1	2	1	2	1	2	3
Sekce	ACO 11 S		ACO 11 +		ACO 11 S		
Asfaltová směs	ACO 11 S		ACO 11 +		ACO 11 S		
Označení pojiva	L	M	J	K	G	H	C
Výrobce pojiva	V	I	VIII	V	V	VI	I
Nezestárlé silniční asfalty 50/70 odebrané při realizaci pokusných úseků	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Odebrané silniční asfalty A1 až A7 zestárlé metodou RTFOT	A1-RTFOT	A2-RTFOT	A3-RTFOT	A4-RTFOT	A5-RTFOT	A6-RTFOT	A7-RTFOT
Odebrané silniční asfalty A1 až A7 zestárlé metodou 3xRTFOT	A1-3xRTFOT	A2-3xRTFOT	A3-3xRTFOT	A4-3xRTFOT	A5-3xRTFOT	A6-3xRTFOT	A7-3xRTFOT
Asfaltové směsi typu asfaltový beton pro obrusné vrstvy z pokusných úseků	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Asfaltové směsi z pokusných úseků zestárlé metodou BSA	B1-BSA	B2-BSA	B3-BSA	B4-BSA	B5-BSA	B6-BSA	B7-BSA
Pojiva znovuzískaná z asfaltových směsí B1 až B7	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Pojiva znovuzískaná z asfaltových směsí zestárlých metodou BSA	C1-BSA	C2-BSA	C3-BSA	C4-BSA	C5-BSA	C6-BSA	C7-BSA

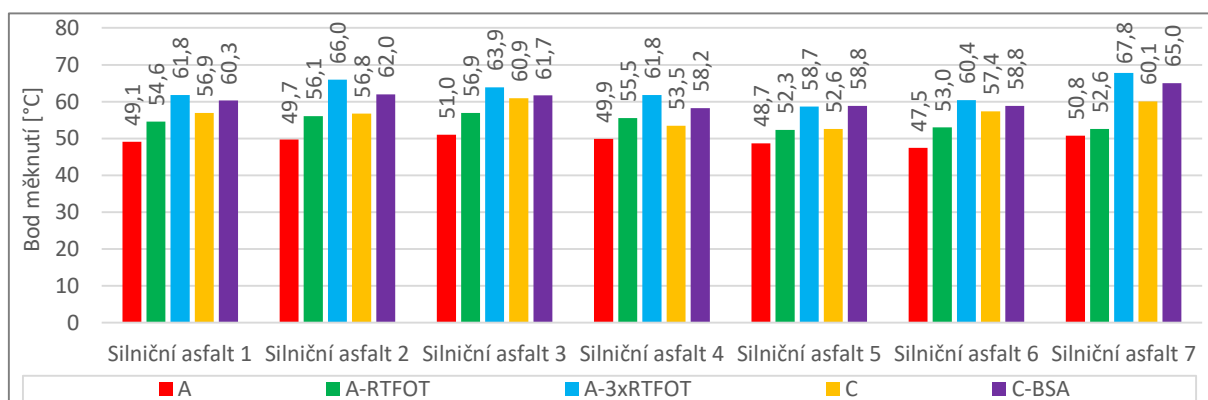
V následujícím textu jsou uvedeny výsledky empirických zkoušek poživ, odebraných při provedení pokusných úseků a dále jsou popsány reologické vlastnosti těchto poživ získané v zařízení DSR. V neposlední řadě jsou vyhodnoceny tuhosti jednotlivých směsí s popisem vlivu laboratorní simulace stárnutí metodou BSA.

10.6.1. Empirické zkoušky asfaltových pojev

V obrázku 73 jsou zaznamenány výsledky zkoušky penetrace jehlou a obrázek 74 zachycuje hodnoty bodu měknutí silničních asfaltů (A), silničních asfaltů po stárnutí metodou RTFOT (A-RTFOT), silničních asfaltů po stárnutí modifikovanou metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT), asfaltů zpětně získaných z odebraných asfaltových směsí (C) a asfaltů zpětně získaných z odebraných asfaltových směsí, které byly zestárnuty metodou BSA (C-BSA).



Obrázek 73: Penetrace jehlou silničních asfaltů (A) a asfaltů zpětně získaných z asfaltových směsí (C) v různém stupni zestárnutí



Obrázek 74: Bod měknutí silničních asfaltů (A) a asfaltů zpětně získaných z asfaltových směsí (C) v různém stupni zestárnutí

Z výsledků zkoušky penetrace jehlou a bodu měknutí je patrné, že pouze silniční asfalt 3 nedosahuje požadované hodnoty penetrace (50 (0,1 mm) až 70 (0,1 mm)). Požadovanému rozsahu hodnot bodu měknutí uvedenému v ČSN 65 7204 [10] (46 °C až 54 °C) vyhovovaly všechny nezestárlé silniční asfalty. Stárnutím metodou RTFOT se hodnota penetrace snížila o 36,8 % až 44,2 % a hodnota bodu měknutí vzrostla o 1,8 °C až 6,4 °C, což odpovídá nárůstu 3,5 % až 12,9 %. Norma ČSN 65 7204 [10] uvádí, že maximální zvýšení bodu měknutí po stárnutí RTFOT silničního asfaltu 50/70 je 9 °C. Tento požadavek tedy splnily všechny silniční asfalty. Rovněž požadavek na zbylou penetraci (≥ 50 %) dodržela všechna srovnávaná pojiva.

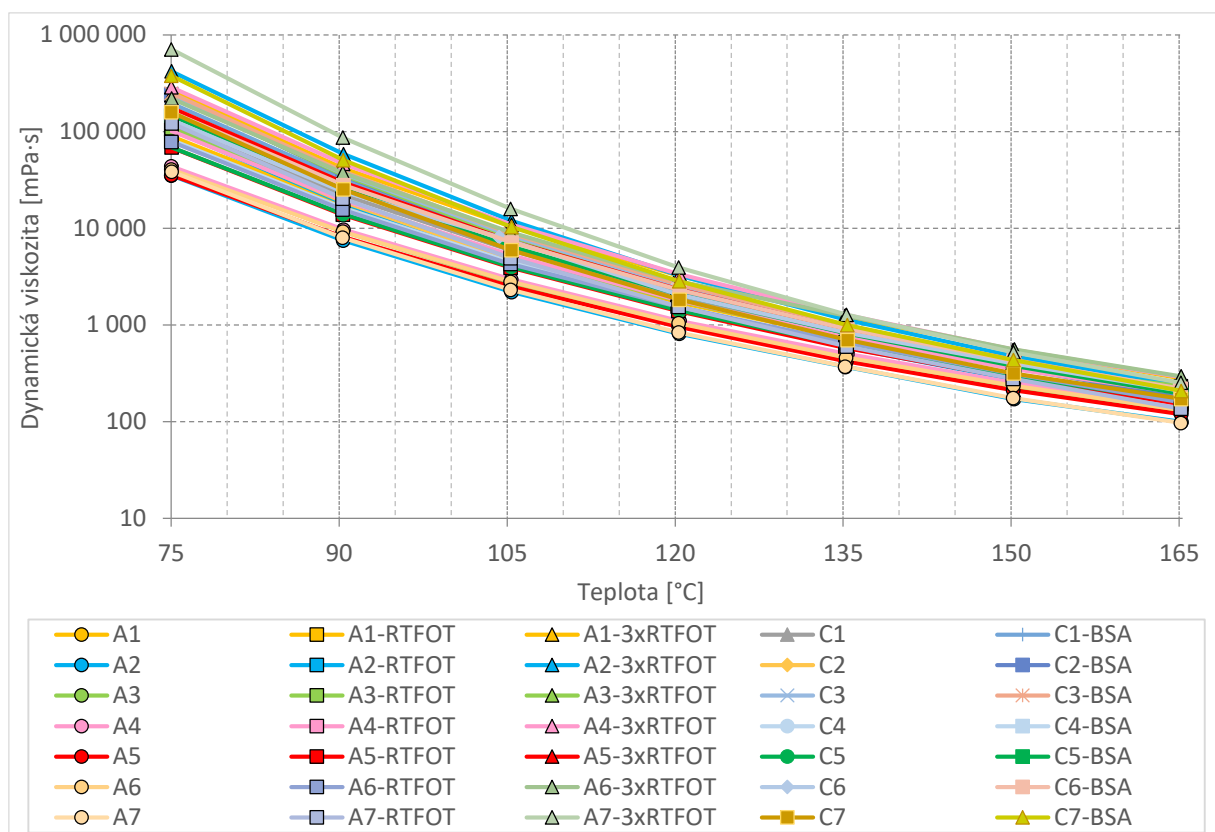
Stárnutím metodou 3xRTFOT došlo ke snížení penetrace jednotlivých asfaltových pojiv o 54,4 % až 61,7 % a k nárůstu bodu měknutí o 10,0 °C až 17,0 °C, což odpovídá nárůstu 20,5 % až 33,4 %. V případě silničních asfaltů č. 2 resp. 7 došlo k nárůstu bodu měknutí o 16,3 °C resp. 17,0 °C (obě od stejného výrobce s označením I), zatímco v případě ostatních pojiv v rozmezí 10,0 °C až 12,9 °C. V rakouském předpise RVS 08.97.05 [130] je uveden požadavek na maximální zvýšení hodnoty bodu měknutí po zkoušce 3xRTFOT (15 °C) a stejný požadavek je uveden v metodice [53].

Průměrná hodnota penetrace jehlou silničních asfaltů zestárých metodou modelující krátkodobé stárnutí RTFOT (A-RTFOT) je 32 (0,1 mm) a průměrná penetrace pojiv vydestilovaných z asfaltových směsí (C) je 33 (0,1 mm). Průměrná hodnota bodu měknutí silničních asfaltů zestárých metodou RTFOT (A-RTFOT) je 54,4 °C a průměrný bod měknutí pojiv vydestilovaných z asfaltových směsí (C) je 56,9 °C. Vyhodnocením změny hodnot empirických zkoušek způsobených laboratorním stárnutím je možné usuzovat, že metoda RTFOT výstižně modeluje krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva na obalovně asfaltových směsí.

Při modelování dlouhodobého stárnutí metodou 3xRTFOT došlo ke snížení hodnoty penetrace na 18 (0,1 mm) až 26 (0,1 mm) s průměrnou hodnotou 22 (0,1 mm) a ke zvýšení hodnoty bodu měknutí na 58,7 °C až 67,8 °C s průměrnou hodnotou 62,9 °C. Stárnutí BSA zapříčinilo snížení hodnoty penetrace vydestilovaných asfaltů na 20 (0,1 mm) až 26 (0,1 mm) s průměrnou hodnotou 24 (0,1 mm) a bod měknutí se zvýšil na hodnoty 58,2 °C až 65,0 °C s průměrnou hodnotou 60,7 °C. Modelování dlouhodobého stárnutí metodou BSA tedy ovlivňuje hodnoty empirických zkoušek (penetrace jehlou a bod měknutí) o něco méně, než modelování stárnutí metodou 3xRTFOT.

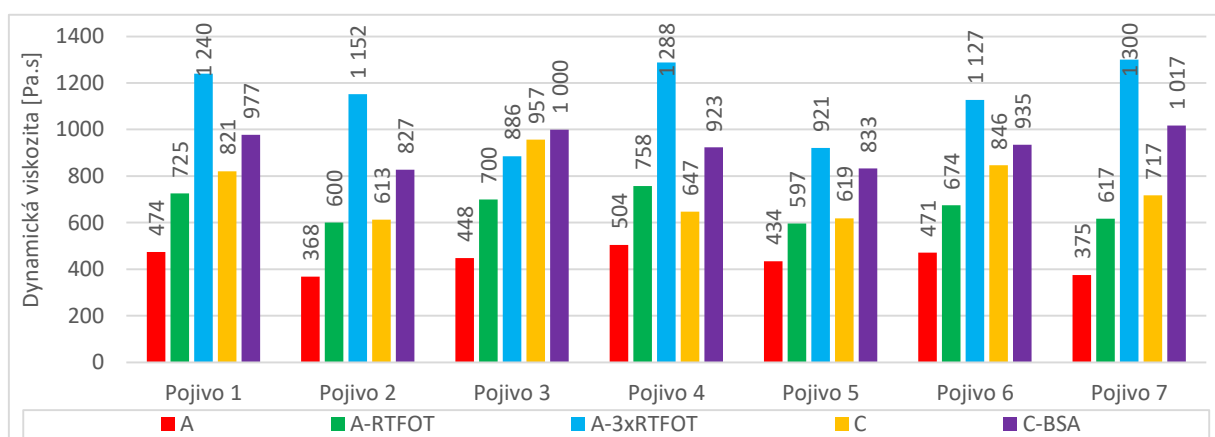
10.6.2. Dynamická viskozita asfaltových pojiv

Dynamická viskozita asfaltových pojiv, odebraných při realizaci pokusných úseků, byla stanovena v DSR geometrií kužel – deska v teplotním rozsahu 75 °C až 165 °C s krokem 15 °C a při smykové rychlosti 1 s⁻¹ až 100 s⁻¹. V obrázku 75 je zachycena závislost dynamické viskozity na teplotě jednotlivých pojiv změřená při smykové rychlosti 1,0 s⁻¹. Je patrný poměrně široký rozsah průběhů závislosti dynamické viskozity na teplotě jednotlivých pojiv.



Obrázek 75: Srovnání závislosti dynamické viskozity na teplotě asfaltových pojiv při smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$

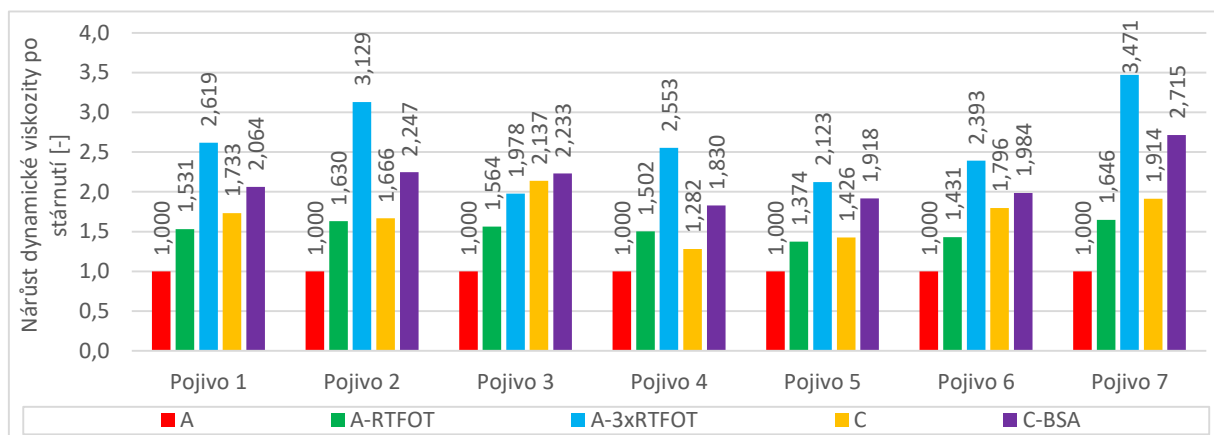
Na obrázku 76 je zaznamenána hodnota dynamické viskozity stanovená při teplotě 135 °C a smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$. Z výsledků lze shrnout, že dynamická viskozita nezestárých pojiv se pohybovala v poměrně úzkém rozpětí ($368 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ až $504 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ při teplotě 135 °C a smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$) a že dynamická viskozita se stárnutím značně stoupá.



Obrázek 76: Vliv stárnutí na dynamickou viskozitu při teplotě 135 °C a smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$

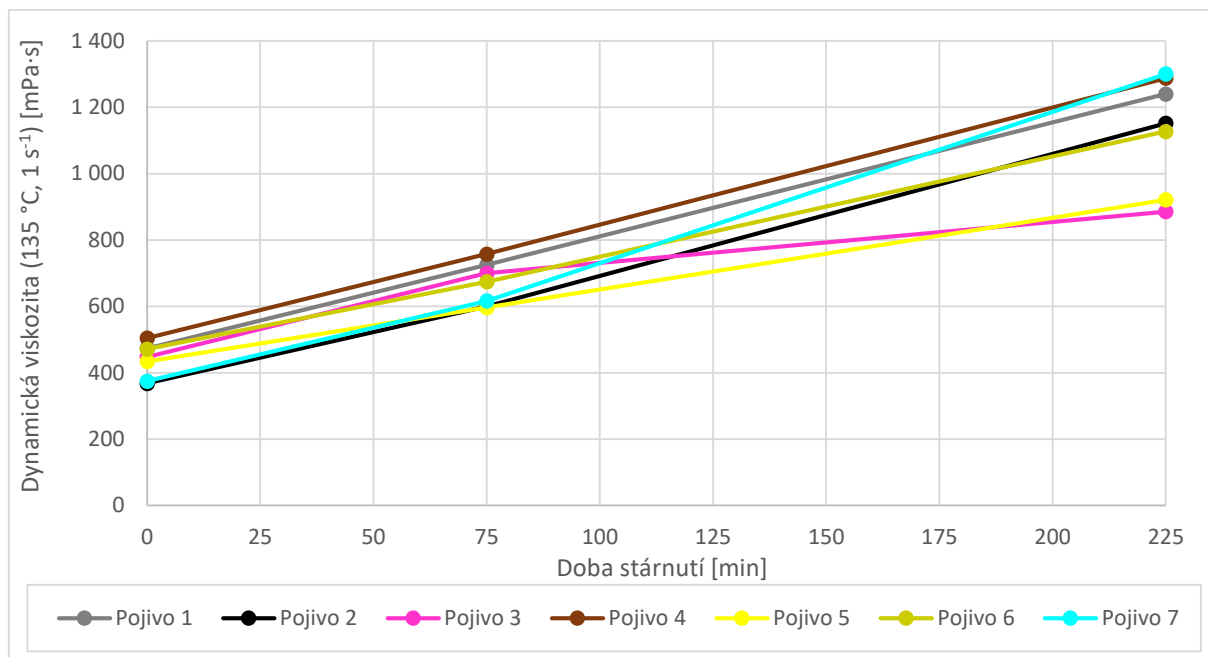
V obrázku 77 je zachycena změna hodnoty dynamické viskozity stanovené při teplotě 135 °C a smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$ srovnávaných pojiv po stárnutí metodou RTFOT (A-RTFOT),

3xRTFOT (A-3xRTFOT) a pojiv znovuzískaných z asfaltových směsí jednotlivých sekcí pokusných úseků (C) a pojiv znovuzískaných z těchto asfaltových směsí zestárlých metodou BSA (C-BSA), která je vyjádřena podílem oproti dynamické viskozitě odpovídajícího nezestárlého pojiva (A). Zvláště postup stárnutí 3xRTFOT dokáže dobře rozlišit náchylnost ke změně dynamické viskozity způsobené stárnutím. Při používání asfaltových pojiv je důležité, aby pojiva co nejméně stárla. To se v tomto případě projevuje co nejmenším nárůstem dynamické viskozity, čehož dosáhly vzorky pojiv s označením 4, 5 a 6. Nejrazantnější zvýšení hodnoty dynamické viskozity bylo možné vysledovat u pojiva s označením 2 a 7, přičemž obě tato pojiva byla vyrobena stejným výrobcem, označeným symbolem I. To koresponduje s výsledky zvýšení bodu měknutí po stárnutí metodou 3xRTFOT.



Obrázek 77: Nárůst hodnoty dynamické viskozity po stárnutí při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s⁻¹ srovnávaných pojiv

Obrázek 78 reprezentuje nárůst hodnoty dynamické viskozity (135 °C, 1 s⁻¹) v čase stárnutí, zajištěného metodou RTFOT a 3xRTFOT. Největší nárůst hodnoty dynamické viskozity (po 75 minutách i 225 minutách stárnutí), vyjádřený podílem dynamické viskozity zestárlého a nezestárlého pojiva, dosahovala pojiva označená 2 a 7 (od stejného výrobce I). Zajímavé je, že tato pojiva vykazovala nejnižší počáteční hodnotu dynamické viskozity, což by mohlo naznačovat přítomnost visbreakingového zbytku v pojivu. Naopak nemírnější projevy stárnutí bylo možné vysledovat u pojiv č. 3, 5 a 6.

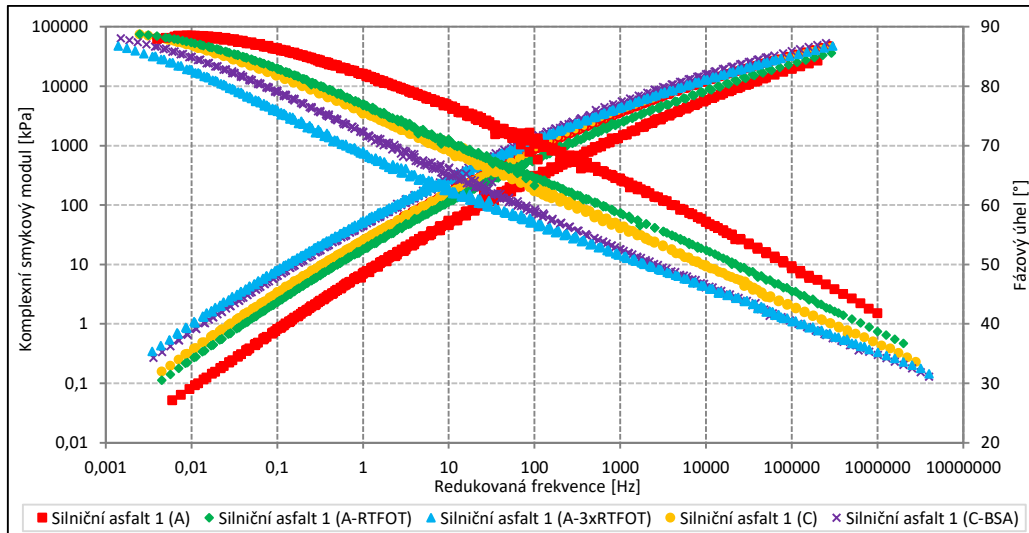


Obrázek 78: Změna hodnoty dynamické viskozity v závislosti na čase stárnutí při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s⁻¹

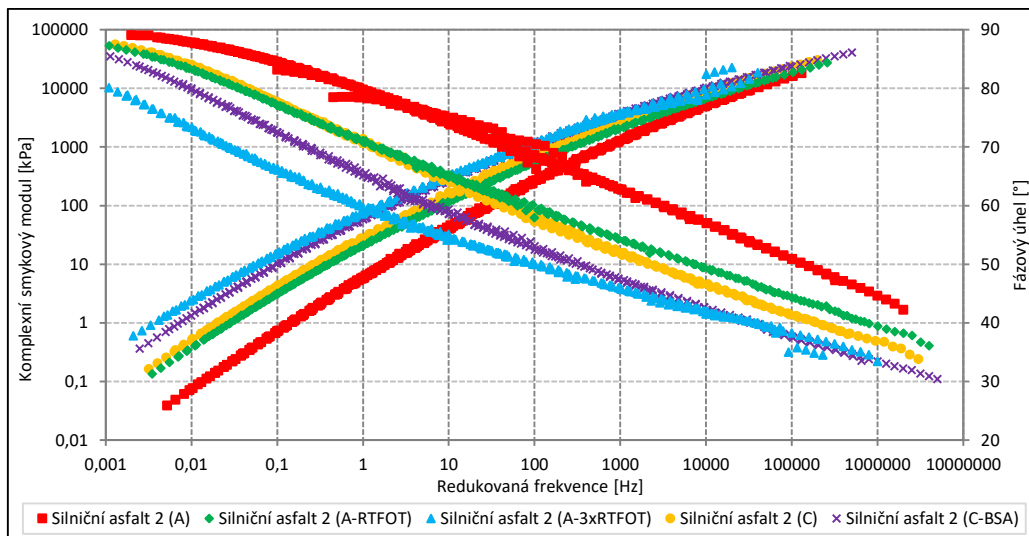
Nejnižších hodnot dynamické viskozity dosahovaly ve všech případech nezestárlé silniční asfalty v celém teplotním rozsahu. Vyšších viskozit dosahovaly v teplotním rozsahu 75 °C až 165 °C asfalty zestárlé metodou RTFOT a asfalty vyextrahované z asfaltových směsí. Nejvyšší viskozitu měla pojiva po zestárnutí metodou 3xRTFOT a pojiva vyextrahovaná ze směsi zestárlé metodou BSA. Postup stárnutí 3xRTFOT a BSA dokáže dobře odlišit náchylnost ke změně dynamické viskozity stárnutím kombinovaným účinkem tepla a vzduchu oproti stárnutí RTFOT, protože rozdíly mezi jednotlivými výsledky jsou vyšší.

10.6.3. Komplexní smykový modul a fázový úhel v DSR

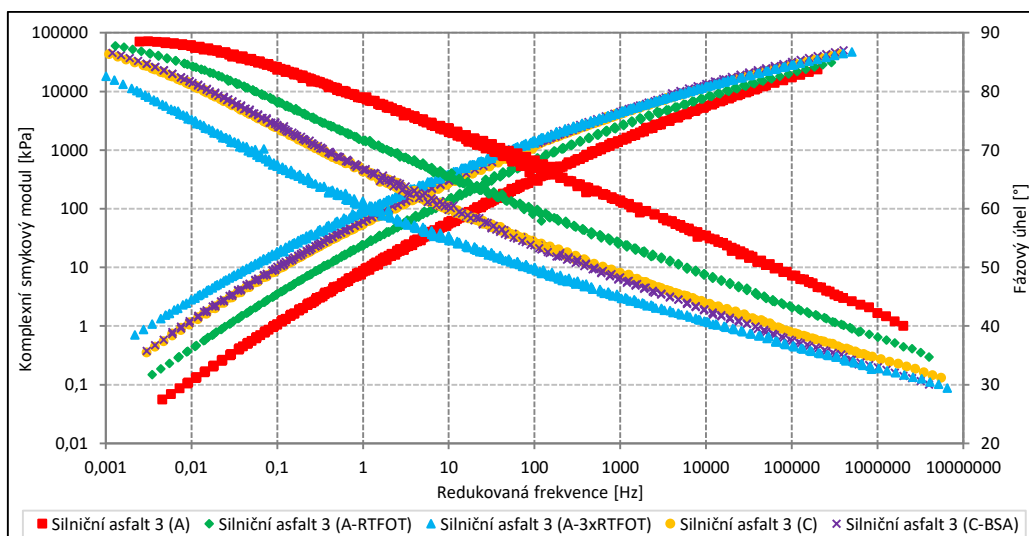
Na srovnávaných pojivech byla provedena reologická měření v oscilaci s řízeným smykovým přetvořením. Byl určen komplexní smykový modul pojiv (G^*) a fázový úhel (δ). Měření bylo provedeno pro teploty 10 °C až 70 °C s teplotním krokem 5 °C. Hlavní křivky komplexních smykových modulů a fázových úhlů silničních asfaltů jsou zobrazeny v obrázcích 79 až 85. Hlavní křivky byly vytvořeny teplotně-časovou superpozicí s referenční teplotou 50 °C. Z grafů je patrné, že nejnižších hodnot komplexního smykového modulu a nejvyšších hodnot fázového úhlu dosahovaly v celém teplotně-frekvenčním rozsahu nezestárlé silniční asfalty (A). Naopak největší vliv na změnu vlastností asfaltů (komplexní smykový modul a fázový úhel) mělo v celém teplotně-frekvenčním rozsahu stárnutí metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT). Zpracování pojiv v obalově asfaltových směsí (C) mělo na pojiva většinou přibližně stejný vliv, jako simulace stárnutí metodou RTFOT (A-RTFOT). Z obrázků je dále patrné, že stárnutí metodou 3xRTFOT má na zvýšení komplexních smykových modulů a snížení fázových úhlů asfaltových pojiv (A-3xRTFOT) mírně větší vliv než stárnutí asfaltové směsi metodou BSA (C-BSA).



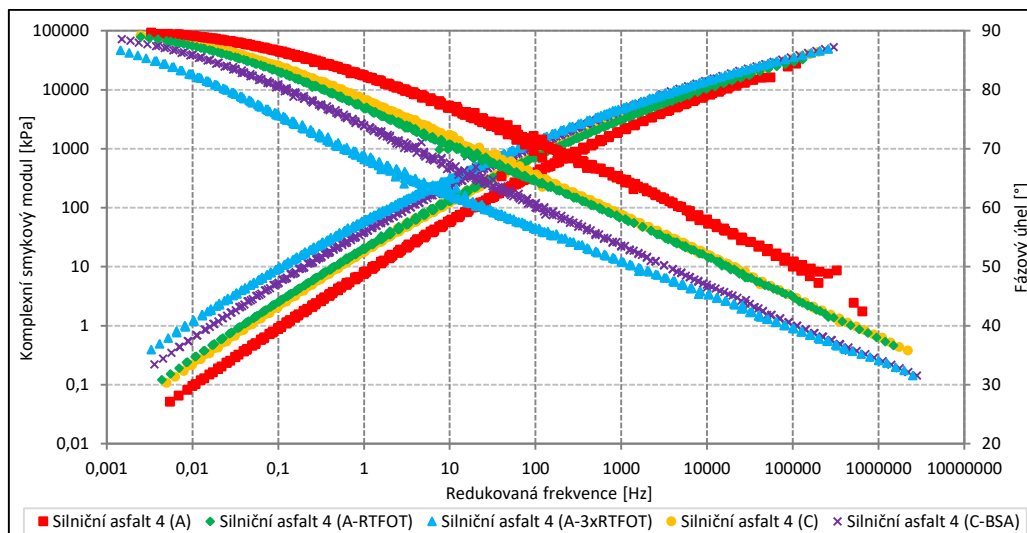
Obrázek 79: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 1



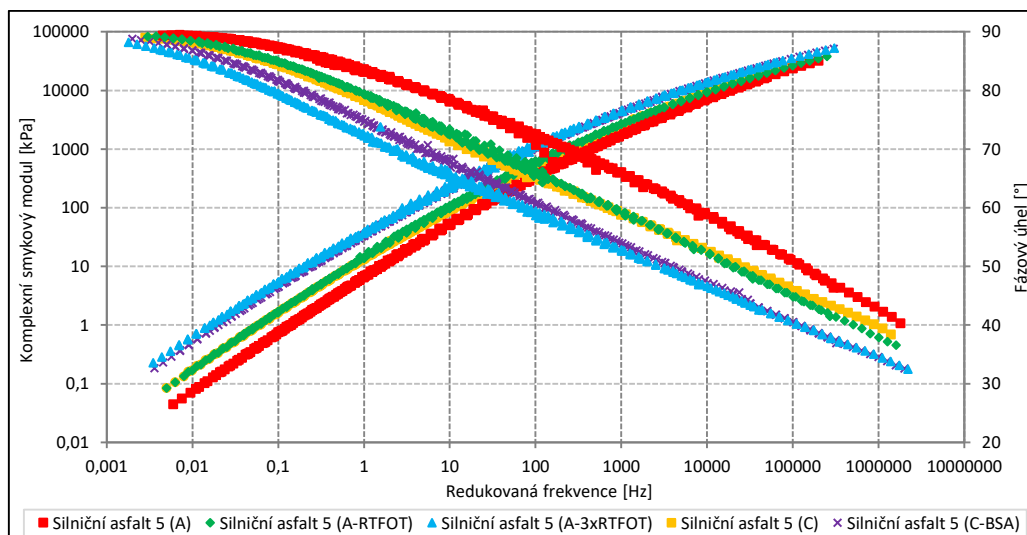
Obrázek 80: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 2



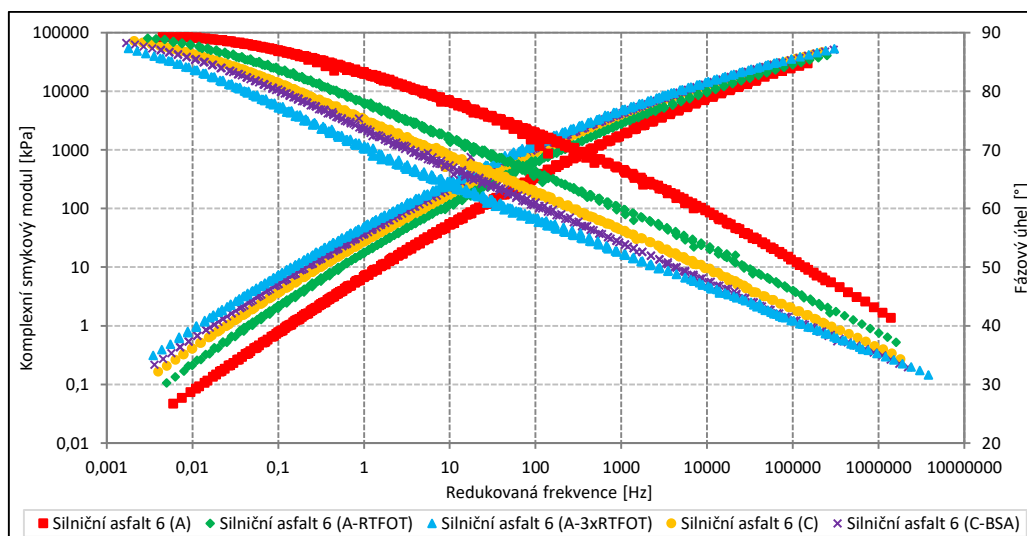
Obrázek 81: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 3



