



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VLASTNOSTI ZPĚTNĚ ZÍSKANÝCH ASFALTOVÝCH POJIV ZE SMĚSÍ S R-MATERIÁLEM

PROPERTIES OF RECLAIMED BITUMENS FROM ASPHALT MIXTURES WITH RAP

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Mucha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav pozemních komunikací
Student: **Bc. Ondřej Mucha**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vlastnosti zpětně získaných asfaltových pojiv ze směsí s R-materiálem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při použití R-materiálu při výrobě asfaltových směsí je nutno oživit zestárlé asfaltové pojivo, které je obsaženo v R-materiálu. Tohoto oživení je možno dosáhnout buď použitím měkčích asfaltových pojiv nebo použitím chemických látek - rejuvenátorů.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Diplomová práce bude zaměřena na problematiku asfaltových směsí s R-materiálem. Konkrétně bude pozornost věnována vlastnostem zpětně získaných asfaltových pojiv z asfaltových směsí, u nich bylo při jejich výrobě zestárlé asfaltové pojivo oživováno různými metodami. Na vzorcích vyextrahovaného pojiva budou stanovovány vybrané empirické a funkční parametry pojiv.

Seznam doporučené literatury a podklady:

ČSN 73 6121

ČSN 73 6141

Řada norem pro zkoušení asfaltových směsí ČSN EN 12697

Internetové zdroje

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 30. 3. 2023

L. S.

prof. Dr.techn. Ing. Michal Varaus
vedoucí ústavu

doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce je problematika asfaltových směsí s R-materiálem. V teoretické části práce je popsán samotný R-materiál, jak se získává, jaké jsou požadavky dle aktuálně platných norem, samotná výroba asfaltové směsi s R-materiálem, jednotlivé možnosti oživení zestárlého pojiva, použité materiály a jednotlivé zkušební metody. V praktické části jsou na vzorcích vyextrahovaného pojiva stanoveny vybrané empirické a funkční parametry pojiv. Tato část práce se zabývá vyhodnocením a porovnáním výsledků vlastností zpětně získaných asfaltových pojiv z asfaltových směsí, u nich bylo při jejich výrobě zestárlé asfaltové pojivo oživováno různými metodami.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfalt, zpětně získané asfaltové pojivo, R-materiál, požadavky na R-materiál, výroba asfaltových směsí s R-materiálem, oživení zestárlých asfaltových pojiv, rejuvenátor, rejuvenační přísady, změkčovací přísady, asfaltové pojivo typu RC, recyklace asfaltové vozovky, penetrace jehlou, bod měknutí, metoda kroužek a kulička, komplexní smykový modul, fázový úhel, dynamický smykový reometr, MSCR test.

ABSTRACT

Subject of this diploma thesis is the issue of asphalt mixtures with RA. The theoretical part of the work describes the RA itself, how it is obtained, the requirements according to currently valid standards, the production of asphalt mixture with RA, various options for rejuvenating aged binder, the materials used and the individual testing methods. In the practical section, selected empirical and functional parameters of extracted binders from samples are determined. This part evaluates and compares the results of properties of reclaimed asphalt binders from asphalt mixtures, where aged asphalt binders were rejuvenated by different methods during their production.

KEYWORDS

Bitumen, reclaimed bitumen, RA, requirements for RA, production of asphalt mixtures with RA, rejuvenation of aged asphalt binders, rejuvenator, rejuvenating additives, softening additives, RC-type asphalt binder, aging of asphalt binders, asphalt pavement recycling, needle penetration, softening point, ring and ball method, complex shear modulus, phase angle, dynamic shear rheometer, MSCR test.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MUCHA, Ondřej. *Vlastnosti zpětně získaných asfaltových pojiv ze směsí s R-materiálem*. Brno, 2024. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí doc. Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vlastnosti zpětně získaných asfaltových pojiv ze směsí s R-materiálem* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2024

Bc. Ondřej Mucha

autor

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří mému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Hýzlovi, Ph.D. za jeho profesionální přístup, odborné vedení, ochotu a vynaložený čas při konzultacích této diplomové práce.

Rád bych poděkoval doc. Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při zpracování zkoušek na DSR. Pavlu Strakovi a všem v laboratoři ústavu PKO děkuji za přátelský kolektiv a pomoc při provádění zkoušek.

Ing. Vlastimilu Suchyňovi děkuji za poskytnuté vzorky asfaltových pojiv a potřebné materiály ke zpracování této diplomové práce.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat celé své rodině, kteří mi studium umožnili, za bezmeznou podporu po dobu studia a za víru v dokončení této práce. Přítelkyni Beátě děkuji za oporu, pevné nervy a starostlivost během mého studia.

Děkuji Vám.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1	R-materiál.....	12
2.1.1	Označení R-materiálu	13
2.1.2	Získání R-materiálu	13
2.1.3	Úprava R-materiálu.....	15
2.1.4	Způsob skladování R-materiálu	18
2.1.5	Požadavky na R-materiál	19
2.1.6	Dávkování R-materiálu do asfaltových směsí	22
2.1.7	Maximální možné dávkování R-materiálu	26
2.2	Použití R-materiálu v nově vyráběných asfaltových směších.....	27
2.3	Výroba asfaltových směsí s R-materiálem.....	28
2.3.1	Přidávání R-materiálu za studena	29
2.3.2	Přidávání R-materiálu za tepla pomocí paralelního bubnu.....	31
2.3.3	Přidávání R-materiálu v kontinuální obalovně	32
2.3.4	Přidávání R-materiálu pomocí dvouplášťového bubnu	34
2.4	Stárnutí asfaltových pojiv	34
2.4.1	Mechanismy stárnutí.....	35
2.4.2	Simulace stárnutí v laboratorních podmínkách	37
2.4.3	Hodnocení náchylnosti asfaltových pojiv ke stárnutí	41
2.5	Možnosti oživení zestárlého pojiva.....	42
2.5.1	Přidání asfaltového pojiva vyšší gradace.....	43
2.5.2	Přidání změkčovacích přísady	44
2.5.3	Přidání rejuvenační přísady	45
2.5.4	Použití asfaltového pojiva typu RC	47

2.5.5	Vlastnosti oživovacích přísad	47
2.5.6	Dávkování oživovací přísady během výroby.....	48
2.5.7	Použité oživovací metody	48
3	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	53
4	POUŽITÉ MATERIÁLY	54
4.1	Asfaltové pojivo	55
4.2	Kamenivo	55
4.3	R-materiál.....	56
4.4	Rejuvenační přísady	56
4.5	ACO 8 s 0 % R-materiálu	57
4.6	ACP 22S(+) s 50 % R-materiálu.....	57
4.7	ACL 16+ s 30 % R-materiálu.....	57
4.8	ACL 16+ s 50 % R-materiálu.....	58
4.9	ACL 16S s 40 % R-materiálu.....	58
5	POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	59
5.1	Zkoušky empirické.....	59
5.1.1	Penetrace jehlou dle ČSN EN 1426.....	59
5.1.2	Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427	62
5.2	Zkoušky funkční.....	64
5.2.1	Stanovení komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu podle ČSN EN 14770	65
5.2.2	Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) podle ČSN EN 16659	69
5.2.3	Stabilita použitých rejuvenátorů	73
6	VÝSLEDKY ZKOUŠEK	75
6.1	Penetrace jehlou dle ČSN EN 1426	75
6.2	Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427.....	78

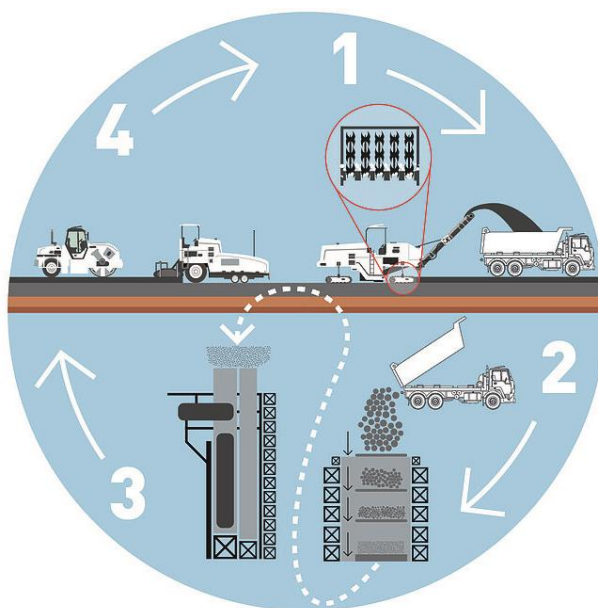
6.3	Stanovení komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu dle ČSN EN 14770	80
6.4	Teplotní citlivost	95
6.5	Zkouška MSCR dle ČSN EN 16659	96
6.6	Stabilita použitých rejuvenátorů	102
6.7	Souhrnná tabulka výsledků zkoušek	104
6.8	Korelace výsledků	105
7	ZÁVĚR	109
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	112
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	120
10	SEZNAM TABULEK	122
11	SEZNAM GRAFŮ	125
12	SEZNAM ROVNIC	128
13	SEZNAM PŘÍLOH	129
14	PŘÍLOHY	130

1 ÚVOD

Moderní společnost se neustále snaží najít ekologičtější a udržitelnější způsoby výroby a využití materiálů. V oblasti stavebnictví a silniční infrastruktury hrají asfaltové směsi klíčovou roli. S rostoucím důrazem na recyklaci a obnovitelné zdroje se užívání tzv. R-materiálu stává stále důležitějším prvkem v inovativních postupech výroby asfaltových směsí.

V poslední době se přírodní suroviny stávají nedostatkovým zbožím, jehož cena roste. Využívání recyklovaných materiálů je tedy nejen ekologickou nutností, ale také ekonomicky zajímavým řešením. Udržitelnost může také poskytnout jistou konkurenční výhodu ve výběrových řízeních, kde se musí splňovat recyklační kvóty. Recyklací asfaltových směsí šetříme nejen kamenivo, ale také spotřebu ropných produktů. [1]

Aby bylo možné znovuzískanou asfaltovou směs v podobě R-materiálu znovu použít během produkce za horka vyráběných asfaltových směsí, je nutné oživit vlastnosti zestárlého asfaltového pojiva takovým způsobem, aby mechanicko-fyzikální chování nově vyrobené směsi s R-materiálem odpovídalo chování asfaltové směsi vyrobené pouze z primárních surovinových zdrojů. Za účelem obnovení vlastností zestárlého asfaltového pojiva je možné použít pojiva vyšší gradace nebo tzv. oživovací přísady. Při použití oživovacích přísad hraje klíčovou roli během návrhu směsi s vysokým obsahem R-materiálu právě proces výběru a množství dávkování oživovací přísady. [2]



Obrázek č. 1: Životní cyklus asfaltových směsí [3]

2 TEORETICKÁ ČÁST

Tato část si dává za cíl uvést do problematiky týkající se asfaltových směsí s obsahem R-materiálu, jejich vlastnostmi, výrobou a jakým způsobem lze oživit zestárlé pojivo pro dosažení požadovaných vlastností nově vyrobené asfaltové směsi. Pozornost je také věnována normovým požadavkům, ekologickému a finančnímu hledisku.

V teoretické části jsou také popsány jednotlivé oživovací přísady, které byly při diplomové práci v praktické části použity.

2.1 R-materiál

Recyklace stavebních materiálů je nezbytným předpokladem udržitelného rozvoje a překlenutí rozporu mezi ekonomickým růstem a ochranou životního prostředí. Neustále zvyšující dopravní zatížení vozovek vyžadují potřebu jak výstavby vozovek nových, tak i oprav a rekonstrukcí vozovek stávajících.

Materiál, který se získá odstraněním asfaltové vrstvy se klasifikuje dle EN 13108-8 a nazývá se termínem znovuzískaná asfaltová směs. Úpravou této znovuzískané asfaltové směsi se teprve získává tzv. R-materiál. [4]

Podle normy ČSN EN 13108-8 je R-materiál (Reclaimed Asphalt – RA) upravený materiál z asfaltové směsi získaný odfrézováním asfaltových vrstev nebo drcením desek vybouraných z asfaltových vozovek nebo velkých kusů asfaltové směsi a asfaltové směsi z neshodné nebo nadbytečné výroby. R-materiál musí být vhodný a připravený k použití jako stavební materiál pro asfaltovou směs po jeho odzkoušení, posouzení a klasifikaci podle této normy. [5]



Obrázek č. 2: Vyfrézovaná znovuzískaná asfaltová směs [6]

2.1.1 Označení R-materiálu

R-materiál se značí zkratkou RA, kterou předchází označení maximální zrnitosti R-materiálu U a následuje ji označení zrnitosti kameniva d/D v milimetrech. Písmeno U označuje maximální zrnitost R-materiálu jakožto nejmenší velikost síta v milimetrech, kterým propadne 100 % zrn asfaltové směsi. RA značí samotný R-materiál, D reprezentuje velikost horního síta kameniva v R-materiálu, která je větší než druhá z obou zmíněných sít – buďto nejmenší síto, skrz které propadne 100 % dělené 1,4 nebo nejmenší síto, skrz které propadne 85 %.

Příklad: R-materiál, jehož kamenivo má velikost horního síta 8 mm a zrna asfaltové směsi mají maximální velikost 40 mm. [5]

Zápis takového R-materiálu by vypadal následovně: 40 RA 0/8 mm; ČSN EN 13108-8

2.1.2 Získání R-materiálu

Recyklovaný asfaltový materiál (RAM) představuje heterogenní směs kameniva, které je částečně stmelené, obalované nebo potažené asfaltovým pojivem. Tato směs vzniká buď vyfrézováním nebo vybouráním hutněných asfaltových vrstev.

Materiál se získává buď vybouráním celé konstrukce vozovky nebo jejich jednotlivých vrstev. Tím je možné oddělit vrstvy stmelené asfaltovým pojivem od zbývajících vrstev. Je preferováno frézovat po jednotlivých vrstvách z důvodu různorodé kvality (různé kamenivo, různá asfaltová pojiva, různá zrnitostní složení). [7]

Frézování je vhodné pro vozovky, kde došlo ke konci životnosti vrstvy, na místech, kde není možné změnit sklon vozovky (například z důvodu odvodnění), a také na mostních konstrukcích, kde nelze přidávat další asfaltové vrstvy kvůli zvětšení zatížení konstrukce. Dále je vhodné pro dočasnou obnovu drsnosti povrchu vozovky.

Silniční frézy rozlišujeme následovně:

- **malé** – šířka frézovacího válce do 500 mm, záběrová hloubka do 100 mm,
- **střední** – šířka frézovacího válce 500-1000 mm, záběrová hloubka do 180 mm,
- **velké** – šířka frézovacího válce nad 1000 mm, záběrová hloubka do 350 mm,
- **speciální** – využívají se pro sanační práce na odfrézování poškozených krytových vrstev v blízkosti kanalizačních poklopů, uličních vpustí, rigolů apod. [7]



Obrázek č. 3: Silniční fréza Wirtgen W 220 [8]

2.1.2.1 Selektivní frézování

Frézování je ve většině případů nejvhodnějším způsobem, jak získat R-materiál z vozovky. Silniční frézy jsou konstruovány pro frézování hromadné či selektivní (tj. po jednotlivých vrstvách konstrukce vozovky). Tyto stroje jsou přizpůsobeny k odstranění předem stanovených tloušťek obrusných, ložných i podkladních vrstev (asfaltových, betonových, stabilizovaných cementem atd.) vozovky pomocí frézovacích hrotů osazených na frézovacím bubnu.

Standardně probíhá frézování za běžné, okolní teploty. Při frézování jsou využívány samohybné silniční frézy, u kterých je voda vstříkována na frézovací buben, čímž se snižuje prašnost a zvyšuje jejich životnost. Materiál je pásovým dopravníkem přesouván na dopravní prostředky, kterými je dopravován do mísících center či na mezideponie. [9]

Selektivní frézování s sebou nenese významné časové nevýhody. Vzhledem k menší hloubce frézování pracují frézy za studena při odstraňování jednotlivých vrstev rychleji než při odstraňování kompletní tloušťky při maximální hloubce frézování jedním přejezdem. Frézování ploch ve dvou nebo ve třech vrstvách může být někdy stejně rychlé, v některých případech dokonce rychlejší než úplné odstranění vozovky. [10] [11]

Mezi největší výhody frézování po jednotlivých vrstvách konstrukce vozovky patří jednoznačně ekologické i ekonomické přínosy. Selektivní frézování zajistí oddělení mletého materiálu podle typu směsi (rozdílné pojivo, zrnitost i kvalita), což je základním předpokladem pro efektivní využití R-materiálu. [12]

2.1.3 Úprava R-materiálu

Základním obecným požadavkem R-materiálu je splnění požadavků zejména z hlediska vlastností zestárlého asfaltového pojiva, kameniva a znečišťujících (cizorodých) látek stanovených podle ČSN EN 13108-8 ed. 2. V průběhu získávání (frézování, vybourávání) je informativně sledována případná přítomnost škodlivých dehtových látek z důvodu vyloučení kontaminované znovuzískané asfaltové směsi z dalšího zpracování na R-materiál. [11]

2.1.3.1 Z odpadu vedlejší produkt

Dne 1. 10. 2023 nabyla účinnost nová vyhláška č. 283/2023 Sb., o kritériích, při jejichž splnění je znovuzískaná asfaltová směs a znovuzískaný penetrační makadam vedlejším produktem nebo přestává být odpadem. Tato vyhláška nahradila vyhlášku ze dne 1. 6. 2019 č. 130/2019 Sb. Vyhláška je společnou prací Ministerstva životního prostředí a Ministerstva průmyslu a obchodu. Klade si za cíl jasně a přesně určit kritéria, při jejichž splnění je možné považovat znovuzískanou asfaltovou směs za vedlejší produkt, a nikoliv za odpad. [13] [14] [15]

Z ekologického hlediska se díky této vyhlášce zvyšuje motivace opětovně využívat znovuzískanou směs jako materiál místo uložení jako odpadu. Tím odpadá administrativa spojená s nakládáním s odpady. Dochází také k úspoře ekonomických nákladů. Od okamžiku platnosti vyhlášky se problematika stanovení polyaromatických uhlovodíků v asfaltových směsích stala intenzivně diskutovaným a rozvíjeným tématem.

V tabulce č. 1 můžeme vidět, že znovuzískaná asfaltová směs (ZAS) je rozdělena do jednotlivých kvalitativních tříd ZAS-T1 až ZAS-T4, kde „x“ je celková suma stanovených polyaromatických uhlovodíků (PAU) definovaných vyhláškou. Toto množství musí být stanoveno akreditovanou laboratoří. [16]

Tabulka č. 1: Klasifikace znovuzískané asfaltové směsi [14]

Celkové obsahy parametru	Jednotka	Kvalitativní třída			
		ZAS-T1	ZAS-T2	ZAS-T3	ZAS-T4
Celkové množství polyaromatických uhlovodíků (PAU)	mg/kg suš.	≤ 12	$12 < x \leq 25$	$25 < x \leq 300$	> 300

2.1.3.2 Drcení a přetřídění R-materiálu

Úprava znovuzískané asfaltové směsi na R-materiál spočívá také v drcení na frakce používané při výrobě nové asfaltové směsi. Vyfrézovaný nebo vybouraný materiál se drtí a následně třídí na jednotlivé frakce.

Frací kameniva se rozumí směs zrn, která se nachází v rozmezí dvou sít, z nichž síto s menšími otvory zadržuje a síto s většími otvory zrna propouští. Dolní síto (s menšími otvory) se značí písmenem „d“ a horní síto (s většími otvory) se značí písmenem „D“. Výsledná frakce kameniva se pak značí jako poměr dolního síta k hornímu sítu, např. 16/32 mm. [17]

Existuje mnoho typů drtičů, které se pro drcení znovuzískané asfaltové směsi používají. Můžeme je rozdělit do různých kategorií, například dle způsobu drcení či mobility drtícího zařízení (mobilní, semimobilní a stacionární). [18]

- **Čelist'ové drtiče** drtí materiál mezi pevnou a pohyblivou částí drtiče. Výhoda je v jednoduchosti konstrukce, ale nevýhodou je jejich jednostranné užití a konečná velikost frakce se pohybuje okolo 300 mm. [19]
- **Odrázové drtiče** se používají pro jemnější drcení, díky použité technologii se jedná o velmi výkonný typ drtiče. Nevýhodou je jeho vysoká cena.
- **Kuželové drtiče** využívají drcení pomocí rotujícího kužele a statického pláště, jeho největší výhodou je vysoká kvalita výstupní frakce. [20]

Třídění znovuzískané asfaltové směsi je proces, při kterém jsou jednotlivá zrna kameniva od sebe oddělována podle velikosti nebo také podle tvaru, protože pro účely asfaltových směsí jsou plochá zrna nevhodná. Nejvíce používaným způsobem třídění kameniva je třídění na sítích.



Obrázek č. 4: R-materiál různých frakcí [21]

2.1.3.3 Homogenizace R-materiálu

Homogenizace R-materiálu před jeho použitím pro výrobu asfaltových směsí je klíčovou záležitostí pro zajištění kvality nově vyráběných asfaltových směsí. Homogenizace je zajištěna různými postupy. Úroveň homogenity R-materiálu určuje jeho maximální množství, které lze v praxi použít. [5]

Znovuzískaná asfaltová směs se ukládá na skládky a případné znečišťující části (beton, obrubníky atd.) jsou odstraňovány. Pro zajištění prvního stupně homogenizace jsou ukládané materiály shrnovány do potřebné výšky nakladačem nebo buldozerem. V případě asfaltových směsí z neshodné nebo nadbytečné výroby a pokládky se ještě teplá asfaltová směs rozhrne na malou tloušťku, po ochlazení se rozpojí a shrne nakladačem na hromadu.

Další fáze homogenizace materiálu nastává při způsobu ukládání rozpojeného materiálu na požadované frakce. Jako vhodné řešení se jeví např. ukládání stejného materiálu na dvě oddělené hromady a následné postupné odebrání z těchto dvou hromad (příznivý vliv na stejnozrnnost). [11]

Pokud se to vyžaduje, musí se deklarovat homogenita R-materiálu, která se stanoví z různých podílů v procentech hrubého a drobného kameniva a jemných částic v R-materiálu, obsahu pojiva v R-materiálu a buď hodnoty penetrace, bodu měknutí nebo viskozity asfaltového pojiva znovuzískaného z R-materiálu. Pokud se vyžaduje míra homogenity, musí se vyjádřit jako maximální rozmezí nebo jako směrodatná odchylka požadovaného počtu zkušebních výsledků. [5]

Abychom zajistili homogenitu přidaného R-materiálu, je důležité zajistit jeho oddělené skladování. To je zásadní s ohledem na kvalitu použitého kameniva a předpokládanou přítomnost modifikovaného asfaltového pojiva.

Případné předúpravy, jako je třídění, drcení nebo přetřídování před použitím, mohou pomoci při dosažení požadované homogenity.

Dalším způsobem, jak docílit homogenity materiálu je optimalizace procesu výroby. Při výrobě asfaltových směsí s R-materiálem lze optimalizovat procesy, například vhodným dávkováním, aby se dosáhlo lepší homogenity materiálu. [22]

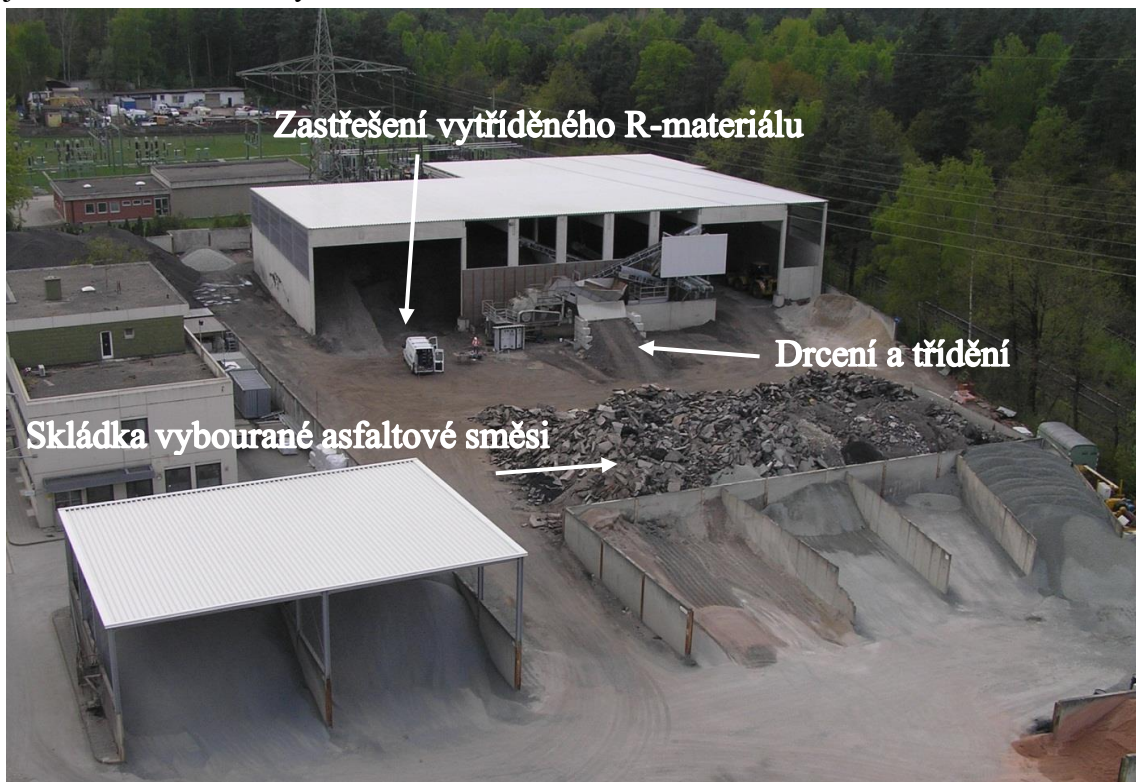
Nehomogenita R-materiálu v průběhu výroby asfaltových směsí může způsobit hned několik problémů – nerovnoměrné vlastnosti směsi, snížení kvality povrchu, nedostatečná adheze, zkrácenou životnost nebo problémy při pokládce asfaltové směsi.

2.1.4 Způsob skladování R-materiálu

R-materiál, který je připraven pro výrobu nových asfaltových směsí se skladuje odděleně pro každou frakci zvlášť ve skládkách se zpevněným asfaltovým nebo betonovým podkladem. Za vhodné se považuje vyspádování podkladu směrem ven ze skládky pro zajištění odtok dešťové vody. Jednotlivé frakce jsou odděleny betonovými dělicími stěnami.

Ideální pro skladování R-materiálu je zastřešená skládka, která brání proniknutí dešťové vody do skladovaného R-materiálu. Zastřešením je docíleno úspory paliv při předehřívání R-materiálu v paralelním sušícím bubnu nebo omezen problém s tvorbou páry při dávkování R-materiálu za studena. R-materiál s velikostí zrna ≤ 8 mm se musí vždy skladovat zastřešený. [23] [24]

Každá zásoba R-materiálu by měla obsahovat takové množství R-materiálu se zatříděnými/deklarovanými vlastnostmi, který je vhodný a použitelný jako stavební materiál pro výrobu asfaltových směsí. Výška hromad by neměla překročit maximální výšku 3,5 m. Během ukládání na skládky jsou odstraňovány případné znečišťující součásti (beton, části obrubníků atd.). Frakce R-materiálu obsahující modifikovaný asfalt je nutno skladovat vždy samostatně. [5]



Obrázek č. 5: Skladování, drcení a třídění R-materiálu [25]

2.1.5 Požadavky na R-materiál

Na asfaltové směsi s obsahem R-materiálu jsou kladeny stejné požadavky jako na asfaltové směsi neobsahující R-materiál. Proto se vlastnosti R-materiálu musí deklarovat. Požadavky na R-materiál s ohledem na vlastnosti pojiva, kameniva a cizorodých látek jsou uvedeny v ČSN EN 13108-8 a ČSN 73 6141. [5] [26]

2.1.5.1 Enviromentální požadavky

R-materiál musí splňovat parametry pro zařazení do jakostní třídy ZAS-T1 a ZAS-T2 ve smyslu vyhlášky Ministerstva životního prostředí a Ministerstva průmyslu a obchodu. Maximální celkové množství polyaromatických uhlovodíků nesmí překročit 12 mg/g sušiny pro ZAS-T1 a 25 mg/kg sušiny pro ZAS-T2.

R-materiál spadající do kvalitativní třídy ZAS-T3 je možno použít tehdy, pokud po namíchání s ostatními materiály splní parametry pro jakostní třídu ZAS-T2 (tj. 25mg/kg sušiny), přičemž obalovna asfaltových směsí musí být technicky upravena tak, že při výrobě asfaltové směsi nedochází k uvolňování výparů škodlivých emisí. [23]

2.1.5.2 Cizorodé látky

Cizorodé látky představují jiné materiály než přírodní kamenivo, které není získané z asfaltových směsí. Jejich přítomnost, obsah a druh se musí deklarovat a stanovit podle normy ČSN EN 12697-42. Požadavky na kategorii cizorodých látek ve vstupním produktu (R-materiálu) jsou definovány v ČSN 73 6121. Mezi cizorodé látky nepatří přísady, které se běžně přidávají do asfaltových směsí (drcený pryž, výztužná a celulózová vlákna atd.)

Cizorodé látky jsou rozděleny do dvou skupin:

- **materiály skupiny 1** – cementový beton, cihly, kov, materiál spodní podkladní vrstvy, cementová malta,
- **materiály skupiny 2** – syntetické materiály, dřevo a plasty.

Testování vzorku probíhá vizuální kontrolou, odebráním a zaznamenáním případného znečištění a prosetím přes síto o velikosti ok 4 mm. [27]

2.1.5.3 Asfaltové pojivo

Vlastnosti asfaltových směsí jsou výrazně ovlivněny vlastnostmi samotného asfaltového pojiva. Jelikož se jedná o organický materiál, je asfaltové pojivo v průběhu své životnosti vystaveno různým formám degradace. Z tohoto důvodu není možné hodnotit vlastnosti asfaltového pojiva a směsí pouze na základě jejich čerstvého stavu, ale je nezbytné posuzovat tyto materiály i po simulaci stárnutí. Skutečnost, že má asfaltové pojivo počáteční přijatelné vlastnosti v nezestárlém stavu, nezaručuje automaticky, že si tyto vlastnosti udrží i po delším období stárnutí. [28]

Je nutné deklarovat druh asfaltového pojiva (silniční asfalt, polymerem modifikovaný asfalt, pojivo typu CRMB nebo tvrdý silniční asfalt) a vlastnosti znovuzískaného asfaltového pojiva. Znovuzískání pojiva ze směsí pro zkoušení se provede podle ČSN EN 12697-3. Minimální četnost pro zkoušení R-materiálu je jedna zkouška na každých 2000 tun R-materiálu. [26]

R-materiál musí být kategorizován jako P₁₅, pokud penetrace pojiva každého ze vzorků je ≥ 10 penetračních jednotek a průměrná hodnota penetrace všech vzorků je ≥ 15 penetračních jednotek.

R-materiál musí být kategorizován jako S₇₀, pokud bod měknutí každého ze vzorků je ≤ 77 °C a průměrná hodnota bodu měknutí všech vzorků je ≤ 70 °C. [11]

Pro jiný R-materiál se musí průměrné hodnoty penetrace nebo bodu měknutí ze všech vzorků deklarovat jako kategorie P_{dec} nebo S_{dec}.

Tabulka č. 2: Požadavky na zpětně získané pojivo z asfaltové směsi v případě použití silničního asfaltu podle ČSN EN 12591 [26]

Požadovaný druh asfaltu	Penetrace zpětně získaného pojiva při teplotě 25 °C podle ČSN EN 1426 [0,1 mm]	Bod měknutí zpětně získaného pojiva podle ČSN EN 1427 [°C]
50/70	30 až 55	48 až 60*
70/100	40 až 75	45 až 57*

* V případě doložení přítomnosti polymerem modifikovaného asfaltu v R-materiálu pomocí metod platných dle normy ČSN 73 6141 omezení teploty bodu měknutí shoda neplatí.

Tabulka č. 3: Požadavky na zpětně získané pojivo z asfaltové směsi v případě použití polymerem modifikovaného asfaltu podle ČSN EN 14023 [26]

Požadovaný druh asfaltu	Penetrace zpětně získaného pojiva při teplotě 25 °C podle ČSN EN 1426 [0,1 mm]	Bod měknutí zpětně získaného pojiva podle ČSN EN 1427 [°C]	Vratná duktilita zpětně získaného pojiva při teplotě 25 °C podle ČSN EN 13398 [%]
PMB 25/55-65	15 až 50	≥ 60	≥ 40*
PMB 45/80-65	30 až 70	≥ 60	≥ 40*

* V průběhu provádění stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů dle ČSN EN 13398 musí zkušební vzorky přenést protažení na délku minimálně 100 mm před případným přetržením.