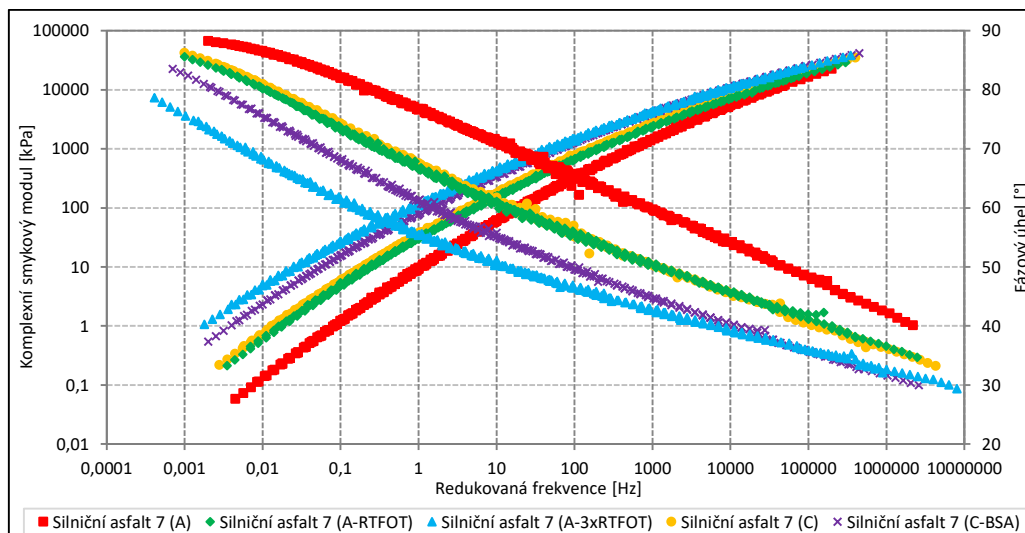
Obrázek 82: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 4



Obrázek 83: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 5



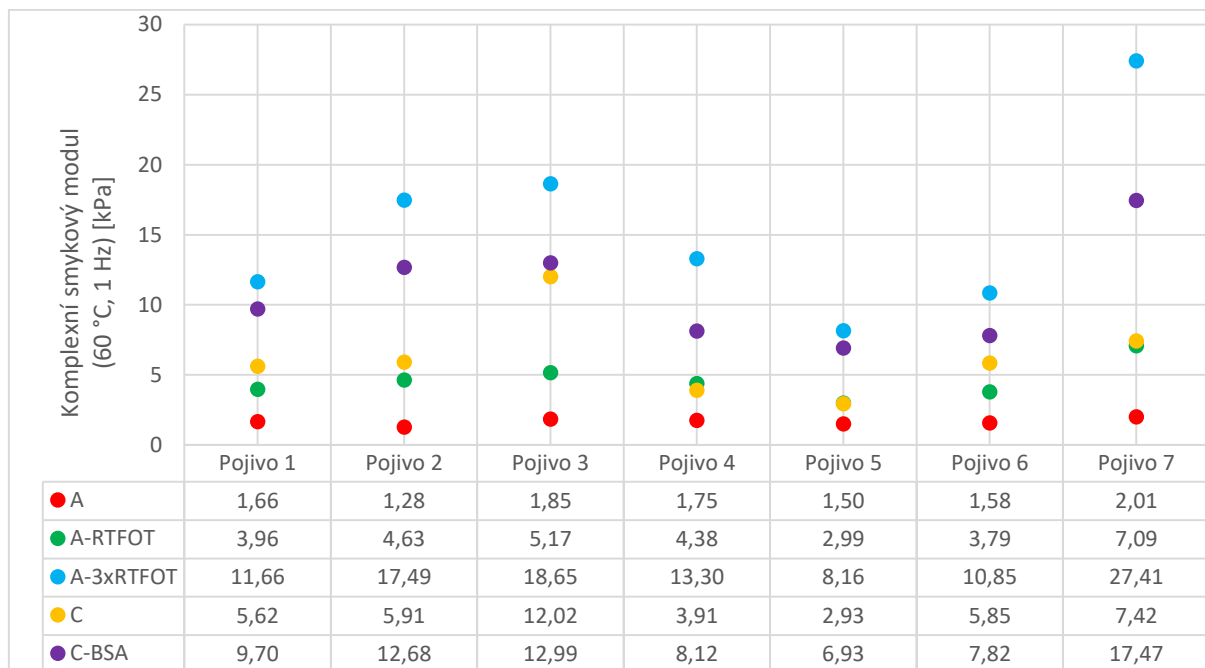
Obrázek 84: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 6



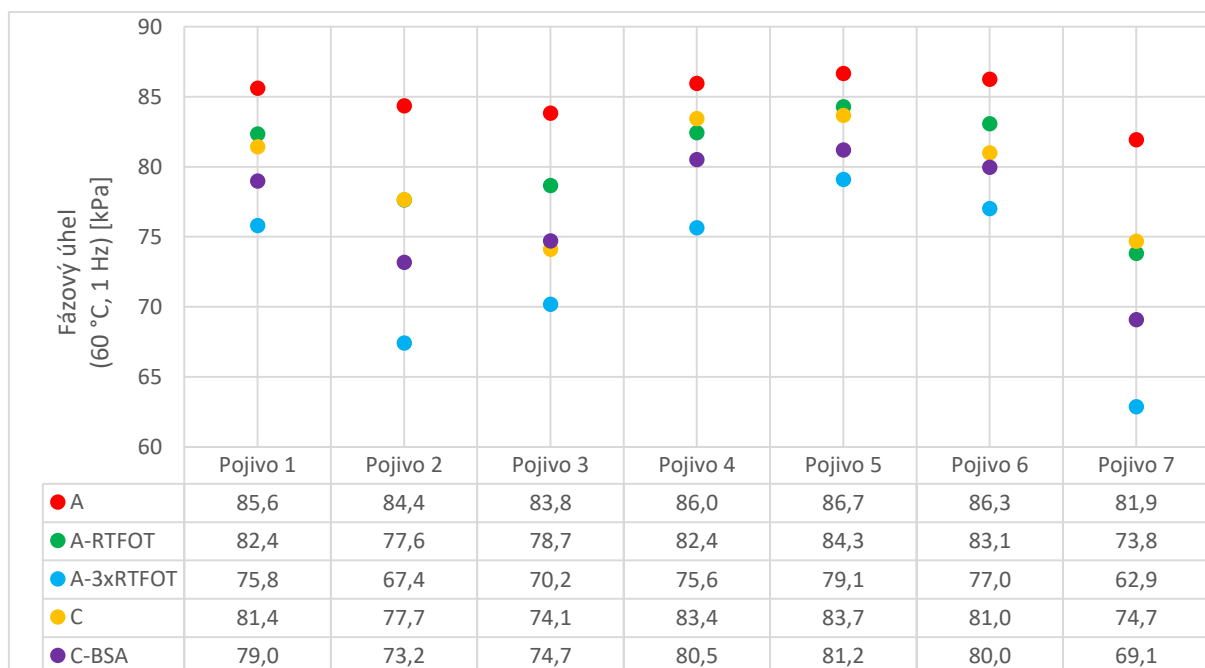
Obrázek 85: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 7

Přehlednější srovnání hodnot komplexního smykového modulu hodnocených pojiv je provedeno pro teplotu 60 °C a frekvenci 1,0 Hz v obrázku 86 a srovnání fázových úhlů pro stejné podmínky zkoušky v obrázku 87. Nejnižších komplexních smykových modulů a nejvyšších hodnot fázových úhlů, stanovených při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz, dosahovaly nezestárlé silniční asfalty odebrané před výrobou asfaltové směsi (A). Při detailním rozboru komplexních smykových modulů a fázových úhlů získaných při teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1 Hz je patrné, že všechna nezestárlá pojiva (A) dosahovala poměrně úzkého rozptylu komplexních smykových modulů (1,28 kPa až 2,01 kPa) i fázových úhlů (81,9 ° až 86,7 °).

Stárnutí RTFOT zapříčinilo zvýšení komplexních smykových modulů jednotlivých pojiv (A-RTFOT) přibližně srovnatelné se zestárnutím pojiv při výrobě asfaltových směsí na obalovně (C). Výjimkou je pojivo 3, u kterého došlo k většímu nárůstu komplexního smykového modulu pojiva znovuzískaného z asfaltové směsi (C) než po stárnutí RTFOT (A-RTFOT). To může být způsobeno zvýšenou teplotou jednotlivých složek asfaltové směsi při její výrobě v obalovně asfaltových směsí.



Obrázek 86: Srovnání komplexních smykových modulů pojiv odebraných při realizaci pokusných úseků stanovené při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz

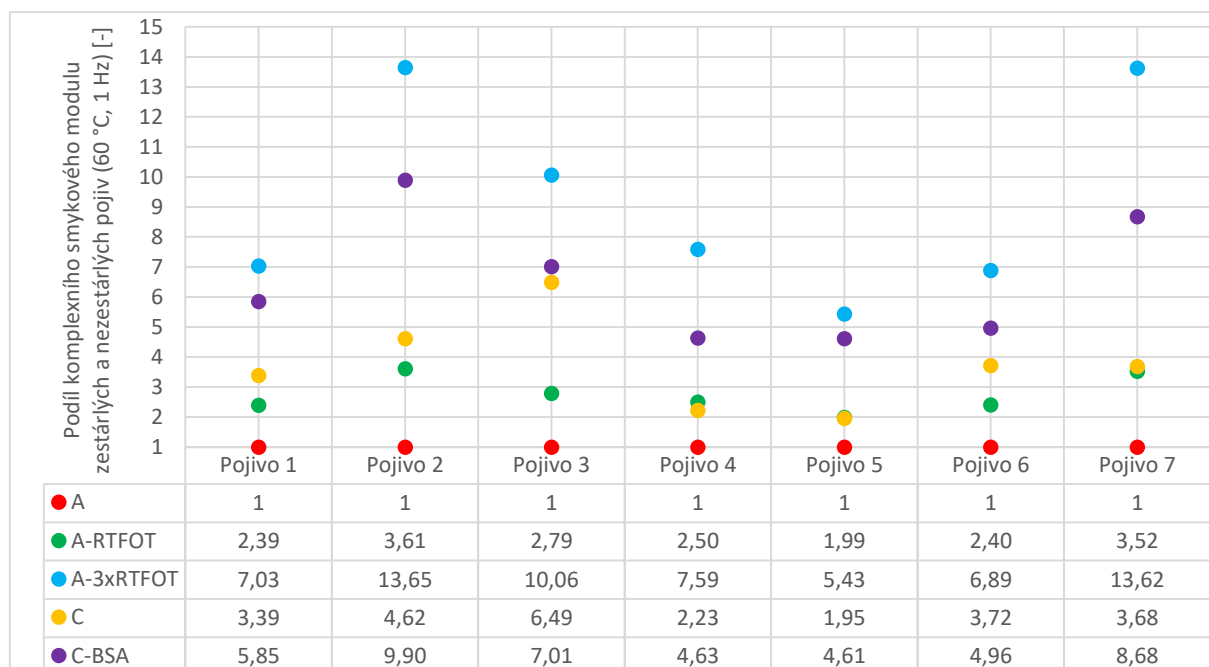


Obrázek 87: Srovnání fázových úhlů pojiv odebraných při realizaci pokusných úseků stanovené při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz

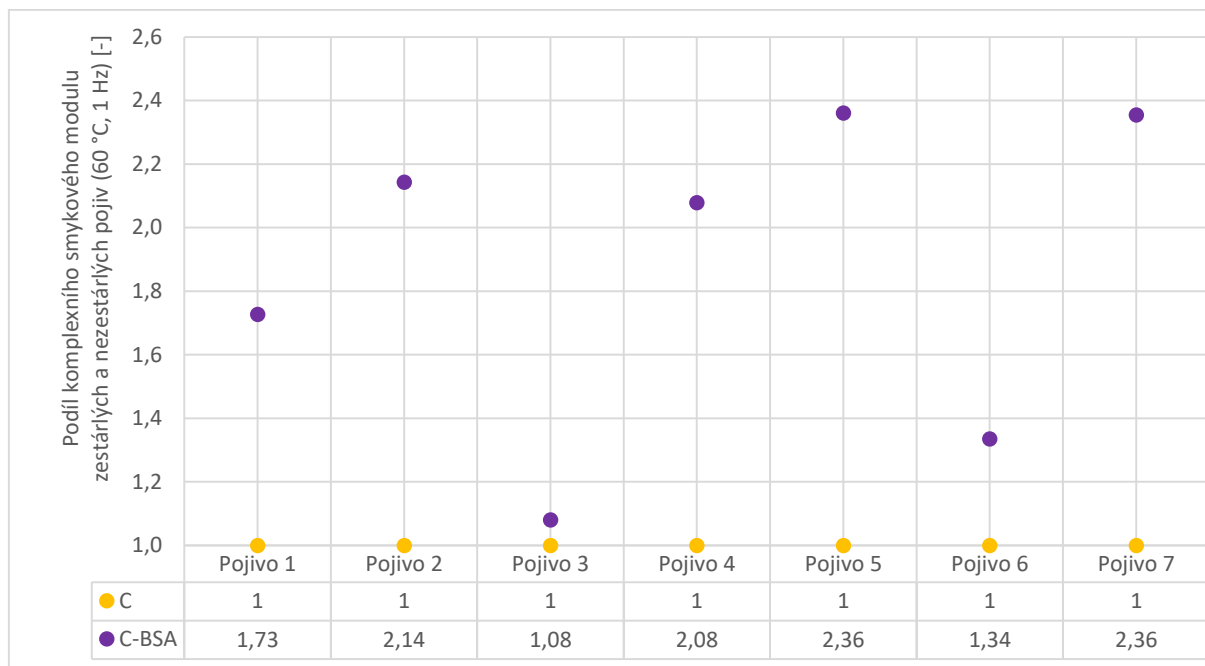
Ze srovnání indexů stárnutí, vyjádřených jako podíl komplexních smykových modulů (60 °C, 1,0 Hz) zestárých a nezestárých pojiv (obrázek 88) je patrné, že komplexní smykové moduly se po stárnutí RTFOT zvýšily 1,9násobně (silniční asfalt 5) až 3,61násobně (silniční asfalt 2). Stárnutím 3xRTFOT vrostla hodnota komplexního smykového modulu na 5,43násobek (silniční asfalt 5) až 13,65násobek (silniční asfalt 2). Nárůst komplexního

smykového modulu pojiv po jejich zabudování do vrstvy (C) oproti komplexním smykovým modulům původních pojiv (A) je 1,95násobný (silniční asfalt 5) až 6,49násobný (silniční asfalt 3).

Zajímavé je srovnání nárůstu komplexního smykového modulu (60 °C, 1,0 Hz) pojiv znovuzískaných z asfaltových směsí zestárých metodou BSA (C-BSA) oproti hodnotám komplexního smykového modulu pojiv znovuzískaných z nezestárých asfaltových směsí (C), které je zaznamenáno na obrázku 89. Toto zvýšení je 1,08násobné (pojivo 3) až 2,36násobné (pojivo 5 a 7). Jedná se tedy o poměrně značné rozpětí výsledků, přičemž tento nárůst komplexních smykových modulů zapříčiněný stárnutím BSA překvapivě nekoreluje s nárůstem komplexních smykových modulů zapříčiněným stárnutím metodou 3xRTFOT. To je pravděpodobně způsobeno odlišnými podmínkami stárnutí a ovlivněním procesu stárnutí vlastnostmi a složením asfaltových směsí.



Obrázek 88: Podíl komplexního smykového modulu zestárých a nezestárých pojiv stanovený při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz (index stárnutí)



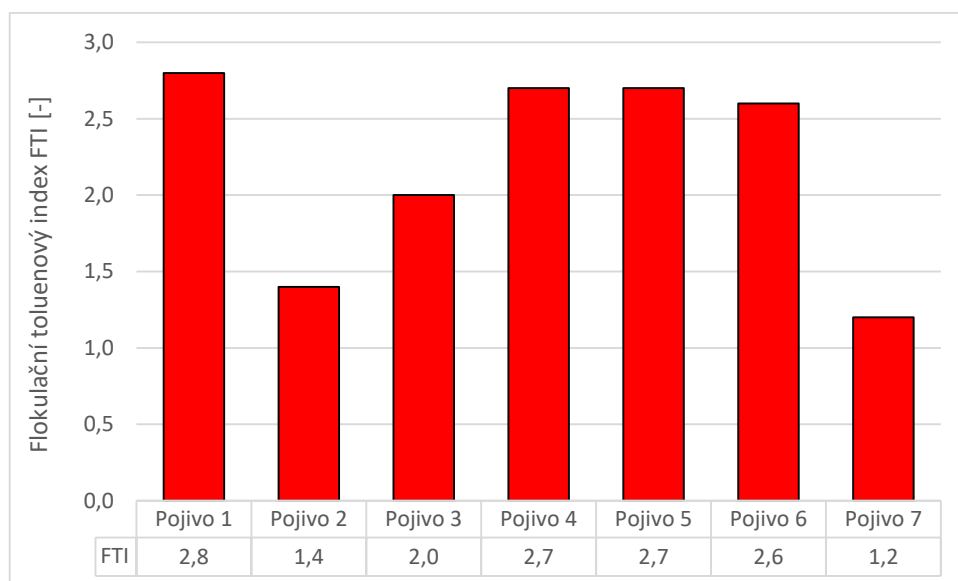
Obrázek 89: Podíl komplexního smykového modulu pojiv znovuzískaných z asfaltových směsí zestárých metodou BSA (C-BSA) a pojiv znovuzískaných z asfaltových směsí (C) stanovený při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz (index stárnutí)

10.6.4. Flokulační toluenový index

Pro sedm nezestárých silničních asfaltů třídy 50/70 (A), určených pro výrobu asfaltových směsí jednotlivých sekcí pokusných úseků, byly pomocí jednobodové precipitační (srážecí) titrace stanoveny hodnoty flokulačního toluenového indexu, které jsou shrnuty v obrázku 90. Z výsledků je patrné, že rozsah hodnot *FTI* byl pro tento omezený soubor silničních asfaltů v rozmezí 1,2 až 2,8. Z obrázku je také patrné, že pojiva se rozdělila převážně do dvou skupin:

- pojiva s neporušenou disperzní stabilitou s hodnotou *FTI* vyšší než 2,0 (pojiva 1, 3, 4, 5 a 6),
- pojiva s problematickou disperzní stabilitou s hodnotou *FTI* nižší než 2,0 (pojiva 2 a 7), přičemž obě tato pojiva byla od stejného výrobce, v této práci označeného I.

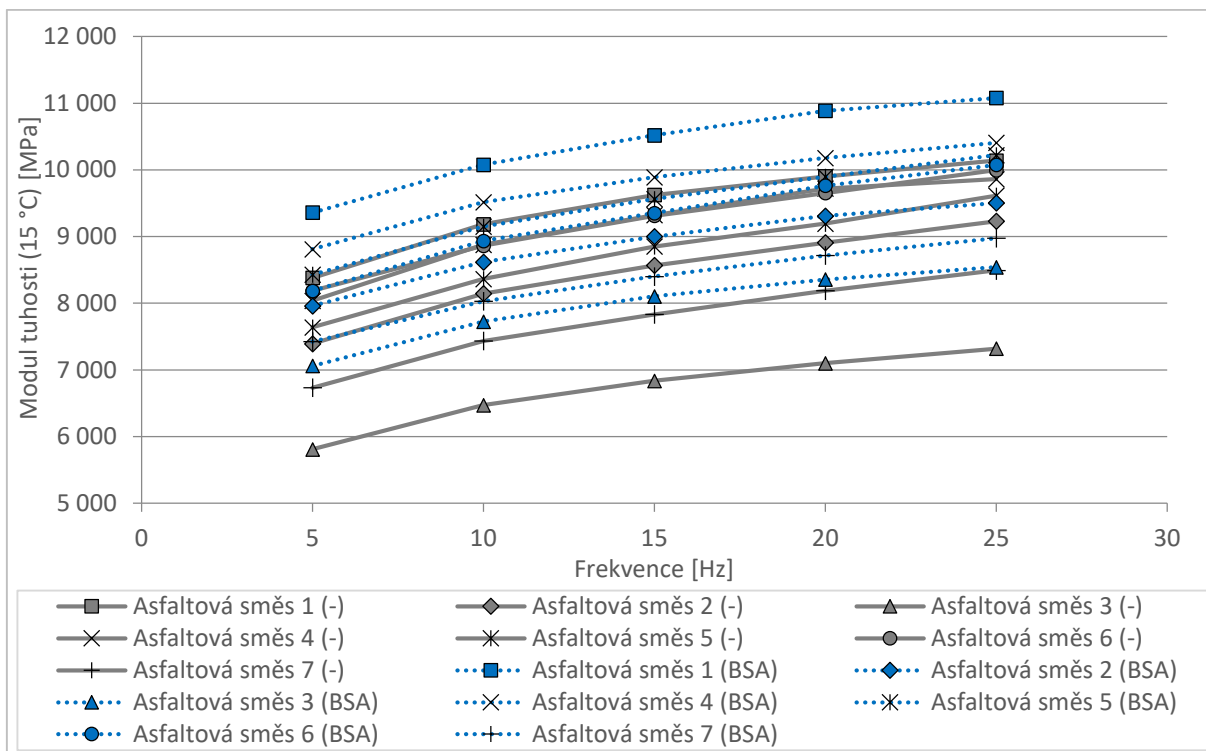
Toto rodělení do dvou skupin je patrné rovněž u většiny ostatních provedených zkoušek (uvedených výše) s důrazem kladeným na vyhodnocení stárnutí. Ostatními provedenými zkouškami bylo prokázáno, že tato dvě pojiva (2 a 7) stárnou intenzivněji než ostatních pět silničních asfaltů. Vyhodnocením hodnoty *FTI* je tedy možné odhadovat náchylnost ke stárnutí silničních asfaltů.



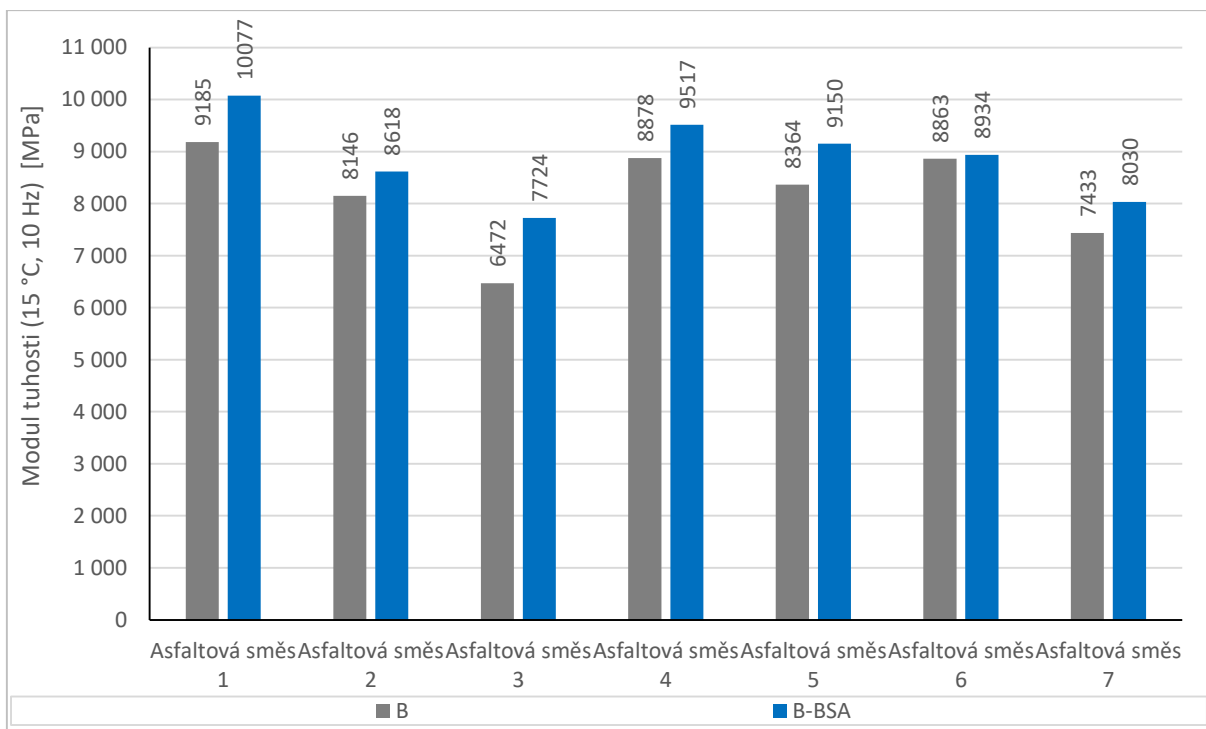
Obrázek 90: Disperzní stabilita vyjádřená hodnotou flokulačního toluenového indexu *FTI*

10.6.5. Tuhost asfaltových směsí

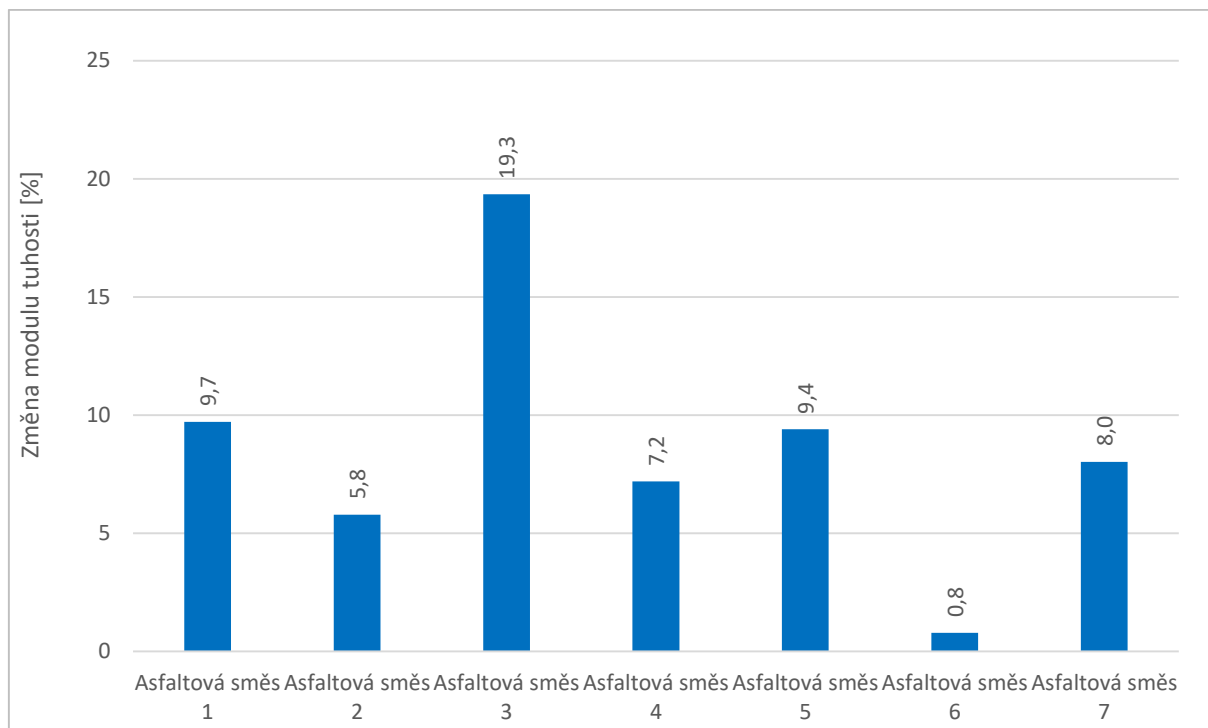
Tuhost asfaltových směsí, odebraných při realizaci jednotlivých sekcí pokusných úseků, byla určena dvoubodovou zkouškou ohybem na komolých klínech podle normy ČSN EN 12697-26 [27]. Výsledky měření modulů tuhosti, zjištěné při teplotě 15 °C, jsou uvedeny v obrázku 91 v závislosti na frekvenci zatěžování a v obrázku 92 při frekvenci 10 Hz. Moduly tuhosti asfaltových směsí (B) stanovené při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz se pohybovaly v rozmezí 6472 MPa (asfaltová směs 3) až 9185 MPa (asfaltová směs 1). Nízká tuhost asfaltové směsi 3 byla zapříčiněna její vyšší mezerovitostí ve srovnání s ostatními směsmi (viz tabulka 8). Vlivem simulace stárnutí metodou BSA se zvýšila tuhost všech asfaltových směsí, a to o 0,8 % (asfaltová směs 6) až o 19,3 % (asfaltová směs 3), což je graficky znázorněno v obrázku 93.



Obrázek 91: Moduly tuhosti směsí z pokusných úseků při teplotě 15 °C v závislosti na frekvenci



Obrázek 92: Moduly tuhosti směsí z pokusných úseků při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz



Obrázek 93: Procentuální zvýšení tuhosti směsí referenčních úseků zapříčiněné stárnutím BSA při frekvenci 10 Hz

10.6.6. Závislosti mezi výsledky vybraných zkoušek pojiv a směsí

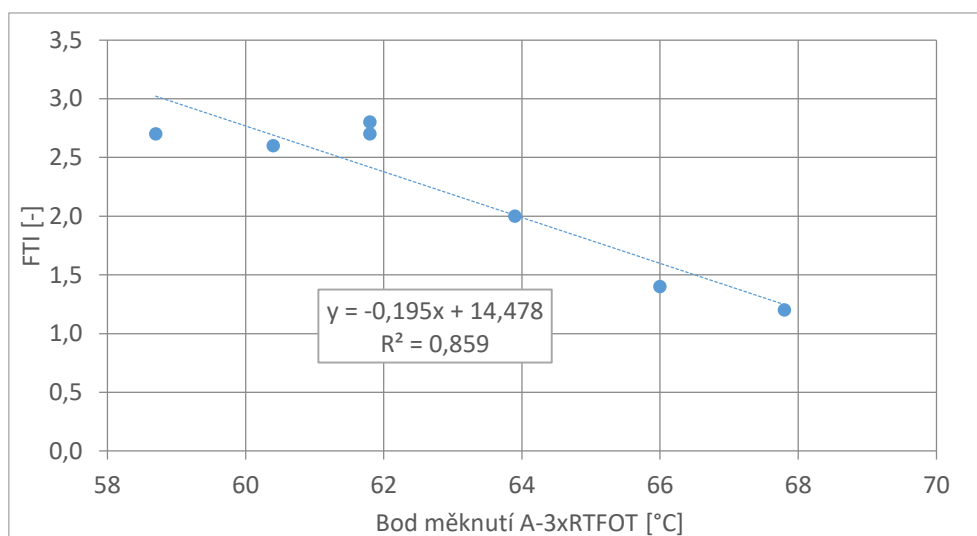
Tato kapitola shrnuje nejzajímavější vzájemné závislosti, které byly nalezeny mezi výsledky zkoušek asfaltových pojiv a asfaltových směsí, použitých při realizaci jednotlivých sekcí pokusných úseků Lukavice (okres Rychnov nad Kněžnou), II/317 Borohrádek a I/34 Polička, ulice Hegerova.

Bylo možné předpokládat určitou závislost mezi výsledky zkoušek pojiv ovlivněných simulací dlouhodobého stárnutí metodou 3xRTFOT (tj. změna vlastnosti pojiva ve stavu A-RTFOT a A-3xRTFOT) a výsledky zkoušek pojiv ovlivněných simulací dlouhodobého stárnutí asfaltových směsí metodou BSA (tj. změna vlastnosti pojiva ve stavu C-BSA a C). V případě hodnot zbylé penetrace (po 3xRTFOT a po BSA) ovšem žádná korelační závislost překvapivě nalezena nebyla ($R^2 = 0,07$). Podobně nízká hodnota koeficientu determinace ($R^2 = 0,07$) byla nalezena i pro hodnoty zvýšení bodu měknutí pojiv po 3xRTFOT (A-3xRTFOT) oproti pojivům po RTFOT (A-RTFOT) a po BSA (C-BSA) oproti pojivům znovuzískaným z asfaltových směsí použitých pro realizaci pokusných úseků (C). Obdobně nízká hodnota koeficientu determinace byla nalezena i pro komplexní smykové moduly ($R^2 = 0,01$) a mírně vyšší pro hodnoty dynamické viskozity ($R^2 = 0,46$). To může být zapříčiněno rozdílnými okrajovými podmínkami (např. teplota, přístup vzduchu, tloušťka vrstvy pojiva) jednotlivých postupů stárnutí a také variujícími vlastnostmi stárnutých asfaltových směsí (např. zrnitost, druh kameniva, obsah pojiva, tloušťka filmu pojiva). Výsledky by ovšem bylo vhodné ověřit na větším souboru asfaltových směsí, resp. pojiv.

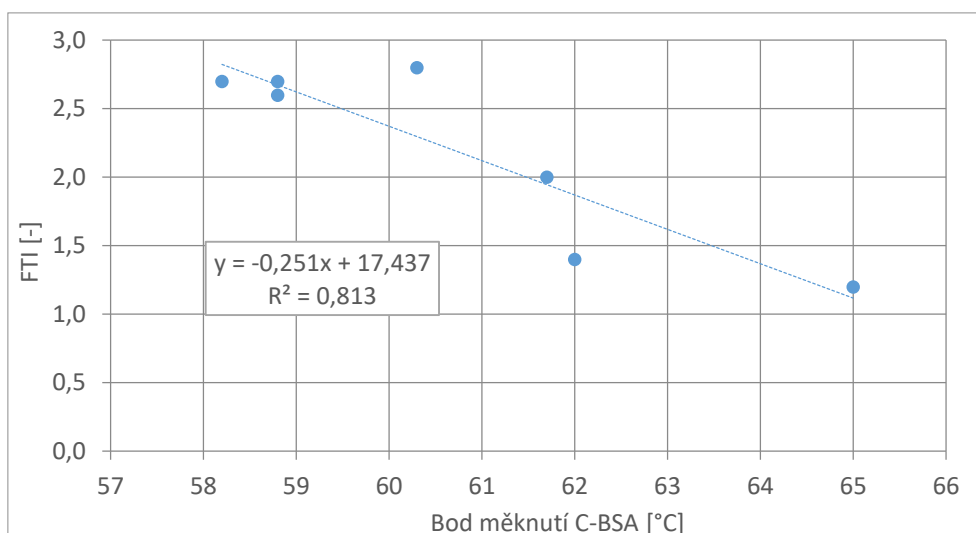
Poměrně zajímavé závislosti bylo ovšem možné nalézt mezi výsledky pojiv zestárlých metodou 3xRTFOT, odebraných při realizaci pokusných úseků (A-3xRTFOT) a výsledky pojiv

znovuzískaných z asfaltové směsi, zestárlé metodou BSA (C-BSA). Koeficient determinace lineární spojnice trendu závislosti bodu měknutí pojiv použitých pro výrobu asfaltových směsí pokusných úseků zestárlých metodou 3xRTFOT (A-RTFOT) a bodu měknutí pojiv znovuzískaných z asfaltových směsí zestárlých metodou BSA (C-BSA) byl $R^2 = 0,83$. Ještě lepší těsnost byla nalezena pro komplexní smykové moduly ($R^2 = 0,95$) a fázové úhly ($R^2 = 0,97$) stejných pojiv. Rovněž mezi bodem měknutí pojiv zestárlých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) a komplexním smykovým modulem stejných pojiv byla nalezena silná lineární závislost ($R^2 = 0,89$), která byla ještě mírně vyšší pro bod měknutí pojiv zestárlých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) a komplexní smykový modul, resp. fázový úhel pojiv znovuzískaných z asfaltových směsí zestárlých metodou BSA (C-BSA) ($R^2 = 0,91$ resp. $R^2 = 0,93$).