Pro prokázání účinnosti vybrané metody ošetření zestárlého asfaltového pojiva je nutno při dávkování R-materiálu do asfaltové směsi v množství vyšším než 15 % hmotnosti směsi z kameniva navíc provést v rámci kontrolních zkoušek asfaltové směsi na zpětně získaném pojivu z hotové směsi:

- zkoušku stanovení penetrace podle ČSN EN 1426,
- stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička podle ČSN EN 1427,
- v případě použití polymerem modifikovaného asfaltu i stanovení vratné duktility podle ČSN EN 13398 v četnostech viz tabulka č. 4.

Tabulka č. 4: Minimální četnost pro stanovení vratné duktility podle ČSN EN 13398 v případě použití polymerem modifikovaného asfaltu [26]

Dávkování R-materiálu [%]	Tuny/zkouška
15 až 30	4000
> 30	2000

Tabulka č. 5: Požadavky na zpětně získané pojivo z asfaltové směsi v případě použití polymerem modifikovaného asfaltu podle ČSN EN 14023 [26]

Požadovaný druh asfaltu	Vratná duktilita zpětně získaného pojiva při teplotě 25 °C podle ČSN EN 13398 [%]
PMB 25/55-65	≥ 40
PMB 45/80-65	≥ 40

2.1.5.4 Další požadavky na R-materiál

Mezi další požadavky vyplývající z normy ČSN 73 6141 patří:

- zrnitost kameniva a horní síto D – průměrná zrnitost kameniva ze vzorků se musí deklarovat, zrnitost se vyjádří v procentech propadu síty 1,4 D; D; 2 mm a 0,063 mm a síty pro hrubé kamenivo o velikosti v rozmezí D a 2 mm a síty o velikosti v rozmezí 2 mm a 0,063 mm,
- obsah pojiva – průměrný obsah pojiva se musí stanovit podle ČSN EN 12697-1,
- zrnitost materiálu – jedná se o maximální velikost zrn R-materiálu U_{RA} , zrnitost R-materiálu U se musí stanovit podle ČSN EN 933-1. [11]

2.1.6 Dávkování R-materiálu do asfaltových směsí

Přípustné množství R-materiálu v asfaltových směsích je uveden především v přílohách normy *ČSN 73 6121 Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody* z března 2023. Původní norma z února roku 2019 má platnost do konce června roku 2024. V aktualizované normě se změnil, a především navýšil nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v jednotlivých asfaltových směsích. Jednoznačně je zde vidět snaha o zvýšení podílu R-materiálu v nových asfaltových směsích.

R-materiál lze přidávat bez jeho dalších úprav do asfaltových směsí v množství maximálně 15 %. Pro výrobu asfaltové směsi s nemodifikovaným asfaltem a přidávání R-materiálu za studena platí hranice maximálně 25 %. Za horka platí tabulka č. 6. Při množství R-materiálu nad 25 % je zapotřebí, aby byla obalovna vybavena zařízením pro jeho předehtání. V tomto případě je nutno vypočítat potřebné množství dávkování asfaltu měkčí gradace nebo rejuvenátorů tak, aby bylo dosaženo penetrace a bodu měknutí výsledné deklarované gradace pojiva. Zároveň musí být splněny požadavky na penetraci a bod měknutí zpětně získaného asfaltového pojiva po výrobě podle tabulky č. 2. [29]

V případě klasického asfaltového betonu, který je nejčastěji využívaným druhem směsi je norma v procentuálním zastoupení R-materiálu benevolentnější. Tabulka č. 6 naznačuje možnost jeho použití ve všech typech směsí. Například v obrusných vrstvách je přijatelný podíl až 35 % (norma z roku 2019 připouštěla maximálně 25 %), v ložných až 50 % (původní norma připouštěl maximálně 40 %) a dokonce až 60 % v podkladních vrstvách.

Tabulka č. 6: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi AC s nemodifikovaným asfaltem [29]

Obrusné vrstvy		Ložní vrstvy		Podkladní vrstvy	
Druh směsi	R-materiál [%]	Druh směsi	R-materiál [%]	Druh směsi	R-materiál [%]
ACO 8	35	ACL 16 +	50	ACP 16 S	60
ACO 8 CH	35	ACL 16		ACP 16 +	
ACO 11 +	30	ACL 22 +		ACP 22 S	
ACO 11	35	ACL 22		ACP 22 +	
ACO 16 +	30				
ACO 16	35				

Nejnovější norma již nerozlišuje nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v ložných a podkladních vrstvách v asfaltových směsích pro různé intenzity dopravního zatížení (značení „S“ a „+“), dávkování R-materiálu je zde sjednocené. Pro obrusné vrstvy asfaltového betonu je stále dávkování R-materiálu rozlišené v závislosti na druhu směsi a pro jaké dopravní zatížení je navržena. [29]

Užitím R-materiálu do nově vyráběných asfaltových směsí dochází k nemalým finančním úsporám. Obecně lze říci, že čím větší dávkování R-materiálu do nově vyrobené asfaltové směsi, tím větší úspora. Zásadní roli ale hraje legislativa. Například v sousedním Německu je materiál určený k vyfrézování (tudíž znovu použitelný do asfaltové směsi) poskytován investorem za symbolické 1 euro/tunu s tou podmínkou, že firmy musí přidat R-materiál do vyráběné asfaltové směsi. V České republice toto neplatí, za vyfrézovaný materiál se platí. [30]

Tabulka č. 7: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi AC s modifikovaným asfaltem [29]

Obrusné vrstvy		Ložní vrstvy		Podkladní vrstvy	
Druh směsi	R-materiál [%]	Druh směsi	R-materiál [%]	Druh směsi	R-materiál [%]
ACO 11 +	30	ACL 16 S	40	ACP 16 S	50
ACO 16 +		ACL 16 +		ACP 22 S	
		ACL 22 S			
		ACL 22 +			

Pro směsi s modifikovaným asfaltem platí: při dávkování R-materiálu > 15 % do asfaltových směsí s PMB je nutno přidávat PMB RC podle normy ČSN 65 7222-1 (dávkování R-materiálu za studena maximálně do 25 % hmotnosti asfaltové směsi, dávkování za horka viz tabulka č. 7.) v takovém množství, aby výsledné hodnoty penetrace, bodu měknutí a vratné duktility směsi nově přidávaného pojiva a pojiva

vyextrahovaného z R-materiálu splnily požadavky penetrace, bodu měknutí a vratné duktility výsledného pojiva deklarovaného podle tabulky č. 8. Zároveň musí být splněny požadavky na penetraci, bod měknutí a vratnou duktilitu zpětně získaného pojiva po výrobě podle tabulky č. 3.

Tabulka č. 8: Specifikace pro silniční modifikované asfalty dle ČSN 65 7222-1, tab. 1 a tab. 3 (výběr) [31]

Označení	10/40-65	25/55-60	25/55-65	45/80-55	45/80-65	25/55 RC	45/80 RC
Penetrace [0,1 mm]	10–40	25–55	25–55	45–80	45–80	25–55	45–80
Bod měknutí [°C]	≥ 65	≥ 60	≥ 65	≥ 55	≥ 65	≥ 60	≥ 55
Vratná duktilita [%]	≥ 50	≥ 60	≥ 70	≥ 60	≥ 70	≥ 80	≥ 80

Snaha je také o využívání R-materiálu v dalších asfaltových směsích. Nicméně u ostatních typů hutněných asfaltových směsí, které jsou v České republice vyráběny, lze přidávat R-materiál při jejich výrobě pouze v omezeném množství. V tabulce č. 9 můžeme vidět nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltového koberce mastixového a v tabulce č. 10 nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltového koberce otevřeného. Ve směsi asfaltového koberce drenážního ani ve směsi asfaltového betonu pro velmi tenké vrstvy se R-materiál nesmí používat. [29]

Tabulka č. 9: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi SMA [29]

Asfaltový koberec mastixový	
Obrusné vrstvy	
Druh směsi	R-materiál [%]
SMA 4,5,8,11, 16	20
SMA 8 S, 11 S, 16 S	10

Tabulka č. 10: Přípustné množství R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi AKO [29]

Asfaltový koberec otevřený	
Vrstva	R-materiál [%]
Obrusná	15
Ložní	30
Podkladní	30

V tabulce č. 11 jsou převzaty hodnoty z ČSN 73 6141, kde je stanoven maximální přípustný podíl R-materiálu v asfaltových směsích s vysokým modulem tuhosti. Za dodržení podmínek uvedených v dokumentu je povoleno až 25 % R-materiálu do ložních vrstev a až 40 % do podkladních vrstev asfaltových směsí s vysokým modulem tuhosti. [32]

Tabulka č. 11: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi VMT [32]

Asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti	
VMT 16, VMT 22	
Vrstva	R-materiál [%]
Ložní	25
Podkladní	40

Z výše uvedených tabulek je zřejmé, že nejvyšší podíl R-materiálu je možné efektivně přidávat do směsí asfaltového betonu, které jsou zároveň nejčastěji využívané. Používat R-materiál i v dalších asfaltových směsích a zvyšovat jeho podíl je určitě správnou cestou k efektivnímu využívání přírodních zdrojů.

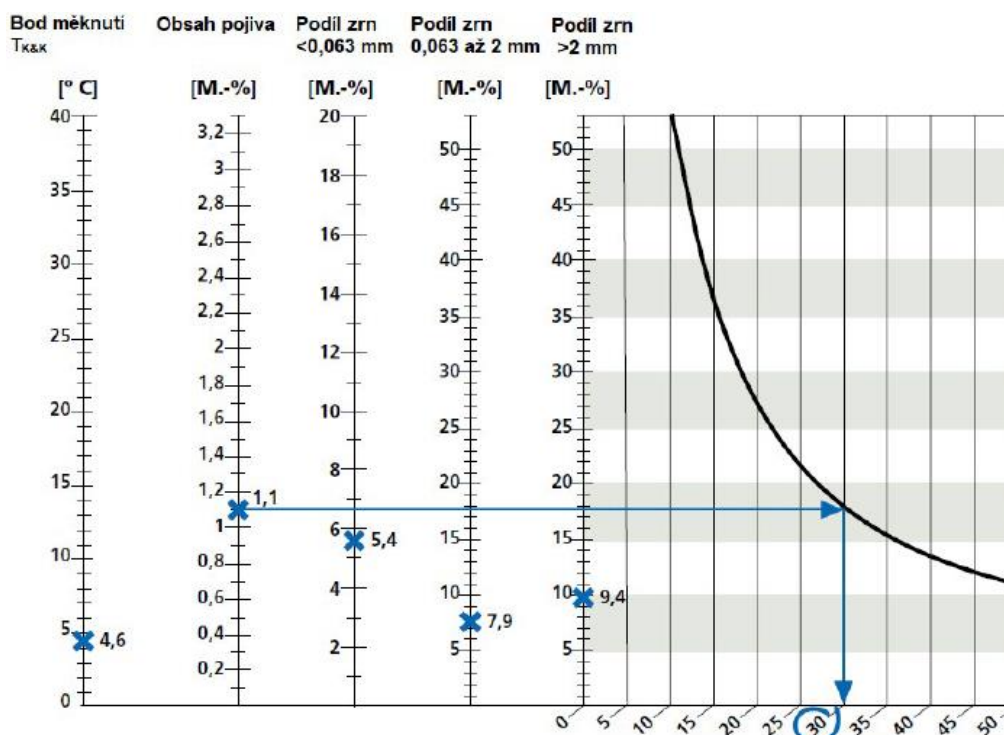
2.1.7 Maximální možné dávkování R-materiálu

Norma ČSN EN 73 6141 doporučuje maximální možné přidané množství R-materiálu. Lze stanovit graficky jako funkci rozsahu pěti charakteristik pomocí nomogramů zvlášť pro podkladní, jednovrstvé kryty a zvlášť pro obrusní a ložní vrstvy.

Přidané množství R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi se určí v závislosti na bodu měknutí (metoda kroužek a kulička), obsahu pojiva, podílu zrn < 0,063 mm, podílu zrn 0,063 až 2 mm a podílu zrn > 2 mm. Rozsahy jednotlivých hodnot se vynesou na osu y a rozhodující pro zjištění maximálně přidaného množství R-materiálu ve vztahu k homogenitě je nejvyšší rozpětí určité charakteristiky ležící na osách y, které potom vede k nejnižšímu přidanému množství R-materiálu. [11]

Tabulka č. 12: Příklad pro charakteristiky R-materiálu (pro asfaltovou ložní vrstvu) [11]

Charakteristika	Bod měknutí [°C]	Obsah pojiva [% hm.]	Podíl zrn < 0,063 mm [% hm.]	Podíl zrn 0,063 až 2 mm [% hm.]	Podíl zrn > 2 mm [% hm.]
Vzorek č. 1	68,6	5,8	9,8	27,7	62,4
Vzorek č. 2	64,0	5,8	11,3	25,2	63,5
Vzorek č. 3	64,8	5,2	9,2	19,8	70,9
Vzorek č. 4	68,0	4,7	6,7	21,5	71,8
Vzorek č. 5	66,4	5,1	12,1	23,8	64,1
Střední hodnota	66,4	5,3	9,8	23,6	66,5
Rozsah	4,6	1,1	5,4	7,9	9,4



Obrázek č. 6: Stanovení maximálního množství přidávaného R-materiálu [11]

2.2 Použití R-materiálu v nově vyráběných asfaltových směsích

Při výrobě „černého zlata“ se po celém světě stále objevuje rozšířené využívání recyklovaného asfaltu jako zdroje. Kromě toho se v průmyslově rozvinutých zemích opravují mnohem více kilometrů silnic, než se staví nové. To znamená, že budou odstraněny miliony tun asfaltu. Použití upraveného R-materiálu je závislé na druhu vrstvy, ze které byl R-materiál získán. Možnosti použití se řídí tabulkou č. 13. [33]

Tabulka č. 13: Možnosti přidání upraveného R-materiálu do nově vyráběných směsí [11]

R-materiál získaný z:	Použití do nově vyráběných směsí pro:			
	Litý asfalt	Asfaltová obrusná vrstva	Asfaltová ložní vrstva	Asfaltová podkladní vrstva
Litého asfaltu	ANO	NE	NE	NE
Asfaltové obrusné vrstvy ^a	ANO	ANO	ANO	ANO
Asfaltové obrusné a ložní vrstvy	ANO	NE ^{b,c}	ANO	ANO
Asfaltové obrusné a ložní vrstvy s modifikovaným pojivem	ANO	ANO ^c	ANO	ANO
Asfaltové ložní vrstvy ^a	NE	NE ^b	ANO	ANO
Asfaltové podkladní vrstvy ^a	NE	NE	NE ^b	ANO
Asfaltové obrusné, ložní a podkladní vrstvy – neselektivní frézování	NE	NE	NE ^b	ANO

^a Jedná se o materiál selektivně vyfrézovaný a po přetřídění skladovaný vždy jako samostatný R-materiál.

^b Platí při použití směsi pro komunikace kategorií D a silnice I. třídy. V ostatních případech platí „ANO“ s případným dalším zohledněním poznámky „c“.

^c Varianta „ANO“ platí pouze v případě dávkování R-materiálu v množství do 30 % včetně.

Množství dávkovaného R-materiálu musí být uvedeno ve zkoušce typu vyráběné asfaltové směsi.

Dávkované maximální množství upraveného R-materiálu do nově vyráběných asfaltových směsí se řídí požadavky, uvedenými v Národních aplikačních dokumentech ke specifikačním normám pro asfaltové směsi za horka řady ČSN EN 13 108 a ČSN 73 6122.

Z důvodu dosažení shodnosti homogenity asfaltové směsi při zkoušce typu a kontrolních zkouškách je pro zkoušky typu preferován způsob ověření ve výrobě. [11]

2.3 Výroba asfaltových směsí s R-materiálem

Výroba asfaltových směsí s R-materiálem se provádí na obalovnách. Z pohledu technologie se tento proces nazývá recyklace asfaltových směsí za horka v míchacím centru. Je to technologický proces, při kterém se v míchacích centrech přidává R-materiál do nově vyráběných směsí. [34]

Zařízení pro výrobu asfaltových směsí je komplexní systém skládající se z několika součástí. Jeho úkolem je dočasné skladování surovin, zahřívání a vysoušení kameniva, temperování a případný ohřev asfaltu, přesné dávkování jednotlivých složek asfaltové směsi, důkladné promísení, krátkodobé skladování hotové směsi v izolovaných zásobnících, zachycení a opětovné použití prachu vzniklého výrobou směsi a expedice hotových směsí. [35]

Při vlastní výrobě asfaltových směsí s R-materiálem se lze obecně setkat se čtyřmi variantami jeho přidávání:

- přidávání R-materiálu za studena,
- přidávání R-materiálu za tepla pomocí paralelního bubnu,
- přidávání R-materiálu v kontinuální obalovně,
- přidávání R-materiálu pomocí dvouplášťového bubnu.



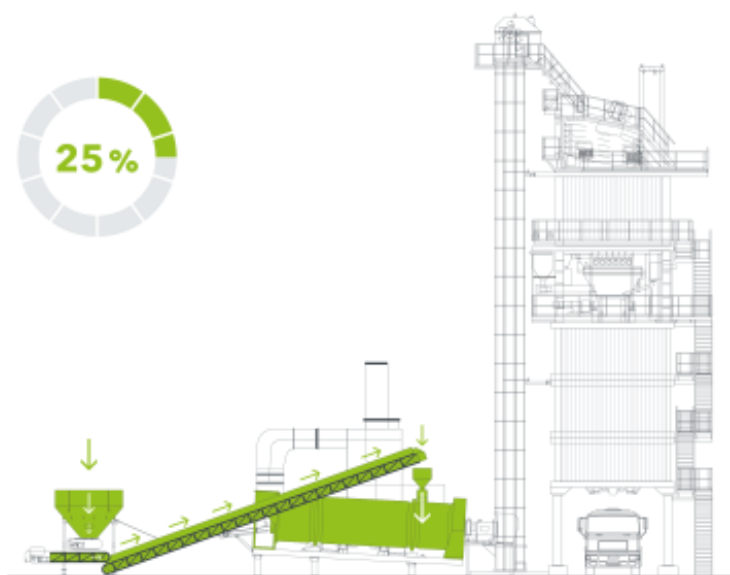
Obrázek č. 7: Obalovna asfaltových směsí, Česká republika – Žabčice [36]

2.3.1 Přidávání R-materiálu za studena

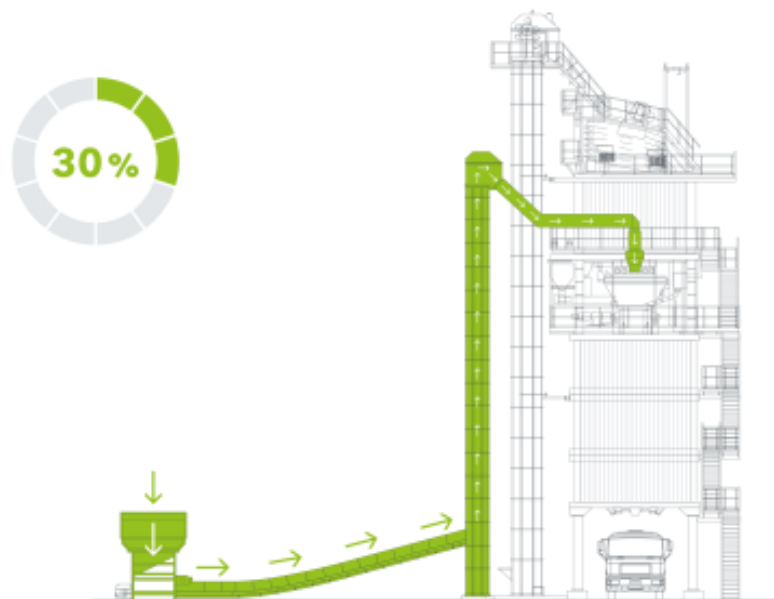
Z pohledu technologie výroby se jedná o klasickou šaržovou obalovnu, kde probíhá výroba asfaltových směsí přerušovaně. Jedná se o nejrozšířenější způsob přidávání R-materiálu v České republice vzhledem k tomu, že necelá polovina všech obaloven v České republice je vybavena zařízením, umožňujícím přidávat R-materiál za studena. R-materiál je dávkován stejnou cestou jako nové kamenivo, nebo je dávkován přímo do míchačky obalovny přes samostatnou váhu. [37]

Tyto způsoby přidávání R-materiálu vyžadují potřebu přehřátí nového kameniva na vyšší teplotu, aby se R-materiál ohřál stykem s kamenivem, s ohledem na výslednou teplotu směsi a vlhkost, kterou zpracováváný R-materiál obsahuje. Tato varianta přidávání však s sebou přináší problémy. Vzhledem k přidávání studeného, často nezastřešeného R-materiálu dochází při jeho styku s kamenivem nahřátým na vysokou teplotu ke vzniku vodní páry, kterou je nutno odvětrávat. Toto odvětrávání snižuje výkon obalovny a zpomaluje výrobu, protože samotné odvětrávání zabere přibližně polovinu času jednoho cyklu míchání. [24]

Na obrázku č. 8 můžeme vidět dávkování R-materiálu stejnou cestou jako nové kamenivo. Při této metodě se doporučuje přidávat maximálně 25 % R-materiálu. Na obrázku č. 9 vidíme dávkování R-materiálu přes samostatnou váhu přímo do míchačky obalovny. Při této metodě se doporučuje přidávat maximálně 30 % R-materiálu. [38]



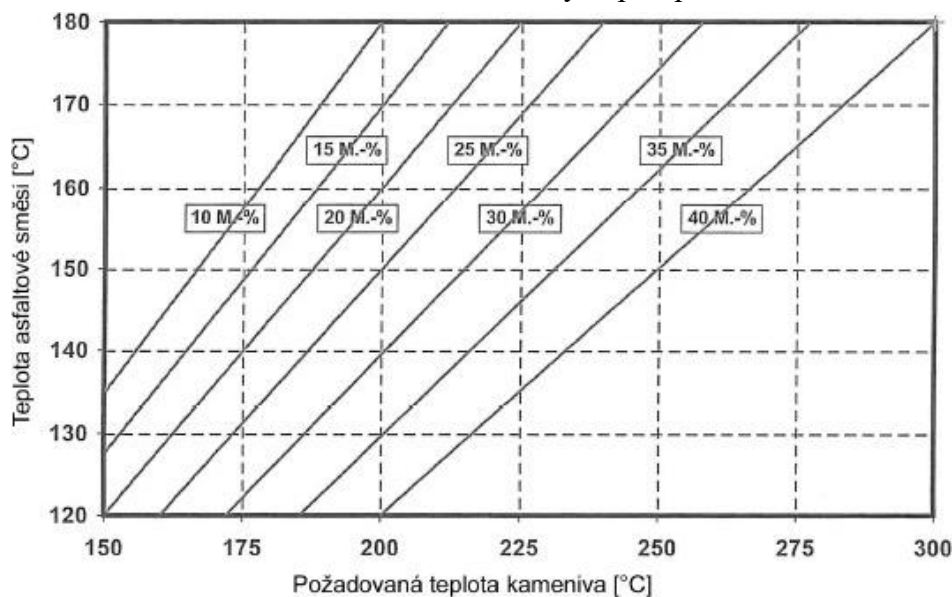
Obrázek č. 8: Dávkování R-materiálu stejnou cestou jako nové kamenivo [38]



Obrázek č. 9: Dávkování R-materiálu přes samostatnou váhu přímo do míchačky obalovny [38]

Snížit vlhkost R-materiálu při dávkování je možné prostřednictvím zastřešení skládek R-materiálu na obalovně a jeho uložení na pevném, dobře odvodněném povrchu, což zabrání absorpci vlhkosti z podloží skládky. V závislosti na vlhkosti R-materiálu je doporučeno navýšit teploty nově přidávaného kameniva.

Vzhledem k nutnosti nahřívát přidávané kamenivo na vyšší teplotu hrozí při jeho styku s pojivem obsaženým v R-materiálu mimo jiné nebezpečí jeho degradace a zrychlené stárnutí (přepálení). Nutnost nahřívání nového kameniva na velmi vysoké teploty lze doložit schématem získaného z německých předpisů. [37]



Obrázek č. 10: Požadovaná teplota nově přidávaného kameniva v závislosti na množství R-materiálu (10–40 %) a požadované výsledné teploty vyrobené směsi [39]

2.3.2 Přidávání R-materiálu za tepla pomocí paralelního bubnu

Dávkování předehřátého R-materiálu umožňuje na rozdíl od přidávání R-materiálu za studena do šaržové obalovny použít při výrobě směsi až 100 % R-materiálu. Touto metodou je R-materiál před vstupem do míchačky šaržové obalovny nejprve předehřátý v paralelním bubnu na teplotu 120 °C až 130 °C. Hlavním znakem tohoto technického řešení je, že paralelní buben je umístěn v horních patrech obalovny. Je zde však nutno upozornit na skutečnost, že jen velmi málo obaloven asfaltových směsí v České republice (cca do 10) je vybaveno paralelním bubnem. [40]

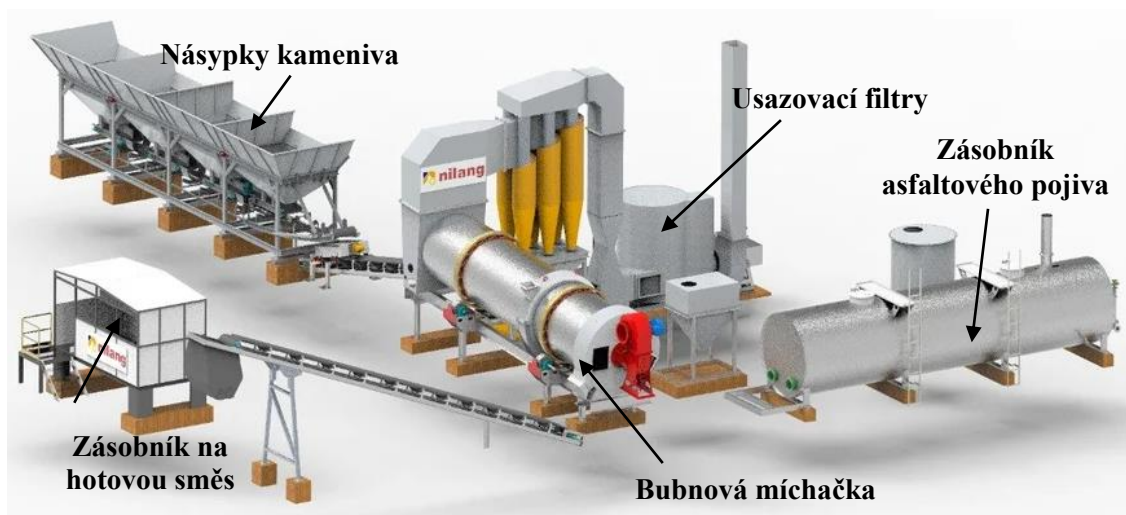
V paralelním bubnu se R-materiál nahřívá na teplotu mezi 120 °C až 130 °C a je ošetřen rejuvenační přísadou pro obnovení vlastností asfaltových pojiv před dávkováním do míchačky obalovny. Tento postup umožňuje dávkování nahřátého R-materiálu bez nutnosti vysoké teploty nově přidaného kameniva, čímž se minimalizuje riziko nadměrné degradace pojiva v R-materiálu, jak by tomu bylo při dávkování za studena. Tím se také předchází tvorbě vodní páry.



Obrázek č. 11: Obalovna s paralelním bubnem, Česká republika – Praha [41]

2.3.3 Přidávání R-materiálu v kontinuální obalovně

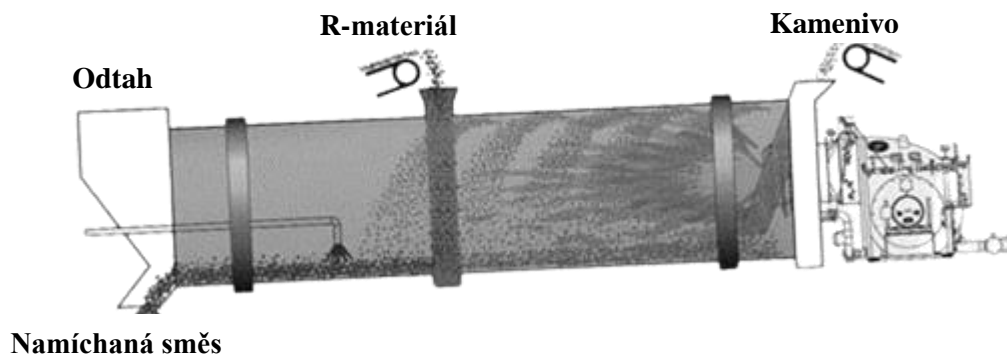
V Evropě se s kontinuální výrobou asfaltových směsí téměř nesetkáme, ale například v USA je skoro 80 % obaloven kontinuálních. Nevýhodou je nutnost konstantní kvality vstupních materiálů a nezastavitelný proces výroby. V tomto typu obalovny se R-materiál dávkuje ve střední části sušícího a ohřívacího bubnu průběžně, následně se míchá s kamenivem a asfaltovým pojivem, popřípadě probíhá míchání v samostatné míchací jednotce. [42]



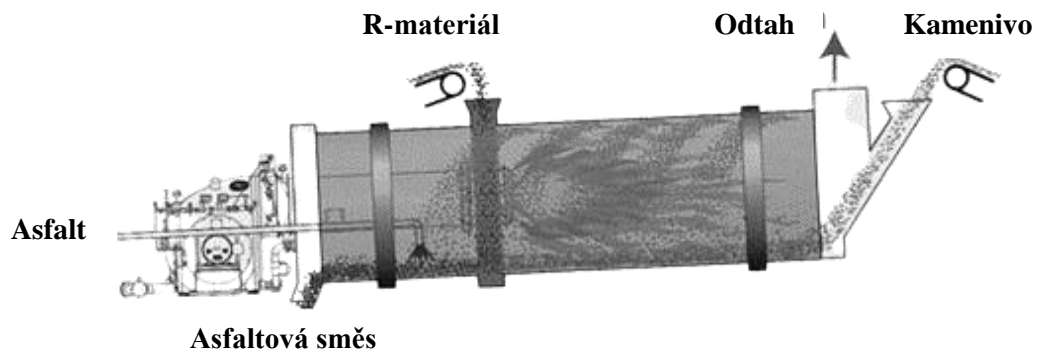
Obrázek č. 12: Schéma kontinuální obalovny

Z konstrukčního pohledu je možno R-materiál dávkovat třemi způsoby:

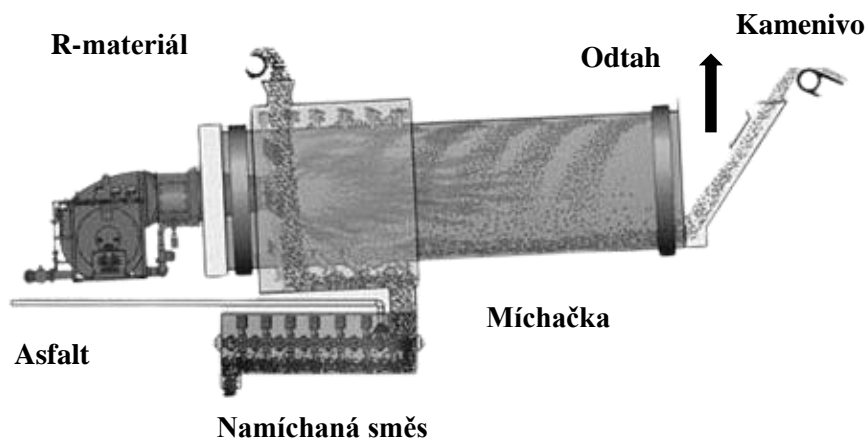
- R-materiál je přidáván souběžně s proudem horkého vzduchu – viz obrázek č. 13,
- R-materiál je přidáván proti proudu horkého vzduchu – viz obrázek č. 14,
- R-materiál je vysušen separátně a teprve poté dochází k míchání směsi v oddělené míchačce – viz obrázek č. 15.