Pro ověření výše popsaných metodik je ovšem zajímavější studovat závislosti mezi hodnotami flokulačního toluenového indexu a ostatními výsledky zkoušek, zejména pojiv ovlivněných stárnutím 3xRTFOT. Obrázek 94 reprezentuje poměrně silnou lineární závislost mezi bodem měknutí pojiv zestárlých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) a hodnotami *FTI* nezestárlých pojiv (A) ($R^2 = 0,86$). Čím nižší (horší) je hodnota *FTI*, tím je vyšší vliv stárnutí metodou 3xRTFOT na hodnotu bodu měknutí. Téměř stejně silná závislost byla vyzorována (obrázek 95) mezi bodem měknutí pojiv znovuzískaných ze směsí zestárlých metodou BSA (C-BSA) a hodnotami *FTI* nezestárlých pojiv (A) ($R^2 = 0,81$).

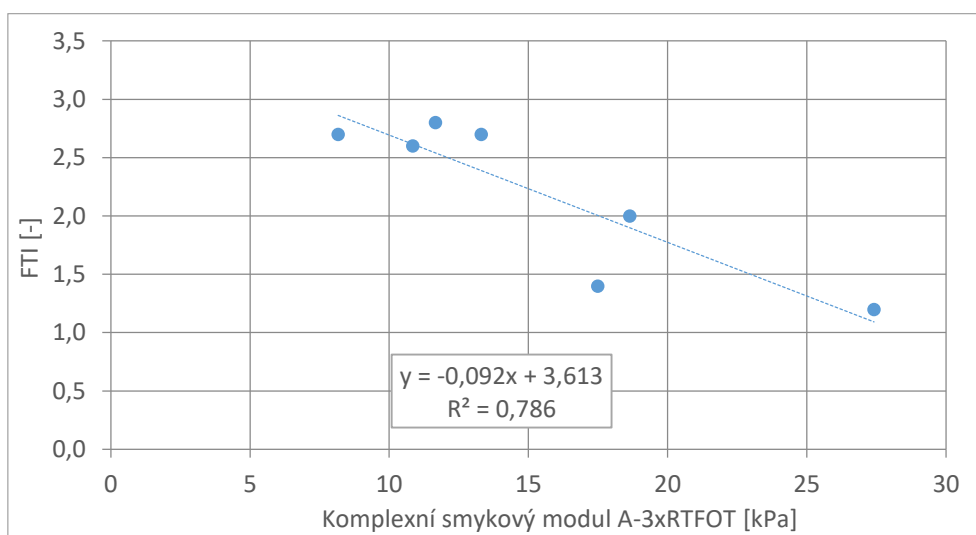


Obrázek 94: Závislost bodu měknutí pojiv zestárlých metodou 3xRTFOT a hodnot flokulačního toluenového indexu

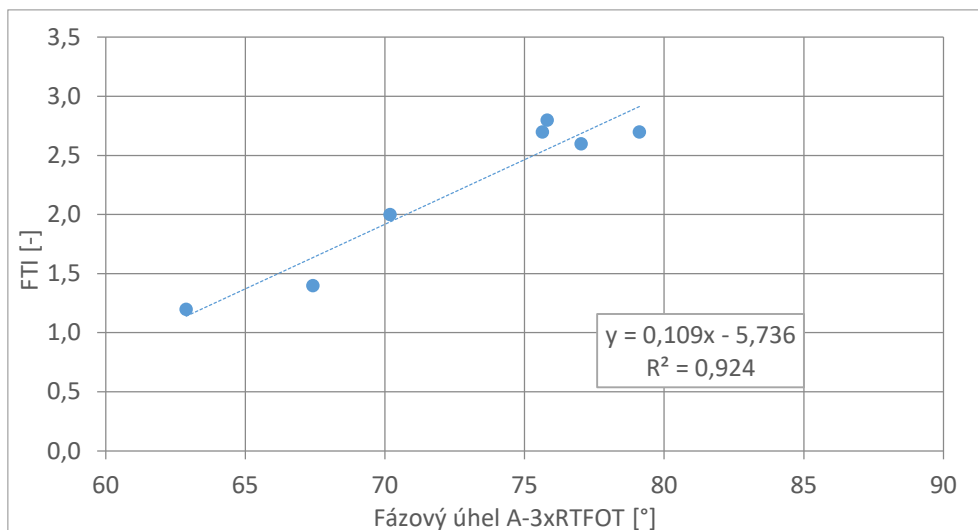


Obrázek 95: Závislost bodu měknutí pojiv znovuzískaných ze směsí zestárých metodou BSA a hodnot flokulačního toluenového indexu

Závislost mezi hodnotami *FTI* nezestárých pojiv a hodnotami komplexních smykových modulů pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) je uvedena v obrázku 96 ($R^2 = 0,79$) a závislost mezi hodnotami *FTI* nezestárých pojiv a hodnotami fázových úhlů pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) je uvedena v obrázku 97 ($R^2 = 0,92$). Opět lze vypožorovat zvýšený vliv stárnutí (vyšší komplexní smykové moduly a nižší fázové úhly) na pojivech s nižší hodnotou *FTI*.

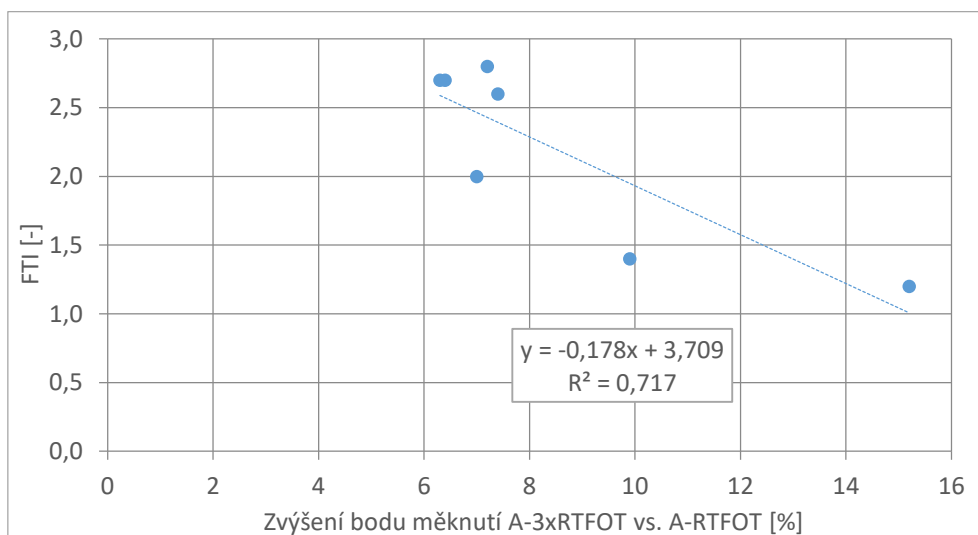


Obrázek 96: Závislost komplexních smykových modulů pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) a hodnot flokulačního toluenového indexu

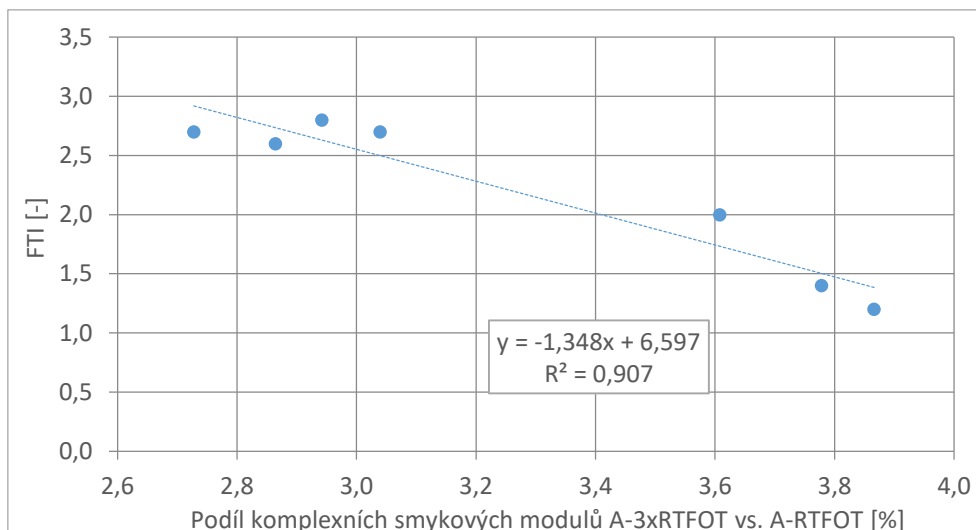


Obrázek 97: Závislost fázových úhlů pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) a hodnot flokulačního toluenového indexu

Závislost mezi hodnotami *FTI* nezestárých pojiv a hodnotami zvýšení bodu měknutí pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) oproti pojivům po RTFOT (A-RTFOT) je uvedena v obrázku 98 ($R^2 = 0,72$) a závislost mezi hodnotami *FTI* nezestárých pojiv a hodnotami podílu komplexních smykových modulů pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) a pojiv zestárých metodou RTFOT (A-RTFOT) je uvedena v obrázku 99 ($R^2 = 0,91$). Opět lze vypožorovat zvýšený vliv stárnutí (větší zvýšení bodu měknutí i podílů komplexních smykových modulů) na pojivech s nižší hodnotou *FTI*.



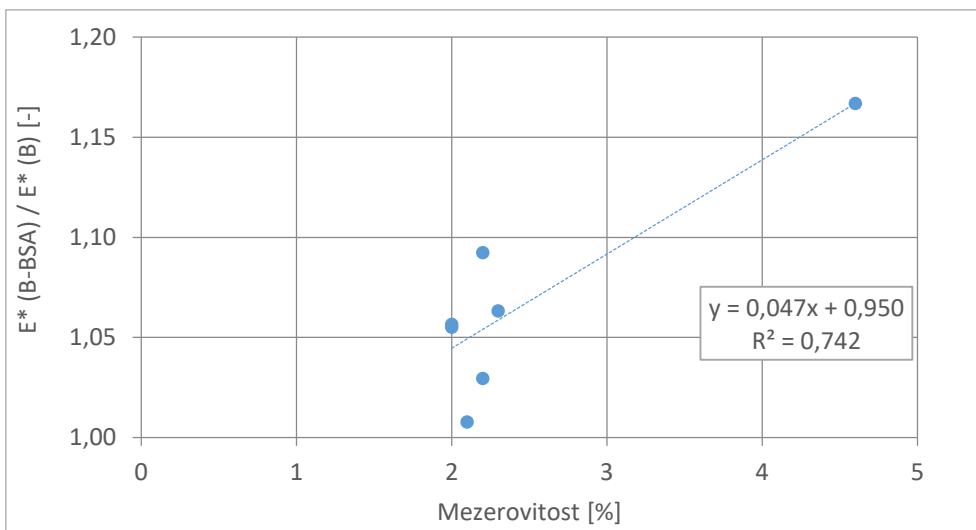
Obrázek 98: Závislost zvýšení bodu měknutí pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) oproti pojivům po RTFOT (A-RTFOT) a hodnot flokulačního toluenového indexu



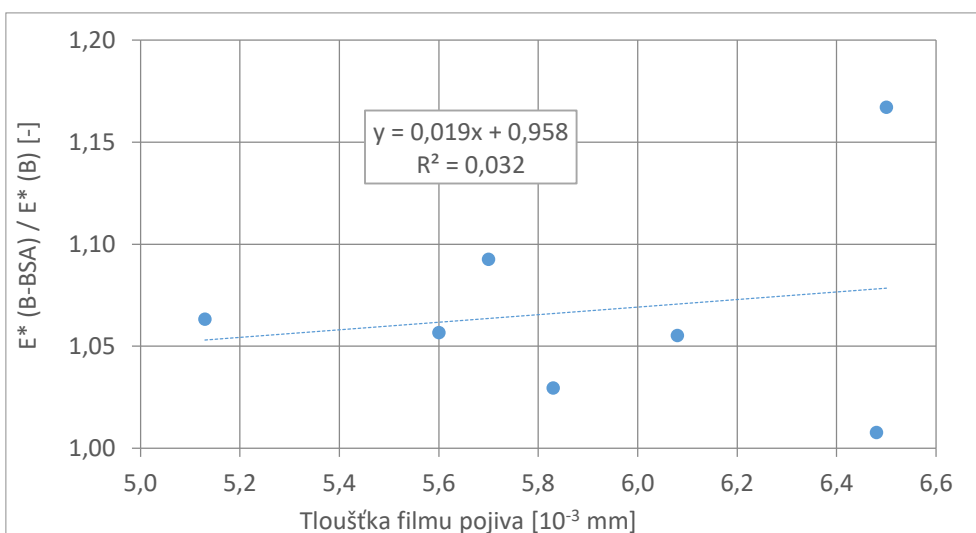
Obrázek 99: Závislost podílu komplexních smykových modulů pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) a pojiv zestárých metodou RTFOT (A-RTFOT) a hodnot flokulačního toluenového indexu

Při souhrnném srovnání výsledků zkoušek nezestárých pojiv (A) i pojiv zestárých všemi metodami (A-RTFOT, A-3xRTFOT, C, C-BSA) vždy do jedné závislosti je možné získat podobné koeficienty determinace, jako jsou uvedeny v kapitole 8.8 pro ucelený soubor patnácti silničních asphaltů. Například závislost mezi výsledky penetrace jehlou a bodu měknutí dosahovala koeficientu determinace $R^2 = 0,87$ a lineární závislost dynamické viskozity (135 °C) a bodu měknutí dosahovala $R^2 = 0,80$. Nejtěsnější závislost byla nalezena mezi komplexním smykovým modulem (60 °C, 1,0 Hz) a bodem měknutí ($R^2 = 0,94$) a komplexním smykovým modulem (60 °C, 1,0 Hz) a penetrací jehlou ($R^2 = 0,91$).

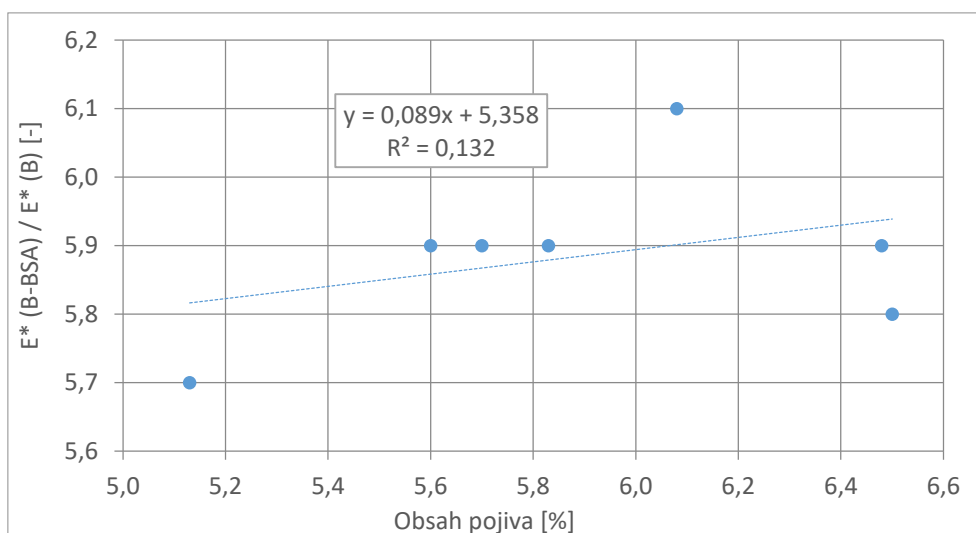
I přesto, že se při modelování stárnutí postupem BSA využívá nezhotovená vrstva směsi, je zvýšení modulů tuhosti asphaltových směsí zapříčiněné stárnutím BSA závislé na mezerovitosti jednotlivých směsí ($R^2 = 0,74$), což je patrné z obrázku 100. Je ovšem nutné podotknout, že mezerovitost většiny asphaltových směsí dosahovala srovnatelných hodnot, a proto je korelaci možné vysledovat pouze díky hodnotám směsi č. 3. Zvýšení tuhosti nekoreluje s tloušťkou filmu pojiva na povrchu kameniva jednotlivých asphaltových směsí ani s jejich obsahem pojiva, což dokládá obrázek 101 a 102.



Obrázek 100: Podíl modulu tuhosti směsi zestárlé metodou BSA a modulu tuhosti nezestárlé směsi v závislosti na mezerovitosti



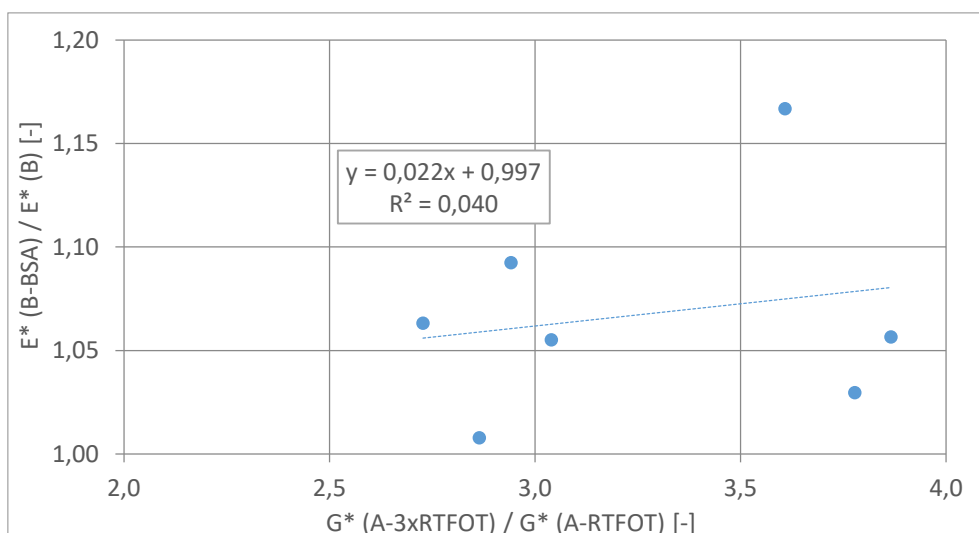
Obrázek 101: Podíl modulu tuhosti směsi po stárnutí metodou BSA a modulu tuhosti nezestárlé směsi v závislosti na tloušťce filmu pojiva na povrchu kameniva



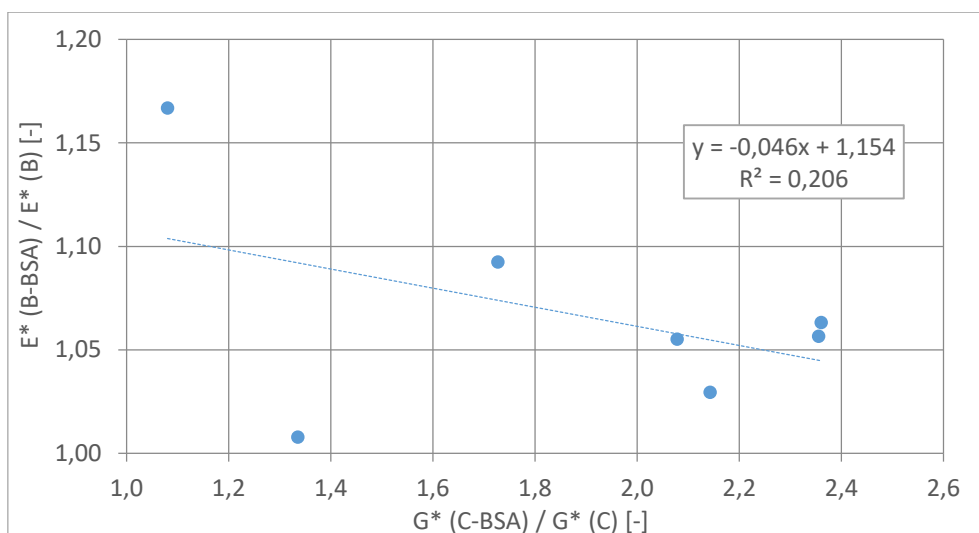
Obrázek 102: Podíl modulu tuhosti směsi po stárnutí metodou BSA a modulu tuhosti nezestárlé směsi v závislosti na obsahu pojiva

Předpokládá se, že stárnutí pojiva metodou RTFOT by mělo odpovídat zestárnutí pojiva při výrobě asfaltové směsi a stárnutí pojiva metodou 3xRTFOT by víceméně mělo odpovídat zestárnutí pojiva v průběhu životnosti, stejně jako stárnutí asfaltové směsi metodou BSA. Proto byl srovnán podíl komplexních smykových modulů (60 °C, 1 Hz) pojiv po 3xRTFOT (A-3xRTFOT) a po RTFOT (A-RTFOT) s podílem modulů tuhosti (15 °C a 10 Hz) asfaltových směsí po BSA (B-BSA) a nezestárlé směsi (B), který je zachycen na obrázku 103. Tento podíl by měl srovnávat zestárnutí pojiva v průběhu životnosti na vozovce, přičemž stárnutí bylo provedeno dvěma metodami. Z obrázku je vidět neexistující korelační závislost těchto podílů ($R^2 = 0,04$), která se zlepšuje jen mírně pro totožné podmínky zkoušky pojiv i směsí, tj. 15 °C, 10 Hz ($R^2 = 0,33$). Tuto závislost by ovšem bylo vhodné zjistit na větším souboru asfaltových pojiv a asfaltových směsí.

Obrázek 104 dokumentuje chybějící korelační závislost mezi podílem komplexních smykových modulů pojiv vydestilovaných ze směsí zestárlých metodou BSA (C-BSA) a komplexních smykových modulů pojiv vydestilovaných z nezestárlých směsí (C) při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz a podílem modulů tuhosti asfaltových směsí po BSA (B-BSA) a modulů tuhosti nezestárlých směsí (B) při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz ($R^2 = 0,21$).

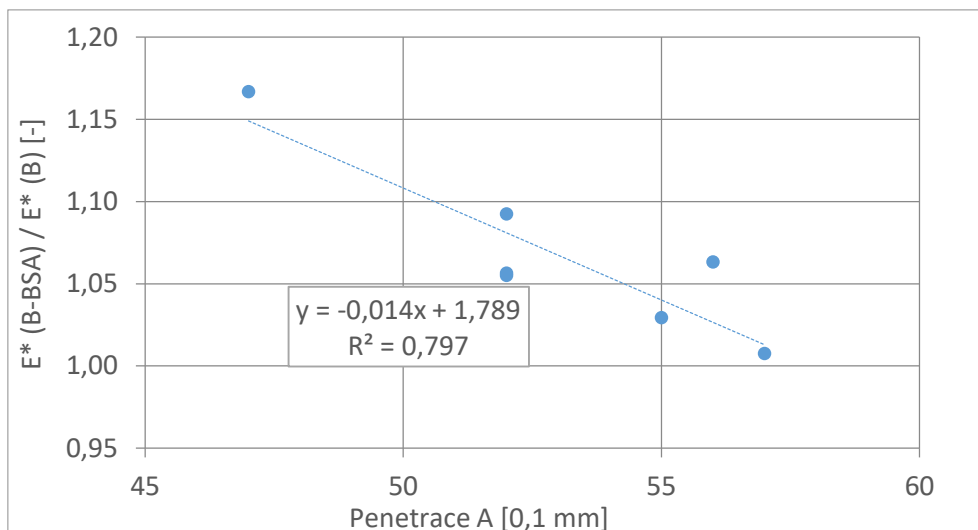


Obrázek 103: Závislost podílu modulů tuhosti asfaltových směsí po stárnutí metodou BSA a nezestárlé směsi (15 °C a 10 Hz) a podílu komplexních smykových modulů pojiv po 3xRTFOT a po RTFOT (60 °C, 1 Hz)



Obrázek 104: Závislost podílu modulů tuhosti asfaltových směsí po stárnutí metodou BSA a nezestárlé směsi (15 °C a 10 Hz) a podílu komplexních smykových modulů pojiv vydestilovaných ze směsí zestárlých metodou BSA a nezestárlých směsí (60 °C, 1,0 Hz)

Zajímavou korelační závislost bylo možné nalézt mezi hodnotami penetrace jehlu nezestárlých pojiv (A) a podílem modulů tuhosti asfaltových směsí po BSA (B-BSA) a modulů tuhosti nezestárlých směsí (B) při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz ($R^2 = 0,80$), což je patrné z obrázku 105. Obrázek ukazuje, že s rostoucí počáteční hodnotou penetrace jehlou dochází k poklesu podílu modulů tuhosti asfaltových směsí po BSA (B-BSA) a modulů tuhosti nezestárlých směsí (B), čili k omezení vlivu stárnutí metodou BSA. Tyto výsledky by ovšem bylo potřeba ověřit na větším souboru materiálů. Ostatní zkoušky pojiv dosahovaly spíše nízké závislosti s podílem modulů tuhosti asfaltových směsí po BSA a nezestárlé směsi.



Obrázek 105: Závislost podílu modulů tuhosti asfaltových směsí po stárnutí metodou BSA a nezestárlé směsi (15 °C a 10 Hz) a hodnot penetrace jehlou nezestárlých poživ

10.7. Zhodnocení stavu pokusných úseků

Pokusné úseky, popsané v kapitole 10.1 až 10.3, jsou až do současné doby (6 let) pravidelně monitorovány vizuálními prohlídkami s vyhodnocením jejich aktuálního stavu. Pro ucelenější informaci o příčinách chování jednotlivých pokusných úseků jsou v tabulce 11 stručně sumarizovány souhrnné výsledky laboratorních zkoušek asfaltových poživ a směsí, použitých při realizaci jednotlivých sekcí pokusných úseků.

Tabulka 11: Souhrnné výsledky laboratorních zkoušek asfaltových pojiv a směsí, použitých při realizaci jednotlivých pokusných úseků

Úsek	Lukavice		Borohrádek		Polička		
	1	2	1	2	1	2	3
Sekce	ACO 11 S		ACO 11 +		ACO 11 S		
Asfaltová směs	ACO 11 S		ACO 11 +		ACO 11 S		
Výrobce pojiva	V	I	VIII	V	V	VI	I
Penetrace jehlou [0,1 mm]	52	55	47	52	56	57	52
Zbylá penetrace po 3xRTFOT [%]	42,3	40,0	38,3	42,3	44,6	45,6	38,5
Bod měknutí [°C]	49,1	49,7	51,0	49,9	48,7	47,5	50,8
Zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT [°C]	12,7	16,3	12,9	11,9	10,0	12,9	17,0
G* (60 °C, 1,0 Hz) [kPa]	1,66	1,28	1,85	1,75	1,50	1,58	2,01
G* po 3xRTFOT / G* (60 °C, 1,0 Hz) [kPa]	7,0	13,7	10,1	7,6	5,4	6,9	13,6
Flokulační toluenový index FTI [-]	2,8	1,4	2,0	2,7	2,7	2,6	1,2
Penetrace znovuzískaného pojiva [0,1 mm]	28	34	23	39	43	32	32
Zbylá penetrace po BSA [%]	78,6	73,5	87,0	66,7	55,8	81,3	71,9
Bod měknutí znovuzískaného pojiva [°C]	56,9	56,8	60,9	53,5	52,6	57,4	60,1
Zvýšení bodu měknutí po BSA [°C]	3,4	5,2	0,8	4,7	6,2	1,4	4,9
E* (15 °C, 10 Hz) [MPa]	9185	8146	6472	8878	8364	8863	7433
E* (15 °C, 10 Hz) po BSA [MPa]	10077	8618	7724	9517	9150	8934	8030
E* po BSA / E* (15 °C, 10 Hz) [-]	1,097	1,058	1,193	1,072	1,094	1,008	1,080

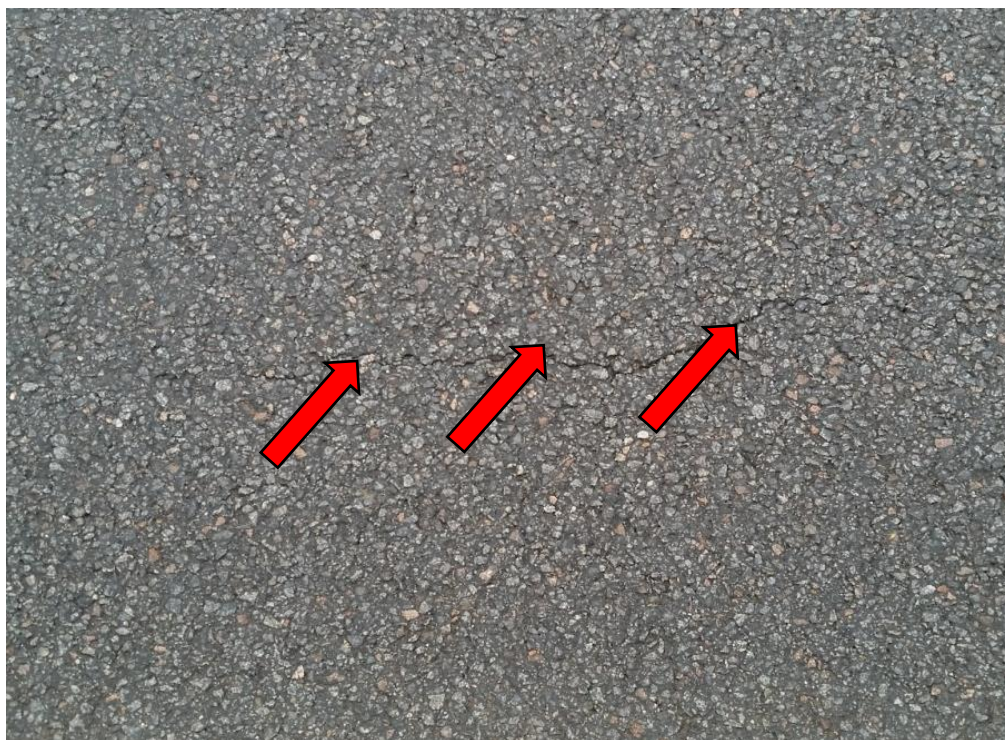
G*... Komplexní smykový modul asfaltového pojiva

E*... Modul tuhosti asfaltové směsi

Vzhledem k poměrně nízkému dopravnímu zatížení sledovaných pokusných úseků Lukavice a II/317 Borohrádek se na těchto úsecích doposud nevyskytly významnější poruchy, které by byly spojeny s chováním obrusné vrstvy (zejm. povrchová koroze, trhliny vznikající v obrusné vrstvě atd.) a stav těchto úseků je odpovídající šestiletému užívání. Rovněž stav jednotlivých podúseků (sekcí) těchto dvou pokusných úseků se jeví jako vzájemně srovnatelný.

Zcela odlišná situace nastává u třetího sledovaného pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova). Na tomto průtahu obcí Polička je denní intenzita těžkých nákladních vozidel (TNV) 1078 vozidel/den [66], což odpovídá třídě dopravního zatížení III. Již po třech letech provozu byly na 3. sekci úseku (úsek se silničním asfaltem C resp. A7 výrobce I) zaznamenány vznikající poruchy obrusné vrstvy (viz obrázek 106 a 107), které se na ostatních dvou sekcích (1. sekce s pojivem G a 2. sekce s pojivem H) nevyskytovaly. Jednalo se zejména o poruchy, klasifikované v TP 82 [133] jako ztráta asfaltového tmelu, hloubková koroze a trhlina úzká podélná či příčná. Je nutné si uvědomit, že silniční asfalt třídy 50/70, použitý na 3. sekci pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova), dosahoval nízké hodnoty FTI (1,2) a tudíž lze u tohoto pojiva předpokládat porušenou vnitřní disperzní stabilitu. Silniční asfalty z 1. a 2. sekce tohoto pokusného úseku vykazovaly hodnoty FTI v intervalu 2,6 až 2,7. Rovněž hodnota zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT silničního asfaltu použitého pro výrobu asfaltové směsi 3. sekce úseku I/34 Polička (17,0 °C) byla oproti hodnotám zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT pojiv ze zbylých dvou sekcí pokusného úseku (10,0 °C a 12,9 °C) znatelně vyšší (horší). Je proto

možné předpokládat, že v části stavby, kde byl použit silniční asfalt označený C, se projevují poruchy související se stárnutím pojiva již po třech letech provozu.



Obrázek 106: Trhlina úzká, dosud neošetřená, vznikající na povrchu obrusné vrstvy 3. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po třech letech provozu [48]



Obrázek 107: Ztráta asfaltového tmelu z povrchu obrusné vrstvy 3. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po třech letech provozu [48]

Při provádění vizuální prohlídky pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po šestiletém užívání (listopad 2020) již bylo zaznamenáno zvýšené množství poruch, které souvisely s působícími klimatickými vlivy (zejména mrazové příčné trhliny – viz obrázek 108) a s poměrně vysokým dopravním zatížením (zejména nepravidelné a místy síťové trhliny – viz obrázek 109 a 110). Situace byla navíc negativně ovlivněna množstvím inženýrských sítí, kolem kterých se poruchy vyskytovaly ve zvýšené míře. Tyto uvedené poruchy bylo možné zaznamenat na všech třech sekcích pokusného úseku. Na 3. sekci pokusného úseku, při jejíž realizaci byl použit silniční asfalt s nízkou hodnotou flokulačního toluenového indexu ($FTI = 1,2$), se ovšem poruchy vyskytovaly častěji než na zbylých dvou sekcích. Zejména nepravidelné trhliny bylo možné pozorovat na velké části 3. sekce, což je patrné z obrázku 111. Na povrchu obrusné vrstvy 3. sekce pokusného úseku se rovněž po šesti letech užívání vyskytovaly poruchy, klasifikované v TP 82 [133] jako ztráta asfaltového tmelu, často přecházející do hloubkové koroze (obrázek 112), což jsou poruchy, které pravděpodobně souvisejí se stárnutím asfaltového pojiva a na ostatních dvou sekcích (1. a 2. sekce) pokusného úseku se téměř nevyskytovaly.