Obrázek č. 13: Systém přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu [43]



Obrázek č. 14: Systém přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu [43]



Obrázek č. 15: Separátní systém vysoušení R-materiálu [43]

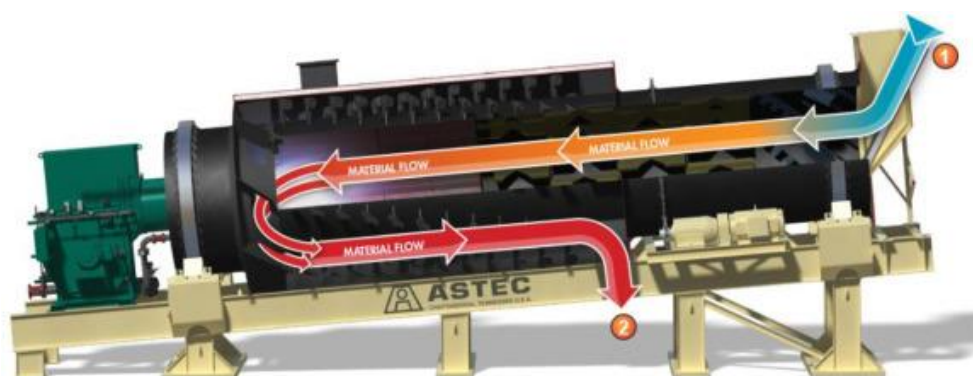
Kontinuální obalovny kombinují sušící buben a míchačku asfaltové směsi do jednoho bubnu, který suší kamenivo, ohřívá ho na míchací teplotu, přidává asfaltové pojivo, míchá s kamenivem a následně ukládá hotový produkt na dopravník, který ho přepraví do zásobníku. Vše se děje kontinuálně.

Kontinuálního procesu výroby asfaltových směsí je dosaženo pomocí počítačového řízení a vážicích zařízení, která okamžitě váží kamenivo při vstupu do sušičky/míchačky. Počítač ví, jak dlouho potrvá, než se kamenivo dostane od jednoho konce bubnu na druhý, takže může aplikovat přesně správné množství asfaltového pojiva.

Dokud nejsou zásobníky vyrobené asfaltové směsi plné, kontinuální obalovna se nemusí zastavit. Proto tento typ obalovny může dosahovat velmi vysokých výrobních objemů. [44]

2.3.4 Přidávání R-materiálu pomocí dvouplášťového bubnu

Jiným typem zařízení jsou obalovny využívající speciální dvouplášťový buben s nepřímým zahříváním R-materiálu. Tento buben se skládá z vnější a vnitřní části. Kamenivo je vloženo do vnitřní části a po předehřátí proudem horkého plynu propadá do vnější části, kde probíhá ohřev R-materiálu. Zde dochází k promísení složek společně s filerem a asfaltových pojivem. [45]



Obrázek č. 16: Princip dvouplášťového bubnu [46]

2.4 Stárnutí asfaltových pojiv

Asfaltové pojivo je materiál organického původu, který podléhá degradačním procesům. Doposud bylo celkem objeveno přes 15 procesů, které způsobují změny ve struktuře asfaltového pojiva. [47]

Asfaltové pojivo, které obsahuje recyklovaný materiál, má odlišné vlastnosti než původní pojivo, a to z důvodu stárnutí asfaltových pojiv. Technicky vzato, toto pojivo je tvrdší a křehčí. Základní empirické zkoušky asfaltového pojiva podle ČSN EN 1426, ČSN EN 1427 a ČSN EN 12593 ukazují obecně nižší penetraci, vyšší teplotu bodu měknutí a vyšší teplotu bodu lámavosti podle Fraasse zpětně získaného pojiva z R-materiálu. Se zvyšujícím se množstvím R-materiálu v za horka vyráběných asfaltových směsí je nezbytné počítat s riziky, kterým je nutné během výroby předcházet. [37]

Při dávkování R-materiálu do nově vyráběné asfaltové směsi bez jeho ošetření by došlo k odchylce vlastností pojiva, a to zejména v jeho deklarované gradaci. Stanovení maximálního množství přidaného R-materiálu lze provést na základě poznatků uvedených v kapitole 2.1.7. [48]

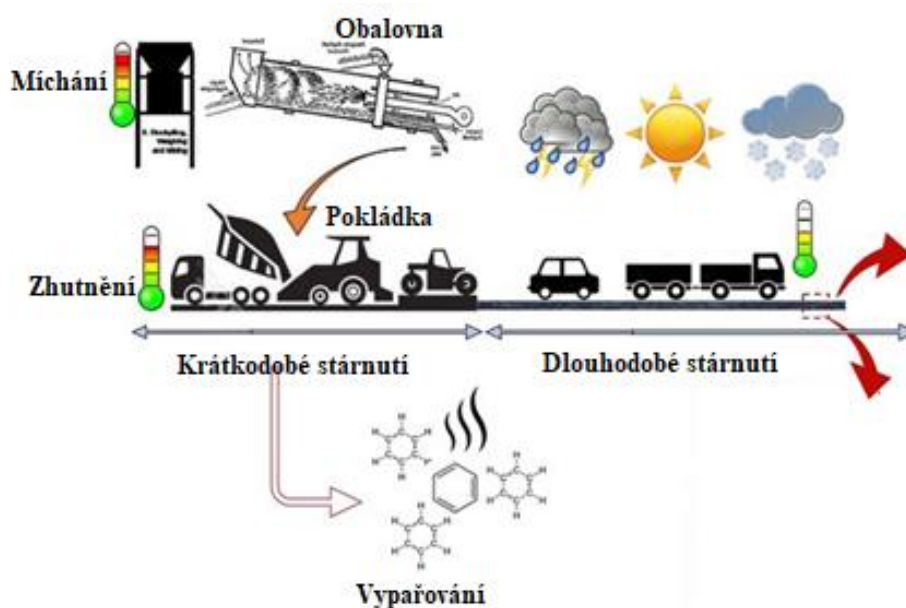
2.4.1 Mechanismy stárnutí

Procesy degradace, obvykle označované jako stárnutí, ovlivňují vlastnosti asfaltového pojiva a jeho odezvu na různé mechanické a teplotní vlivy. Stárnutí zahrnuje změny fyzikálně-chemických vlastností, které se s časem u asfaltových pojiv mění. Obvykle se pojivo stává tužším a křehčím, což se projevuje posunem teplot, při kterých je pojivo funkční.

Tímto procesem se zvyšuje odolnost pojiva vůči trvalým deformacím, ale současně se snižuje jeho odolnost vůči mrazovým podmínkám a opakovanému zatížení. Kombinace vlivů provozu a teplotních změn může způsobit vznik trhlin, což má za následek postupné zhoršování stavu vozovky a vyžaduje opravy nebo dokonce odstranění poškozené vrstvy. [49]

Stárnutí asfaltových pojiv je proces, který začíná již v průběhu výroby asfaltových směsí, pokračuje během skladování, zpracování, dopravy, pokládce asfaltových směsí a trvá i během jejich plánované životnosti. Během času dochází především ke změnám reologických vlastností asfaltových pojiv. [50]

Proces stárnutí asfaltového pojiva je výrazně ovlivněn místem, kde se daná asfaltová směs nachází, specifickými klimatickými podmínkami, působení vzdušného kyslíku, vlhkosti, chemickými látkami, ultrafialovým zářením a také typem asfaltové směsi, její mezerovitosti a tloušťkou asfaltové vrstvy. [48] [51]



Obrázek č. 17: Schéma krátkodobého a dlouhodobého stárnutí vozovek [52]

Jak již bylo zmíněno, vlastnosti asfaltových pojiv se v čase mění. Je proto nezbytné vyhodnocovat vlastnosti jednotlivých pojiv nejen před vlastní výrobou asfaltové směsi, ale taktéž po výrobě, přepravě a pokládce asfaltové směsi. Vlastnosti pojiv je důležité vyhodnocovat také v průběhu životnosti asfaltové vozovky, jelikož právě tyto vlastnosti jsou zásadní pro trvanlivou vozovku. [53]

Podle převažujícího vlivu, který negativně působí na asfaltové směsi můžeme stárnutí rozdělit na:

- stárnutí destilační,
- stárnutí termooxidační,
- stárnutí exudační,
- stárnutí strukturální.

Destilační stárnutí je nejvýrazněji patrné při vystavení asfaltů vysokým teplotám. Při zvýšených teplotách určité asfalty mohou začít rozkládat uhlovodíkové molekuly, což vede k tvorbě nízkomolekulárních sloučenin nebo odpařování lehkých olejovitých složek. Množství odpařených lehkých frakcí stoupá s rostoucí teplotou, vyšší gradací asfaltu nebo se zvětšujícím se povrchem vzorku. Vzhledem k tomu, že odpaření těchto lehkých frakcí zvyšuje tuhost asfaltu, je žádoucí minimalizovat jejich obsah v asfaltových pojivech. Z tohoto důvodu se například při simulaci stárnutí metodou RTFOT podle ČSN EN 12607-1 sleduje změna hmotnosti. [9]

Exudační stárnutí, známé také jako migrační procesy, probíhá při normálních teplotách a pomaleji než destilační stárnutí. Tento jev nastává, pokud je do asfaltového pojiva přidáno malé množství fluxačních olejů nebo pokud není výrobní proces dostatečně optimalizován, což může vést k pozdější křehkosti asfaltu. Během těchto migračních procesů dochází ke shlukování asfalténů a pronikání asfaltových olejů do kameniva, což vede ke ztrátě plasticity, elasticity asfaltového pojiva a jeho křehnutí. [54]

Strukturální stárnutí nastává, když je asfaltové pojivo dlouhodobě vystaveno nízkým teplotám. Tento proces nesouvisí s chemickými změnami v materiálu, ale spíše se zdá být důsledkem reorganizace a stabilizace jednotlivých molekul. Během posuzování fyzikálních vlastností asfaltového pojiva může strukturální stárnutí způsobovat zdánlivé zvýšení tuhosti materiálu, avšak toto zvýšení je hlavně ovlivněno historií teploty, které byl vzorek vystaven. [54]

Nejvýznamnější dopad na vlastnosti asfaltů má **termooxidační stárnutí**. Probíhá postupně a dlouhodobě v důsledku interakce asfaltu s okolním vzduchem. Čím je teplota vyšší, tím intenzivnější je oxidační proces. Každé zvýšení teploty o 10 °C zdvojnásobuje rychlost této reakce. Dochází k vytváření polárních kyslíkatých sloučenin, které se sdružují do složitých struktur, což zvyšuje viskozitu, tvrdost a křehkost asfaltu. Oxidační stárnutí začíná postupně a urychluje se s rostoucí koncentrací radikálů. V případě nízké koncentrace radikálů bývá jejich aktivita omezena a do řetězových reakcí vstupují jen zřídka. [37]

Stárnutí asfaltové směsi můžeme obecně také rozdělit na:

- **Krátkodobé stárnutí** – probíhá v řádu několika hodin. Začíná již během výroby asfaltové směsi, kdy horké kamenivo přichází do kontaktu s rozehrátým asfaltovým pojivem. Tento proces pokračuje během transportu, pokládky a zhutňování asfaltové směsi.
- **Dlouhodobé stárnutí** – po dokončení krátkodobého procesu stárnutí, tedy poté, co je asfaltová směs zhutněna na vozovce, začíná dlouhodobé stárnutí, které pokračuje až do konce životnosti asfaltové vozovky. Tento proces trvá obvykle několik let až desetiletí. [51]

2.4.2 Simulace stárnutí v laboratorních podmínkách

V laboratoři by mělo být uměle stárnutí velmi blízké reálnému degradačnímu procesu. K simulaci stárnutí asfaltového pojiva a směsi můžeme v laboratorních podmínkách využít hned několik metod:

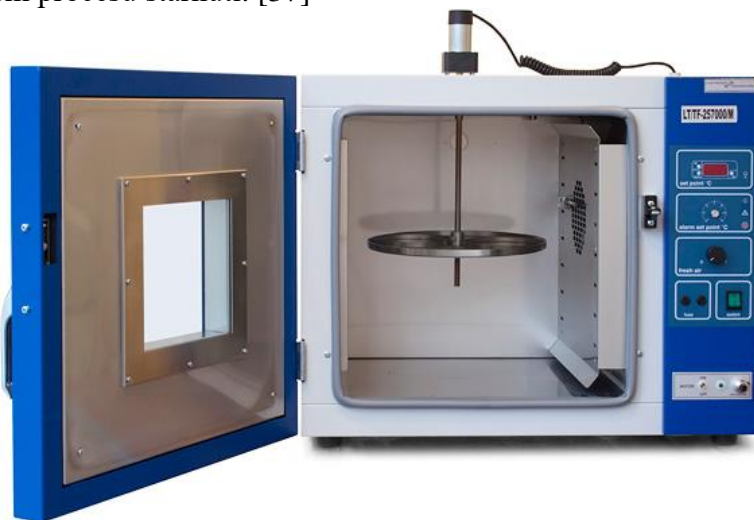
- stárnutí samotného asfaltového pojiva,
- simulace stárnutí pojiva vloženého do asfaltové směsi,
- stárnutí volně uložené směsi,
- stárnutí na zhutněných zkušebních vzorcích. [55]

Dále je možné simulaci stárnutí rozdělit na krátkodobou simulaci stárnutí (krátkodobé stárnutí) a dlouhodobou simulaci stárnutí (dlouhodobé stárnutí). Krátkodobá simulace zahrnuje procesy stárnutí asfaltu při aplikaci pojiva na kamenivo a při pokládce a hutnění vrstvy. Dlouhodobá simulace představuje zhoršení asfaltu vloženého do zhutněné vrstvy asfaltové směsi.

2.4.2.1 Laboratorní metody simulace krátkodobého stárnutí

a) Zkouška tepelné stálosti tenkého filmu (TFOT – Thin Film Oven Test)

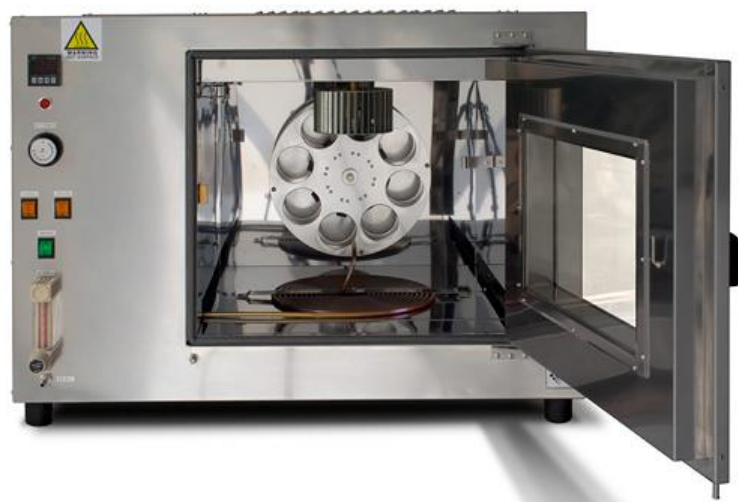
Zkouška podle ČSN EN 12607-2 spočívá v nalití asfaltového pojiva na rovnou misku, vytvářející vrstvu tloušťky 3,2 mm. Tato miska je umístěna do sušárny s nuceným prouděním vzduchu na otáčející se police, které rotují rychlostí 5,5 otáček za minutu. Standardně se zkouška provádí po dobu pěti hodin při teplotě 120 °C nebo 163 °C. Hodnota degradace pojiva je stanovena na základě změny hmotnosti nebo změnou jeho vlastností během procesu stárnutí. [37]



Obrázek č. 18: Zkušební zařízení pro zkoušku tepelné stálosti tenkého filmu [56]

b) Zkouška tepelné stálosti v tenké pohyblivé vrstvě (RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test)

Stárnutí pojiva je simulováno podle postupu popsání v ČSN EN 12607-1. Během této zkoušky se pojivo vystavuje stárnutí v sušárně s dvojitou stěnou a elektrickým ohřevem nastaveným na teplotu 163 °C. Pojivo je umístěno do osmi válcovitých skleněných nádobek, které jsou ohřívány horkým vzduchem z trysky. Účinek tepla a vzduchu se posuzuje prostřednictvím změny hmotnosti pojiva nebo vlastnostmi asfaltového pojiva, které jsou hodnoceny před a po stárnutí. Pro popis změn vlastností jsou využívány zkoušky penetrace jehlou, bodu měknutí nebo dynamické viskozity. Změny vlastností pojiva po stárnutí mohou být také interpretovány pomocí reologických charakteristik získaných z dynamického smykového reometru. [57]



Obrázek č. 19: Zkušební zařízení pro zkoušku tepelné stálosti v tenké pohybuující se vrstvě [58]

c) Zkouška krátkodobého stárnutí metodou RFT (Rotating Flask Test)

Metoda zkoušky je podle standardu ČSN EN 12607-3. Během této zkoušky se asfaltové pojivo vystavuje stárnutí v baňce rotačního vakuového destilačního zařízení při teplotě obvykle 165 °C po dobu 150 minut. Hodnota stárnutí pojiva se posuzuje na základě změny hmotnosti nebo modifikaci základních charakteristik pojiva (například penetrace, bod měknutí nebo dynamická viskozita před a po procesu stárnutí). [59]