Obrázek 108: Mrazová trhlina na povrchu obrusné vrstvy 1. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po šesti letech provozu [146]



Obrázek 109: Nepravidelné trhliny na povrchu obrusné vrstvy 1. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po šesti letech provozu [146]



Obrázek 110: Lokální výskyt síťových trhlín na omezené ploše povrchu obrusné vrstvy 2. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po šesti letech provozu [146]



Obrázek 111: Nepravidelné trhliny na povrchu obrusné vrstvy 3. sekce pokusného úseku I/34 Políčka (ulice Hegerova) po šesti letech provozu [146]



Obrázek 112: Ztráta asfaltového tmelu a hloubková koroze na povrchu obrusné vrstvy 3. sekce pokusného úseku I/34 Políčka (ulice Hegerova) po šesti letech provozu [146]

Pravidelným sledováním stavu pokusných úseků s vyhodnocením vývoje poruch tedy byl v praxi prokázán vliv disperzní stability silničních asfaltů a jejich náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí na chování a trvanlivost asfaltových vrstev vozovek.

10.8. Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí

V rámci projektu TAČR č. TA03030381 „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“ [141] a na základě výsledků uvedených výše, byla vyvinuta metodika popisující laboratorní simulaci stárnutí asfaltové směsi [53]. Cílem metodiky je zavést jednoduchý zkušební postup, který by umožňoval laboratorně simulovat změnu vlastností asfaltového pojiva zapříčiněnou termooxidačním stárnutím, přičemž toto pojivo je již zabudováno v asfaltové směsi. Celé znění metodiky, která je certifikována Ministerstvem dopravy, je uvedeno v příloze C a na stránce <https://www.pko.fce.vutbr.cz/>. Níže je pro přehlednost metodika stručně představena.

10.8.1. Podstata metody

Nežádoucí změny vlastností pojiva nebo asfaltové směsi, které snižují užité vlastnosti materiálu, se souhrnně označují jako jeho degradace. Čím je vyšší mezerovitost asfaltové směsi, tím snáze může do vrstvy pronikat vzdušný kyslík, což je jednou z příčin vyšší termooxidační zátěže (stárnutí) asfaltového pojiva. Rovněž v případě, že asfaltový film je na povrchu kameniva příliš tenký, může dojít k nadměrnému stárnutí této tenké vrstvy pojiva. Na stárnutí asfaltového pojiva může mít vliv i druh a kvalita použitého kameniva. Aby bylo možné hodnotit vliv těchto parametrů na rychlost a rozsah degradace asfaltového pojiva v reálné asfaltové směsi, je nutné v laboratoři modelovat stárnutí asfaltového pojiva zabudovaného přímo v asfaltové směsi (ne pouze na asfaltovém pojivu).

Z hlediska aplikační snadnosti a dostupných zkušeností se v současnosti jeví použití Braunschweigské metody stárnutí (Braunschweiger Alterung – BSA) jako neoptimálnější řešení pro modelování stárnutí asfaltových směsí. Metoda BSA byla vyvinuta a optimalizována na Technické univerzitě Braunschweig (Německo). Nevyžaduje náročné instrumentální vybavení a je snadno použitelná v podmínkách České republiky. Postup je možné aplikovat na laboratorně připravenou asfaltovou směs nebo na asfaltovou směs vyrobenou na obalovně.

Při této metodě se na vrstvu nezhotušené asfaltové směsi působí zvýšenou teplotou po stanovenou dobu. Stupeň zestárnutí asfaltového pojiva obsaženého v asfaltové směsi se poté hodnotí změnou vlastností zestárlé asfaltové směsi po jejím přeformování na zkušební tělesa (např. změna tuhosti) oproti vlastnostem směsi před procesem simulace stárnutí. Další možností hodnocení stárnutí asfaltové směsi je znovuzískání asfaltového pojiva z asfaltové směsi před a po procesu simulace stárnutí, přičemž na těchto pojivech se určí vybrané laboratorní vlastnosti (např. penetrace jehlou, bod měknutí, komplexní smykové moduly a fázové úhly, dynamická viskozita atd.). Z rozdílů výsledků těchto zkoušek se hodnotí míra zestárnutí pojiva v asfaltové směsi.

10.8.2. Postup zkoušky

Před vlastní zkouškou stárnutí se na obalovně asfaltových směsí odebere vzorek asfaltové směsi v souladu s ČSN EN 12697-27 [28] nebo se připraví v laboratoři podle ČSN EN 12697-35 [29]. V případě odebraného vzorku asfaltové směsi se vzorek zahřeje v laboratorní sušárně a rozprostře se v tloušťce vrstvy 25 mm (± 5 mm) na síto. Vzorek asfaltové směsi připravený v laboratoři se ihned po vyrobení rozprostře na síto v tloušťce vrstvy přibližně 25 mm (± 5 mm) tak, aby nebylo nutné směs znovu ohřívat. Část asfaltové směsi se uchová pro určení jejích počátečních vlastností před stárnutím.

Laboratorní sušárna s nuceným prouděním vzduchu se předehřeje na teplotu 80 °C (± 1 °C) po dobu 60 minut. Síta s asfaltovou směsí se vloží do vyhřáté laboratorní sušárny. Stárnutí trvá 96 hodin (± 1 hodina). Poté se síta se zestárlou asfaltovou směsí vyjmou z laboratorní sušárny, asfaltová směs se odebere ze sít a uloží pro další zkoušky.

10.8.3. Hodnocení změn vlastností asfaltové směsi způsobené stárnutím metodou BSA

Doposud nebyly stanoveny požadované parametry, které by měly zajišťovat vyhovující vlastnosti asfaltové směsi, resp. vlastnosti znovuzískaného pojiva ze zestárlé směsi po procesu stárnutí BSA. Je to zřejmě z toho důvodu, že na výsledky zkoušek má kromě vlastností použitého pojiva značný vliv druh asfaltové směsi, její složení, kvalita použitých materiálů a eventuálně použití přísad. Postup je tedy vhodný zejména pro relativní porovnání různých asfaltových směsí při jejich laboratorním návrhu nebo kontrole vlastností, pro analyzování vlivu přidání modifikačních přísad nebo pro porovnání různých postupů výroby asfaltových směsí z hlediska jejich vlivu na termooxidační stárnutí.

10.8.4. Popis hodnocení změn vlastností asfaltové směsi způsobených stárnutím

Vlastnosti asfaltové směsi po laboratorní simulaci stárnutí se stanovují příslušnými zkušebními metodami, aniž by se vzorek znovu ohříval více než jednou. Na zestárlé asfaltové směsi je možné určit tuhost podle ČSN EN 12697-26 [27] nebo je možné vakuovou destilací v rotačním vakuovém destilačním zařízení zpětně získat asfaltová pojiva postupem podle ČSN EN 12697-3 [16] pro další zkoušky pojiv obsažených v asfaltové směsi (penetrace jehlou podle ČSN EN 1426 [37], bod měknutí podle ČSN EN 1427 [38], bod lámavosti podle ČSN EN 12593 [12] a komplexní smykové moduly a fázové úhly podle ČSN EN 14770 [40]). Vliv stárnutí metodou BSA na změnu vlastností asfaltových směsí se pak hodnotí změnou hodnot uvedených laboratorních zkoušek před stárnutím a po stárnutí metodou BSA.

Vzhledem k velkému množství parametrů, které je nutné při hodnocení stárnutí asfaltové směsi uvažovat (např. použité materiály, typ směsi, tloušťka asfaltového filmu), slouží metodika jako nástroj pro relativní porovnání různých asfaltových směsí ve fázi návrhu a optimalizace asfaltové směsi, pro analyzování vlivu přidání modifikačních přísad nebo pro porovnání různých postupů výroby asfaltových směsí z hlediska jejich vlivu na termooxidační stárnutí v nich obsažených asfaltových pojiv.

11. ZÁVĚRY HABILITAČNÍ PRÁCE

Všechny činnosti, které jsou popisovány v rámci této habilitační práce, si kladly za cíl rozšířit soubor využitelných moderních zkušebních metod, které budou mít potenciál výstižněji popsat chování stavebních silničních materiálů, zejména asfaltových pojiv a asfaltových směsí, se zaměřením na jejich trvanlivost ve vozovce. Konkrétně bylo dosaženo níže uvedených cílů:

- a) Byl popsán systém technických předpisů používaných v České republice pro technologii výstavby vozovek.
- b) Bylo popsáno složení a struktura asfaltových pojiv a jejich změn v průběhu jejich užívání včetně hodnocení vlivu přítomnosti visbreakingových zbytků na vlastnosti asfaltových pojiv.
- c) Byla popsána problematika stárnutí asfaltových pojiv a asfaltových směsí v průběhu výroby, pokládky a jejich následné funkce v konstrukci vozovky včetně představení běžně využívaných laboratorních zkušebních metod, simulujících stárnutí asfaltových pojiv a asfaltových směsí. Dále byl popsán stávající způsob hodnocení náchylnosti asfaltových pojiv a směsí ke stárnutí v České republice.
- d) Bylo představeno reologické chování asfaltových pojiv včetně popisu systému funkčního zkoušení asfaltových pojiv s důrazem kladeným na soubor laboratorních zkoušek využívaných v Evropě a v České republice.
- e) Byl popsán systém funkčního zkoušení asfaltových směsí a představeny nejčastěji využívané moderní funkční zkoušky, vhodné pro hodnocení chování asfaltových směsí.
- f) V experimentální části práce byla primární pozornost věnována silničním asfaltům, které jsou v České republice nejrozšířenějším druhem asfaltových pojiv, používaným pro stmelení kameniva v asfaltových směsích. Na uceleném souboru vybraných silničních asfaltů byla provedena řada empirických a funkčních zkoušek pro ověření laboratorních vlastností těchto pojiv. Po jejich vyhodnocení je možno konstatovat, že většina srovnávaných pojiv vyhovovala požadavkům platných předpisů, i když z výsledků pokročilých zkoušek, provedených nad rámec normových požadavků, je patrné, že se pojiva chovají vzájemně značně rozdílně.
- g) Na základě dosažených výsledků laboratorních zkoušek byla vyvinuta metodika pro hodnocení vnitřní chemické (disperzní) stability asfaltových pojiv [125], což je vlastnost, ke které se v České republice doposud přímo nevztahovala žádná

zkušební metoda. Tato metodika byla projednána s Úsekem kontroly kvality staveb Ředitelství silnic a dálnic ČR a následně byla dne 25. 1. 2017 certifikována Ministerstvem dopravy, přičemž bylo vydáno osvědčení o uznání uplatněné certifikované metodiky pod č.j. 142/2016-710-VV/1. Text certifikované metodiky je uveden v příloze této práce. Certifikovanou metodiku již v současné době rutinně využívají mimo jiné i některé společnosti, zabývající se výrobou a prodejem asfaltových pojiv.

- h) Z důvodu potřeby ověření závislosti mezi hodnotou disperzní stability a náchylností asfaltových pojiv ke stárnutí a dále z důvodu nutnosti nastavení kritického parametru do metodiky hodnotící náchylnost asfaltových pojiv ke stárnutí byl ve druhé fázi experimentální části práce rozšířen zkušební soubor hodnocených silničních asfaltů na 47 vzorků. Tento soubor obsahoval rovněž silniční asfalty, které se při skladování, výrobě asfaltové směsi nebo pokládce nebo hutnění vrstvy asfaltové směsi chovaly nestandardně.
- i) Na základě vyhodnocení změn vlastností těchto pojiv, způsobených stárnutím, byla vypracována metodika hodnotící silniční asfalty z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí [53] včetně omezujících parametrů, při jejichž překročení lze považovat pojivo za náchylné ke stárnutí (viz tabulka 7). Tato metodika byla projednána s Úsekem kontroly kvality staveb Ředitelství silnic a dálnic ČR a následně byla dne 21. 12. 2015 certifikována Ministerstvem dopravy, přičemž bylo vydáno osvědčení o uznání uplatněné certifikované metodiky pod č.j. 99/2015-710-VV/1. Text certifikované metodiky je uveden v příloze této práce.
- j) Výsledky disperzní stability a náchylnosti vybraných silničních asfaltů k termooxidačnímu stárnutí byly srovnány s vlastnostmi laboratorně smíšených asfaltových pojiv, která obsahovala známé podíly visbreakingového zbytku. Z výsledků je patrné, že s rostoucím obsahem visbreakingového zbytku klesá (zhoršuje se) disperzní stabilita pojiva a zvyšuje se jeho náchylnost k termooxidačnímu stárnutí.
- k) V rámci výzkumného projektu [141], jehož byl autor habilitační práce hlavním řešitelem, se podařilo vybudovat tři pokusné úseky, kde se varioval silniční asfalt v asfaltové směsi typu asfaltový beton pro obrusné vrstvy. První dva úseky obsahovaly dvě sekce s různým silničním asfaltem třídy 50/70 (úsek v obci Lukavice – okres Rychnov nad Kněžnou a úsek II/317 Borohrádek) a třetí pokusný úsek (I/34 Polička, ulice Hegerova) byl rozdělen do tří sekcí, vzájemně se od sebe lišících pouze zdrojem použitého silničního asfaltu třídy 50/70. Z každé sekce všech pokusných úseků byla odebrána asfaltová směs a zároveň i použitý silniční asfalt pro následné provedení laboratorních zkoušek pojiv i asfaltových směsí. Odebrané asfaltové směsi byly zestárnuty Braunschweigskou metodou stárnutí (BSA) a vlastnosti

těchto zestárlých směsí a pojiv znovuzískaných z těchto směsí byly korelovány s laboratorními vlastnostmi pojiv (nezestárlých i laboratorně zestárlých) použitých pro výrobu odpovídajících asfaltových směsí. Na základě porovnání výsledků laboratorních zkoušek byla vyvinuta metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí [52]. Tato metodika byla následně dne 21. 12. 2015 certifikována Ministerstvem dopravy, přičemž bylo vydáno osvědčení o uznání uplatněné certifikované metodiky pod č.j. 100/2015-710-VV/1. Text certifikované metodiky je uveden v příloze této práce.

- l) Výše popsané pokusné úseky jsou doposud pravidelně sledovány a průběžně je vyhodnocován jejich stav. Zejména na nejvíce zatíženém pokusném úseku (I/34 Polička, ulice Hegerova) byly již po třech letech užívání zaznamenány poruchy obrusné vrstvy, spojené se stárnutím asfaltového pojiva (ztráta asfaltového tmelu, hloubková koroze a trhliny úzké podélné či příčné). Tyto poruchy se ovšem vyskytovaly pouze na sekci úseku, kde byl použit silniční asfalt s porušenou disperzní stabilitou a vysokou náchylností k termooxidačnímu stárnutí, určenou pomocí metodiky pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí [53], čímž byla potvrzena relevantnost vyvinutých metodik v praxi.
- m) V průběhu řešení výše zmiňovaného výzkumného projektu a v době sestavování této habilitační práce postupně proběhla řada jednání s představiteli státních investorských organizací (Ředitelství silnic a dálnic ČR, Ministerstvo dopravy), na kterých byly představovány výsledky práce s cílem umožnit zavedení těchto metod do běžné praxe. Souběžně s těmito aktivitami proběhly školení s touto tematikou, na kterých jsou prezentovány výsledky výzkumu. Jde například o pravidelné semináře pro zaměstnance silniční laboratoří, pořádané každoročně na Ústavu pozemních komunikací, jednání národního aplikačního týmu pro asfaltová pojiva (NAT 1) nebo o jednání pracovních týmů při Sdružení pro výstavbu silnic, z nichž jednoho týmu je autor habilitační práce vedoucím (tým č. 7 pro asfaltová pojiva a asfaltové emulze) a dalších týmů je členem.
- n) Na základě výsledků výše popsaného výzkumu byly stanoveny závěry, které byly využity pro získání a řešení následného výzkumného projektu Technologické agentury ČR s označením TH02020246 a názvem „Sledování vlastností drobného kameniva za účelem prodloužení životnosti asfaltových vozovek“. Výsledky uvedených výzkumných projektů a následných studií byly využity mimo jiné pro publikaci tří článků v odborných periodikách s impact factorem.

12. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Anderson, D.A., and Marasteanu, M.O. (2014) Physical hardening of asphalt binders relative to their glass transition temperatures, Transportation Research Board, doi: 10.3141/1661-05
- [2] ASTM D6703-14: Standard Test Method for Automated Heithaus Titrimetry, Volume: 04.03, 2014
- [3] Bell, C. A., AbWahab, Y., Cristi, M. E., Sosnovske, D. (1994) Report SHRP-A-383, Selection of laboratory aging procedures for asphalt – aggregate mixtures, Strategic Highway Research Program, National Research Council, NW Washington, United States, ISBN: 0309057620
- [4] Besamusca, J., Volkers, A., Water J., Gaarkeuken, B. (2012) Simulating ageing of an EN 12591 70/100 Bitumen at laboratory conditionong compared to porous asphalt, Proceeding of 5th E&E Congress, ID O5EE-224, Istanbul, Turkey
- [5] Blažek, J., Rábl V. (2006) Základy zpracování a využití Ropy, Vysoká škola chemicko-technologická, Praha, ISBN 80-7080-473-4
- [6] Boduszynki, M. Mieczslaw J. F., McKay, Latham D. R. (1980) Asphaltenes, where are you, Association of Asphalt Paving Technologies vol. 49: 123-143
- [7] Corbett L. W. (1984) Refinery Processing of Asphalt Cement, Transportation Research Record 999
- [8] Coufalík, P. (2017) Reologické vlastnosti asfaltových pojiv. Disertační práce. p. 213
- [9] Coufalík, P., Dašek, O., Coufalíková, I., Hýzl, P. (2017) The Effects of Aging on Asphalt Binders Containing Visbreaking Residues. Engineering Materials and Technology. Key Engineering Materials. Trans Tech Publications. p. 541-546. ISSN: 1013-9826.
- [10] ČSN 65 7204: Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční asfalty, srpen 2016
- [11] ČSN 73 6121: Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody, únor 2019
- [12] ČSN EN 12593: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse, leden 2016.
- [13] ČSN EN 12594: Asfalty a asfaltová pojiva – Příprava analytických vzorků, květen 2015
- [14] ČSN EN 12607-1: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT, červen 2015
- [15] ČSN EN 12607-2: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 2: Metoda TFOT, červenec 2015
- [16] ČSN EN 12607-3: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 3: Metoda RFT, červenec 2015
- [17] ČSN EN 12697-3: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva – Rotační vakuové destilační zařízení, listopad 2013
- [18] ČSN EN 12697-10: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 10: Zhutnitelnost, prosinec 2018

- [19] ČSN EN 12697-11: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 11: Stanovení afinity mezi pojivem a kamenivem, září 2020
- [20] ČSN EN 12697-12: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 12: Stanovení odolnosti zkušební tělesa vůči vodě, leden 2019
- [21] ČSN EN 12697-15: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 15: Stanovení citlivosti asfaltových směsí k segregaci, červenec 2004
- [22] ČSN EN 12697-16: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 16: Odolnost proti otěru, říjen 2016
- [23] ČSN EN 12697-19: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 19: Propustnost zkušební tělesa, září 2020
- [24] ČSN EN 12697-22: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 22: Zkouška pojíždění kolem, září 2020
- [25] ČSN EN 12697-24: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 24: Odolnost vůči únavě, červen 2019
- [26] ČSN EN 12697-25: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 25: Cyklická zkouška v tlaku, říjen 2017
- [27] ČSN EN 12697-26: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 26: Tuhost, květen 2019
- [28] ČSN EN 12697-27: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 27: Odběr vzorků, prosinec 2018
- [29] ČSN EN 12697-35: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 35: Laboratorní výroba směsi, květen 2018
- [30] ČSN EN 12697-40: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 40: Propustnost in situ, září 2020
- [31] ČSN EN 12697-43: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 43: Odolnost proti působení pohonných hmot, prosinec 2014
- [32] ČSN EN 12697-44: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese, prosinec 2019
- [33] ČSN EN 12697-46: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem, září 2020
- [34] ČSN EN 13043: Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch, duben 2014.
- [35] ČSN EN 13108-1: Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton, březen 2008
- [36] ČSN EN 13702: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska, duben 2019.
- [37] ČSN EN 1426: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou, leden 2016.
- [38] ČSN EN 1427: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička, leden 2016.
- [39] ČSN EN 14769: Asfalty a asfaltová pojiva – Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV), leden 2013

- [40] ČSN EN 14770: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR), prosinec 2012.
- [41] ČSN EN 14771: Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR), leden 2013
- [42] ČSN EN 15323: Asfalty a asfaltová pojiva – Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT), listopad 2007
- [43] ČSN EN 16659: Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test), listopad 2016.
- [44] Dašek, O. (2006) Vliv míry zhutnění na funkční charakteristiky asfaltových směsí. Diplomová práce. p. 83
- [45] Dašek, O. (2013) Uplatnění pryžového granulátu v asfaltových pojivech a hutněných asfaltových směsích. Disertační práce. p. 186
- [46] Dašek, O., Coufalík, P. (2014) Výzkumná zpráva k projektu TA03030381 za rok 2013, Příloha B.1
- [47] Dašek, O., Coufalík, P., Hýzl, P., Šaček, P., Hegr, Z., Matoušek, D. (2016) Změny vlastností silničních asfaltů způsobené stárnutím. Silniční obzor, 77 (2), p. 31-35. ISSN: 0322-7154.
- [48] Dašek, O., Coufalík, P., Hýzl, P., Stoklásek, S., Špaček, P., Hegr, Z. (2017) Doplnující kritéria pro hodnocení vlastností silničních asfaltů a jejich vztah k trvanlivosti vozovky. Konference Asfaltové vozovky 2015. České Budějovice.
- [49] Dašek, O., Coufalík, P., Hýzl, P., Stoklásek, S., Špaček, P., Hegr, Z. (2018) Stárnutí a disperzní stabilita silničních asfaltů. Silnice a železnice, 2018 (1), p. 123-127. ISSN: 1801-822X.
- [50] Dašek, O., Coufalík, P., Koudelka, T., Hýzl, P., Špaček, P., Hegr, Z., Žák, J., Suda, J. (2019) Srovnání vlastností vybraných asfaltových pojiv. Silniční obzor, 80 (1), s. 15-22. ISSN: 0322-7154.
- [51] Dašek, O., Hýzl, P., Coufalík, P. (2016) Výzkumná zpráva k projektu FV10526 za rok 2016, Příloha č. 1
- [52] Dašek, O., Hýzl, P., Coufalík, P., Varaus, M., Stehlík, D., Špaček, P., Hegr, Z., Stoklásek, S., Matoušek, D., Svoboda, P. (2015) Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí, Certifikovaná metodika.
- [53] Dašek, O., Hýzl, P., Coufalík, P., Varaus, M., Stehlík, D., Špaček, P., Hegr, Z., Stoklásek, S., Matoušek, D., Svoboda, P. (2015) Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí, Certifikovaná metodika.
- [54] Dašek, O., Hýzl, P., Varaus, M. (2017) Asfaltové směsi a jejich zkoušení. Silnice a mosty. 2017 (2). p. 13-18.
- [55] Dašek, O., Koudelka, T. (2019) Hodnocení teplotní citlivosti a viskoelastických vlastností asfaltových pojiv. Silnice mosty, 4 (2019), p. 12-18.
- [56] Dašek, O., Stoklásek, S., Coufalík, P., Hýzl, P., Varaus, M. (2017) Thermooxidative properties of bituminous binders in relation to their inner chemical compatibility

- determined by single point precipitation titration. Road Materials and Pavement Design, 2017 (18), no. Supplement 1, p. 118-130. ISSN: 1468-0629.
- [57] Dodatek TP 170, Navrhování vozovek pozemních komunikací. Technické podmínky Ministerstva dopravy, 2010.
- [58] DRAFT prEN 14023: Bitumen and bituminous binders – Specification framework for polymer modified bitumens, 2020
- [59] EN 14023: Bitumen and bituminous binders – Specification framework for polymer modified bitumens, 2010
- [60] Erkens, S., Scarpas, T. (2014, listopad) Ageing of asphalt symposium, Delf University, ISBN 978-94-6186-524-3
- [61] Glover, C.J., Davison, R.R., Domke, C. H., Ruan, Y., Juristyarini, P., Knorr, D.B., Jung, S. H. (2005) Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field evaluation, Report FHWA/TX-05/1872-2.
- [62] Golalipour, A. (2013) Investigation of the effect of oil modification on critical characteristics of asphalt binders, dizertační práce, University of Wisconsin-Madison, Wisconsin, USA
- [63] Hagner T., Bitumen und Bitumenmodifikationen, Total, Bitumen und Bitumenmodifikationen – VSVI Berlin-Brandenburg, 2016
- [64] Holmes, Ch. (2016) Rejuvenators, Winter Conference, South Carolina, Columbia
- [65] Hotař, P. (2014) Reologické vlastnosti asfaltových pojiv. Diplomová práce. P. 73
- [66] <http://scitani2016.rsd.cz/>
- [67] http://www.g-labo.de/media/attachments/2018/11/12/alterung-nach-rcat-modell_nrc210_941878_leaflet14_rev1-1.pdf
- [68] <http://www.matest.com/en/Products/bitumen-asphalt/Macro-Category/bituminous-binders-determination-of-the-resistance-of-hardening-rotating-flask-test-rft-me/b065-rotary-evaporation-apparatus>
- [69] <http://www.pjpk.cz/prehled-norem-pro-obor-silnicniho-stavitelstvi/>
- [70] <http://www.pjpk.cz/technicke-kvalitativni-podminky-staveb-tkp/>
- [71] <http://www.pjpk.cz/technicke-podminky-tp/>
- [72] <https://pavementinteractive.org/reference-desk/testing/binder-tests/rolling-thin-film-oven/>
- [73] https://www.controls-group.com/eng/bitumen-testing-equipment/pressure-ageing-vessel-pav__.php
- [74] https://www.controls-group.com/eng/bitumen-testing-equipment/rolling-thin-film-ovens-rtfot__.php
- [75] <https://www.csq.cz/jak-funguje-technicka-normalizace/>
- [76] <https://www.directindustry.com/prod/cooper-research-technology/product-68434-1372353.html>
- [77] <https://www.johnmorrisgroup.com/AU/Product/29016/Thermosel>
- [78] <https://www.mpo.cz/cz/stavebnictvi-a-suroviny/stavebni-vyrobky/pozadavky-na-stavebni-vyrobky-s-oznaceni-ce--157746/>

- [79] <https://www.slideshare.net/adoolaa/tests-to-simulate-ageing-of-bitumen>
- [80] <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/automaticky-vyjizdec-koleji.html>
- [81] <https://www.technor.cz/technicke-normy-csn.html>
- [82] <https://www.unmz.cz/caste-dotazy/casto-kladene-otazky-technicka-normalizace/>
- [83] Hýzl, P. (2006) Praktické aplikace v pozemních komunikacích. Modul 5 – Nové metody zkoušení asfaltových pojiv. Studijní opory VUT v Brně, FAST.
- [84] Hýzl, P. (2018) Využití R-materiálu v asfaltových směsích. Habilitační práce. p. 130. Brno.
- [85] Hýzl, P. (2020) Zkoušení asfaltových směsí. Funkční zkoušky. Prezentace. Předmět CM054, VUT v Brně, FAST.
- [86] Hýzl, P., Dašek, O., Krčmová, I., Coufalík, P. (2015) Zkušební normy pro asfaltové směsi – nové metody. Konference Asfaltové vozovky 2015. České Budějovice.
- [87] Hýzl, P., Varaus, M. (2007) Funkční zkoušky asfaltových směsí. Stavebnictví, 2007 (6-7).
- [88] Jasso, M., Hampl, R., Vacin, O., Bakos, D., Stastna, J., Zanzotto, L. (2015) Rheology of conventional asphalt modified with SBS, Elvaloy and polyphosphoric acid. Fuel Processing Technology, 140. p. 172-179. doi: 10.1016/j.fuproc.2015.09.002
- [89] Jones, D. (1992) Understanding how the origin and composition of paving-grade asphalt cements affect their performance. SHRP – technical memorandum #4
- [90] Kawanaka, S., Leontaritis, K. J., Park, S. J., Mansoori, G. A. (1989) Thermodynamic and Colloidal Models of Asphaltene Flocculation. Oil-Field Chemistry, Enhanced Recovery and Production Stimulation. 24. p. 443-458. doi: 10.1021/bk-1989-0396.ch024
- [91] Koudelka, T. (2020) Recyklace asfaltových pojiv pomocí oživovacích přísad, Disertační práce, p. 204, Brno.
- [92] Koudelka, T., Coufalík, P., Dašek, O., Coufalíková, I., Varaus, M. (2020) Rheological characteristics of paving bitumens and recycled binder blends in relation to ageing. Road Materials and Pavement Design, 2020, p. 1-18. ISSN: 1468-0629.
- [93] Kriz P., Stastna J., Zanzotto L. (2007) Glass Transition and Phase Stability in Asphalt Binders, Road Materials and Pavement Design, vol X
- [94] Kudrna, J. (2007) Diagnostika a management vozovek. Modul 01. Spolehlivost vozovek a bezpečnost silničního provozu. Studijní opory VUT v Brně, FAST.
- [95] Lesueur D. (2009) Evidence of the Colloidal Structure of Bitumen, ISAP – International Workshop on Chemo-Mechanics of Bituminous Materials, Delft, 39-4
- [96] Lesueur, D. (2009) The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, Advances In Colloid And Interface Science 145 (1-2)
- [97] Liu, G., Nielsen, E., Komacka, J., Leegwater, G., Ven, M. V. D. (2014) Rheological and chemical evaluation on the ageing properties of SBS polymer modified bitumen: From the laboratory to the field. Construction and Building Materials, 51 (2014) p. 244-248. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.002

- [98] Liu, G., Nielsen, E., Komacka, J., Leegwater, G., Ven, M. V. D. (2015) Influence of soft bitumens on the chemical and rheological properties of reclaimed polymer-modified binders from the “old” surface-layer asphalt. *Construction and Building Materials*, 79 (2015) p. 129-135. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.002
- [99] Long, B. R. (1981) The concept of Asphaltenes. *Advances in Chemistry* vol. 195 (No 2): 17-27, doi: 10.1021/ba-1981-0195.ch002
- [100] Martin A. E., Zhou F., Arambula E., Park E., Chowdhury A., Kaseer F., Carvajal J., Hajj J., Daniel J., Glover Ch., (2015) 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
- [101] Masson, J. F., Price, T., Collins, P. (2001) Dynamics of bitumen fractions by thin-layer chromatography/flame ionization detection, *Energy & Fuels*, 15, 955-960.
- [102] Mezger, T. G. (2011) *The Rheology Handbook, For users of rotational and oscillatory rheometers*, 3rd revised edition, p. 432, ISBN 3-86630-864-7, ISBN 978-3-86630-864-0
- [103] Nařízení Evropského parlamentu a rady (EU) č. 305/2011 (2011) Úřední věstník Evropské unie. p.39.
- [104] Nellensteyn, F. J. (1924) The constitution of Asphalt. *J Inst Petrol Technol* 10:311
- [105] Ngai K.L. (2004) *The Glass Transition and the Glassy State*, Mark J.E. (Ed), *Physical Properties of Polymers*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 72-152
- [106] Paliukaite, M., Vaitkus, A., Zofka, A. (2014, květen) Evaluation of bitumen fractional composition depending on the crude oil type and production technology, 9th International Conference Environmental Engineering
- [107] Petersen, J.C., Robertson R.E., Branthaver J.F., Harnsberger P.M., Duval J.J, Kim S.S, Anderson D.A., Christiansen D.W., Bahia H.U. (1994) *Binder characterization end evaluation Vol. 1. SHRP-A-367*
- [108] Petrauskas, D., Ullah, S. (2016) *Manufacture and storage of bitumens*, Shell Bitumen Handbook, 6th edition, ISBN 978-0-7277-5838-8
- [109] Pěňčík, M. (2015) *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Diplomová práce. P. 81
- [110] Plitz J. (1997) *Stárnutí silničních pojiv*. Asfaltové vozovky 1997, České Budějovice.
- [111] prEN 12697-52: Bituminous mixtures — Test methods — Part 52: Conditioning to address oxidative ageing. CEN/TC 227
- [112] Preston, N., O'nions, L. (2016) *Durability of bitumens and asphalts*, Shell Bitumen Handbook, 6th edition, ISBN 978-0-7277-5838-8
- [113] Read, J., Whiteok, D. (2003) *Shell Bitumen Handbook*. 5th edition, London, Thomas Telford Publishing
- [114] Redelius, P. (2009) Asphaltene in Bitumen, What they are and what they are not, *Road Materials and Pavement Design*. Vol 10. 25-43, doi: 10.1080/14680629.2009.9690234
- [115] Sakib, N., Bhasin, A. (2019) Measuring polarity-based distributions (SARA) of bitumen using simplified chromatographic techniques, *International Journal of Pavement Engineering*, 20 (12), p. 1371-1384, DOI: 10.1080/10298436.2018.1428972

- [116] Sdružení pro výstavbu silnic (2020) Přehledy výroby a zpracování materiálů pro stavbu vozovek v roce 2019. p. 20
- [117] Siddiqui M. M., Ali M. F. (1999) Studies on the aging behaviour of the arabian asphalt, Fuel 79 (9), DOI10.1016/S0016-2361(99)00018-6
- [118] Sirota, E. B. (2004) Understanding the physical structure of asphaltenes to optimize bitumen manufacture, 3rd Euroasphalt and Eurobitume congress vol 1: 930-940, Vienna, ISBN 90-802884-4-6
- [119] Scholz, T.V. (1995) Durability of Bituminous Paving Mixtures. PhD Thesis, University of Nottingham, Nottingham, UK
- [120] Skronka, G., Vacín, O. (2018) Porovnání stárnutí u polymerem modifikovaných asfaltových pojiv. Silniční obzor, 79 (2).
- [121] Soenen, H., Lu, X., Muehlich, U., Laukkanen, O. V. (2016, July). The influence of aging on binder fatigue and other fracture related binders test results. International Society for Asphalt Pavements (ISAP), Wyoming, USA
- [122] Speight, G. J. (1994) Asphaltene constituents and Asphalts, Asphaltenes and Asphalts vol. 40a 1st edition (No 2)
- [123] Speight, G. J. (2004) Petroleum Asphaltenes Part 1 Asphaltenes, Resins and Structure of Petroleum. Oil and Gas Science and Technology vol. 59 (No 5): 467-477
- [124] Stastna, J., Zanzotto, L., Vacin, O. J. (2003) Viscosity function in polymer-modified asphalts. Journal of Colloid and Interface Science, 259 (1). p. 200-207. doi: 10.1016/S0021-9797(02)00197-2
- [125] Stoklásek, S., Dašek, O., Hýzl, P., Coufalík, P., Varaus, M., Stehlík, D., Špaček, P., Hegr, Z., Matoušek, D., Svoboda, P. (2016) Metodika pro hodnocení disperzní stability silničních asfaltů, Certifikovaná metodika.
- [126] Stoklásek, S., Špaček, P., Dašek, O., Coufalík, P., Hegr, Z., Telecký, J. (2014) Stárnutí asfaltových pojiv jako důležitý aspekt životnosti asfaltových vozovek, Výzkumná zpráva k projektu TA03030381, Příloha B4.2
- [127] Struik, L. C. E. (1978) Physical aging in amorphous polymers and other materials, Delft, Netherlands
- [128] Střasáková, M. (2016) Stárnutí asfaltových pojiv. Diplomová práce. p. 82
- [129] Štěpanovský, V. (2015) Problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsí. Diplomová práce. p. 94
- [130] Technische Vertragsbedingungen-Baustoffe- RVS 08.97.05: GmbH., Anforderungen an Asphaltmischgut", Januar 2007/Februar 2010.
- [131] Technologická agentura České republiky, Schvalování certifikovaných metodik v působnosti TA ČR, Směrnice Technologické agentury České republiky, SME-32, 2016.
- [132] The bitumen industry – a global perspective, Production, chemistry, use, specification and occupation exposure, Second edition, IS-230, 2011, ISBN: 978-1-934154-61-8
- [133] TP 82, Katalog poruch netuhých vozovek. Technické podmínky Ministerstva dopravy, 2010.