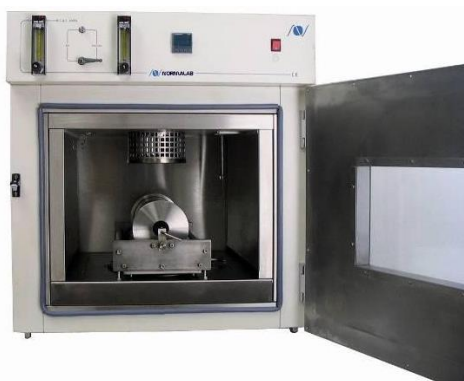


Obrázek č. 20: Zkušební zařízení pro zkoušku krátkodobého stárnutí metodou RFT [60]

2.4.2.2 Laboratorní metody dlouhodobého stárnutí

a) Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT – Rotating Cylinder Ageing Test)

Metoda popsaná v normě ČSN EN 15323 popisuje vstřikování kyslíku do horizontálně umístěného ocelového válce, který rotuje a obsahuje pojivo, v laboratorní sušárně s teplotou 85 °C po dobu 140 hodin. Hodnocení míry stárnutí pojiva se provádí na základě změn jeho vlastností, jako je penetrace nebo bod měknutí, před a po simulování stárnutí. [61]



Obrázek č. 21. Zkušební zařízení pro zkoušku metodou rotujícího válce [62]

b) Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV – Pressure Ageing Vessel)

Postup zkoušky uvedený v ČSN EN 14769 zahrnuje umístění zestárlého pojiva metodou RTFOT do miskách s nepohybující se vrstvou o tloušťce přibližně 3,2 mm do tlakové nádoby předehřáté na zkušební teplotu (běžně 85 °C–110 °C) za pracovního tlaku vzduchu 2,1 MPa. Standardní doba stárnutí je obvykle 20 nebo 65 hodin. Hodnocení vlivu urychleného dlouhodobého stárnutí probíhá pomocí změn vlastností asfaltového pojiva, které jsou měřeny před a po stárnutí. [63]



Obrázek č. 22: Zkušební zařízení pro zkoušku stárnutí v tlakové nádobě [64]

2.4.3 Hodnocení náchylnosti asfaltových pojiv ke stárnutí

Samotné požadavky na asfaltová pojiva v rámci jejich stárnutí jsou aktuálně specifikovány v normách pro asfaltová pojiva ČSN EN 12591 (specifikace pro silniční asfalty) a ČSN EN 14023 (specifikace pro polymerem modifikované asfalty). V těchto normách se stanovují požadavky na změnu hmotnosti, zbylou penetraci a zvýšení bodu měknutí po simulaci stárnutí metodou RTFOT (případně RFT). Avšak tyto požadavky se zaměřují výhradně na změnu vlastností pojiv po krátkodobém stárnutí. Pro vyhodnocení dlouhodobého stárnutí lze využít testu PAV podle ČSN EN 14769. [37]

Normy stanovující limity pro silniční asfalty v kontextu stárnutí byly původně formulovány poměrně benevolentně. To vedlo k situaci, kdy i pojiva, jež prokazovala známky zrychleného stárnutí během své životnosti ve vozovce, splňovala stanovené požadavky. Proto ministerstvo dopravy na základě výzkumných prací vydalo dokument s názvem *Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí*. Tato metodika má za cíl zavést jednoduchý postup simulace stárnutí a zároveň stanovit limity pro hraniční hodnoty.

Metodika provádí hodnocení náchylnosti ke stárnutí asfaltového pojiva metodou 3xRTFOT (tj. trojnásobná doba testu RTFOT) a vychází z postupu uvedeného v normě ČSN EN 12607-1. Čas expozice byl tedy prodloužen ze 75 minut na 225 minut. Pro posouzení termooxidačního stárnutí asfaltových pojiv jsou navrženy parametry v tabulce č. 14. [65]

Mezi výhody této zkoušky patří možnost využití stejného vybavení jako pro modelování krátkodobého stárnutí, což znamená úsporu finančních prostředků za nákup dalšího zařízení. Další výhodou je nižší časová náročnost této zkoušky oproti jiným zkouškám pro dlouhodobé stárnutí.

Hlavní nevýhodou je fakt, že tato zkouška není součástí evropských standardů a oxidace probíhá poměrně za vysokých teplot. [54]

Tabulka č. 14: Požadované vlastnosti silničních asfaltů gradace 50/70 a 70/100 po stárnutí metodou 3xRTFOT [65]

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	-	≤ 15násobek

2.5 Možnosti oživení zestárlého pojiva

Přidání vyššího podílu R-materiálu do asfaltových směsí významně ovlivňuje jejich vlastnosti. Zvýšení podílu R-materiálu ve směsi obvykle způsobuje zvýšení tuhosti a snížení odolnosti vůči únavě a teplotním změnám. Tento nárůst tuhosti je zapříčiněn přítomností zestárlého pojiva v R-materiálu, které se vyznačuje shlukováním asfalténů (tj. nerozpustných tuhých látek obalených pryskyřicemi) a pronikáním fluxačních olejů do kameniva. To vede ke křehnutí pojiva, které postupně ztrácí svou pružnost. Pro zabránění tomuto jevu se využívají tzv. oživovací přísady během výroby asfaltových směsí. Bez ošetření dávkovaného R-materiálu do nově vyráběné asfaltové směsi by od určitého dávkování R-materiálu došlo k vybočení deklarované gradace (nově dávkovaného) pojiva. [66] [67]

Zpětně získané asfaltové pojivo z R-materiálu by z pohledu základních empirických zkoušek pojiva vykazovalo nižší hodnotu penetrace podle ČSN EN 1426, vyšší teplotu bodu měknutí podle ČSN EN 1427 a vyšší teplotu bodu lámavosti podle Fraasse dle ČSN EN 12593. [37]

Použití oživovacích přísad přináší řadu výhod v oblasti technologie a logistiky. Jednou z nich je možnost téměř neomezeného využití R-materiálu, což snižuje nároky na těžbu kameniva a objem přepravovaného materiálu. Dále usnadňuje přidání přísady bez nutnosti zakládání dalšího skladovacího prostoru v areálu obalovny.

Existuje několik možností oživení zestárlého asfaltového pojiva. Tyto přísady ideálně obnovují nejen chemickou strukturu pojiva, ale i jeho mechanické a fyzikální vlastnosti, včetně odolnosti proti termooxidačním změnám v průběhu času. Kvalifikovaná oživovací přísada musí splňovat několik zásadních požadavků:

- oživit zestárlé pojivo za účelem snížení jeho tuhosti a navrácení některých vlastností na hodnoty podobné silničnímu asfaltu požadované kategorie,
- změnit vlastnosti asfaltového pojiva v R-materiálu tak, aby se nesnížila trvanlivost asfaltové směsi po dlouhodobém stárnutí,
- zajistit přítomnost dostatečného množství asfaltového pojiva, aby došlo k řádnému obalení zrn kameniva v asfaltové směsi a zároveň, aby byly splněny požadavky na vlastnosti asfaltových směsí. [68]

Jednotlivé možnosti oživení zestárlého pojiva jsou popsány níže.

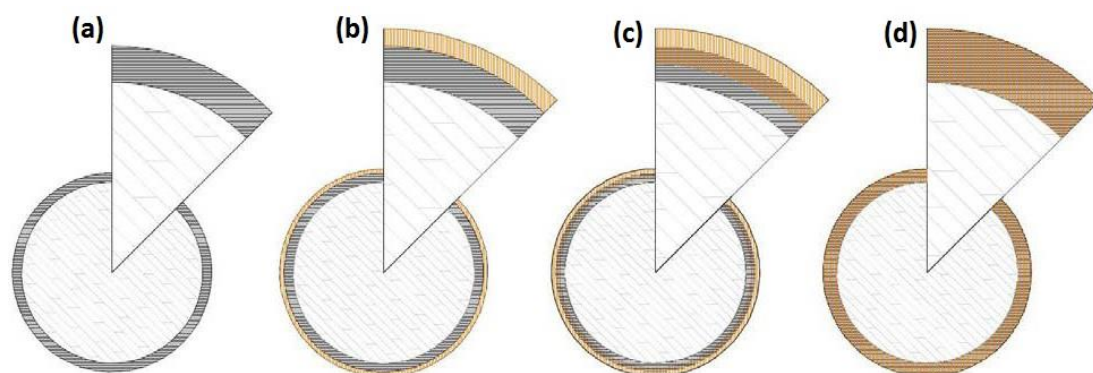
2.5.1 Přidání asfaltového pojiva vyšší gradace

Jednou z variant, jak oživit zestárlé asfaltové pojivo v R-materiálu, je relativně jednoduchý postup přidání asfaltového pojiva vyšší gradace. Při výrobě asfaltové směsi v obalovně se přidává nové pojivo s nižší viskozitou (vyšší hodnotou penetrace dle ČSN EN 1426). Na základě znalosti parametrů zestárlého pojiva a množství přidaného R-materiálu do nové směsi lze vypočítat optimální množství pojiva s vyšší hodnotou penetrace. Při požadavku na novou směs s pojivem 50/70 by bylo možné použití „měkčího“ pojiva gradace 70/100, 100/150 nebo 160/220. Oživení zestárlého pojiva pojivem vyšší třídy je definováno v normě ČSN EN 13108-1. [69] [37]

V získaných vzorcích asfaltového pojiva, které bylo zpětně získáno, byly analyzovány reologické parametry pomocí dynamického smykového reometru. Na základě těchto výsledků autoři dospěli k následujícím závěrům:

- během míchání došlo pouze k částečnému promísení a vlastnosti pojiva se v různých vrstvách filmu liší,
- přidání „měkčího“ pojiva umožňuje změnit vlastnosti pojiva obsaženého v R-materiálu, zejména v horní vrstvě pojiva. [37]

Sledování míry promísení pojiva je možné pomocí tzv. postupné extrakce pojiva. Proces difuze nového pojiva a pojiva z R-materiálu je znázorněn na obrázku č. 23. Během této studie byla provedena extrakce pojiva z asfaltové směsi obsahující nově přidané pojivo o kvalitě 160/220, aby byl získán vzorek pojiva z vrchní, střední a vnitřní vrstvy asfaltového filmu, který obaluje kamenivo.



- (a) Pouze pojivo z R-materiálu
(b) Pojivo z R-materiálu + nové pojivo, žádné promísení
(c) Pojivo z R-materiálu + nové pojivo, částečné promísení
(d) Pojivo z R-materiálu + nové pojivo, úplné promísení

Obrázek č. 23: Jednotlivé fáze difuze nového pojiva a pojiva z R-materiálu [37]

Jedna z nevýhod této jednoduché technologie přidávání asfaltového pojiva vyšší gradace je fakt, že obalovna asfaltových směsí musí být vybavena dalším zásobníkem asfaltového pojiva, ve kterém je toto „měkčí“ pojivo skladováno. Další nevýhodou je omezené užití, oživit vlastnosti pomocí asfaltového pojiva vyšší gradace lze v případě dávkování R-materiálu v množství do 30 až 50 %. [69]

Tato metoda oživení přináší naopak výhodu v tom, že použití o jednu nebo dvě gradace „měkčího“ pojiva v kombinaci s dokonalým promísením může vést nejen ke změkčení zestárlého pojiva, ale také k obnovení jeho fyzikálních a chemických vlastností.

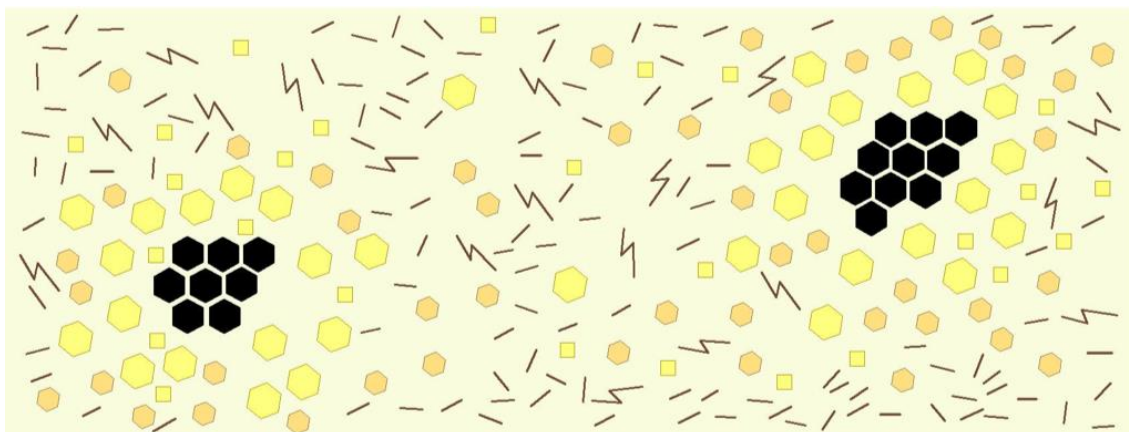
2.5.2 Přidání změkčovacích přísad

K pochopení účelu rejuvenátorů a změkčovacích přísad v R-materiálu je vhodné si připomenout životní cyklus konstrukce vozovky a stárnutí asfaltového pojiva v asfaltové směsi zmíněné v kapitole 2.4 *Stárnutí asfaltových pojiv*. Chemické složky v asfaltových pojivech se posuzují podle zastoupení skupin:

- tekuté složky – označované jako maltény: saturáty (nasyčené oleje), aromáty (aromatické oleje), pryskyřice (polární vysokomolekulární látky),
- pevné složky – označované jako asfaltény (polární makromolekulární látky). [70]

Pokud je množství R-materiálu vyšší jak 50 %, je efektivnější způsob oživení použitím oživovacích přísad. Oproti použití pojiva vyšší gradace je výhoda oživovacích přísad v použití libovolného množství R-materiálu. Prvním typem oživovacích přísad jsou přísady fluxační (změkčující). Tyto přísady pouze snižují viskozitu zestárlého asfaltového pojiva a z dlouhodobého hlediska nejsou schopna zabránit tvorbě mrazových a únavových trhlin. Při zvýšených provozních teplotách může jejich oživující účinek dokonce zcela zaniknout. [68]

Přidání fluxační přísady nemá za následek rozptýlení shluků asfalténů, ale pouze zředění malténové fáze, jak je patrné na obrázku č. 24. Během stárnutí asfaltového pojiva v R-materiálu dojde k nárustu podílu asfalténů ve srovnání s maltény. Očekává se, že přidáním oživovací přísady dojde ke zvýšení malténové fáze ve srovnání s asfalténovou v zestárlém pojivu.

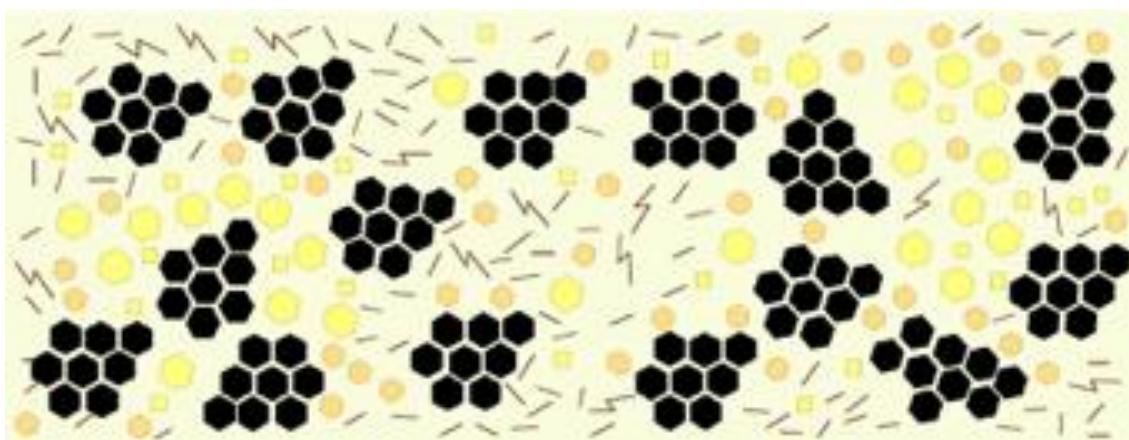


Obrázek č. 24: Působení změkčující přísady [68]

2.5.3 Přidání rejuvenační přísady

Druhým typem oživovacích přísad jsou tzv. rejuvenátory (oživovače). Tyto přísady kromě snížení viskozity obnovují fyzikální a chemické vlastnosti zestárlého pojiva. Rejuvenátory na rozdíl od fluxačních přísad úspěšně oživují zestárlé asfaltové pojivo a přerušují proces shlukování asfalténů. Na obrázku č. 25 můžeme vidět rozptýlení shluků asfalténů v asfaltovém pojivu. [68]

Rejuvenátory by neměly být označovány za látky, které pouze snižují viskozitu zestárlého asfaltového pojiva prostřednictvím ředění malténové fáze pomocí látek s nízkou polaritou, jako jsou nasycené uhlovodíky. Tyto látky nepřerušují proces shlukování asfalténů a nezabrání dlouhodobě vzniku nízkoteplotních nebo únavových trhlin. Navíc mají tendenci být více těkavé, což může vést k migraci oživovacích přísad při vyšších letních teplotách, čímž efekt oživení v podstatě zaniká. [48]



Obrázek č. 25: Působení rejuvenační přísady [68]

Většina běžně dostupných rejuvenátorů užívaných v České republice se získává následujícím způsobem:

- rerafinace použitých mazacích olejů (odpadní motorové oleje, destilační zbytky z rerafinace odpadních motorových olejů),
- rafinace ropných produktů se složkami polárních aromatických olejů,
- uhlovodíky upravené pro modifikaci asfaltu,
- fytooleje (oleje získávané z rostlinných zdrojů) získávané zpracováním rostlin,
- oleje získané z živočišných tuků.