- [134] TP 170, Navrhování vozovek pozemních komunikací. Technické podmínky Ministerstva dopravy, 2004.
- [135] TP 170, Navrhování vozovek pozemních komunikací. Technické podmínky Ministerstva dopravy, 2006.
- [136] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (2014) Technické normy a vaše podnikání – jak profitovat z užívání technických norem při vašem podnikání a jak se zapojit do aktivit technické normalizace. Sborníky technické harmonizace.
- [137] Valentin, J. (2003) Užité vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí: charakteristiky, nové zkušební metody, vývojové trendy. Praha: České vysoké učení technické v Praze.
- [138] Van Lent, D.Q., Mookhoek, S.D., Vliet, D., Giezen, C., Leegwater, G.A. (2016) Comparing field aging to artificial laboratorial aging of bituminous binders for porous asphalt concrete using black space graph analysis, 6thEuroasphalt & Eurobitumene Congress, Prague, 2016
- [139] Varaus, M. (2009) Funkční způsob navrhování asfaltových směsí podle evropských norem. Teze habilitační práce. ISSN 1213-418X.
- [140] Večerka, I. (2005) Evropské normy pro české silnice – stav 2005, Asfaltové vozovky 2005, p. 387-398.
- [141] Výzkumný projekt Technologické agentury ČR č. TA03030381 „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“; Řešitel: Vysoké učení technické v Brně, doba řešení: 01/2013 až 12/2016.
- [142] www.mapy.cz
- [143] Yildirim, Y, Solaimanian, M., Kennedy, T.K. (2000) Mixing and compaction temperatures for hot mix asphalt concrete, Texas department of transportation, Austin, Texas
- [144] Zajíček, J. a kol., Technologie stavby vozovek, p. 392, 2014, ISBN: 978-80-87438-59-6
- [145] Zanzotto, L., Stastna, J., Vacin, O. (2000) Thermomechanical Properties of Several Polymer Modified Asphalts. Applied Rheology, 10 (4). p. 185-191. doi: 10.1515/arh-2000-0012
- [146] Zdeněk Hegr – fotodokumentace stavu pokusného úseku.

13. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Koloidní struktura asfaltového pojiva [90]	19
Obrázek 2: Gastelův koloidní index asfaltových pojiv z různých rop [106, 91].....	22
Obrázek 3: Změna struktury asfaltového pojiva během stárnutí [64].....	27
Obrázek 4: Zařízení RTFOT (vlevo) [74] a skleněné nádoby (vpravo) [72]	30
Obrázek 5: Zařízení TFOT [79]	30
Obrázek 6: Rotační vakuové destilační zařízení k provedení zkoušky krátkodobého stárnutí metodou RFT [68].....	31
Obrázek 7: Zařízení pro urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (Rotating Cylinder Ageing Test – RCAT) [67]	31
Obrázek 8: Zkušební miska s nalitým vzorkem asfaltu pro zkoušku v PAV (vlevo) [8] a zařízení PAV a VDO (vpravo) [73]	32
Obrázek 9: Srovnání tokové křivky Newtonské kapaliny, pseudoplastické kapaliny, dilatantní kapaliny a Binghamské kapaliny [45]	38
Obrázek 10: Závislost dynamické viskozity na čase Newtonské, tixotropní a reopexní kapaliny [45]	38
Obrázek 11: Systém funkčních zkoušek asfaltových pojiv s definováním užitečných vlastností [137].....	39
Obrázek 12: Brookfieldův viskozimetr s jednotkou thermosel [77]	40
Obrázek 13: Rotační reometr Kinexus.....	41
Obrázek 14: Vzorky asfaltového pojiva připravené pro vložení do DSR (vlevo) a vzorek umístěný mezi destičkami reometru (vpravo) [45].....	42
Obrázek 15: Příklad sestavení hlavní křivky komplexního smykového modulu [8]	43
Obrázek 16: Příklad průběhu Blackova diagramu pro různá asfaltová pojiva [51].....	43
Obrázek 17: Určení lineárně visko-elastické oblasti vybraného pojiva [46]	44
Obrázek 18: Grafický záznam průběhu smykového přetvoření při zkoušce MSCR [46]	45
Obrázek 19: Příklad průhybového trámečkového reometru od firmy Cannon [8].....	46
Obrázek 20: Zkušební těleso upevněné do zařízení TSRST v silniční laboratoři VUT v Brně [44]	51
Obrázek 21: Vyjížděč kolejí [80]	52
Obrázek 22: Triaxiální komora [85]	53
Obrázek 23: Zařízení pro provedení dvoubodové zkoušky ohybem (vlevo) [76] a zkušební těleso tvaru trapezoidu vlepené do podložek (vpravo) [44].....	54
Obrázek 24: Srovnání závislosti dynamické viskozity na teplotě silničních asfaltů při smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$	62
Obrázek 25: Vliv stárnutí na dynamickou viskozitu při teplotě $135 \text{ }^\circ\text{C}$ a smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$	62
Obrázek 26: Nárůst hodnoty dynamické viskozity po stárnutí při teplotě $135 \text{ }^\circ\text{C}$ a smykové rychlosti $1,0 \text{ s}^{-1}$ srovnávaných pojiv.....	63
Obrázek 27: Srovnání hlavních křivek komplexních smykových modulů nezestárlých pojiv ..	64
Obrázek 28: Srovnání hlavních křivek komplexních smykových modulů pojiv zestárlých metodou 3xRTFOT	64
Obrázek 29: Blackovy diagramy nezestárlých pojiv	65
Obrázek 30: Blackovy diagramy pojiv zestárlých metodou 3xRTFOT	66
Obrázek 31: Vliv stárnutí na komplexní smykový modul stanovený při teplotě $60 \text{ }^\circ\text{C}$ a frekvenci $1,59 \text{ Hz}$	67

Obrázek 32: Vliv stárnutí na fázový úhel stanovený při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz	67
Obrázek 33: Vliv stárnutí na komplexní smykový modul stanovený při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz	68
Obrázek 34: Podíl komplexního smykového modulu zestárých a nezestárých pojiv stanovený při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz (index stárnutí)	68
Obrázek 35: Teplotní citlivost nezestárých pojiv stanovená jako podíl komplexního smykového modulu určeného při teplotě 10 °C a 70 °C a frekvenci 1,0 Hz.....	69
Obrázek 36: Kritická teplota jednotlivých nezestárých silničních asphaltů a asphaltů zestárých metodou RTFOT a 3xRTFOT.....	70
Obrázek 37: Podíl kritické teploty nezestárých a zestárých pojiv	71
Obrázek 38: Modul tuhosti za ohybu při teplotě -16 °C pro jednotlivé silniční asfalty s ohledem na stárnutí.....	71
Obrázek 39: Velikost m-hodnoty při teplotě -16 °C pro jednotlivé silniční asfalty s ohledem na stárnutí	72
Obrázek 40: Detekce flokulačního bodu – fotografie detailu precipitátu (sraženiny) na filtračním papíře	74
Obrázek 41: Korelace mezi obsahem visbreakingových zbytků a parametrem disperzní stability vyjádřeným hodnotou flokulačního toluenového indexu <i>FTI</i>	75
Obrázek 42: Disperzní stabilita vyjádřená hodnotou flokulačního toluenového indexu <i>FTI</i> ...	76
Obrázek 43: Závislost mezi výsledky zkoušky penetrace jehlou a bodu měknutí	77
Obrázek 44: Závislost dynamické viskozity a penetrace jehlou	77
Obrázek 45: Závislost dynamické viskozity a bodu měknutí.....	78
Obrázek 46: Závislost komplexního smykového modulu a penetrace jehlou	78
Obrázek 47: Závislost komplexního smykového modulu a bodu měknutí	79
Obrázek 48: Závislost výsledků teplotní citlivosti a komplexních smykových modulů pojiv ...	79
Obrázek 49: Závislost teplotní citlivosti pojiv (stanovené v DSR jako podíl komplexního smykového modulu stanoveného při teplotě 10 °C a 70 °C a frekvenci 1 Hz) a dolní kritické teploty zjištěné v BBR	80
Obrázek 50: Závislost teplotní citlivosti pojiv a modulu tuhosti za ohybu zjištěného v BBR při teplotě -16 °C.....	80
Obrázek 51: Závislost indexu stárnutí (podíl komplexního smykového modulu v DSR pojiv zestárých metodou 3xRTFOT a nezestárých pojiv, 60 °C, 1,0 Hz) a zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT	81
Obrázek 52: Závislost změny kritické teploty určené v BBR zapříčiněné stárnutím metodou 3xRTFOT a indexu stárnutí (podíl komplexního smykového modulu v DSR pojiv zestárých metodou 3xRTFOT a nezestárých pojiv, 60 °C, 1,0 Hz)	82
Obrázek 53: Závislost flokulačního toluenového indexu a indexu stárnutí (podíl komplexního smykového modulu v DSR pojiv zestárých metodou 3xRTFOT a nezestárých pojiv, 60 °C, 1,0 Hz).....	83
Obrázek 54: Závislost flokulačního toluenového indexu a zvýšení bodu měknutí pojiv po 3xRTFOT.....	83
Obrázek 55: Hodnota bodu měknutí nezestárých silničních asphaltů rozšířeného souboru a asfaltů zestárých metodou 3xRTFOT.....	87
Obrázek 56: Hodnota zvýšení bodu měknutí silničních asphaltů rozšířeného souboru po stárnutí metodou 3xRTFOT	87
Obrázek 57: Četnost hodnoty zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT pro třídy rozdělené po 3 °C.....	88

Obrázek 58: Hodnota komplexního smykového modulu nezestárých pojiv a pojiv po 3xRTFOT při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz.....	90
Obrázek 59: Hodnota fázového úhlu nezestárých pojiv a pojiv po 3xRTFOT při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz	90
Obrázek 60: Podíl komplexního smykového modulu pojiv po 3xRTFOT a nezestárých pojiv při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz	91
Obrázek 61: Podíl fázového úhlu pojiv po 3xRTFOT a nezestárých pojiv při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz	91
Obrázek 62: Závislost mezi komplexním smykovým modulem (60 °C, 1,0 Hz) a bodem měknutí.....	92
Obrázek 63: Závislost mezi fázovým úhlem (60 °C, 1,0 Hz) a bodem měknutí.....	93
Obrázek 64: Závislost mezi fázovým úhlem (60 °C, 1,0 Hz) a zvýšením bodu měknutí po 3xRTFOT.....	93
Obrázek 65: Závislost mezi podílem komplexního smykového modulu po 3xRTFOT a před stárnutím (60 °C, 1,0 Hz) a zvýšením bodu měknutí po 3xRTFOT.....	94
Obrázek 66: Závislost mezi hodnotami flokulačního toluenového indexu a zvýšením bodu měknutí po 3xRTFOT	95
Obrázek 67: Pokusný úsek Lukavice [142]	98
Obrázek 68: Pohled na 1. sekci úseku Lukavice [126].....	99
Obrázek 69: Pokusný úsek II/317 Borohrádek [142].....	100
Obrázek 70: Pohled na pokusný úsek Borohrádek [126]	100
Obrázek 71: Pokusný úsek I/34 Polička [142]	101
Obrázek 72: Pohled na pokusný úsek I/34 Polička [126]	102
Obrázek 73: Penetrace jehlou silničních asphaltů (A) a asphaltů zpětně získaných z asphaltových směsí (C) v různém stupni zestárnutí	105
Obrázek 74: Bod měknutí silničních asphaltů (A) a asphaltů zpětně získaných z asphaltových směsí (C) v různém stupni zestárnutí	105
Obrázek 75: Srovnání závislosti dynamické viskozity na teplotě asphaltových pojiv při smykové rychlosti 1,0 s ⁻¹	107
Obrázek 76: Vliv stárnutí na dynamickou viskozitu při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s ⁻¹	107
Obrázek 77: Nárůst hodnoty dynamické viskozity po stárnutí při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s ⁻¹ srovnávaných pojiv.....	108
Obrázek 78: Změna hodnoty dynamické viskozity v závislosti na čase stárnutí při teplotě 135 °C a smykové rychlosti 1,0 s ⁻¹	109
Obrázek 79: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 1.....	110
Obrázek 80: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 2.....	110
Obrázek 81: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 3.....	110
Obrázek 82: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 4.....	111
Obrázek 83: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 5.....	111
Obrázek 84: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 6.....	111
Obrázek 85: Hlavní křivky komplexního smykového modulu a fázového úhlu pojiva 7.....	112
Obrázek 86: Srovnání komplexních smykových modulů pojiv odebraných při realizaci pokusných úseků stanovené při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz	113
Obrázek 87: Srovnání fázových úhlů pojiv odebraných při realizaci pokusných úseků stanovené při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz	113

Obrázek 88: Podíl komplexního smykového modulu zestárých a nezestárých pojiv stanovený při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz (index stárnutí)	114
Obrázek 89: Podíl komplexního smykového modulu pojiv znovuzískaných z asfaltových směsí zestárých metodou BSA (C-BSA) a pojiv znovuzískaných z asfaltových směsí (C) stanovený při teplotě 60 °C a frekvenci 1,0 Hz (index stárnutí).....	115
Obrázek 90: Disperzní stabilita vyjádřená hodnotou flokulačního toluenového indexu <i>FTI</i> .	116
Obrázek 91: Moduly tuhosti směsí z pokusných úseků při teplotě 15 °C v závislosti na frekvenci	117
Obrázek 92: Moduly tuhosti směsí z pokusných úseků při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz .	117
Obrázek 93: Procentuální zvýšení tuhosti směsí referenčních úseků zapříčiněné stárnutím BSA při frekvenci 10 Hz.....	118
Obrázek 94: Závislost bodu měknutí pojiv zestárých metodou 3xRTFOT a hodnot flokulačního toluenového indexu.....	119
Obrázek 95: Závislost bodu měknutí pojiv znovuzískaných ze směsí zestárých metodou BSA a hodnot flokulačního toluenového indexu	120
Obrázek 96: Závislost komplexních smykových modulů pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) a hodnot flokulačního toluenového indexu	120
Obrázek 97: Závislost fázových úhlů pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) a hodnot flokulačního toluenového indexu	121
Obrázek 98: Závislost zvýšení bodu měknutí pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) oproti pojivům po RTFOT (A-RTFOT) a hodnot flokulačního toluenového indexu	121
Obrázek 99: Závislost podílu komplexních smykových modulů pojiv zestárých metodou 3xRTFOT (A-3xRTFOT) a pojiv zestárých metodou RTFOT (A-RTFOT) a hodnot flokulačního toluenového indexu.....	122
Obrázek 100: Podíl modulu tuhosti směsi zestárlé metodou BSA a modulu tuhosti nezestárlé směsi v závislosti na mezerovitosti	123
Obrázek 101: Podíl modulu tuhosti směsi po stárnutí metodou BSA a modulu tuhosti nezestárlé směsi v závislosti na tloušťce filmu pojiva na povrchu kameniva	123
Obrázek 102: Podíl modulu tuhosti směsi po stárnutí metodou BSA a modulu tuhosti nezestárlé směsi v závislosti na obsahu pojiva	124
Obrázek 103: Závislost podílu modulů tuhosti asfaltových směsí po stárnutí metodou BSA a nezestárlé směsi (15 °C a 10 Hz) a podílu komplexních smykových modulů pojiv po 3xRTFOT a po RTFOT (60 °C, 1 Hz).....	125
Obrázek 104: Závislost podílu modulů tuhosti asfaltových směsí po stárnutí metodou BSA a nezestárlé směsi (15 °C a 10 Hz) a podílu komplexních smykových modulů pojiv vydestilovaných ze směsí zestárých metodou BSA a nezestárých směsí (60 °C, 1,0 Hz).....	125
Obrázek 105: Závislost podílu modulů tuhosti asfaltových směsí po stárnutí metodou BSA a nezestárlé směsi (15 °C a 10 Hz) a hodnot penetrace jehlou nezestárých pojiv	126
Obrázek 106: Trhlina úzká, dosud neošetřená, vznikající na povrchu obrusné vrstvy 3. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po třech letech provozu [48] ..	128
Obrázek 107: Ztráta asfaltového tmelu z povrchu obrusné vrstvy 3. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po třech letech provozu [48].....	128
Obrázek 108: Mrazová trhlina na povrchu obrusné vrstvy 1. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po šesti letech provozu [146]	129

Obrázek 109: Nepravidelné trhliny na povrchu obrusné vrstvy 1. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po šesti letech provozu [146].....	130
Obrázek 110: Lokální výskyt síťových trhlin na omezené ploše povrchu obrusné vrstvy 2. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po šesti letech provozu [146].....	130
Obrázek 111: Nepravidelné trhliny na povrchu obrusné vrstvy 3. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po šesti letech provozu [146].....	131
Obrázek 112: Ztráta asfaltového tmelu a hloubková koroze na povrchu obrusné vrstvy 3. sekce pokusného úseku I/34 Polička (ulice Hegerova) po šesti letech provozu [146].....	131

14. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přibližné chemické složení asfaltového pojiva z hlediska prvků [96]	18
Tabulka 2: Přehled nejběžněji používaných metod simulujících urychlené stárnutí asfaltových pojiv [126, 53, 84]	29
Tabulka 3: Silniční asfalty vybrané pro provedení laboratorních zkoušek.....	58
Tabulka 4: Hodnoty penetrace jehlou a zbylé penetrace jednotlivých pojiv.....	59
Tabulka 5: Hodnoty bodu měknutí a zvýšení bodu měknutí jednotlivých pojiv.....	60
Tabulka 6: Rozšířený soubor vzorků silničních asfaltů	85
Tabulka 7: Požadované vlastnosti silničních asfaltů třídy 50/70 a 70/100 po stárnutí metodou 3xRTFOT.....	97
Tabulka 8: Výsledky kontrolních zkoušek směsí asfaltového betonu pro obrusné vrstvy odebraných při realizaci pokusných úseků	103
Tabulka 9: Míra zhutnění a mezerovitost obrusných vrstev jednotlivých sekcí pokusných úseků	103
Tabulka 10: Označení laboratorních vzorků materiálů získaných při provádění pokusných úseků	104
Tabulka 11: Souhrnné výsledky laboratorních zkoušek asfaltových pojiv a směsí, použitých při realizaci jednotlivých pokusných úseků	127

PŘÍLOHY HABILITAČNÍ PRÁCE

A. Metodika pro hodnocení disperzní stability silničních asphaltů

Metodika pro hodnocení disperzní stability silničních asfaltů

Jednobodová precipitační titrace

Metodika vznikla v rámci řešení projektu TAČR TA03030381
Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení
životnosti asfaltových vozovek

Autoři: RNDr. Svatopluk Stoklásek
Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Ing. Pavel Coufalík
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Ing. Petr Špaček
Ing. Zdeněk Hegr
Ing. David Matoušek
Ing. Petr Svoboda

V Brně, září 2016

OBSAH

1.	Cíl metodiky	3
2.	Vlastní popis metodiky	5
2.1.	Princip metody	5
2.2.	Okrajové podmínky titrace	6
2.2.1.	Koncentrace roztoku asfaltového pojiva a toluenu	6
2.2.2.	Referenční teplota	6
2.3.	Zkušební zařízení a pomůcky	6
2.4.	Použité chemikálie	6
2.5.	Pracovní postup	6
2.6.	Detekce flokulačního bodu	7
2.7.	Vyjádření výsledků	8
2.8.	Opakovatelnost výsledků	9
2.9.	Interpretace výsledků a obor použitelnosti metody	9
3.	Srovnání „novosti postupů“	10
3.1.	Vyjádření disperzní stability pomocí indexů grupového složení asfaltového pojiva	10
3.2.	Vyjádření disperzní stability pomocí sériové precipitační titrace – Heithausova titrace	11
3.3.	Základní popis inovace	14
3.4.	Synergie metody jednobodové srážecí titrace s metodou 3xRTFOT	16
4.	Popis uplatnění certifikované metodiky	17
5.	Ekonomické aspekty	18
6.	Seznam použité související literatury	18
7.	Seznam publikací, které předcházely metodice	19
8.	Dedikace na projekt	20
9.	Vypracování metodiky	20
10.	Jména oponentů a názvy jejich organizací	20

1. Cíl metodiky

Silniční asfalty dostupné na evropském trhu jsou v současné době charakterizovány požadavky harmonizované evropské normy ČSN EN 12591 z roku 2009, která stanovuje limitní hodnoty požadavků na silniční asfalty. Požadavky na trvanlivost definuje tato norma omezujícím rozsahem změn vlastností silničních asfaltů, které jsou vyvolány definovaným termooxidačním namáháním v čase a vyjádřeny ve vztahu k výchozím hodnotám.

K samotné chemické nebo materiálové podstatě, či k obdobnému popisu asfaltových pojiv, se v České republice nevztahuje přímo žádná zkušební metoda. Částečně lze do této oblasti zařadit normové požadavky na rozpustnost asfaltového pojiva stanovené podle normy ČSN EN 12592:2015 (99 % asfaltového pojiva musí být rozpustné v organickém rozpouštědle cyklohexanu) a také požadavek na minimální hodnotu bodu vzplanutí stanovený podle normy ČSN EN ISO 2592:2004 (limitní hodnoty 240 °C až 220 °C podle druhu silničního asfaltu). Obě tyto položky mají pouze zaručit, že do asfaltových pojiv nebudou přidávány žádné nežádoucí substance, které by v konečném důsledku významně znehodnocovaly užité vlastnosti asfaltového pojiva.

Kvalita silničního asfaltu je ovlivněna původem a druhem výchozí zpracovávané ropy (například nejkvalitnější asfalty používané hlavně do emulzí se těží ve Venezuele). Geografický původ zpracovávaného ložiska ropy a způsob její rafinace určuje složení destilačních zbytků. Pouhá znalost skupinového složení ropy má ale velmi omezenou korelaci s vlastnostmi silničních asfaltů. Mnohem důležitější je ale kvalita a chemická podstata jednotlivých složek asfaltových pojiv včetně jejich vzájemné kompatibility. Tyto strukturální skutečnosti zásadně rozhodují o fázové stabilitě systému, jenž se všeobecně označuje jako koloidní/disperzní stabilita. Na základě současných vědomostí o uspořádání asfaltenových agregátů v asfaltovém pojivu je pravděpodobně vhodnější používat název disperzní stabilita, neboť neevokuje přítomnost micelárních struktur, které nebyly v asfaltovém pojivu nikdy prokázány.

Ve střeoevropském prostoru může být navíc dalším významným faktorem, ovlivňujícím chování asfaltových pojiv, přídavek visbreakingových zbytků. V českém silničním asfaltovém stavitelství se dlouhodobě vede diskuze o vlivu přidávání visbreakingových zbytků na kvalitu asfaltových pojiv. Ovšem pro jednoznačně kvalifikovaný odhad dopadu těchto příměsí nejsou v těchto případech k dispozici relevantní údaje o prokazatelném obsahu (a dávkovaném množství) visbreakingových zbytků v asfaltovém materiálu. Je známo, že přídavek visbreakingových zbytků labilizuje asfaltové pojivo, které se za určitých podmínek může stát fázově nestabilní.

Hlavním cílem metodiky je posouzení vnitřní disperzní (koloidní) stability asfaltového pojiva, která odráží míru vzájemné slučitelnosti jeho jednotlivých složek a na základě této informace signalizovat potenciální přítomnost visbreakingových zbytků v asfaltovém pojivu, popřípadě odhadnout i jeho skutečné množství.

Cílem této metodiky v současné době není zavést diskriminující kritéria pro výběr asfaltových pojiv, ale snaha získat analytické nástroje, které umožňují lépe identifikovat potenciálně problematická asfaltová pojiva, jejichž servisní výkonost v reálné vozovce může být z dlouhodobého hlediska jednoznačně sledována a posouzena na základě dlouhodobého sběru relevantních dat a jejich vyhodnocení. Teoreticky vypracovaná metodika tak může napomoci potvrdit nebo vyvrátit negativní vliv přítomnosti visbreakingového zbytku na kvalitu asfaltových vozovek v ČR.

Metodika vychází z postupu, který je nazýván **Heithausova titrace**. Jedná se o dvouparametrické vyjádření jednak vnitřní kompatibility asfaltového/ropného systému a jednak peptizační schopnosti systému definující celkovou disperzní stabilitu asfaltového pojiva. Extrakcí postupů použitých v Heithausově metodě sériových titrací bylo zjištěno, že pro účely detekce asfaltových pojiv se silně kompromitovanou disperzní stabilitou lze použít zjednodušenou jednobodovou titrační metodu, která je efektivní, rychlá a naprosto dostatečná pro vyjádření míry narušení vnitřní kompatibility asfaltového pojiva. Odvozená jednobodová srážecí titrace je tedy zjednodušující kompromis, jenž lépe odpovídá potřebám běžné laboratorní silniční praxe a zároveň dostatečně signalizuje odchylky vnitřních vlastností od normálu. Právě tyto odchylky jsou předmětem technologického zájmu při výrobě a pokládce asfaltových směsí.

Hlavním požadavkem na experimentální uspořádání tedy nebyla vyčerpávající vědecká přesnost, ale aplikační jednoduchost metody s dostatečnou vypovídající hodnotou o zásadních změnách tohoto parametru, jenž umožňuje studovat chování asfaltových pojiv včetně vlivu obsahu visbreakingových zbytků. **Tuto metodu je tedy třeba považovat za pomocnou indikační metodu podporující další výzkum a operativní sledování přímo na úrovni výrobních firem. Nutno podotknout, že tato metodika není psaná pro potřeby petrochemických rafinérií, ale výlučně pro potřeby a z úhlu pohledu firem českého silničního stavitelství.**

Metodika by měla umožnit získání informací ve třech posloupnostně podmíněných krocích:

- **posoudit narušenou disperzní stabilitu u silničních asfaltů, která je vyvolána především přídavkem visbreakingových zbytků,**
- **na základě kalibrační křivky přibližně odhadnout jeho množství v asfaltovém pojivu (zejména možnosti relativního hodnocení ustálené výroby nebo nákupu asfaltových vstupů),**

- **využít výše popisované informace při hodnocení vlivu visbreakingových zbytků na kvalitu asfaltových vozovek, zejména při dlouhodobém sledování provozní výkonnosti nebo vzniku a četnosti poruch.**

Metodika zavádí do českého silničního stavitelství zkušební postup, který to s vysokou pravděpodobností umožňuje. Dále se výzkumem ukázalo, že je tato metoda provázána s metodikou pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí, která využívá postupy urychleného stárnutí metodou 3xRTFOT. Použitím obou metodik v synergii bude umožněno získat detailnější informace o vlivu přidání visbreakingových zbytků na vlastnosti asfaltových povliv.

Metodika je přednostně určena pro hodnocení disperzní stability silničních asfaltů gradace 50/70 a 70/100, nicméně je rovněž možné hodnotit disperzní stabilitu silničních asfaltů jiných typů.

2. Vlastní popis metodiky

Jednobodová precipitační titrace

2.1. Princip metody

Podstatou jednobodové precipitační (srážecí) titrace, hodnotící vnitřní kompatibilitu grupových složek asfaltového pojiva je, že se **pomocí postupného přidávání srážecího organického činidla (izooktanu) k roztoku definovaného množství silničního asfaltu v toluenu navodí takové podmínky, za kterých se daný roztok stává termodynamicky nestabilním. V tomto bodě dochází k fázovému vylučování nejméně rozpustných složek roztoku, tzv. flokulační bod. Míra přídatku srážecího roztoku je i mírou stability jeho roztoku za dané koncentrace a tedy i mírou kompatibility jednotlivých složek asfaltového pojiva.** V případě asfaltových povliv jsou nejméně rozpustné a tedy i nejdříve se srážející/vylučující sloučeniny, jež mají charakter „asfaltenů“. Ostatní základní grupové složky asfaltu jsou skupiny „nenasyčené“ (do této skupiny patří i parafiny), „aromáty“ a „pryskyřice“. Nenasycené a aromáty jsou považovány za součást maltenové fáze, ve které jsou zjednodušeně řečeno dispergované asfalteny. Pryskyřice stojí na pomezí těchto dvou skupin a hrají roli ve stabilizaci asfaltenových agregátů/asociátů v maltenech. Podrobnější popis systému asfaltového pojiva je uveden v (1). Jak bylo řečeno výše, o vzájemné kompatibilitě jednotlivých složek rozhoduje především chemická podstata sloučenin.

Visbreakingové zbytky se svým charakterem řadí do skupiny asfaltenů. Typickou vlastností visbreakingových materiálů je jejich poměrně nízká rozpustnost v některých typech uhlovodíkových rozpouštědel. Přítomnost visbreakingových zbytků tedy ještě více zhoršuje vzájemnou kompatibilitu asfaltenových a maltenových složek. Změny v disperzní

stabilitě asfaltového pojiva vyvolané přidáním visbreakingových zbytků jsou proto velmi významné.

2.2. Okrajové podmínky titrace

2.2.1. Koncentrace roztoku asfaltového pojiva a toluenu

Pro jednobodovou precipitační titraci byla zvolena koncentrace roztoku $1,0\pm 0,005$ g asfaltového pojiva v 10 ml toluenu, jenž se podle zkušeností jeví jako velmi dobré řešení, které umožňuje dosáhnout spolehlivého rozpuštění asfaltu v přiměřeném časovém rozpětí dvou hodin. Zvolená kombinace se vyznačuje i přiměřenou spotřebou srážedla (titrantu) a dobře viditelnou detekcí počátku precipitace.

2.2.2. Referenční teplota

Teplota zkoušky byla ustanovena na $20\pm 0,2$ °C proto, aby zkouška mohla být prováděna za teploty nejbližší té, která panuje v laboratořích po většinu roku.

2.3. Zkušební zařízení a pomůcky

- Erlenmayerova baňka s objemem 100 ml
- Laboratorní horkovzdušná sušárna umožňující udržovat teplotu do 150 °C
- Skleněná byreta s dělením stupnice nejméně 0,2 ml
- Vodní lázeň s termostatickou regulací umožňující udržovat teplotu na $20\pm 0,2$ °C
- Skleněná tyčinka délky 200 mm průměru 5 mm, nálevky a trychtýře
- Filtrační papír (doporučen typ AK-1M, papírna Štětí, CZ)

2.4. Použité chemikálie

- Toluén v kvalitě p.a. (pro analýzu)
- Izooktan (2,2,4-trimethylpentan) v kvalitě p.a.

UPOZORNĚNÍ: Popsaná metoda vyžaduje použití chemických látek, které mohou být nebezpečné lidskému zdraví.

2.5. Pracovní postup

Do 100 ml Erlenmayerovy baňky je odváženo $1,000\pm 0,005$ g asfaltového pojiva. Poté je uzavřená baňka na několik minut umístěna do laboratorní sušárny s teplotou cca 60 °C až 80 °C nad bod měknutí z důvodu rozehtání pojiva a vytvoření tenké vrstvy pojiva na dně baňky. Po natavení, které trvá v tomto případě několik minut, se baňka vyjme a krouživým pohybem se vytvoří na dně a stěnách baňky asfaltový film. Tím je urychleno rozpouštění a jeho kvalita. Po ochlazení na laboratorní teplotu se přidá byretou celkem $10\pm 0,1$ ml toluenu v kvalitě p.a. Krouživým pohybem se rozpouští vzorek do úplné solvatace alespoň 20 až

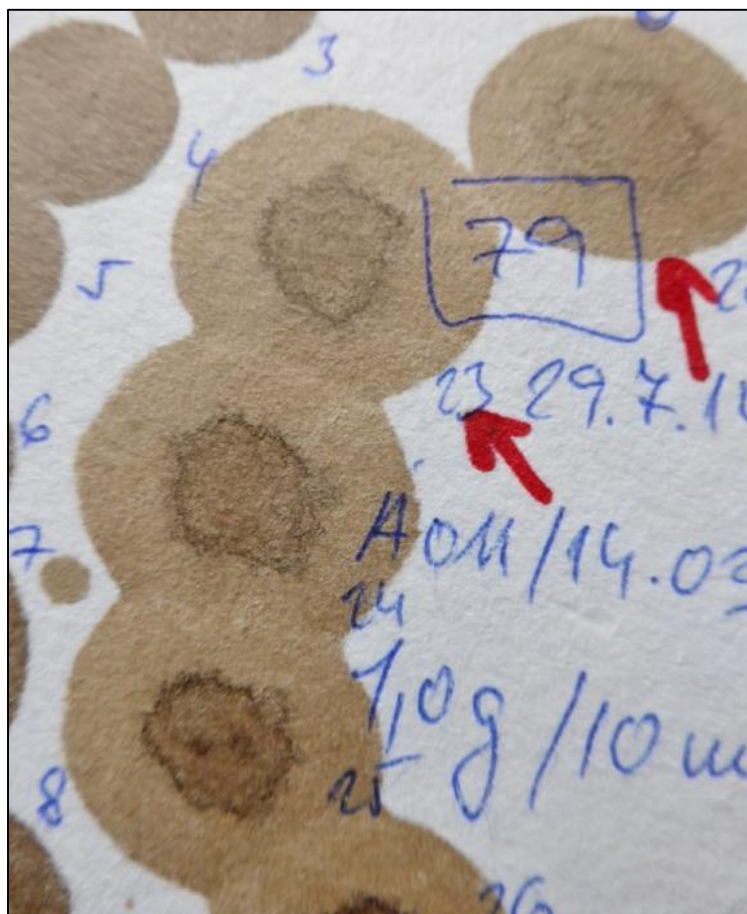
30 minut. Proces rozpouštění je velmi důležitý, neboť má zajistit úplnou solvataci jednotlivých komponent asfaltového pojiva. Nedokonalá solvatace a rozrušení klastrů/agregátů může ovlivnit nutné množství srážedla k dosažení flokulačního bodu. Občasné promíchání vzorku krouživým pohybem je vhodné i během temperace vzorku ve vodní lázni.

Roztok se nechá cca 60 min za občasného míchání spolu s rozpouštědly temperovat ve vodní lázni při teplotě $20 \pm 0,2$ °C. Před začátkem titrace se nanese skleněnou 200 mm tyčinkou o průměru 5 mm kapka zkoušeného roztoku na filtrační papír, čímž se zjistí, zda nejsou přítomny nerozpuštěné podíly. Poté se titruje izooktanem ze skleněné byrety s dělením stupnice nejméně 0,2 ml tak, že na počátku se za stálého míchání přidá 2 ml izooktanového titrantu a při nepřerušovaném kroužení baňkou se počká cca 10 s. Poté se odebere skleněnou tyčinkou kapka roztoku a nanese se na filtrační papír. Tento postup se opakuje v pravidelném rytmu kolem 30 s v kroku přidání titrantu 1,0 ml, až se objeví zřetelná tmavší soustředná kružnice odloučeného precipitátu (sraženiny). Detekce flokulačního bodu se provede podle postupu uvedeného v bodě 2.6.

2.6. Detekce flokulačního bodu

Detekce počátku precipitace se provádí kapkovou metodou, která je známá již nejméně od 30. let minulého století (2) a tato kapková metoda se provádí obdobně jako v případě zkoušky posouzení jemných částic kameniva methylenovou modří. Flokulační bod je určen okamžikem, kdy je na filtračním papíře možné zřetelně identifikovat vznik sraženiny. Detekce počátku flokulačního děje může být ovlivněna u některých druhů asfaltů jeho nezřetelností, která závisí na kvalitě přítomných asfaltenů, jejich polaritě, distribuci molekulární hmotnosti a funkčnosti ochranných peptizačních činidel.

Podle zkušeností by se při objemu titrovaného roztoku 10 ml neměly výsledky opakovaných stanovení odlišovat o více než jeden mililitr přidávaného titrantu. Pro většinu asfaltů (především s dobrou disperzní stabilitou) platí, že existuje určitá prodleva mezi nástupem precipitace a tvorbou velmi zřetelné sraženiny. To je způsobeno různým chemickým složením asfaltových pojiv a různou rozpustností jednotlivých přítomných komponent. **Jako referenční bod byl zvolen rozsah flokulace, kdy na rubové straně filtračního papíru (doporučen typ AK-1M, papírna Štětí, CZ) lze rozeznat soustředné kružnice nebo skvrnu sraženiny.** Tato prodleva nepřekračuje nikdy přídavek srážedla 2 mililitry. Příklad typického záznamu flokulačního bodu a vzniku sraženiny je zaznamenán na obrázku 1.



Obrázek 1: Detekce flokulačního bodu – fotografie detailu precipitátu (sraženiny) na filtračním papíře

2.7. Vyjádření výsledků

Pro účely relativního srovnávání je možné vyjádřit výsledek jako poměr objemu přidaného srážedla k objemu rozpouštědla.

Z hlediska korektnosti při výpočtu flokulačního bodu by se při stejné počáteční koncentraci asfaltu měl používat vztah, který zohledňuje objemové změny výsledného roztoku podle následující rovnice. Výslednou hodnotu tohoto poměru můžeme označit jako **FR** – „**Floculation Ratio**“, která je mírou vnitřní kompatibility asfaltového pojiva.

$$FR = \frac{V_S}{V_S + V_T}$$

R - 01

FR	= Flokulační poměr v bodě počátku flokulace
V _S	= Počáteční objem titrovaného roztoku (ml)
V _T	= Objem přidaného titrantu (ml)

Na základě zkušeností se ukazuje, že je z praktického hlediska výhodnější používat pouze jednu navážku asfaltového pojiva v konstantním množství rozpouštědla. Korekce výsledků na množství přidávaného izooktanu je pro dané účely a za daných podmínek nepříliš významná. Zároveň je rovněž smysluplnější při použité koncentraci titrovat po celých mililitrech. Disperzní stabilitu asfaltového pojiva pak dostatečně určuje pouhý poměr objemu titrantu k výchozímu objemu titrovaného roztoku (hustota 2,2,4-trimethylpentanu (izooktanu) při teplotě 25 °C je 0,692 g/cm³ a hustota toluenu je 0,865 g/cm³). Daný poměr se může označit jako **FTI – „Flokulační toluenový index“**. Z podílu je patrné, že čím vyšší je hodnota FTI, tím je asfaltové pojivo schopno pojmout více titrantu a tím lze také usuzovat na vyšší disperzní stabilitu tohoto asfaltového pojiva.

$FTI = \frac{V_T}{V_S}$		R - 02
FTI	=	Flokulační Toluenový Index
V _S	=	Počáteční objem titrovaného roztoku (ml)
V _T	=	Objem přidávaného titrantu (ml)

2.8. Opakovatelnost výsledků

Při opakovaném stanovení na různých vzorcích jednoho asfaltového materiálu, za dodržení všech podmínek zkoušky a pro jednoho operátora se pohybuje rozptyl výsledků ±1 ml přidávaného titrantu. Uvedený rozptyl je způsoben nezřetelností vzniku flokulačního bodu na rubové straně filtračního papíru. Platí, že u velmi disperzně stabilních asfaltů s pozvolným nástupem flokulace může být tento rozdíl mírně větší (±2 ml).

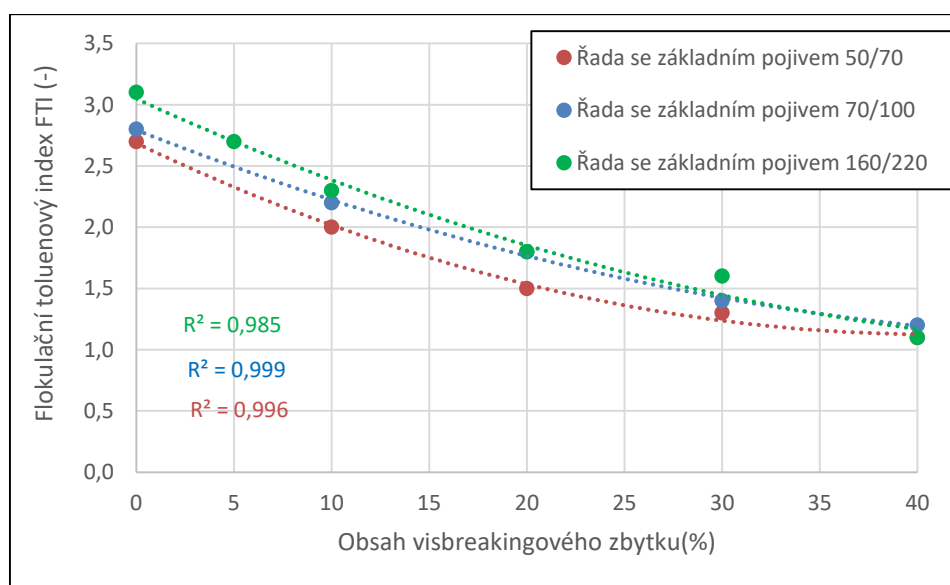
2.9. Interpretace výsledků a obor použitelnosti metody

Jednobodová titrace neumí příliš zachytit subtilní změny v disperzní stabilitě mezi jednotlivými velmi podobnými asfaltovými pojivy nebo v důsledku simulovaného stárnutí (3) tak, jak to dokáže klasická Heithausova titrace. Analýzou zestárých asfaltových pojiv se ukazuje, že míra celkové disperzní stability vyjádřená Heithausovými parametry klesá. Rozdílné jsou pouze příspěvky jednotlivých členů, kdy se rozpustnost a peptizace asfaltenů v důsledku oxidace zhoršuje, naopak solvatační schopnost maltenové fáze se zvyšuje. Děje se tak pravděpodobně v důsledku oxidace podílů aromatických sloučenin v maltenech. Heithausova titrace dokáže zaznamenat i vliv vzrůstajícího množství asfaltenů na vnitřní kompatibilitu asfaltového systému.

Pokud provádíme srovnání parametru disperzní stability vyjádřené zjednodušeně pomocí flokulačního toluenového indexu FTI vzešlého z jednobodové precipitační titrace, nejsme u většiny střeoevropských asfaltových pojiv schopni detailně zaznamenat rozdíly mezi nezestárým výchozím materiálem a asfaltovým materiálem zestárým akcelorovanou metodou 3xRTFOT, přičemž rozdíl v termooxidační zátěži je poměrně značný. Vidíme sice

zcela systematickou tendenci ke změně množství přidávaného precipitačního činidla, ale tato změna je nevýrazná a téměř na hranici reprodukovatelnosti metody.

Co ale simplificovaná titrační metoda vyjadřuje jednoznačně, je demonstrace změn vyvolaných přidáním visbreakingových reziduí. Na příkladu z diagramu na obrázku 2 je patrné, jak se projevuje zvyšující se obsah visbreakingového zbytku na poklesu hodnoty FTI s různými výchozími asfaltovými pojivy obsahujícími různé množství visbreakingového zbytku, přičemž je nutné poznamenat, že visbreakingové zbytky byly do asfaltu přidávány bez následné stabilizace na oxidačních kolonách. Z obrázku je patrné, že hodnota indexu disperzní stability FTI těchto modelových pojiv se nachází v rozsahu 1,1 až 3,1. Hodnoty indexu disperzní stability FTI vybraných komerčně dodávaných pojiv gradace 50/70 a 70/100 se pohybovaly v rozmezí 1,2 až 3,0, což je patrné z obrázku 7.



Obrázek 2: Korelace mezi obsahem visbreakingových zbytků a parametrem disperzní stability vyjádřeným hodnotou flokulačního toluenového indexu FTI

3. Srovnání „novosti postupů“

V České republice se v silničním stavitelství doposud žádná metoda, která by cílila přímo na vnitřní strukturu a chemickou podstatu asfaltových pojiv, běžně nepoužívá. V literatuře jsou známé metody vyjádření disperzní stability pomocí analýzy skupinového složení nebo sériové precipitační titrace (Heithausovy titrace).

3.1. Vyjádření disperzní stability pomocí indexů grupového složení asfaltového pojiva

Toto skupinové složení může být stanoveno buď preparační sloupcovou chromatografií PCC nebo tenkovrstvou chromatografií TLC. První metoda (PCC) je přesnější a lépe reprodukovatelná, ale náročná na čas a vynaloženou laboratorní práci, takže analýza vzorku trvá poměrně dlouho a je nákladná. Druhá metoda (TLC) je podstatně rychlejší a časově

úspornější, ale může mít problémy s reprodukovatelností a optimalizací podmínek (4), přičemž trpí na poměrně velký rozptyl hodnot jednotlivého stanovení. Současně jsou peněžní nároky na počáteční investici do instrumentálního vybavení poměrně vysoké. Nepříjemností je i skutečnost, že obě metody využívají částečně odlišné chromatografické podmínky, které ovlivňují účinnost dělení (každá z metod dokáže lépe oddělit a identifikovat jiné skupiny asfaltového pojiva). Zjištěné skupinové složení (nejčastěji jsou udávány čtyři skupiny – nenasycené, aromáty, pryskyřice a asfalteny) se vyjadřují ve formě indexu, tedy poměru jednotlivých komponent. Tento index se označuje chybně jako koloidní, častěji se však v literatuře používá pojmenování Gaestelův index (5).

$$I_C = \frac{\text{Asfalteny+Nasycené}}{\text{Pryskyřice + Aromáty}} \quad R - 03$$

Tento index představuje vodítko pro odhad disperzní stability. Čím menší má Gaestelův index hodnotu, tím větší je stabilita systému, protože asfalteny jsou lépe peptizované. Původní vzorec vyjadřoval v čitateli součet podílu asfaltenu a flokulačních molekul (nasycené sloučeniny, nafteny). Ve jmenovateli byl pak podíl peptizačních molekul (pryskyřic). Aromáty se mohly rozdělit do obou členů zlomku. Tento index dokáže částečně predikovat porušenou disperzní stabilitu s náchylností k separaci fází, protože de facto vyjadřuje podíl fázově nestabilních molekul na jednotku molekul, které systém stabilizují. Nutno podotknout, že se jedná pouze o přibližné měřítko.

3.2. Vyjádření disperzní stability pomocí sériové precipitační titrace – Heithausova titrace

Mnohem přesnější jsou metody vyvinuté a publikované v 60. letech minulého století, které umožnily popsat disperzní stabilitu sofistikovanějším způsobem. Jedná se o sériovou konduktometrickou nebo turbidimetrickou titraci nazývanou v literatuře Heithausova titrace (6) a (7). V současnosti je metoda posouzení disperzní stability normována americkou normou ASTM D6703-14 „Standard Test Method for Automated Heithaus Titrimetry“ (8) především pro posuzování ropných zdrojů. Tento postup je ovšem pracný a zdlouhavý. Základní myšlenkou kvantifikace disperzní stability asfaltového pojiva touto metodou je experimentální stanovení dvou parametrů, které charakterizují jednak solvatační schopnost maltenové fáze p_0 a jednak schopnost asfaltového podílu podléhat peptizaci p_a . Kombinací těchto parametrů je možné vypočítat souhrnný Heithausův parametr P , který vyjadřuje míru vnitřní kompatibility systému.

Experimentálně se hodnoty p_0 a p_a určí z titrací koncentračních řad roztoku asfaltového pojiva v toluenu, přičemž platí, že poměr objemu přidávaného titrantu k celkovému objemu roztoku v bodě flokulace se označuje jako „Flokulační poměr FR“ („Flokulation ratio“).

$$FR = \frac{V_S}{V_S + V_T}$$

R - 04

FR = Flokulační poměr v bodě počátku flokulace

V_S = Počáteční objem titrovaného roztoku (ml)

V_T = Objem přidaného titrantu (ml)

Koncentrace roztoku je vypočítána jako:

$$C = \frac{W_A}{V_S + V_T}$$

R - 05

C = Koncentrace roztoku (g/ml)

W_A = Hmotnost rozpuštěného pojiva (g)

V_S = Počáteční objem titrovaného roztoku (ml)

V_T = Objem přidaného titrantu (ml)

Hodnoty flokulačního poměru FR pro různé koncentrace jsou vyneseny do grafu, jehož osa x reprezentuje koncentrace a osa y reprezentuje flokulační poměr. Získaná extrapolovaná regresní přímka protíná osu y grafu v bodě FR_{max} a osu x grafu v bodě C_{min} . Oba zjištěné indexy jsou dále použity k výpočtu parametrů p_0 a p_a podle následujících vztahů:

$$p_a = 1 - FR_{max}$$

R - 06

p_a = parametr stavu peptizace asfaltenového podílu

FR_{max} = maximální teoretický flokulační poměr (viz obrázek 3)

$$p_0 = FR_{max}(C_{min}^{-1} + 1)$$

R - 07

p_0 = parametr solvatační schopnosti maltenového podílu

FR_{max} = maximální teoretický flokulační poměr

C_{min} = minimální teoretická koncentrace roztoku (viz obrázek 3)

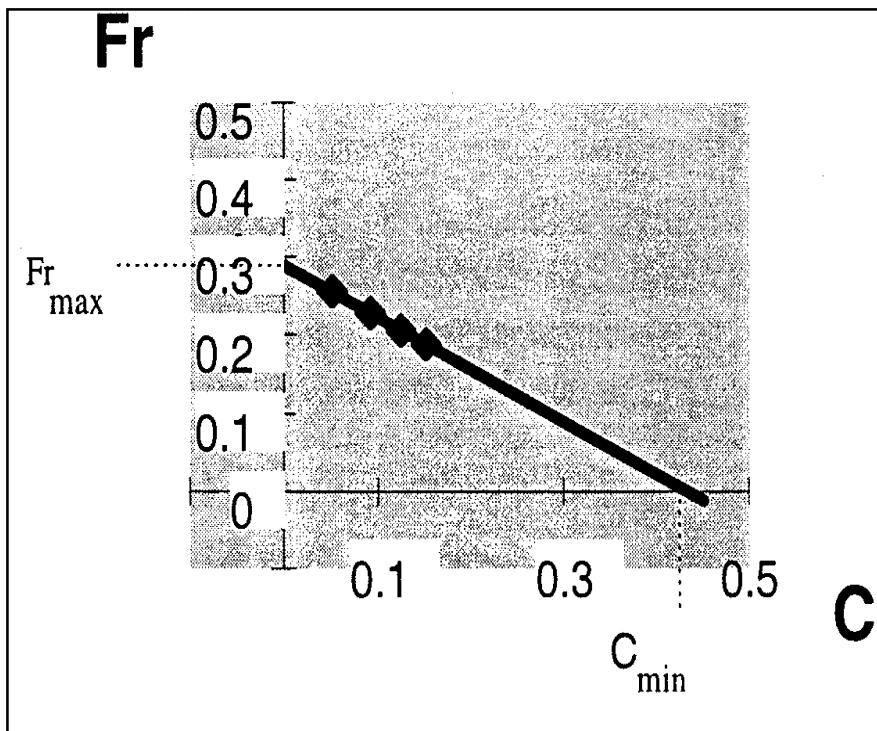
Heithausův parametr míry vnitřní kompatibility P se získá ze vztahu:

$$P = \frac{p_0}{p_a + 1}$$

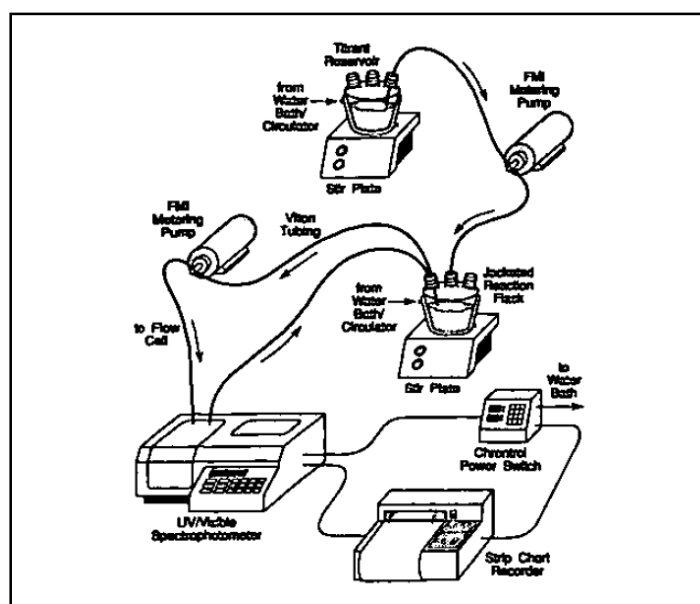
R - 08

Bezrozměrné hodnoty Heithausova parametru P pro asfalty na bázi těžkých destilačních zbytků **se pohybují v rozmezí 2,5 – 10**. Vyšší hodnoty znamenají lepší vnitřní kompatibilitu, nižší hodnoty naopak horší. Tyto metody jsou v manuální variantě rovněž časově velmi náročné, a proto byl titrační proces v 80. letech zautomatizován tak, aby titrace probíhala kontinuálně při automatickém přidávání titrantu. Tato varianta je náročná především investičně, protože je nutno zakoupit specializované jednoúčelové zařízení. Současně se ale zjistilo, že výrazně stoupá přesnost stanovení a klesá rozptyl výsledků. Pro detekci počátku flokulace se využívá optických metod – změny transmitance na vlnové délce 740 nm (9). V současnosti je přístroj patentován pro použití na asfaltech a na směsných asfaltech (10),

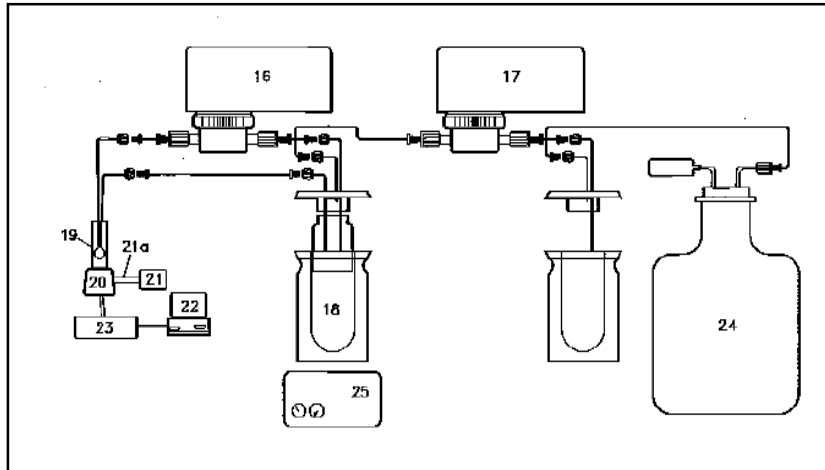
(11), (12), (13). Zařízení je plně automatizované, včetně přívodu titrantu a okruhu s optickou detekční jednotkou. Tato vylepšená metoda se někdy v literatuře označuje zkratkou AFT – „Automated Flocculation Titrimetry“. Zařízení bylo vyvinuto v americkém Western Institutu (14), viz obrázek 4.



Obrázek 3: Heithausův diagram závislosti flokulačního poměru na koncentraci roztoku, převzato z (3)



Obrázek 4: Instrumentální schéma automatické Heithausovy titrace, převzato z (15)



Obrázek 5: Podrobné schéma zapojení, převzato z (13)

Na trhu je dostupné laboratorní vybavení, které se používá především pro stanovení disperzní stability surových rop a těžkých destilačních zbytků a směsí asfaltů, viz obrázek 6 od firmy Koehler Instrument Company, Inc.



Obrázek 6: Komerční automatický flokulační titrometr K47100 převzato z (16)

3.3. Základní popis inovace

Při tvorbě metodiky se vycházelo především z těchto předpokladů:

- a) V České republice je podle dostupných informací převládajícím typem primárně zpracovávané ropné suroviny Russian Export Blend (REB). Některé rafinerie, které

dodávají svoje asfaltové produkty na český trh, mohou ustáleně používat i jiné geografické zdroje. Protože způsob destilačního zpracování ropy neovlivňuje zásadně disperzní stabilitu (17) výsledného produktu, a pokud k výrobě asfaltu jsou používány vhodné suroviny, bude se disperzní stabilita výsledných asfaltových produktů na bázi těžkých destilačních zbytků pohybovat v poměrně úzkém rozmezí. Je předpoklad, že současně i reologické užité vlastnosti budou taktéž dosti podobné. Rovněž z dosavadních zkušeností se lze domnívat, že procesy polofoukání neovlivňují v negativní míře konečné hodnoty disperzní stability.

- b) Odlišná situace již může nastat při přepracování těchto těžkých ropných destilačních zbytků ze zpracování ropy a jejich zpětného **přidávání do nástřiku na kolony v procesu jejich stabilizování v primární bitumenové matrici**. Vliv visbreakingových zbytků nebyl dosud v českém silničním stavitelství oficiálně studován nebo vyhodnocován z hlediska vlivu na kvalitu asfaltových povrchů. Podle literatury se **přidáním visbreakingových zbytků, které mají charakter asfaltenů, významně snižuje disperzní stabilita vzniklého směsného pojiva**.
- c) Zvolený postup laboratorního stanovení by měl být co nejjednodušší, dostatečně experimentálně robustní a s jasnou vypovídající hodnotou.
- d) Pro experimentální jednoduchost je výhodné použít **kapkovou metodu detekce bodu flokulace**.
- e) Je vhodné zvolit takové koncentrační poměry, aby byla zajištěna v normálních laboratorních podmínkách dostatečná solvatace a rozpouštění vzorku v toluenu při rozumných časech, jenž zajistí, aby pracovní postup příliš neovlivňoval výsledky. Dále aby tento koncentrační poměr ještě umožňoval snadnou detekci skvrny precipitátu (sraženiny) na filtračním papíře. Také chyba při navažování vzorku by měla být limitujícím faktorem pro stanovení přítomnosti těchto visbreakingových zbytků.
- f) Protože parametry rozpustnosti jsou termodynamicky závislé, uspořádání titračního pokusu musí být v určité míře robustní vůči výkyvům teploty v praxi výrobních laboratoří.
- g) Z hlediska vyššího obsahu parafinů v ruských ropách je podle literatury vhodné zvolit jako flokulační rozpouštědlo izooktan (2,2,4-trimethylpentan) na místo původně používaného n-heptanu.

Metodika jednobodové precipitační titrace je proto postavena na zjednodušení Heithausovy titrace pro stanovení disperzní stability ropných materiálů a z nich pocházejících destilačních zbytků. V českém silničním stavitelství se doposud žádné stanovení na bázi srážecí titrace izooktanem popisující vnitřní kompatibilitu jednotlivých složek asfaltového pojiva nepoužívalo. Z tohoto hlediska je jakýkoliv přístup a zavedení těchto metod do silniční praxe nové a inovativní, protože bude možné identifikovat především pojiva s visbreakingovými zbytky nebo jinak porušenou stabilitou, což je například fatální vlastnost při přípravě silničních emulzí. Žádné existující postupy a praktické, popřípadě operativní použití uvedené

metody nebylo v českém silničním stavitelství známo, byť se daný postup ve formě Heithausovy titrace a stanovení peptizační síly asfaltového pojiva v rafinérské praxi pravděpodobně používá.

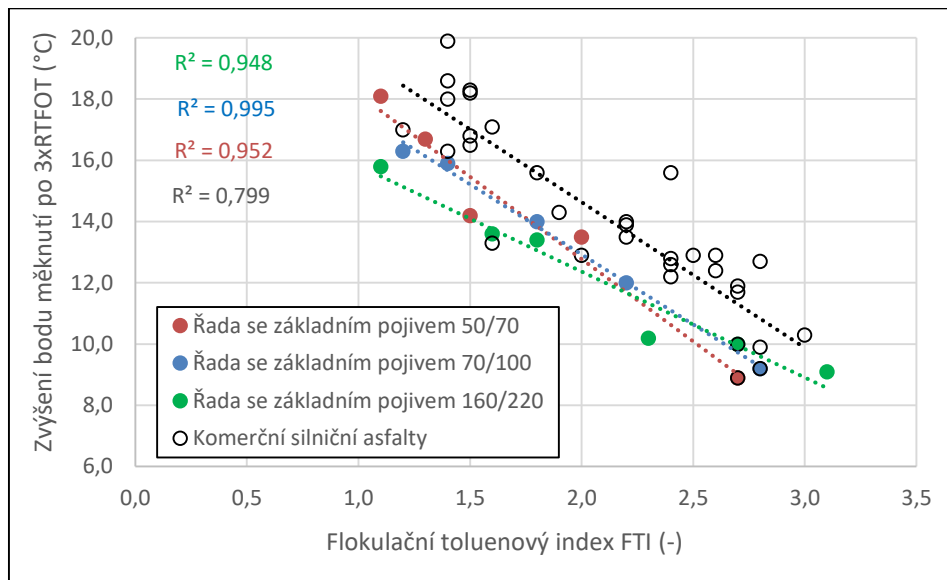
Sama jednobodová srážecí titrace izooktanem je zjednodušením Heithausovy titrace, vhodná k operativnímu použití ve výrobní praxi produkce asfaltových směsí nebo asfaltových emulzí. Samotná metoda má oproti standardní metodě Heithausovy titrace několik výhod:

- a) Je dostatečně jednoduchá, instrumentálně a časově nenáročná.
- b) Počáteční investice jsou velice malé.
- c) Je vhodná pro operativní použití ve výrobě a kontrole kvality asfaltových pojiv.
- d) Dokáže velmi snadno a spolehlivě identifikovat pojiva s porušenou disperzní stabilitou.
- e) Má při dodržení laboratorních postupů dobrou opakovatelnost a reprodukovatelnost (± 1 ml titrantu), tj. 0,1 FTI.
- f) Při vytvoření ověřených kalibračních křivek dokáže přibližně kvantifikovat množství visbreakingových zbytků v asfaltovém pojivu.
- g) Ve spojení s metodou simulovaného stárnutí má výzkumný a obecně metodologický význam.
- h) Hodnotící škála je pro evropské silniční asfalty dostatečná – hodnoty flokulačního toluenového indexu FTI se pohybují v rozmezí přibližně 1,0 – 3,0, ovšem rozdíly mezi vzorky na bázi čistých destilačních zbytků jsou zanedbatelné.
- i) Základní přínos uvedené metody je skutečnost, že představuje významný analytický nástroj, který dokáže diferenciovat některá pojiva, která při použití konvenčních zkoušek poskytují nivelizované výsledky a umožňuje jejich dlouhodobým sledováním vyhodnotit jejich příspěvek ke kvalitě asfaltových silnic (negativní nebo pozitivní).

3.4. Synergie metody jednobodové srážecí titrace s metodou 3xRTFOT

Nedílnou součástí informací poskytovaných inovovanými zkušebními metodami je demonstrace vzájemné provázanosti výsledků zkušební metody s výsledky zavedených zkoušek. Porovnání výsledků zkoušky disperzní stability s hodnotami základních reologických parametrů získanými po zkoušce urychleného stárnutí 3xRTFOT ukazují, že existuje výrazná korelace mezi změnami těchto parametrů po provedené zkoušce stárnutí a nominální velikostí flokulačního toluenového indexu FTI. Ve středoevropském prostoru je porušení disperzní stability všeobecně spojováno především s vlivem visbreakingových zbytků. Jak je uvedeno v obrázku 7, existuje velmi silná závislost mezi hodnotami FTI a hodnotami zvýšení bodu měknutí po urychleném stárnutí metodou 3xRTFOT. Podobně silná korelační závislost se vztahuje také například na změnu komplexního smykového modulu nebo fázového úhlu.

Tento poznatek platí obecně pro všechny typy asfaltových pojiv, buď připravené míšením s visbreakingovými zbytky, nebo odebrané z dodávek komerčních pojiv. U hodnot nízkoteplotních vlastností již vyjádřené vztahy mohou platit odlišně pro laboratorně připravené koncentrační řady obsahující visbreakingové zbytky (nízkoteplotní vlastnosti se zhoršují) a běžná komerční pojiva (nízkoteplotní vlastnosti se zlepšují).



Obrázek 7: Korelace mezi parametrem disperzní stability vyjádřeným hodnotou FTI a nárůstem bodu měknutí po zkoušce akcelerovaného stárnutí 3xRTFOT

4. Popis uplatnění certifikované metodiky

Metodika hodnocení disperzní stability silničních asfaltů slouží k identifikaci asfaltových pojiv s porušenou disperzní stabilitou. Nedokonalá disperzní stabilita znamená často nerovnováhu ve složení asfaltového pojiva především s obsahem visbreakingových zbytků. Je to metoda, po které mnozí silničáři volali a která může posunout diskuzi z čistě teoretické roviny na praktickou úroveň. Jako výzkumná nebo operativní metoda vytváří rámec, který umožňuje takto identifikovaná asfaltová pojiva sledovat a dále zkoumat v delším časovém horizontu, a shromáždit dostatečné množství průkazných dat, které mohou jednoznačně potvrdit nebo vyvrátit, zda hypotéza o škodlivém vlivu visbreakingových zbytků je kvantifikovatelná a průkazně ověřitelná. Existuje značná komplementarita s metodou 3xRTFOT, kdy každá metoda přináší svůj díl do mozaiky celkového reologického chování asfaltových pojiv a jejich termooxidační stability.

Významný přínos by mohla mít tato chemická metoda při výrobě asfaltových emulzí, protože jednoznačné ověření vzájemné kompatibility umožňuje výrobu kvalitních asfaltových emulzí.

Popis asfaltových materiálů z výše uvedeného fyzikálně - chemického pohledu je přínosný při výběru materiálových zdrojů. Vzhledem k tomu, že objem státních investic do silniční

infrastruktury je poměrně značný, uvedená metoda může pomoci optimalizovat kvalitu materiálových vstupů, jež se projevuje následně v prodloužení životnosti asfaltových vozovek.

5. Ekonomické aspekty

Posouzení parametru disperzní stability asfaltového materiálu je analytická metoda, která dokáže indikovat potenciální přítomnost visbreakingových reziduí v silničních asfaltech. Tato problematika nebyla nikdy exaktně v České republice zkoumána, byť probíhají diskuze, které vyjadřují pochybnosti o kvalitě asfaltových pojiv obsahujících právě tyto příměsi. Výše uvedenou metodou se odborné silničářské komunitě dostává do rukou nástroj, který umožňuje do této diskuze vnést relevantní výsledky z dlouhodobého sledování kvality asfaltových silnic.