Rejuvenátory hrají klíčovou roli v obnovení fyzikálních a chemických vlastností. Často zahrnují extrakty z olejů, které mají vysoký obsah maltenických složek (nafteny a polární aromatické sloučeniny). Tyto složky přispívají k obnovení složení zestárlého pojiva, které se postupem času ztrácí v průběhu užívání. Je důležité, aby rejuvenátory obsahovaly vysoký podíl aromátů, které jsou nezbytné pro zachování asfalténů, a zároveň obsahovaly minimální množství saturátů, které nejsou kompatibilní s asfaltény.

Účinnost rejuvenátorů závisí na jejich rovnoměrném rozložení v asfaltové směsi a schopnosti absorpce do zestárlého pojiva, které obklopuje kamenivo. Pokud je směs připravována v obalovně, je důležité zajistit, aby se rejuvenátor dostatečně rozmístil v R-materiálu. Absorpce oživovače do zestárlého pojiva probíhá následujícím způsobem:

1. Rejuvenátor vytvoří tenkou vrstvu nízkoviskózního obalu kolem asfaltem obaleného kameniva.
2. Rejuvenátor postupně proniká do vrstvy zestárlého pojiva, což způsobuje změkčení pojiva a ztrátu na povrchu kameniva.
3. Poté, co je využit veškerý rejuvenátor, jeho pronikání stále probíhá. Dochází k postupnému snižování viskozity a zároveň k postupnému zvyšování viskozity vnější vrstvy.
4. Po určité době dojde k ustálení stavu napříč celým povrchem asfaltového filmu. [70]

V poslední době se rejuvenátory staly součástí preventivní údržby asfaltových vozovek. Tato technologie se aplikuje v počátečních fázích životnosti silnice, obvykle po 3 až 4 letech užívání. Využívají se zde speciální rejuvenační pečecí materiály. Tyto materiály jsou typicky aplikovány rovnoměrně přímo na povrch asfaltové vozovky. Jejich účelem je změkčit zoxidované asfaltové pojivo a tím prodloužit celou životnost vozovky. [71]

2.5.4 Použití asfaltového pojiva typu RC

Jedná se o speciálně navržené modifikované asfaltové pojivo určené pro účely recyklace. Při porovnání s konvenčním polymerem modifikovaným asfaltovým pojivem se zpravidla vyznačuje vyšším stupněm modifikace, přičemž pro výrobu může být například použito měkčího vstupního asfaltu, rejuvenátoru nebo pojivo může být chemicky zesíťované. Výsledkem by měla být vyšší kvalita těchto pojiv, která se může projevit například vyšší elasticitou nebo lepšími nízkoteplotními vlastnostmi. [72]

Při použití asfaltového pojiva typu RC jde o proces obnovy zestárlého pojiva, který je zejména vhodný pro R-materiál obsahující modifikovaný asfalt. Výrobci těchto pojiv označují tento typ zkratkou „PMB RC“ (Polymer modified bitumen for recycling). S rostoucím provozem na silnicích se stále častěji využívají modifikovaná pojiva při nových stavbách, což zvyšuje podíl tohoto typu R-materiálu. Jedná se o nejvíce kvalitní dostupný R-materiál, který lze získat. [37]

Tento materiál se většinou získává z opotřebovaných vrstev vozovek, kde jsou tradičně používána kameniva s vysokými parametry a obsahují polymerem modifikované pojivo. Tím lze využít zbytkový potenciál modifikátorů. Nicméně tato problematika je poměrně složitá, protože v R-materiálu se mohou vyskytovat různé typy modifikátorů.

2.5.5 Vlastnosti oživovacích přísad

Aby oživovací přísady splňovaly požadavky pro použití v asfaltových pojivech, musí vyhovovat následujícím kritériím:

- nesmí představovat riziko pro zdraví a bezpečnost pracovníků nebo pro životní prostředí,
- měly by zlepšovat vlastnosti asfaltových pojiv za cenově přijatelných podmínek,
- při skladování směsi nesmí dojít k oddělení olejů od asfaltového pojiva nebo k chemickým změnám,
- musí zajistit správnou přilnavost ke kamenivu,
- měly by být dostupné v širokém množství a preferovány by měly být místní zdroje fluxačních olejů,
- po skončení životnosti by měly být recyklovatelné. [73]

2.5.6 Dávkování oživovací přísady během výroby

Je klíčové, aby výrobce pečlivě určil a zhodnotil, kde a jak lze oživovací přísadu aplikovat v procesu výroby. Způsoby míchání a postupy závisí na mnoha faktorech, včetně typu a vlastnosti oživovacích přísad, jejich kompatibility s existujícími zařízeními, fázováním a časováním míchání. V různých konfiguracích obaloven lze oživovací přísadu přidávat například k R-materiálu během drcení, skládkování, na dopravní pás R-materiálu, před vstupem do paralelního bubnu, na výstupu paralelního bubnu (před vstupem do míchačky) nebo do míchačky. Také je možné provádět dávkování přímo do síla asfaltového pojiva nebo na jeho váhu. Každý z těchto způsobů má své výhody i nevýhody. [69]

Každá oživovací přísada potřebuje čas k interakci se zestárým asfaltovým pojivem. Důležité je dosáhnout homogenního rozložení oživovací přísady pro získání efektivního regenerovaného asfaltového pojiva. Při dávkování na výstupu z paralelního bubnu je zestárý asfalt již přehřátý, což umožňuje oživovací přísadě do něj proniknout. Tímto způsobem se nejvíce optimalizuje doba, kterou má oživovací přísada k disperzi v regenerovaném asfaltu před dalším mícháním se zbývajících složkami. Tento postup lze aplikovat pouze tehdy, má-li oživovací přísada odpovídající teplotu vzplanutí a dobrou tepelnou stabilitu.

Přidání oživovací přísady během míchání vyžaduje zohlednění fáze a délky míchání. Samotné míchání probíhá na obalovně relativně rychle (25 až 45 sekund), a proto je důležité pečlivě zvažovat postupné přidání oživovací přísady k recyklovanému pojivu (nebo celé směsi), aby se dosáhlo požadovaných výsledků. [69]

2.5.7 Použité oživovací metody

V diplomové práci byly použity celkem 4 metody oživení zestárleho asfaltového pojiva v nově vyráběných asfaltových směsích.

První použitou metodou oživení zestárleho asfaltového pojiva bylo oživení pomocí rejuvenační přísady. Konkrétně byly použity dva rejuvenátory od různých výrobců v různém dávkování. Pro potřeby diplomové práce jsou jednotlivé rejuvenátory označeny římskými číslicemi.

2.5.7.1 Rejuvenátor I.

Tento rejuvenátor je vyvinut a vyráběn v České republice. Výrobek je určen pro rejuvenaci (změkčování, omlazování) zestárých asfaltových pojiv. Jedná se o rafinovaný rostlinný řepkový olej, především využívaný jako složka některých maziv. Neobsahuje žádné nebezpečné látky, při styku s pokožkou a sliznicí může způsobit mírné podráždění. Vzhledem ke své přírodní povaze nemá negativní vliv na životní prostředí.

Tabulka č. 15: Fyzikální a chemické vlastnosti Rejuvenátoru I.

Rejuvenátor I.	
Fyzikální a chemické vlastnosti	
Skupenství	Kapalina
Barva	Zelenomodrá
Zápach	Mírný
Bod tání (~ bod tekutosti)	< -9 °C
Hořlavost	Hořlavá kapalina
Bod vzplanutí	Nad 225 °C
Teplota samovznícení	Nad 400 °C
Teplota rozkladu	Nedochází k samovolnému rozkladu
Kinematická viskozita	6 mm ² /s při 20 °C
Rozpustnost	Nerozpustný ve vodě
Hustota	915 kg/m ³ při 15 °C
Třída nebezpečnosti	IV.
Reaktivita	Stabilní

Doporučená teplota skladování je 10 až 35 °C v místech chráněných před povětrnostními vlivy, v dobře uzavřených obalech. Musí se chránit před vniknutím vody. Doba použitelnosti je 2 roky.



Obrázek č. 26: Rejuvenátor I.

2.5.7.2 Rejuvenátor II.

Tento rejuvenátor je vyvinut a vyráběn v České republice. Přesné složení této oživovací přísady je obchodním tajemstvím výrobce. Podle bezpečnostního listu se jedná o látku určenou k rejuvenaci. Jedná se o směs topných olejů na bázi recyklovaných olejů získaných úpravou – procesem nízkoteplotní sedimentace, filtrací a míchání olejů splňující požadavky ČSN 65 6691 Ropné výrobky – Topné oleje na bázi odpadních olejů. Podle složení a informací o složkách se tento rejuvenátor skládá z 70 až 90 % z odpadních použitých olejů zařazených mezi nechlorované motorové, převodové a mazací oleje. Tato látka má podle bezpečnostního listu podezření na vyvolání rakoviny, která může mírně dráždit oči a kůži. Látka/směs je také závadná vodám.

Tabulka č. 16: Fyzikální a chemické vlastnosti Rejuvenátoru II.

Rejuvenátor II.	
Fyzikální a chemické vlastnosti	
Skupenství	Kapalina
Barva	Tmavě hnědá až černá
Zápach	Typický olejový, ropný
Hořlavost	Hořlavá kapalina
Bod vzplanutí	Nad 70 °C
Teplota samovznícení	Nad 400 °C
Teplota rozkladu	Informace není k dispozici
Kinematická viskozita	6 mm ² /s při 100 °C; >21,5 mm ² /s při 40 °C
Rozpustnost	Nemísitelný
Hustota	850 až 950 kg/m ³ při 20 °C
Třída nebezpečnosti	IV.
Reaktivita	Stabilní

Skladování se doporučuje v originálních, těsně uzavřených nádobách na dobře větraném, suchém a chladném místě, nejlépe v nádobách určených ke skladování topných olejů. Zakazuje se skladování spolu s látkami podporujícími hoření a samozápalnými látkami.

Informace jsou čerpány z bezpečnostních listů a osvědčení o vhodnosti výrobků, nicméně spousta informací podléhá obchodními tajemství a přesné složení jednotlivých rejuvenátorů nelze získat. Informace z bezpečnostních listů slouží pouze k správnější a bezpečnější manipulaci, skladování, dopravě a odstranění výrobků. Nelze na ně pohlížet jako na záruku nebo objasnění kvality výrobku.



Obrázek č. 27: Rejuvenátor II.

2.5.7.3 Přidání asfaltového pojiva vyšší gradace

Druhou použitou metodou oživení zestárlého asfaltového pojiva bylo přidání asfaltového pojiva vyšší gradace. Princip oživení této metody je popsán v kapitole 2.5.1 *Přidání asfaltového pojiva vyšší gradace*.

Pro oživení vlastností zestárlého asfaltového pojiva byl použit silniční asfalt 70/100.

Tabulka č. 17: Vlastnosti výrobku a tolerance silničního asfaltu 70/100 [74]

Silniční asfalt 70/100				
Parametr	Jednotka	Oblast		Zkušební metoda
		Min	Max	
Penetrace při 25 °C	0,1 mm	70	100	ČSN EN 1426
Bod měknutí KK	°C	43	51	ČSN EN 1427
Bod vzplanutí CoC	°C	230		ČSN EN ISO 2592
Rozpustnost	% hm.	99,0		ČSN EN 12592
Bod lámavosti dle Fraasse	°C		-10	ČSN EN 12593
Odolnost proti stárnutí				ČSN EN 12607-1
- Změna hmotnosti	% hm.		0,8	
- Nárůst bodu měknutí KK	°C		9	ČSN EN 1427
- Zbylá penetrace	%	46		ČSN EN 1426
Dodatečné zkoušky				
- Silová duktilita	J/cm ²		*	ČSN EN 13589, 13703
- Vlastnosti za nízkých teplot BBR	°C		**	
- Odolnost proti deformacím DSR	Pa, °		***	ČSN EN 14770

* T = 10 °C,
 ** teplota, při níž modul ohybové tuhosti dosahuje hodnoty 300 MPa (°C),
 *** komplexní smykový modul a fázový úhel při frekvenci 1,59 Hz v oblasti teploty 30 °C až 90 °C.

Silniční asfalt 70/100 se také běžně používá při výrobě asfaltových směsí obrusných, ložních i podkladních vrstev v silničním stavitelství a asfaltových směsí ve vodohospodářském stavitelství. Odpovídá silničnímu asfaltu dle ČSN EN 12591, tab. 1 a navazujícím předpisům.

2.5.7.4 Použití asfaltového pojiva typu RC

Třetí použitou metodou oživení zestárlého asfaltového pojiva bylo použití asfaltového pojiva typu RC. Princip oživení této metody je popsán v kapitole 2.5.4 *Použití asfaltového pojiva typu RC*.

Pro oživení vlastností zestárlého asfaltového pojiva bylo použito asfaltové pojivo PMB 45/80-55 RC a PMB 45/80-70 RC.

Tabulka č. 18: Vlastnosti výrobku a tolerance PMB 45/80-55 RC [75]

PMB 45/80-55 RC				
Parametr	Jednotka	Oblast		Zkušební metoda
		Min	Max	
Penetrace při 25 °C	0,1 mm	45	80	ČSN EN 1426
Bod měknutí KK	°C	55		ČSN EN 1427
Bod vzplanutí CoC	°C	235		ČSN EN ISO 2592
Bod lámavosti dle Fraasse	°C		-18	ČSN EN 12593
Odolnost proti stárnutí				ČSN EN 12607-1
- Změna hmotnosti	% hm.		0,5	
- Nárůst bodu měknutí KK	°C		0,5	ČSN EN 1427
- Zbylá penetrace	%	60		ČSN EN 1426
Dodatečné zkoušky				
- Silová duktilita	J/cm ²		≥ 3	ČSN EN 13589, 13703

2.5.7.5 Kombinace metod

Čtvrtou použitou metodou byla kombinace Rejuvenátoru II. s asfaltovým pojivem vyšší gradace, konkrétně silničního asfaltu 70/100. Užití „měkčího“ asfaltového pojiva pro obnovení zestárlých vlastností asfaltových pojiv je omezeno oborem použitelnosti, kdy se zvětšujícím se obsahem R-materiálu v nově vyráběné asfaltové směsi, klesá jeho efektivita. Proto pro vzorek asfaltové směsi s obsahem 50 % R-materiálu byla zvolena kombinace výše zmíněných metod.

3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce je porovnat vlastnosti zpětně získaných asfaltových pojiv z asfaltových směsí s R-materiálem, u kterých bylo při jejich výrobě zestárlé asfaltové pojivo oživováno různými metodami. Na vzorcích vyextrahovaného pojiva budou stanovovány vybrané empirické a funkční parametry pojiv.

Pro účely diplomové práce bylo získáno celkem čtrnáct různých vzorků zpětně získaných asfaltových pojiv z asfaltových směsí s různým obsahem R-materiálu, u kterých bylo zestárlé asfaltové pojivo oživováno různými metodami v různém dávkování. Pro možnost porovnání byl získán také jeden vzorek zpětně získaného asfaltového pojiva z asfaltové směsi, která neobsahuje žádný R-materiál.

Na všech patnácti vzorcích zpětně získaných asfaltových pojiv budou prováděny zkoušky stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426, stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427 a stanovení komplexního modulu ve smyku a úhel fázového posunu dle ČSN EN 14770. Výsledky zkoušek budou vyhodnoceny a pomocí znázornění grafickou formou budou prezentovány účinnosti jednotlivých oživovacích metod.