Investice do budování a údržby silniční infrastruktury jsou základním pilířem a předpokladem ekonomické úspěšnosti a dalšího rozvoje daného územního celku nebo celého státu. Drtivá většina těchto investic je financována z veřejných zdrojů a každé i nepatrné zvýšení kvality prováděných staveb nebo oprav vede ke zvýšení servisní životnosti, což může vést v tomto národohospodářském sektoru z dlouhodobého hlediska k miliardovým úsporám investičních prostředků. Z tohoto pohledu může být už jen tato samotná metodika stanovení disperzní stability silničních asfaltů dalším významným stavebním kamenem politiky jakosti českých asfaltových vozovek, která enormním způsobem amplifikuje prostředky vložené do projektu TA03030381 „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“.

6. Seznam použité související literatury

1. S. Stoklásek: "Použití dynamického smykového reometru DSR ve výzkumu asfaltových pojiv", kapitola Stárnutí asfaltových pojiv, rešerše VUT Brno, 2014.
2. G.L. Oliensis: "A Qualitative Test for Determining the Degree of Heterogeneity of Asphalts," ASTM, Proc. of the 36th Ann. Meeting, Chicago, 26-20 Jun. 1933, Vol. 33, Part II, 715-728.
3. P. Redelius: „Ageing of bitumen studied by colloidal stability“, AB Nynas Petroleum, <http://www.nynas.com/Global/Bitumen%20for%20paving%20applications/UK/33710.pdf>.
4. J.F. Masson, T. Price, P. Collins: „Dynamics of bitumen fractions by thin-layer chromatography/flame ionization detection“, Energy & Fuels, 15, 955-960, 2001.
5. C. Gaestel C., Smadja and K. A. Lamminan, "Contribution à la connaissance des propriétés des bitumes routiers". Rev. Gen. Routes Aérodomes 466, 85–95.

6. J.J. Heithaus: „Measurement and Significance of Asphaltene Peptization“, J. Inst. Petrol., 48, 1962, pp. 45-53.
7. J.J. Heithaus: “Measurement and Significance of Asphaltene Peptization“, J. Am.Chem. Soc., Div. Petrol. Chem. Prepr., 5, 1960, pp. A23-A37.
8. ASTM D6703 – 14: „Standard Test Method for Automated Heithaus Titrimetry“, Volume: 04.03, 2014.
9. G. Hoiter, M. Robin: „Action De Divers Diluants Sur les Produits Petroliers Lourds: Mesure, Interpretation et Prevision de la Flocculation des Asphaltenes“, Revue de L’ Institut Francais du Petrole, 18, 1983, pp. 101-120.
10. US2004058451 (A1) — 2004-03-25 Pauli A. T., Robertson R. E., Branthaver J.F., Schabron J. F.: „Automated flocculation titrimeter system“, 2004-03-25.
11. US2010251935 (A1) - Pauli A. T., Robertson R. E., Branthaver J.F., Schabron J. F.: „Blended Asphaltic Composition“, 2010-10-07.
12. US7736900 (B2) - Pauli A. T., Robertson R. E., Branthaver J.F., Schabron J. F.: „Automated flocculation titration method for accurate determination of Heithaus parameters“, 2010-06-15.
13. US8236564 (B2) - Pauli A. T., Robertson R. E., Branthaver J.F., Schabron J. F.: „Automated titration method for use on blended asphalts“, 2012-08-07.
14. <http://www.westernresearch.org/>.
15. A. T. Pauli : „Asphalt Compatibility Testing Using the Automated Heithaus Titration Test“, Prepr. Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem. 1996, 41(4), p. 1276, https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/41_4_ORLANDO_08-96_1276.pdf.
16. <http://www.koehlerinstrument.com/products/K47100.html>.
17. H. Laux, I. Rahimian, P. Schorling: „The Colloidal Stability of Crude Oils and Residues“, Petroleum Science and Technology, Volume 17, Issue 3-4, 1999.

7. Seznam publikací, které předcházely metodice

S. Stoklásek, O. Dašek, P. Coufalík, P. Šperka: Vlastnosti asfaltových pojiv a faktory ovlivňující stárnutí. Prezentace na konferenci Asfaltové vozovky 2015. České Budějovice. 2015.

8. Dedikace na projekt

Metodika byla zpracována v rámci řešení projektu Technologické agentury ČR s označením TA03030381 a názvem „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“.

9. Vypracování metodiky

RNDr. Svatopluk Stoklásek, nezávislý konzultant

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Petr Hýzl, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Pavel Coufalík, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

doc. Dr. Ing. Michal Varaus, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Petr Špaček, Skanska a.s.

Ing. Zdeněk Hegr, Skanska a.s.

Ing. David Matoušek, Pragoprojekt a.s.

Ing. Petr Svoboda, Pragoprojekt a.s.

10. Jména oponentů a názvy jejich organizací

Ing. Jiří Hlavatý, Ph.D., Ředitel úseku kontroly kvality staveb, Ředitelství silnic a dálnic ČR

Ing. Milan Slaviček, tajemník týmu č. 6 pro asfaltové technologie za horka Sdružení pro výstavbu silnic Praha, SILMOS-Q s.r.o.



Praha 25. ledna 2017
Č. j.: 142/2016-710-VV/1

v y d á v á

O S V Ě D Ě N Í

o uznání uplatněné certifikované metodiky
v souladu s podmínkami „Metodiky hodnocení výsledků výzkumu a vývoje“

s názvem

„Metodika pro hodnocení disperzní stability silničních asfaltů“

ŘEŠITEL

**Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební
Skanska a.s.**

Pragoprojekt a.s.

Autor:

RNDr. Svatopluk Stoklásek

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

Ing. Pavel Coufalík

doc. Dr. Ing. Michal Varaus

Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

Ing. Petr Špaček

Ing. Zdeněk Hegr

Ing. David Matoušek

Ing. Petr Svoboda

Vypracované v rámci výzkumného projektu č. TA03030381 s názvem „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“ financovaného z programu ALFA Technologické agentury České republiky.

Zpracovatelé 2 nezávislých oponentních posudků:

- Ing. Jiří Hlavatý, ŘSD ČR
- Ing. Milan Slavíček, SILMOS – Q s.r.o.

JUDr. Václav Kobera
Ředitel

Odbor ITS, kosmických aktivit a VaVaI



B. Metodika pro hodnocení silničních asphaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí

Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí

Metodika vznikla v rámci řešení projektu TAČR TA03030381
Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující
prodloužení životnosti asfaltových vozovek

Autoři: Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Ing. Pavel Coufalík
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Ing. Petr Špaček
Ing. Zdeněk Hegr
RNDr. Svatopluk Stoklásek
Ing. David Matoušek
Ing. Petr Svoboda

V Brně, září 2015

OBSAH

1. Cíl metodiky
2. Vlastní popis metodiky
 - 2.1. Zdůvodnění potřeby metodiky
 - 2.2. Stárnutí asfaltových pojiv
 - 2.3. Náchylnost ke stárnutí v současnosti vyráběných asfaltových pojiv
 - 2.4. Metody laboratorního stárnutí asfaltových pojiv popsané v platných předpisech
 - 2.5. Podstata metodiky – metoda laboratorního stárnutí asfaltového pojiva metodou RTFOT s trojnásobnou dobou trvání (3xRTFOT)
 - 2.6. Hodnocení náchylnosti silničních asfaltů k termooxidačnímu stárnutí pomocí metody 3xRTFOT - měřené veličiny
 - 2.7. Hodnocení náchylnosti silničních asfaltů k termooxidačnímu stárnutí pomocí metody 3xRTFOT – požadavky na změnu měřených veličin pro silniční asfalt 50/70 a 70/100
3. Srovnání „novosti postupů“
4. Popis uplatnění certifikované metodiky
5. Ekonomické aspekty
6. Seznam použité související literatury
7. Seznam publikací, které předcházely metodice
8. Dedikace na projekt
9. Vypracování metodiky
10. Jména oponentů a názvy jejich organizací

1. Cíl metodiky

Všechna v ČR vyráběná asfaltová pojiva v současné době splňují parametry požadované platnými technickými předpisy a normami. Dlouhodobým sledováním kvality asfaltových hutněných vrstev se však ukázalo, že některá pojiva v konstrukci vozovky nemusejí splňovat požadavky na dostatečnou trvanlivost. Změna vlastností asfaltového pojiva pak může následně negativně ovlivnit užité vlastnosti hutněné asfaltové vrstvy. Tento degradační proces se projevuje především ve vzniku trhlin a výtlučků, což vede dále k celkové desintegraci konstrukce vozovky. Cílem metodiky je zavést jednoduchý zkušební postup simulovaného stárnutí a současně nastavit požadavky na limitní hodnoty signálních veličin. Zvolené parametry jsou snadno stanovitelné laboratorními zkouškami a zároveň překročení zvolených hraničních hodnot indikuje problematické chování asfaltového pojiva. Potenciální možnost s předstihem rozpoznat asfaltová pojiva náchylná ke zrychlenému termooxidačnímu stárnutí představuje zásadní přínos pro zajištění kvality asfaltových vrstev používající jako pojivo nemodifikované silniční asfalty.

2. Vlastní popis metodiky

2.1. Zdůvodnění potřeby metodiky

Neutěšený stav některých pozemních komunikací, a zejména extrémní případy, kdy se prvotní poruchy asfaltového krytu objevují již v záruční době, vyvolává otázku efektivnosti investic do oprav silniční sítě.

Pokud je určitý materiál použit v nějakém výrobku, předpokládá se, že splňuje předepsané vlastnosti a že tyto vlastnosti zůstávají v čase víceméně neměnné. V případě asfaltových pojiv ale tento předpoklad úplně neplatí. Asfalty jako organické látky podléhají během technologických výrobních procesů hutněné asfaltové vrstvy celé řadě komplexních změn, které mohou vést ke změně funkčních vlastností jak asfaltového pojiva, tak zprostředkovaně i hutněné asfaltové vrstvy. Je to důsledek jednak skutečnosti, že výrobní procesy probíhají za zvýšené teploty a jednak obecnému vlivu oxidační zemské atmosféry s reaktivními molekulami kyslíku. Tyto komplexní pochody se souhrnně označují jako stárnutí materiálu.

V případě asfaltových pojiv se fyzikálně-chemické změny v důsledku podmínek při skladování, výrobě, transportu, pokládce asfaltových směsí a během jejich předpokládané životnosti považují za degradační – tedy takové, které zhoršují vlastnosti konstrukčních materiálů.

Teoretické předpoklady trvanlivosti materiálů však často nejen neodpovídají reálným zkušenostem uživatelů pozemních komunikací, ale stav některých povrchů vozovky silniční sítě neodpovídá ani vynaloženým prostředkům na jejich výstavbu, či opravu.

Někdy se poruchy projevují krátce (v řádech jednotek let) po uvedení vozovky do provozu. Je nutné si uvědomit, že prodloužení životnosti řádově o rok může přinést značné národohospodářské úspory. Proto je nutné používat stavební materiály, které dosahují dostatečné trvanlivosti. V případě asfaltových pojiv se jedná zejména o kvalitní oxidační stabilitu (někdy označovanou jako termooxidační stabilitu), tzn. odolnost vůči oxidativnímu stárnutí. Aby mohla být predikována odolnost asfaltových pojiv vůči stárnutí, je nutné tuto materiálovou vlastnost umět zkoušet. Proto je snahou najít jednoduchý laboratorní zkušební postup, který by lépe vystihoval náchylnost asfaltových pojiv ke stárnutí a dále který by od sebe výstižně odlišil pojiva, která vykazují zvýšenou náchylnost ke stárnutí od pojiv s kvalitní termooxidační stabilitou. Právě dostatečné rozlišení jednotlivých asfaltových pojiv pro danou veličinu je problémem některých postupů laboratorní simulace stárnutí, neboť výsledky pro dvě odlišně se chovající asfaltová pojiva jsou velmi podobné. Tento jev je označován jako nivelizační efekt. Metody uvedené ve stávajících platných předpisech jsou popsány v kapitole 2.4.

2.2. Stárnutí asfaltových pojiv

Asfalt je materiál organického původu, který se skládá z rozmanitých uhlovodíkových sloučenin, jež za určitých podmínek mohou podléhat degradačním procesům vlivem působení tepla, vzdušného kyslíku a ultrafialového elektromagnetického záření, či jejich kombinací.

Termooxidační degradace asfaltového pojiva je – stručně řečeno – soubor chemických pochodů, které jsou vyvolány vlivem tepla a vzdušného kyslíku. Většinou vedou k zabudování atomů kyslíku do chemických struktur asfaltového materiálu – organických uhlovodíkových molekul a jejich přeměně na sloučeniny, ovlivňující následně fyzikální vlastnosti asfaltových pojiv, jako je pružnost, moduly tuhosti, nízkoteplotní křehkost atd. Souhrnně lze označit tyto negativní degradační změny jako termooxidační stárnutí (degradace) pojiva. Oxidace může probíhat i za nižších teplot s mírně odlišnou kinetikou a rychlostí. Pokud procesy probíhají za zvýšené teploty, než jsou standardní klimatické podmínky, označujeme tuto oxidaci jako termooxidaci, protože je významně iniciována termickými vlivy. Typickým jevem spojeným s oxidací organických molekul za zvýšených teplot je tvorba nízkomolekulárních produktů, které z materiálu následně vytěkávají (destilační pochody).

Kinetika a průběh těchto termooxidačních reakcí má většinou povahu radikálových řetězových reakcí a je řízena především teplotou a přístupem kyslíku k pojivu (kontaktní plocha vystavená atmosférickému kyslíku). Právě přítomnost kyslíku v oxidačních reakcích umožňuje jejich lavinovitý exponenciální průběh.

Důsledkem vlivu zabudování kyslíkových atomů do molekuly je i labilizace okolních uhlíkových atomů. Na jedné straně se snáze molekuly v těchto místech štěpí (popřípadě

tvoří radikály) a uvolňují nízkomolekulární látky (úbytek hmotnosti v testu RTFOT u většiny asfaltů používaných ve střední Evropě), přičemž zplodiny oxidace prohlubují degradaci. Na druhé straně jsou uhlíkové atomy v okolí elektronegativních atomů (takovým prvkem je právě kyslík) náchylnější k nukleofilnímu a radikálovému ataku. Tento mechanismus rovněž vede ke zvětšování molekulové hmotnosti.

Rozsah termooxidačního stárnutí je závislý na složení a chemické povaze asfaltu. Je známo, že různé asfalty vykazují různou náchylnost k oxidaci, která se odráží nejen v rozsahu, ale i v teplotně časové závislosti degradačních chemických změn. To bylo prokázáno porovnáním asfaltů z různých ropných zdrojů například pomocí indexu stárnutí asfaltů, který je nejčastěji vyjadřován poměrem viskozity před stárnutím a po stárnutí.

Termooxidační stárnutí pojiva není spojeno pouze s technologickými procesy, ve kterých je asfaltová směs po určitou dobu udržována při významně zvýšené teplotě, ale pokračuje po celou dobu životnosti asfaltových vrstev vozovky. Zde již vstupují do hry i další faktory jako jsou difúzní odpor asfaltového filmu (stoupá s jeho tloušťkou), permeabilita asfaltové vrstvy pro molekuly vzdušného kyslíku (úměrné mezerovitosti položené asfaltové vrstvy a její tloušťce), vliv ultrafialového slunečního záření atd.

Dalšími (méně důležitými) formami stárnutí jsou destilační procesy (odpařování), migrační procesy (strukturální stárnutí) a fyzikální stárnutí. Destilační procesy probíhají nejvíce při zpracování silničních asfaltů za horka a často se objevují u některých typů asfaltů, u kterých za vyšších teplot dochází ve zvýšené míře k štěpení uhlovodíkových molekul za vzniku nízkomolekulárních sloučenin nebo obsahují lehké olejovité podíly. Pokud je zvýšená teplota aplikována déle, dochází k jejich vydestilování. Stárnutí odpařováním závisí na teplotě a okolních podmínkách. Odpar lehkých frakcí se zvyšuje s rostoucí teplotou, rostoucím povrchem a penetrací asfaltu.

Obdobou destilace jsou migrační procesy, probíhající ovšem za normálních teplot s podstatně menší rychlostí. Tyto jevy jsou typické pro situace, kdy jsou do asfaltového pojiva přimíchány malé podíly fluxačních olejů, nebo nejsou při výrobě používány dostatečně výkonné destilační kolony, což vede k následnému vytvrzování (křehnutí) asfaltů. Při migračním (strukturálním) stárnutí dochází k nárůstu velikosti koloidních částic, přičemž v asfaltové směsi vnikají oleje do kameniva. Při tomto procesu asfaltové pojivo ztrácí plasticitu, elasticitu a křehne. Nárůstem velikosti částic postupně vznikne hrubá disperze a vícefázový systém.

Fyzikální tvrdnutí vzniká, pokud je asfaltové pojivo vystaveno nízkým teplotám po delší časové období. Většinou jde o reverzibilní proces, který není spojen s chemickými změnami v materiálu. Jedná se spíše o zafixování konformace molekul a agregování sloučenin na bázi vodíkových vazeb (můstků). Přesto tyto fyzikální procesy ve svém

důsledku vedou k zdánlivému zvýšení tvrdosti materiálu. V laboratoři se projevuje tím, že výsledná naměřená hodnota (například komplexní smykový modul) je závislá na tepelné historii vzorku.

Nejzásadnější vliv na změnu vlastností asfaltového pojiva má stárnutí termooxidační, proto se tato metodika dále zabývá pouze tímto druhem stárnutí.

2.3. Náchylnost ke stárnutí v současnosti vyráběných asfaltových pojiv

Každá rafinerie se nachází pod tlakem ekonomických ukazatelů, a proto mnohé zavedly technologie, které umožňují ještě hlubší přepracování destilačních zbytků po frakcionaci ropy. Posouvají tak bilanční produktové schéma více na stranu lehkých a středních frakcí, jako je například motorová nafta a střední topný olej (za vzniku i menšího množství LPG a benzínu). Impulzem pro zavedení těchto technologií je tedy ekonomický pohled rafinerií na výtěžnost frakcionace. Základem těchto postupů je především „visbreaker“ technologie (visbreaking), jejíž podstatou je termické (nekatalytické) štěpení velkých molekul těžkých destilačních zbytků během rychlého ohřevu v trubkových pecích s následným přeorganizováním uhlíkových štěpů. Průvodním jevem je pokles viskozity termicky konvertované výstupní suroviny, což se odráží v názvu technologie.

Právě výstupní materiál visbreakingových reziduí se často přimíchává k bitumenovým produktům, protože svojí chemickou podstatou odpovídají velmi tvrdým asfaltům. Pro stabilizaci visbreakingových reziduí v bitumenové matrici a pro zlepšení jeho odolnosti vůči stárnutí je nutné, aby směsný materiál prošel procesem polofoukání.

Příměs visbreakingových reziduí k asfaltové matrici může vést ke snížení koloidní stability, zvýšení termické lability a snížení odolnosti proti stárnutí, změně teplotní citlivosti pojiva, změně povrchového napětí a vnitřní koheze, snížení viskozity směsného pojiva, zvýšení adheze a odolnosti proti působení vody v asfaltových směsích a ke změně teploty skelného přechodu. Všechny tyto změny chování základního pojiva závisejí na množství podílu přidaného visbreakingového rezidua.

2.4. Metody laboratorního stárnutí asfaltových pojiv popsané v platných předpisech

Aby bylo možné predikovat termooxidační chování asfaltů na základě kvantifikačních zkoušek, jsou do laboratorní praxe zavedeny metody akcelerovaných testů, které v laboratoři simulují stárnutí asfaltových pojiv. Mezi laboratorní metodou a skutečným degradačním procesem by měla být co nejtěsnější korelace, jež na základě urychleného, časově omezeného testu, umožňuje popsat výsledek skutečného stavu ve zvolených bodech životnosti materiálů.

Laboratorní modelování stárnutí asfaltových pojiv je možné rozdělit na zrychlenou simulaci krátkodobého stárnutí a dlouhodobého stárnutí. Krátkodobé stárnutí modeluje stárnutí pojiva při obalování kameniva na obalovně asfaltových směsí a dlouhodobé stárnutí modeluje degradaci asfaltového pojiva zabudovaného ve ztuhlé asfaltové vrstvě. Mezi nejrozšířenější postupy učené pro krátkodobé stárnutí asfaltových pojiv je možné zařadit zkoušku tepelné stálosti v tenké pohybující se vrstvě (Rolling Thin Film Oven Test – RTFOT), zkoušku tepelné stálosti tenkého filmu (Thin Film Oven Test – TFOT) a zkoušku krátkodobého stárnutí metodou RFT (Rotating Flask Test).

Pro modelování dlouhodobého stárnutí se využívá zkouška urychleného dlouhodobého stárnutí v tlakové nádobě (Pressure Ageing Vessel – PAV) nebo urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (Rotating Cylinder Ageing Test – RCAT). Jednotlivé metody budou dále stručně představeny a zkušební podmínky jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Přehled metod akcelerovaného stárnutí normovaných v Evropě

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

a) Tepelná stálost v tenké pohybující se vrstvě (RTFOT)

Zkouška tepelné stálosti v tenké pohybující se vrstvě je popsána v normě ČSN EN 12607-1. Stárnutí asfaltového pojiva je ovlivněno vzdušným kyslíkem pouze do malých tloušťek (přibližně 50 mikrometrů), proto se při zkoušce uplatňuje tenká pohybující se vrstva pojiva. Zkouška simuluje termooxidační stárnutí, kterému je pojivo vystaveno při obalování kameniva na obalovně asfaltových směsí. Při zkoušce se pro stárnutí pojiva používá sušárna s dvojitou stěnou a elektrickým ohřevem s teplotou 163 °C. Pro umístění pojiva slouží osm válcových skleněných nádobek, do kterých se fouká ohřátý vzduch z trysky. Kombinovaný účinek tepla a vzduchu se stanoví změnou hmotnosti pojiva v nádobkách nebo změnou vlastností asfaltového pojiva, které jsou

určovány před a po stárnutí. Pro popis změny vlastností se používají zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí nebo dynamické viskozity. Změny vlastností pojiva po stárnutí je rovněž možné vyjádřit reologickými vlastnostmi zjištěnými v dynamickém smykovém reometru.

b) Tepelná stálost tenkého filmu (TFOT)

Zkouška tepelné stálosti tenkého filmu se provádí podle normy ČSN EN 12607-2. Asfaltové pojivo se nalije na ploché misky tak, aby vytvořilo vrstvu o tloušťce 3,2 mm a vloží se do sušárny s nuceným prouděním vzduchu na poličky, které se otáčejí rychlostí 5,5 ot./min. Běžně se zkouška provádí po dobu pěti hodin při teplotě 120 °C popř. 163 °C. Zestárnutí pojiva se určí změnou hmotnosti pojiva nebo změnou jeho vlastností vzniklou v průběhu stárnutí (např. zkouškou kinematické viskozity podle ČSN EN 12595).

c) Krátkodobé stárnutí metodou rotující baňky (RFT)

Metoda stárnutí pojiva v rotující baňce popsána v normě ČSN EN 12607-3 simuluje krátkodobé stárnutí asfaltového pojiva při obalování kameniva na obalovně. Při zkoušce se asfaltové pojivo podrobí stárnutí v baňce rotačního vakuového destilačního zařízení při teplotě nejčastěji 165 °C po dobu 150 minut. Vliv tepla a vzduchu se určí změnou hmotnosti nebo změnou charakteristik pojiva (např. penetrace, bod měknutí nebo dynamická viskozita před a po stárnutí).

d) Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT)

Metoda popsána v normě ČSN EN 15323 simuluje dlouhodobé stárnutí asfaltového pojiva. Do horizontálně umístěného ocelového rotujícího válce s pojivem v laboratorní sušárně s teplotou 85 °C se vhání kyslík po dobu 140 hodin. Stárnutí pojiva se hodnotí změnou vlastností (např. penetrace nebo bod měknutí) před a po procesu simulovaného stárnutí. Po úpravě zkušebních podmínek lze metodu použít rovněž pro simulování krátkodobého stárnutí pojiva.

e) Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV)

Zkouška urychleného dlouhodobého stárnutí podle ČSN EN 14769 simuluje stárnutí, kterému je pojivo podrobeno během své životnosti. Pojivo (zestárnuté metodou RTFOT) v nepohybující se vrstvě tloušťky přibližně 3,2 mm se umístí v miskách do tlakové nádoby předehřáté na zkušební teplotu (běžně 85 °C, 90 °C, 100 °C nebo 110 °C) s pracovním tlakem vzduchu 2,1 MPa. Běžně používaná doba stárnutí je 20 hodin nebo 65 hodin. Vliv urychleného dlouhodobého stárnutí se určí změnou vlastností asfaltového pojiva, které jsou stanoveny před a po stárnutí.

2.5. Podstata metodiky – metoda laboratorního stárnutí asfaltového pojiva metodou RTFOT s trojnásobnou dobou trvání (3xRTFOT)

Stárnutí asfaltového pojiva metodou RTFOT s trojnásobnou dobou trvání (3xRTFOT) vychází z postupu popsaného v normě ČSN EN 12607-1 (Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT) a z rakouské oborové specifikace RVS 08.97.05. Navržená metodika pro laboratorní simulaci termooxidační stability asfaltových pojiv využívá modifikovaný postup stárnutí asfaltového pojiva RTFOT, ve kterém je prodloužena celková doba simulovaného stárnutí na trojnásobek. Proto se tato metoda označuje jako metoda 3xRTFOT. Pro vlastní vyhodnocení a posouzení rozsahu termooxidačního stárnutí pojiv jsou navrženy jako signální veličiny následující parametry stanovované v laboratoři:

- bod měknutí podle ČSN EN 1427
- komplexní smykový modul a fázový úhel zjištěný při referenční teplotě a frekvenci v dynamickém smykovém reometru podle ČSN EN 14770.

Postup 3xRTFOT poměrně dobře identifikuje náchylnost ke zrychlenému stárnutí (například způsobenému vyšším podílem visbreakingových zbytků v asfaltovém pojivu). Je třeba zdůraznit, že oxidace probíhá za poměrně vysoké teploty, jakým jsou asfaltové směsi vystaveny především při výrobě. Rozsah a průběh oxidace je indukován především termicky vlivem vysoké teploty a má mírně jinou kinetiku než procesy dlouhodobého stárnutí. Přesto dokáže odhalit reaktivní sloučeniny nebo struktury asfaltového pojiva, které tento materiál labilizují a jsou potenciálně náchylné k termooxidačním změnám. Metoda leží svým expozičním degradačním zatížením mezi postupy RTFOT a PAV. Postup prokazuje vyšší citlivost hodnocení změny vlastností pojiv v dynamickém smykovém reometru oproti klasické zkoušce bodu měknutí kroužkem a kuličkou.

Při stárnutí asfaltového pojiva metodou RTFOT s trojnásobnou dobou trvání (3xRTFOT) se tedy využije laboratorní zařízení specifikované normou ČSN EN 12607-1 (sušárna s dvojitou stěnou a elektrickým ohřevem). Doba stárnutí pohybující se vrstvy pojiva se ovšem prodlouží na trojnásobek, tzn. 225 minut při teplotě 163 °C. Delší expoziční doba vzorku se projevuje masivnějším rozsahem jeho termické oxidace, čímž se charakter pojiva více blíží vlastnostem pojiva na konci své doby životnosti ve vrstvě vozovky.

Popis laboratorního postupu metody 3xRTFOT

Před vlastním procesem stárnutí metodou 3xRTFOT se připraví vzorek asfaltu podle normy ČSN EN 12594. Vzorek asfaltového pojiva se po zahřátí v nádobě s víkem na teplotu o 10 °C nižší, než je zkušební teplota, zhomogenizuje mícháním. V případě speciálních asfaltových pojiv nebo polymerem modifikovaných pojiv může být nezbytné připravit vzorek při vyšší teplotě. Poté se stanoví počáteční vlastnosti asfaltového pojiva

před stárnutím – penetrace podle ČSN EN 1426, bod měknutí podle ČSN EN 1427 a komplexní smykový modul a fázový úhel podle ČSN EN 14770 (viz kapitola 2.6).

Sušárna se přehřejší na zkušební teplotu 163 °C po dobu 60 minut. Do skleněných nádobek se nalije 35,0 g ± 0,5 g vzorku asfaltového pojiva. Počet skleněných nádobek musí být dostatečný k provedení všech plánovaných zkoušek.

Nádobky s asfaltovým pojivem se vloží do držáku sušárny vyhřáté na zkušební teplotu, dvířka se uzavřou a spustí se otáčení držáku s frekvencí otáčení 15,0 min⁻¹ ± 0,2 min⁻¹. Nastaví se průtok vzduchu 4,0 l/min ± 0,2 l/min. Zkouška trvá 225 min ± 1 min od doby, kdy teplota v sušárně dosáhla hodnoty o 1 °C nižší, než je zkušební teplota 163 °C. Jestliže se do 15 min nedosáhne zkušební teploty 163 °C ± 1 °C, zkouška se přeruší. Na konci zkušební doby se nádobky vyjmou ze sušárny.

Veškeré zestárnuté pojivo se ihned přelije do jedné sběrné nádoby bez ochlazení a opětovného zahřívání nádobek. Směs pojiva se homogenizuje mícháním tak, aby se nevmíchaly vzduchové bubliny. Pro odstranění pojiva z nádobek je možné použít uzpůsobené špachtle nebo jiné vhodné nástroje.

2.6. Hodnocení náchylnosti silničních asfaltů k termooxidačnímu stárnutí pomocí metody 3xRTFOT – měřené veličiny

Vlastnosti pojiva po zkoušce stárnutí se stanovují do 72 hodin v souladu s příslušnými zkušebními metodami, aniž by se vzorek znovu ohříval více než jednou. Na zestárnutém asfaltovém pojivu metodou 3xRTFOT se určí penetrace podle ČSN EN 1426, bod měknutí podle ČSN EN 1427 a případně komplexní smykový modul a fázový úhel podle ČSN EN 14770 při teplotě 60 °C a frekvenci 1 Hz. Pro určení komplexního smykového modulu a fázového úhlu se použije tloušťka vzorku (velikost mezery mezi destičkami dynamického smykového reometru) 1 mm a průměr destiček 25 mm. Pokud by byla při určení komplexních smykových modulů a fázových úhlů pojiva po 3xRTFOT nedostatečná tuhost měřicí soustavy přístroje, použije se tloušťka vzorku 2 mm a průměr destiček 8 mm.

Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu musí být provedeno v rámci lineárně viskoelastické oblasti asfaltového pojiva. Zkouška komplexního smykového modulu a fázového úhlu je prozatím jen doporučena, protože většina silničních laboratoří v ČR není doposud vybavena zařízením dynamický smykový reometrem.

Vliv stárnutí 3xRTFOT na změnu vlastností asfaltových pojiv se pak hodnotí změnou hodnot uvedených laboratorních zkoušek před stárnutím a po stárnutí metodou 3xRTFOT.

2.7. Hodnocení náchylnosti silničních asfaltů k termooxidačnímu stárnutí pomocí metody 3xRTFOT – požadavky na změnu měřených veličin pro silniční asfalt 50/70 a 70/100

V tabulce 2 jsou uvedeny požadavky na maximální přípustnou změnu vlastností silničních asfaltů gradace 50/70 a 70/100 po stárnutí metodou 3xRTFOT.

Tabulka 2: Požadované vlastnosti silničních asfaltů gradace 50/70 a 70/100 po stárnutí metodou 3xRTFOT

Vlastnost	Metoda zkoušení	Jednotka	Hodnota
Zvýšení bodu měknutí po 3xRTFOT	ČSN EN 1427	°C	≤ 15
Zvýšení komplexního smykového modulu po 3xRTFOT	ČSN EN 14770, 60 °C, 1 Hz	-	≤ 15tinásobek

3. Srovnání „novosti postupů“

Norma ČSN EN 12591 (Asfalty a asfaltová pojiva – Specifikace pro silniční asfalty) a norma ČSN EN 14023 (Asfalty a asfaltová pojiva – Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty) obsahují požadavky na hodnotu změny hmotnosti, hodnotu zbylé penetrace a hodnotu zvýšení bodu měknutí po simulaci stárnutí metodou RTFOT (popř. RFT). Jedná se pouze o požadavky na změnu vlastností pojiv po krátkodobém stárnutí a tyto požadavky jsou nastaveny tak, aby je splnila naprostá většina vyráběných asfaltových pojiv. Dlouhodobé stárnutí je možné v ČR hodnotit zkouškou PAV podle ČSN EN 14769 nebo zkouškou RCAT podle ČSN EN 15323. Tyto postupy ovšem vyžadují nákladné laboratorní vybavení, a proto tyto zkoušky nejsou v České republice rozšířeny. V zahraniční literatuře jsou hodnoty stanoveny většinou pro systém hodnocení pojiva metodikou SHRP – tzv. PG Grade. Filozofie tohoto systému je nastavená odlišně a není při ní určena limitní hodnota, která by jednoznačně stanovila hranici, za kterou se považuje změna vlastností za diskriminující faktor pro další použití asfaltového pojiva ve výrobě asfaltových směsí.

Postup vytvořený v rámci této metodiky má za úkol kvalitněji rozpoznat pojiva náchylná k termooxidačnímu stárnutí od pojiv, která vykazují uspokojivou odolnost vůči tomuto degradačnímu procesu. Výše uvedený přístup k řešení problematiky stárnutí a především výstupy z něho nebyly zatím v České republice dosud zavedeny a používány. Uvedený postup má výhodu, že uspořádání této laboratorní metody v sobě zahrnuje i určitý vliv dlouhodobého stárnutí, což od sebe dokáže lépe rozlišit jednotlivá asfaltová pojiva (postup odstraňuje nivelizační efekt, neboť výsledky měřených hodnot se od sebe často značně odlišují). Na základě hlubší termické oxidace pak lze u jednotlivých pojiv jednoznačně identifikovat defektní chování silničních asfaltů, které se na vozovce projeví předčasným stárnutím a poruchami asfaltového krytu.

Tato metodika byla inspirována rakouským postupem stárnutí asfaltového pojiva, nazvaným „trojnásobné RTFOT“ a označovaným jako „3-fach RTFOT“. Postup stárnutí 3xRTFOT není zatím běžně rozšířen, požadavek na jeho provedení byl zakotven pouze v rakouské oborové specifikaci RVS 08.97.05. Zde je uvedeno, že zvýšení bodu měknutí asfaltového pojiva podrobeného stárnutí metodou 3xRTFOT může být maximálně 15 °C. Provedené hodnocení asfaltů pomocí stanovení bodu měknutí a jeho nárůstu po provedené zkoušce 3xRTFOT popřípadě pomocí stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu, potvrzuje tuto hodnotu jako limitní hranici, která umožňuje stanovit přílišnou náchylnost asfaltového pojiva k termooxidaci. V současné době se v Rakousku vede diskuze o variantě limitní hodnoty bodu měknutí po 3xRTFOT, která je stanovena tak, že nárůst bodu měknutí musí ležet maximálně do 8 °C nad hranicí horního přípustného bodu měknutí. Pro gradaci silničního asfaltu 50/70 to tedy znamená do 62 °C (54 °C + 8 °C = 62 °C). Rovněž se v Rakousku uvažuje o zřízení požadavku na zbylou penetraci po 3xRTFOT (25 (0,1 mm)).

4. Popis uplatnění certifikované metodiky

V současné době dochází k poruchám asfaltových vrstev trhlinami, což je úzce spojeno s vlastnostmi asfaltového pojiva a jeho změnami v průběhu užívání vrstvy. Je možné předpokládat, že některá pojiva mají sklon k rychlému termooxidačnímu stárnutí, které je v případě asfaltového pojiva jednoznačně degradační proces, snižující trvanlivost stavebního díla a snižující užité hodnoty asfaltové vozovky především tím, že zvyšuje náchylnost asfaltové vrstvy k tvorbě trhlin a její postupné desintegraci. Tuto negativní tendenci je možno u asfaltového pojiva předpovídat na základě výsledků laboratorní zkoušky 3xRTFOT, která je poměrně jednoduchou modifikací stávající používané metody s velkými důsledky na klasifikaci jednotlivých pojiv, které často při jednoduché metodě RTFOT vykazují velmi podobné chování (nivelizační efekt). Výsledky provedené na velké skupině silničních asfaltů dokládá, že takové asfalty s potenciálním problematickým chováním se pomocí této metody dají jednoznačně identifikovat.

Certifikovaná metodika pro hodnocení použitelnosti asfaltového pojiva z hlediska termooxidačního stárnutí je určena pro orgány státní správy (zejména Ministerstvo dopravy ČR a Ředitelství silnic a dálnic ČR), které touto certifikovanou metodikou získají jednoduchý nástroj pro hodnocení náchylnosti asfaltových pojiv ke stárnutí. Metodika bude uplatněna při kontrole vlastností silničních asfaltů a zejména při kontrole stálosti těchto vlastností po simulaci stárnutí metodou 3xRTFOT v laboratoři. Metodiku budou využívat silniční laboratoře nebo laboratoře výrobců asfaltů.

5. Ekonomické aspekty

Hlavní ekonomický přínos této metodiky je možné spatřovat v jednoznačné identifikaci termooxidačního stárnutí silničních asfaltů (například způsobené vyšším podílem

visbreakingových zbytků, jež představují v současné době jeden z hlavních problémů ovlivňujících kvalitu asfaltových pojiv). Silniční laboratoře budou schopny snadno odlišit silniční asfalty s dobrou termooxidační stabilitou od asfaltů, které vykazují známky rychlého termooxidačního stárnutí a tato pojiva vyloučit z používání v hutněných asfaltových vrstvách. Vyloučení nekvalitních pojiv se projeví pozitivně na kvalitě asfaltových povrchů. Je možno předpokládat, že dojde k výraznému prodloužení životnosti asfaltových vrstev a celospolečenským úsporám plynoucím ze snížení nákladů pro cyklus údržby a oprav asfaltové vozovky.

Ekonomickou výhodu tohoto postupu pro silniční laboratoře lze spatřovat v tom, že pro zkoušku dlouhodobého stárnutí 3xRTFOT není nutné pořizovat další nákladné zařízení (PAV nebo RCAT). Využije se totiž stávající zařízení sloužící pro zkoušku krátkodobého stárnutí RTFOT podle normy ČSN EN 12607-1.

6. Seznam použité související literatury

ČSN EN 12607-1 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 1: Metoda RTFOT

ČSN EN 12607-2 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 2: Metoda TFOT

ČSN EN 12595 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení kinematické viskozity

ČSN EN 12607-3 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 3: Metoda RFT

ČSN EN 14769 Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV)

ČSN EN 15323 Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT)

ČSN EN 12594 Asfalty a asfaltová pojiva - Příprava analytických vzorků

ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou

ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička

ČSN EN 14770 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)

ČSN EN 12591 Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty

ČSN EN 14023 Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty

Spiegel M.: Entwicklungen von gebrauchsvorhaltensorientierten Bitumenspezifikationen. Bauseminar Gestrata 2009.

http://www.gestrata.at/archiv/seminar_2009/bauseminar_teil1.pdf.

Technische Vertragsbedingungen-Baustoffe RVS 08.97.05: GmbH., Anforderungen an Asphaltmischgut (Januar 2007/Februar 2010).

7. Seznam publikací, které předcházely metodice

Stoklásek S. a kol.: Stárnutí asfaltových pojiv jako důležitý aspekt životnosti asfaltových vozovek. Posouzení vlivu stárnutí na kvalitu asfaltových pojiv pomocí přístroje DSR. Příloha B 4.2 výzkumné zprávy projektu TA03030381. 2014.

Coufalík P.: Vlastnosti silničních asfaltů s určením vlivu stárnutí metodou RTFOT. Sborník konference Juniorstav 2014. 2014.

Dašek O., Coufalík P., Hýzl P., Varaus M., Špaček P., Hegr Z., Stoklásek S.: Nové zkušební metody umožňující predikovat prodloužení životnosti asfaltových vozovek. Silniční obzor, roč. 75, číslo 2. 2014.

Dašek O.: Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek. Prezentace na Týmu 6 pro asfaltové technologie za horka. 2015.

8. Dedikace na projekt

Metodika byla zpracována v rámci řešení projektu Technologické agentury ČR s označením TA03030381 a názvem „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“.

9. Vypracování metodiky

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Petr Hýzl, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Pavel Coufalík, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

doc. Dr. Ing. Michal Varaus, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Dušan Stehlík, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Petr Špaček, Skanska a.s.

Ing. Zdeněk Hegr, Skanska a.s.

RNDr. Svatopluk Stoklásek, nezávislý konzultant

Ing. David Matoušek, Pragoprojekt a.s.

Ing. Petr Svoboda, Pragoprojekt a.s.

10. Jména oponentů a názvy jejich organizací

Ing. Lubomír Kvarda, Ředitelství silnic a dálnic ČR
Ing. Milan Slavíček, SILMOS-Q s.r.o.



Praha 21. prosince 2015
Č. j.: 99/2015-710-VV/1

v y d á v á

OSVĚDČENÍ

o uznání uplatněné certifikované metodiky
v souladu s podmínkami „Metodiky hodnocení výsledků výzkumu a vývoje“

*„Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k
termooxidačnímu stárnutí“*

ŘEŠITEL

VUT v Brně, Fakulta stavební
Skanska a.s.
Pragoprojekt a.s.

Autor:

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Ing. Pavel Coufalík
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Ing. Petr Špaček
Ing. Zdeněk Hegr
RNDr. Svatopluk Stoklásek
Ing. David Matoušek
Ing. Petr Svoboda

Dedikace:

Vypracované v rámci výzkumného projektu č. TA03030381 názvem „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“ financovaného za podpory TA ČR.

Zpracovatelé 2 nezávislých oponentních posudků:

- Ing. Lubomír Kvarda, ŘSD ČR
- Ing. Milan Slavíček, SILMOS-Q s.r.o.

Ing. Martin Pichl

JUDr. Václav Kobera
Ředitel

Odbor ITS, kosmických aktivit a VaVal



C. Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí

Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí

Metodika vznikla v rámci řešení projektu TAČR TA03030381
Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující
prodloužení životnosti asfaltových vozovek

Autoři: Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Ing. Pavel Coufalík
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Ing. Petr Špaček
Ing. Zdeněk Hegr
RNDr. Svatopluk Stoklásek
Ing. David Matoušek
Ing. Petr Svoboda

V Brně, srpen 2015

OBSAH

1. Cíl metodiky
2. Vlastní popis metodiky
 - 2.1. Zdůvodnění potřeby metodiky
 - 2.2. Používané metody simulace stárnutí asfaltových směsí v laboratoři
 - 2.3. Popis navržené metody simulovaného stárnutí pro posouzení asfaltových směsí
 - 2.4. Hodnocení změny vlastností asfaltové směsi způsobené stárnutím metodou BSA
3. Srovnání „novosti postupů“
4. Popis uplatnění certifikované metodiky
5. Ekonomické aspekty
6. Seznam použité související literatury
7. Seznam publikací, které předcházely metodice
8. Dedikace na projekt
9. Vypracovali
10. Jména oponentů a názvy jejich organizací

1. Cíl metodiky

V České republice prozatím neexistuje metodika pro simulaci termooxidačního stárnutí asfaltových směsí v laboratoři. Výhodou simulovaného laboratorního stárnutí asfaltové směsi (tzn. stárnutí asfaltového pojiva zabudovaného do asfaltové směsi) je možnost posoudit vliv druhu, kvality a obsahu pojiva v asfaltové směsi, tloušťky filmu pojiva na povrchu kameniva a eventuálně i použitých přísad na změnu vlastností asfaltového pojiva v asfaltové směsi. Takto jsou zohledněny pro dané asfaltové pojivo konkrétní podmínky použití, které se mohou od doposud používaných standardních testů akcelerovaného simulovaného stárnutí pouhého pojiva odlišovat.

Pro laboratorní modelování stárnutí asfaltové směsi je v rámci této metodiky využit postup pocházející z Technické university v Braunschweigu (Braunschweigska metoda stárnutí, označovaná jako BSA). Při této metodě se rozprostře vrstva asfaltové směsi na ploché síto a vloží se na dobu 96 hodin do laboratorní sušárny s nuceným prouděním vzduchu s teplotou 80 °C. Míra zestárnutí asfaltové směsi se pak hodnotí změnou vlastností asfaltové směsi popř. změnou vlastností pojiva znovuzískaného z asfaltové směsi.

Cílem metodiky je navrhnout zkušební postup, který by umožňoval laboratorně simulovat změnu vlastností asfaltového pojiva zapříčiněnou termooxidačním stárnutím, přičemž toto pojivo je již zabudováno v asfaltové směsi.

2. Vlastní popis metodiky

2.1. Zdůvodnění potřeby metodiky

Vysoká mezerovitost, nekvalitní asfaltové pojivo nebo jeho nedostatečné množství v konkrétní asfaltové směsi (potažmo nedostatečná tloušťka asfaltového filmu), mohou vést k nadměrnému stárnutí a ztrátě elasticity pojiva (křehnutí). Ve svém důsledku mohou tyto parametry způsobovat předčasné poruchy asfaltové vrstvy vozovky. Čím je vyšší mezerovitost asfaltové směsi, tím snáze může do vrstvy pronikat vzdušný kyslík, což je jednou z příčin vyšší termooxidační zátěže (stárnutí) asfaltového pojiva. Rovněž v případě, že asfaltový film je na povrchu kameniva příliš tenký, může dojít k nadměrnému stárnutí této tenké vrstvy pojiva. Vzdůstá-li tloušťka asfaltového filmu, vzdůstá i exponenciálně difúzní odpor této vrstvy a pojivo nacházející se níže pod povrchem je méně ovlivněno stárnutím (degradací) a zachovává si původní vlastnosti. Stejný efekt vykazuje i snížení mezerovitosti asfaltové směsi. Na stárnutí asfaltového pojiva může mít vliv i druh a kvalita použitého kameniva. Termooxidační stárnutí je převládající typ procesu, který probíhá během životnosti asfaltového pojiva ve vozovce, zvláště pokud je pojivo vystaveno vyšším teplotám. Nutno si ale uvědomit, že mohou

existovat i jiné mechanismy, které vedou ke změně vlastností pojiva v čase (například migrace nízkomolekulárních látek obsažených ve výchozím asfaltovém pojivu atd.).

Nežádoucí změny vlastností pojiva nebo asfaltové směsi, které snižují užité vlastnosti materiálu, se souhrnně označují jako jeho degradace. Aby bylo možné hodnotit vliv těchto parametrů na rychlost a rozsah degradace asfaltového pojiva v reálné asfaltové směsi, je nutné v laboratoři modelovat stárnutí asfaltového pojiva zabudovaného přímo v asfaltové směsi (ne pouze na asfaltovém pojivu). V dalším textu bude označováno termooxidační stárnutí asfaltového pojiva obsaženého v asfaltové směsi jako „stárnutí asfaltové směsi“.

Soustava českých technických předpisů doposud nezahrnuje žádný postup, který by popisoval modelování stárnutí asfaltové směsi v laboratorních podmínkách. Je tedy snahou najít jednoduchou a finančně nenáročnou laboratorní zkušební metodu, která by umožňovala hodnotit stárnutí asfaltového pojiva v asfaltové směsi a pomocí které by bylo možné porovnat náchylnost ke stárnutí pro jednotlivá asfaltová pojiva obsažená v konkrétních asfaltových směsích.

Pro posouzení odolnosti asfaltových směsí vůči stárnutí je třeba brát v úvahu dvě skutečnosti, které ovlivňují celý proces posouzení vlivu stárnutí na kvalitu hutněných asfaltových vrstev:

A) Jednak je to samotné provedení a expozice asfaltové směsi vůči externím vlivům navozující termooxidační (popřípadě i jiné druhy nebo mechanismy) stárnutí. V tomto případě se jedná především o zvolenou teplotu a formu uchování asfaltové směsi v průběhu laboratorního modelování stárnutí (volně ložená směs versus hutněná asfaltová směs).

B) Jednak samotné vyhodnocení změn posuzované změnou reologických veličin buď samotného pojiva (znovuzískaného pojiva) nebo reologických vlastností samotné hutněné asfaltové směsi. V prvním případě se vyhodnocuje především vliv tloušťky asfaltového filmu, popřípadě možný katalytický vliv použitého kameniva. V druhém případě se jedná o komplexní posouzení vlastností asfaltové směsi (doporučeno především pro oblasti nízkých teplot).

Oba přístupy je možno kombinovat pro získání plastičtějšího obrazu probíhajících změn a jejich vzájemných souvislostí.

Metodika může rovněž sloužit jako nástroj pro porovnání různých asfaltových směsí ve fázi návrhu a optimalizace asfaltové směsi, pro analyzování vlivu přidání modifikačních přísad nebo pro porovnání různých postupů výroby asfaltových směsí z hlediska jejich vlivu na termooxidační stárnutí. Dostupné metody jsou popsány v následující kapitole.

2.2. Používané metody simulace stárnutí asfaltových směsí v laboratoři

Existují různé postupy hodnotící stárnutí asfaltových materiálů, které zahrnují změnu vlastností asfaltových pojiv přímo v asfaltových směsích. V těchto zkouškách jsou zahrnuty vlivy tloušťky asfaltového filmu, typu směsi, mezerovitosti a kvality použitých materiálů. Následné laboratorní zkoušky jsou prováděny přímo na zestárlých směsích nebo na znovuzískaném zestárlém pojivu. Zároveň je ve Spolkové republice Německo běžná kontrola zestárnutí pojiva po procesu výroby a pokládky, která se prokazuje vlastnostmi znovuzískaného pojiva z asfaltové směsi v rámci předávacích procedur.

V následujícím textu jsou popsány nejčastěji používané postupy modelování stárnutí asfaltových směsí v laboratoři. Žádný z těchto postupů není doposud uveden v českých technických předpisech ani ve schválených harmonizovaných evropských normách.

a) Braunschweigska metoda stárnutí – Braunschweiger Alterung (BSA)

Při této metodě je nezhotněná asfaltová směs vystavena teplotě 80 °C po dobu 96 hodin. Nezhotněná asfaltová směs je umístěna v temperované zkušební komoře s nucenou cirkulací vzduchu. Následně jsou prováděny vybrané laboratorní zkoušky přímo na zkušebních vzorcích připravených z takto laboratorně zestárlé asfaltové směsi a výsledky jsou porovnávány s vlastnostmi nativní nezestárlé asfaltové směsi. Metoda simuluje termooxidační stárnutí asfaltové směsi (vrstvy) jako v reálné vozovce. Postup byl optimalizován (teplota) na podmínky, při kterých jsou omezeny štěpné reakce a destilační stárnutí, které vznikají při vyšších teplotách. Termooxidační zátěž leží mezi metodou RTFOT a PAV.

b) Metody programu SHRP

V rámci amerického výzkumného programu SHRP byly vyvinuty metodiky pro sledování stárnutí asfaltových pojiv přímo v asfaltových směsích, které jsou popsány ve zprávě SHRP-A-383. Postup SHRP#1025 simuluje krátkodobé stárnutí. Nezhotněná asfaltová směs je podrobena termooxidačnímu stárnutí v laboratorní sušárně s nuceným prouděním vzduchu po dobu 4 hodin při teplotě 135 °C.

Dlouhodobé stárnutí popisuje postup SHRP#1030. Pro směsi s nízkou mezerovitostí a plynulou čarou zrnitosti nebo pro směsi s vysoce viskózním pojivem se doporučuje jako dlouhodobé stárnutí použít uložení zhotněné asfaltové směsi (zkušební tělesa) do sušárny s teplotou 85 °C na pět dní a pro asfaltové směsi s vysokou mezerovitostí nebo asfaltové směsi s měkkým pojivem se doporučuje nízkotlaká oxidace zhotněných zkušebních těles v triaxiální komoře při teplotě 85 °C po dobu pěti dní. Následně je pojivo znovuzískáno a podrobeno funkčním zkouškám.

c) Metody technické komise RILEM

V rámci technické komise RILEM byl vyvinut postup stárnutí vrstvy asfaltové směsi, který má za úkol simulovat dvě fáze stárnutí (krátkodobé a dlouhodobé). Při krátkodobém stárnutí je nezhutněná vrstva asfaltové směsi umístěna na čtyři hodiny do laboratorní sušárny s nuceným prouděním vzduchu při teplotě 135 °C. Každou hodinu se asfaltová směs míchá po dobu jedné minuty. Při simulaci dlouhodobého stárnutí se nezhutněná vrstva krátkodobě zestárnuté asfaltové směsi umístí na devět dní do sušárny s nuceným prouděním vzduchu s teplotou 85 °C. Doporučuje se odebírat vzorky asfaltové směsi a směs zamíchat po 2, 5, 7 a 9 dnech stárnutí. Tento postup je prozatím ve fázi vývoje.

d) Návrh evropské normy prEN 12697-52

V současné době se tvoří první verze evropské normy s označením prEN 12697-52, která by měla popisovat metody simulace stárnutí asfaltové směsi v laboratoři. Norma je ovšem prozatím ve stadiu veřejného připomínkování (Enquiry).

Norma popisuje dvě sady postupů urychleného termooxidačního stárnutí asfaltových směsí. První dva postupy (modelování krátkodobého stárnutí a modelování dlouhodobého stárnutí) mohou být aplikovány na nezhutněnou asfaltovou směs a zbývající dva postupy se použijí pro zestárnutí zhutněných laboratorních těles. Zkušební tělesa mohou být vyrobena v laboratoři nebo odebrána z hotové vrstvy.

Při stárnutí nezhutněné směsi se asfaltová směs rozprostře na plochu desku v tloušťce cca 25 mm a udržuje se při zvýšené teplotě v laboratorní sušárně s nuceným proudem vzduchu po danou dobu (nejčastěji 4 hodiny při teplotě 135 °C v souladu s předpisem SHRP-A-383 pro krátkodobé stárnutí nebo 336 hodin při teplotě 60 °C podle předpisu BRRC nebo 216 hodin při teplotě 85 °C podle předpisu RILEM nebo 96 hodin při teplotě 80 °C – Braunschweigska metoda pro dlouhodobé stárnutí). Kromě toho může být aplikován zvýšený tlak pro urychlení stárnutí – nejčastěji v přístroji PAV (20 hodin při teplotě 90 °C a tlaku 2,1 MPa).

V případě stárnutí zhutněných těles jsou popsány dva postupy stárnutí. První metoda popisuje uložení zkušebních těles s mezerovitostí nad 8 % na ploché desce do laboratorní sušárny se zvýšenou teplotou s nuceným proudem vzduchu po danou dobu (nejčastěji 120 hodin při teplotě 85 °C). Druhý postup stárnutí předepisuje uložení zhutněných zkušebních těles do triaxiální komory, přičemž skrz těleso nuceně proudí okysličovadlo (ozonem obohacený stlačený vzduch) po danou dobu při dané teplotě (nejčastěji 72 hodin až 168 hodin).

Zestárnutá asfaltová směs nebo zestárnutá zkušební tělesa jsou pak použita pro další laboratorní zkoušky, které umožní popsat vliv termooxidačního stárnutí na vlastnosti asfaltových směsí. Alternativou může být znovuzískání pojiva ze zestárnutých směsí a zhodnocení stárnutí asfaltové směsi na změnu vlastností asfaltového pojiva.

2.3. Popis navržené metody simulovaného stárnutí pro posouzení asfaltových směsí

Z hlediska aplikační snadnosti a dostupných zkušeností se v současnosti jeví použití metody BSA jako nejoptimálnější řešení pro modelování stárnutí asfaltových směsí. Metoda BSA byla vyvinuta a optimalizována na Technické univerzitě Braunschweig (Německo). Nevyžaduje náročné instrumentální vybavení a je snadno použitelná v podmínkách České republiky. Postup je možné aplikovat na laboratorně připravenou asfaltovou směs nebo na asfaltovou směs vyrobenou na obalovně.

Při této metodě se na vrstvu nezhuťné asfaltové směsi působí zvýšenou teplotou po stanovenou dobu. Stupeň zestárnutí asfaltového pojiva obsaženého v asfaltové směsi se poté hodnotí změnou vlastností zestárnuté asfaltové směsi po jejím přeformování na zkušební tělesa (např. změna tuhosti) oproti vlastnostem směsi před procesem simulace stárnutí. Další možností hodnocení stárnutí asfaltové směsi je znovuzískání asfaltového pojiva z asfaltové směsi před a po procesu simulace stárnutí, přičemž na těchto pojivech se určí vybrané laboratorní vlastnosti (např. penetrace, bod měknutí, komplexní smykové moduly a fázové úhly, dynamická viskozita atd.). Z rozdílů výsledků těchto zkoušek se hodnotí míra zestárnutí pojiva v asfaltové směsi.

Popis postupu:

Před vlastní zkouškou se nejprve na obalovně asfaltových směsí odebere vzorek asfaltové směsi v souladu s ČSN EN 12697-27 nebo se připraví v laboratoři podle ČSN EN 12697-35. V případě odebraného vzorku asfaltové směsi se vzorek zahřeje v laboratorní sušárně a rozprostře se v tloušťce vrstvy 25 mm (± 5 mm) na síto. Vzorek asfaltové směsi připravený v laboratoři se ihned po vyrobení rozprostře na síto v tloušťce vrstvy přibližně 25 mm (± 5 mm) tak, aby nebylo nutné směs znovu ohřívat. Část asfaltové směsi se uchová pro určení jejích počátečních vlastností před stárnutím.

Laboratorní sušárna s nuceným prouděním vzduchu se předejde na teplotu 80 °C (± 1 °C) po dobu 60 minut. Síta s asfaltovou směsí se vloží do vyhřáté laboratorní sušárny. Stárnutí trvá 96 hodin (± 1 hodina). Poté se síta se zestárnutou asfaltovou směsí vyjmou z laboratorní sušárny, asfaltová směs se odebere ze sít a uloží pro další zkoušky.

2.4. Hodnocení změny vlastností asfaltové směsi způsobené stárnutím metodou BSA

Doposud nebyly stanoveny požadované parametry, které by měly zajišťovat vyhovující vlastnosti asfaltové směsi resp. vlastnosti znovuzískaného pojiva ze zestárnuté směsi po procesu stárnutí BSA. Je to zřejmě z toho důvodu, že na výsledky zkoušek má kromě vlastností použitého pojiva značný vliv druh asfaltové směsi, její složení, kvalita

použitých materiálů a eventuálně použití přísad. Postup je tedy vhodný zejména pro relativní porovnání různých asfaltových směsí při jejich laboratorním návrhu nebo kontrole vlastností, pro analyzování vlivu přidání modifikačních přísad nebo pro porovnání různých postupů výroby asfaltových směsí z hlediska jejich vlivu na termooxidační stárnutí.

Popis hodnocení změn vlastností asfaltové směsi způsobených stárnutím:

Vlastnosti asfaltové směsi po laboratorní simulaci stárnutí se stanovují příslušnými zkušebními metodami, aniž by se vzorek znovu ohříval více než jednou. Na zestárnuté asfaltové směsi je možné určit tuhost podle ČSN EN 12697-26 nebo je možné vakuovou destilací v rotačním vakuovém destilačním zařízení zpětně získat asfaltová pojiva postupem podle ČSN EN 12697-3 pro další zkoušky pojiv obsažených v asfaltové směsi (penetrace podle ČSN EN 1426, bod měknutí podle ČSN EN 1427, bod lámavosti podle ČSN EN 12693 a komplexní smykové moduly a fázové úhly podle ČSN EN 14770).

Vliv stárnutí metodou BSA na změnu vlastností asfaltových směsí se pak hodnotí změnou hodnot uvedených laboratorních zkoušek před stárnutím a po stárnutí metodou BSA.

Vzhledem k velkému množství parametrů, které je nutné při hodnocení stárnutí asfaltové směsi uvažovat (např. použité materiály, typ směsi, tloušťka asfaltového filmu), slouží metodika jako nástroj pro relativní porovnání různých asfaltových směsí ve fázi návrhu a optimalizace asfaltové směsi, pro analyzování vlivu přidání modifikačních přísad nebo pro porovnání různých postupů výroby asfaltových směsí z hlediska jejich vlivu na termooxidační stárnutí.

3. Srovnání „novosti postupů“

V ČR je v platnosti několik postupů popisujících simulaci stárnutí asfaltového pojiva, ovšem neexistuje v současné době platný technický předpis, který by popisoval simulaci stárnutí asfaltové směsi v laboratoři. Metodika popisující proces stárnutí asfaltové směsi v laboratorních podmínkách nově umožní popsat vliv složení asfaltové směsi, dávkování asfaltového pojiva a vliv druhu a kvality použitých materiálů na změny vlastností asfaltové směsi způsobené stárnutím.

Nyní se na evropské úrovni začíná pracovat na první verzi harmonizované evropské normy s označením prEN 12697-52, která by měla popisovat metody simulace stárnutí asfaltové směsi v laboratoři. Norma je ovšem prozatím ve stadiu veřejného připomínkování (Enquiry).

Tato metodika byla inspirována postupem stárnutí asfaltové směsi, který vznikl na Technické univerzitě Braunschweig (Německo) s označením BSA.

4. Popis uplatnění certifikované metodiky

V současné době převažují na asfaltových vozovkách ve zvýšené míře spíše poruchy typu trhliny. Tento typ poruchy je reprezentován především trhlinami, jež vznikají jako důsledek odbourávání (relaxací) indukovaného napětí a při kterém jsou za daných podmínek překročeny pevnostní charakteristiky asfaltového materiálu. Tyto poruchy se často vyskytují dokonce i v prvních letech po zhotovení asfaltových vrstev. Jedním z možných důvodů vzniku těchto poruch je zrychlené stárnutí asfaltového pojiva obsaženého v asfaltové směsi, přičemž vlastnosti této směsi mohou značně ovlivnit rychlost stárnutí asfaltového pojiva. Proto je nutné hodnotit stárnutí asfaltového pojiva přímo zabudovaného do asfaltové směsi laboratorními zkouškami. Projevuje se tak hlavně vliv tloušťky asfaltového filmu, která hraje zásadní roli v dynamice a rozsahu stárnutí asfaltového pojiva, popřípadě vliv kameniva.

Tato metodika popisující postup simulace termooxidačního stárnutí asfaltové směsi v laboratoři bude uplatněna v silničních laboratořích při porovnání různých asfaltových směsí ve fázi návrhu a optimalizace asfaltové směsi, pro analyzování vlivu přidání modifikačních přísad nebo pro porovnání různých postupů výroby asfaltových směsí z hlediska jejich vlivu na termooxidační stárnutí. Certifikovanou metodiku může uplatnit zejména Ministerstvo dopravy ČR a Ředitelství silnic a dálnic ČR (popř. jiný investor), čímž získají nástroj pro hodnocení náchylnosti asfaltových směsí ke stárnutí.

5. Ekonomické aspekty

Hlavní ekonomický přínos této metodiky spočívá v rozpoznání náchylnosti asfaltových směsí ke zrychlenému termooxidačnímu stárnutí, což je v současné době jeden z klíčových prvků při vzniku poruch asfaltových vozovek. Silniční laboratoře budou schopny rozlišit asfaltové směsi odolné vůči stárnutí od asfaltových směsí náchylných k rychlému termooxidačnímu stárnutí. Bude tedy možné identifikovat a využívat pouze směsi, které prokáží vysokou odolnost vůči stárnutí. Je předpoklad, že následně dojde k prodloužení životnosti asfaltových vrstev a k celospolečenským úsporám plynoucím z nižších nároků na opravy, popřípadě z prodloužení cyklu oprav.

Ekonomickou výhodou tohoto postupu pro silniční laboratoře lze spatřovat rovněž v tom, že pro zkoušku stárnutí asfaltové směsi BSA není nutné pořizovat další nákladné zařízení. Využije se totiž stávající laboratorní zařízení – sušárna s nuceným prouděním vzduchu, kterou jsou všechny silniční laboratoře vybaveny.

6. Seznam použité související literatury

Büchler S., Mollenhauer K., Renken P. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 07.208/2004/BGB Einfluss von modifizierten Bitumen auf die Kälte- und Ermüdungseigenschaften von Asphalt und deren Veränderung während der Nutzungsdauer.

Büchler S., Wistuba M.P.: Das Braunschweiger Verfahren zur Alterung von Asphaltmischgut und deren Einfluss auf die Kälte- und Ermüdungseigenschaften, Straße und Autobahn 1, 2010, Seite 6.

Büchler S., Renken P., Mollenhauer K.: Relation between rheological bitumen characteristic and resistance of asphalt against fatigue and cold temperatures. Paper No.402-077. Euroasphalt and Eurobitume Congress. Copenhagen. 2008.

prEN 12697-52: Bituminous mixtures — Test methods — Part 52: Conditioning to address oxidative ageing. CEN/TC 227.

Piérard N., Vanelstraete A.: Developing a test method for the accelerated ageing of bituminous mixtures in the laboratory. 7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials (ATCBM09), Rhodes (Grèce). 2009.

De la Roche C., Van de Ven M., Van den Bergh W., Gabet T., Dubois V., Grenfell J., Porot L.: Development of a laboratory bituminous mixtures ageing protocol. 7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials (ATCBM09), Rhodes (Grèce). 2009.

Bell C.A., AbWahab Y., Cristi M.E., Sosnovske D.: Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt-Aggregate Mixtures. SHRP-A-383. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 1994.

SHRP program: „Standard Practice for Short Term Aging of Asphalt Concrete Mixtures, ” SHRP #1025, 1992.

SHRP program: „Standard Practice for Long Term Aging of Asphalt Concrete Mixtures, ” SHRP #1030, 1992.

7. Seznam publikací, které předcházely metodice

Stoklásek S. a kol.: Stárnutí asfaltových pojiv jako důležitý aspekt životnosti asfaltových vozovek. Posouzení vlivu stárnutí na kvalitu asfaltových pojiv pomocí přístroje DSR. Příloha B 4.2 výzkumné zprávy projektu TA03030381. 2014.

Dašek O.: Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek. Prezentace na Týmu 6 pro asfaltové technologie za horka. 2015.

Dašek O., Coufalík P., Hýzl P., Špaček P., Hegr Z., Matoušek D.: Změny vlastností silničních asfaltů způsobené stárnutím. Příspěvek na konferenci Asfaltové vozovky 2015, České Budějovice, 2015.

8. Dedikace na projekt

Metodika byla zpracována v rámci řešení projektu TAČR TA03030381 Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek.

9. Vypracování metodiky

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Petr Hýzl, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Pavel Coufalík, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

doc. Dr. Ing. Michal Varaus, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Dušan Stehlík, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Ing. Petr Špaček, Skanska a.s.

Ing. Zdeněk Hegr, Skanska a.s.

RNDr. Svatopluk Stoklásek, nezávislý konzultant

Ing. David Matoušek, Pragoprojekt a.s.

Ing. Petr Svoboda, Pragoprojekt a.s.

10. Jména oponentů a názvy jejich organizací

Ing. Lubomír Kvarda, Ředitelství silnic a dálnic ČR

Ing. Milan Slaviček, SILMOS-Q s.r.o.



Praha 21. prosince 2015
Č.j.: 100/2015-710-VV/1

v y d á v á

OSVĚDČENÍ

o uznání uplatněné certifikované metodiky
v souladu s podmínkami „Metodiky hodnocení výsledků výzkumu a vývoje“

„Metodika popisující laboratorní stárnutí asfaltových směsí“

ŘEŠITEL

VUT v Brně, Fakulta stavební
Skanska a.s.
Pragoprojekt a.s.

Autor:

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Ing. Pavel Coufalík
doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Ing. Petr Špaček
Ing. Zdeněk Hegr
RNDr. Svatopluk Stoklásek
Ing. David Matoušek
Ing. Petr Svoboda

Dedikace:

Vypracované v rámci výzkumného projektu č. TA03030381 názvem „Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek“ financovaného za podpory TA ČR.

Zpracovatelé 2 nezávislých oponentních posudků:

- Ing. Lubomír Kvarda, ŘSD ČR
- Ing. Milan Slaviček, SILMOS-Q s.r.o.

JUDr. Václav Kobera
Ředitel


Ing. Martin Pichl

Odbor ITS, kosmických aktivit a VaVal