Pro stanovení reologických vlastností zpětně získaných asfaltových pojiv byl využit dynamický smykový reometr Kinexus. Konkrétně byly prováděny oscilační měření s danou frekvencí a daným smykovým přetvořením (zkroucení vzorku asfaltu sevřeného horní a dolní destičkou reometru) pro charakterizování viskózního i elastického chování asfaltových pojiv. Dále u polymerem modifikovaných asfaltových pojiv byla provedena zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle ČSN EN 16659, která mimo jiné umožňuje posoudit a rozlišit stupeň modifikace pojiv.

Dalším cílem diplomové práce je také pokusit se najít závislosti mezi jednotlivými parametry a určit vzájemné korelační koeficienty. U jednotlivých rejuvenátorů se posoudí jejich stabilita při zahřívání na vyšší teploty.

Diplomová práce si klade za cíl také popsat a shrnout jednotlivé teoretické poznatky, které souvisejí s výrobou asfaltových směsí s vyšším obsahem R-materiálu a prakticky dokázat jejich funkčnost při porovnání funkčních parametrů navržených směsí s R-materiálem s příslušnou referenční směsí bez R-materiálu.

4 POUŽITÉ MATERIÁLY

V praktické části této diplomové práce bylo odzkoušeno celkem čtrnáct zpětně získaných asfaltových pojiv z asfaltových směsí s R-materiálem a jedno zpětně získané asfaltové pojivo z asfaltové směsi bez obsahu R-materiálu (referenční asfaltová směs pro porovnání). Množství R-materiálu se pohybuje od 30 do 50 % včetně. Ve dvou případech zpětně získaných asfaltových pojiv se jedná o polymerem modifikované pojivo.

Základní seznam použitých zpětně získaných asfaltových pojiv je přehledně uveden v tabulce č. 19. Podrobnější popis jednotlivých vzorků je uveden níže.

Tabulka č. 19: Seznam zkoušených vzorků v diplomové práci

Označení vzorku	Asfaltová směs	Obsah R-materiálu	Oživovací přísada	
			Dávkování [kg _{rejuv.} /t _{R-mat.}]	Typ
REF	ACO 8 50/70	0	0	-
A1	ACP 22S 50/70	50	2,5	Rejuvenátor I.
A2	ACP 22S 50/70	50	3,5	Rejuvenátor I.
A3	ACP 22S 50/70	50	4,5	Rejuvenátor I.
B1	ACP 22+ 50/70	50	2,5	Rejuvenátor II.
B2	ACP 22+ 50/70	50	3,5	Rejuvenátor II.
B3	ACP 22+ 50/70	50	4,5	Rejuvenátor II.
C1	ACL 16+ 50/70	30	2,5	Rejuvenátor II.
C2	ACL 16+ 50/70	30	3,5	Rejuvenátor II.
C3	ACL 16+ 50/70	30	4,5	Rejuvenátor II.
D1	ACL 16+ 50/70	30	0	70/100
E1	ACL 16+ 50/70	50	1,5	Rejuvenátor II. + 70/100
E2	ACL 16+ 50/70	50	2,5	Rejuvenátor II. + 70/100
F1	ACP 22S PMB 22/55-65	50	0,5	PMB 45/80-55 RC
F2	ACP 22S PMB 22/55-65	40	0,5	PMB 45/80-70 RC

4.1 Asfaltové pojivo

Pro výrobu asfaltových směsí typu asfaltový beton bylo použito silniční asfaltové pojivo gradace 50/70 a 70/100. Dále polymerem modifikované asfaltové pojivo 45/80-55 RC a 45/80-70 RC. Níže v tabulce jsou uvedeny jejich základní zjištěné parametry.

Tabulka č. 20: Základní parametry pojiva gradace 50/70. [76]

Silniční asfaltové pojivo 50/70		
	Stanovené hodnoty	Požadavek normy ČSN EN 12591
Hodnota penetrace dle ČSN EN 1426	60 p.j.	50 až 70 p.j.
Teplota bodu měknutí dle ČSN EN 1427	50,0 °C	46 až 54 °C

Tabulka č. 21: Základní parametry pojiva gradace 70/100. [76]

Silniční asfaltové pojivo 70/100		
	Stanovené hodnoty	Požadavek normy ČSN EN 12591
Hodnota penetrace dle ČSN EN 1426	85 p.j.	70 až 100 p.j.
Teplota bodu měknutí dle ČSN EN 1427	45,0 °C	43 až 51 °C

Tabulka č. 22: Základní parametry pojiva 45/80-55 RC. [31]

Asfaltové pojivo 45/80-55 RC		
	Stanovené hodnoty	Požadavek normy ČSN 65 7222-1
Hodnota penetrace dle ČSN EN 1426	77 p.j.	45 až 80 p.j.
Teplota bodu měknutí dle ČSN EN 1427	56,3 °C	≥ 55 °C

Tabulka č. 23: Základní parametry pojiva 45/80-70 RC. [31]

Asfaltové pojivo 45/80-70 RC		
	Stanovené hodnoty	Požadavek normy ČSN 65 7222-1
Hodnota penetrace dle ČSN EN 1426	69,8 p.j.	45 až 80 p.j.
Teplota bodu měknutí dle ČSN EN 1427	77 °C	≥ 70 °C

4.2 Kamenivo

Při výrobě asfaltových směsí bylo kromě R-materiálu frakce 0/11 mm použito přírodní kamenivo z Lomu Tasovice. K výrobě asfaltových směsí s R-materiálem bylo použito drcené kamenivo frakce 0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16 a 16/22 mm.

4.3 R-materiál

Při výrobě asfaltových směsí s R-materiálem byl použit R-materiál značený 16 RA 0/11 mm. Z tohoto R-materiálu bylo vyextrahované asfaltové pojivo a stanoveno jeho množství v R-materiálu. Na tomto zpětně získaném pojivu byly stanoveny jeho základní parametry. Níže v tabulkách jsou uvedeny základní zjištěné parametry na zpětně získaných pojivech včetně jejich množství v příslušném R-materiálu.

Tabulka č. 24: Základní zjištěné parametry zpětně získaného pojiva z R-materiálu

Parametry R-materiálu před oživením		
	Stanovené hodnoty	Množství pojiva v R-materiálu
Hodnota penetrace dle ČSN EN 1426	20 p.j.	5,7 %
Teplota bodu měknutí dle ČSN EN 1427	65,0 °C	

4.4 Rejuvenační přísady

Použité rejuvenační přísady jsou vypsány v kapitole 2.5.7 *Použité oživovací metody*.

- **Rejuvenátor I. i Rejuvenátor II.** se dávkoval ve třech variantách:
 - 2,5 kilogramu rejuvenátoru na 1 tunu R-materiálu (4,4 % hm.),
 - 3,5 kilogramu rejuvenátoru na 1 tunu R-materiálu (6,1 % hm.),
 - 4,5 kilogramu rejuvenátoru na 1 tunu R-materiálu (7,9 % hm.).
- Asfaltové pojivo **PMB 45/80-55 RC i PMB 45/80-70 RC** se dávkovalo v množství 0,5 kilogramu na 1 tunu R-materiálu (0,9 % hm.).
- Kombinace **Rejuvenátoru II. se silničním pojivem 70/100** se dávkovala ve dvou variantách:
 - 1,5 kilogramu přísady na 1 tunu R-materiálu (2,6 % hm.),
 - 2,5 kilogramu přísady na 1 tunu R-materiálu (4,4 % hm.).
- **Silniční asfaltové pojivo 70/100** se dávkovalo v množství 3,1 % hm. asfaltové směsi.

4.5 ACO 8 s 0 % R-materiálu

Jedná se o referenční směs asfaltového betonu pro obrusné vrstvy s 0 % R-materiálu. Zpětně získané asfaltové pojivo slouží pro porovnání vlastností s ostatními zpětně získanými pojivy.

Tabulka č. 25: Parametry vzorku pojiva REF s 0 % R-materiálu

Parametry vzorku							
Vzorek	Asfaltová směs (AS)	Obsah R-mat.	Obsah pojiva ve směsi			Podíl pojiva (celkový obsah = 100 %)	
			Celkem [% hm. AS]	50/70 (70/100) 45/80 RC [% hm. AS]	Pojivo z R-mat. [% hm. AS]	50/70 (70/100) 45/80 RC [%]	Pojivo z R-mat. [%]
REF	ACO 8 50/70	0	6,2	6,2	0	100	0

4.6 ACP 22S(+) s 50 % R-materiálu

Jedná se o směsi asfaltového betonu pro podkladní vrstvy s maximálním zrnem kameniva velikosti 22 mm. Směsi obsahují 50 % R-materiálu. Zestárlé pojivo u vzorků A1-A3 bylo oživeno Rejuvenátorem I., u vzorků pojiv B1-B3 bylo oživeno Rejuvenátorem II. a u vzorku F1 bylo oživeno asfaltovým pojivem PMB 45/80-55 RC.

Tabulka č. 26: Parametry vzorků pojiv A1-A3, B1-B3 a F1 s 50 % R-materiálu

Parametry vzorku							
Vzorek	Asfaltová směs (AS)	Obsah R-mat.	Obsah pojiva ve směsi			Podíl pojiva (celkový obsah = 100 %)	
			Celkem [% hm. AS]	50/70 (70/100) 45/80 RC [% hm. AS]	Pojivo z R-mat. [% hm. AS]	50/70 (70/100) 45/80 RC [%]	Pojivo z R-mat. [%]
A1-A3	ACP 22S 50/70	50	4,5	1,7	2,9	37	63
B1-B3	ACP 22+ 50/70	50	4,3	1,5	2,9	34	66
F1	ACP 22S PMB 25/55-65	50	4,3	1,5	2,9	34	66

4.7 ACL 16+ s 30 % R-materiálu

Jedná se o směsi asfaltového betonu pro ložní vrstvy s maximálním zrnem kameniva velikosti 16 mm. Směsi obsahují 30 % R-materiálu. Zestárlé pojivo u vzorků pojiv C1-C3 bylo oživeno Rejuvenátorem II. a u vzorku pojiva D1 bylo oživeno silničním asfaltovým pojivem 70/100.

Tabulka č. 27: Parametry vzorků pojiv C1-C3 a D1 s 30 % R-materiálu

Parametry vzorku							
Vzorek	Asfaltová směs (AS)	Obsah R-mat.	Obsah pojiva ve směsi			Podíl pojiva (celkový obsah = 100 %)	
			Celkem [% hm. AS]	50/70 (70/100) 45/80 RC [% hm. AS]	Pojivo z R-mat. [% hm. AS]	50/70 (70/100) 45/80 RC [%]	Pojivo z R-mat. [%]
C1-C3	ACL 16+ 50/70	30	4,8	3,1	1,7	64	36
D1	ACL 16+ 50/70	30	4,8	3,1	1,7	64	36

4.8 ACL 16+ s 50 % R-materiálu

Jedná se o směsi asfaltového betonu pro ložní vrstvy s maximálním zrnem kameniva velikosti 16 mm. Směsi obsahují 50 % R-materiálu. Zestárlé pojivo u vzorků E1-E2 bylo oživeno kombinací Rejuvenátoru II. se silničním asfaltovým pojivem 70/100.

Tabulka č. 28: Parametry vzorků pojiv E1-E2 s 50 % R-materiálu

Parametry vzorku							
Vzorek	Asfaltová směs (AS)	Obsah R-mat.	Obsah pojiva ve směsi			Podíl pojiva (celkový obsah = 100 %)	
			Celkem [% hm. AS]	50/70 (70/100) 45/80 RC [% hm. AS]	Pojivo z R-mat. [% hm. AS]	50/70 (70/100) 45/80 RC [%]	Pojivo z R-mat. [%]
E1-E2	ACL 16+ 50/70	50	4,8	2,0	2,8	41	59

4.9 ACL 16S s 40 % R-materiálu

Jedná se o směs asfaltového betonu pro ložní vrstvy s maximálním zrnem kameniva velikosti 16 mm. Směs obsahuje 40 % R-materiálu. Zestárlé pojivo bylo oživeno asfaltovým pojivem PMB 45/80-70 RC.

Tabulka č. 29: Parametry vzorku pojiva F2 s 40 % R-materiálu

Parametry vzorku							
Vzorek	Asfaltová směs (AS)	Obsah R-mat.	Obsah pojiva ve směsi			Podíl pojiva (celkový obsah = 100 %)	
			Celkem [% hm. AS]	50/70 (70/100) 45/80 RC [% hm. AS]	Pojivo z R-mat. [% hm. AS]	50/70 (70/100) 45/80 RC [%]	Pojivo z R-mat. [%]
F2	ACL 16S PMB 25/55-65	40	4,8	2,5	2,3	52	48

5 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

Za účelem hodnocení asfaltových pojiv v rámci řešení diplomové práce byly využity empirické (základní) a funkční zkoušky, které jsou blíže popsány v následujících kapitolách. K hodnocení chování zpětně získaných asfaltových pojiv byly použity i reologické parametry.

Postup práce byl zvolen tak, aby bylo dosaženo cílů práce. V prvním kroku se provedly základní empirické zkoušky. Následně se provedly funkční zkoušky a vybrané reologické parametry oživených pojiv byly porovnány s reologickými parametry referenční směsi. V poslední fázi se provádělo hodnocení fyzikálních vlastností oživovacích přísad.

5.1 Zkoušky empirické

Základní empirické zkoušky asfaltových pojiv jsou jednoduché a rychlé, ale problémem je zkušební teplota. Při provádění zkoušek není dosahováno takových teplot, které by byly v reálném provozu v asfaltových vrstvách. Zároveň výroba směsi a jejich stárnutí nelze těmito zkouškami blíže specifikovat. Modifikovaná asfaltová pojiva se empirickými zkouškami špatně charakterizují, protože jejich elastické vlastnosti nemusí být lineární. [77]

5.1.1 Penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

Zkouška je popsána v normě *ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. [78]

Stanovení penetrace jehlou je definováno hloubkou proniknutí jehly do vzorků asfaltového pojiva, který je vytemperován na teplotu 25 °C. Při této teplotě je vzorek zatěžován hmotností 100 gramů po dobu 5 vteřin. Výsledná hodnota penetrace se uvádí v penetračních jednotkách (1 penetrační jednotka = 0,1 milimetru).

Aby nedošlo k degradaci asfaltového pojiva při zahřívání na teplotu potřebnou pro rozlítí pojiva do penetračních misek, proběhla penetrace jehlou v již získaných nádobách se zpětně získaným asfaltovým pojivem.

5.1.1.1 Přístroje a pomůcky

K měření penetrace slouží penetrometr, jehož klíčovou částí je jehla o průměru 1 mm se zkoseným hrotem ve tvaru kužele o průměru 0,16 až 0,14 mm. Tento penetrometr umožňuje pohyb jehly ve svislém směru. Analytický vzorek se umísťuje do nádoby z kovu nebo skla, které má průměr mezi 55 a 70 mm. Pro provedení testu je taktéž potřebné zařízení pro měření času a teploty. [69]

5.1.1.2 Příprava na zkoušku

Vzorky se umístily přes noc do vodní lázně s teplotou 25 °C. Nádoby se zpětně získaným asfaltovým pojivem byly naplněny tak, aby byla výška ztuhlé hladiny minimálně o 10 mm větší, než je předpokládaná hloubka vniknutí jehly.

Před provedením samotné zkoušky je potřeba ověřit a připravit zařízení pro stanovení penetrace spolu s penetrační jehlou. Důležité je, aby držák jehly byl schopen pohybu ve svislém směru a byl zbaven nečistot. V případě, že jsou nečistoty na hrotu penetrační jehly, je nutné je odstranit toluenem a následně jehlu osušit čistým hadříkem. Poté se penetrační jehla vloží do držáku. Během celého měření je vzorek umístěn ve vodní lázni, která musí držet předepsanou teplotu dle normy $25\text{ °C} \pm 0,15\text{ °C}$. [78]

5.1.1.3 Postup zkoušky

Vzorek je umístěn ve vodní lázni do požadované pozice, poté jsou hodnoty na stupnici penetrometru vynulovány. Postupně se penetrační jehla spouští k povrchu vzorku, dokud se s ním její hrot nedotkne. V tom okamžiku se nastaví doba zatížení na přesně stanovených 5 vteřin a zařízení se spustí. Poté se odečte hodnota hloubky vpichu, zvaná také penetrace, která se přepočte na penetrační jednotky. Na obrázku č. 28 můžeme vidět penetrometr při provádění zkoušky.

Zkouška je zakončena zaznamenáním naměřeného výsledku, opatrným vyjmutím jehly ze vzorku a jejím následným očištěním. Tento postup se opakuje minimálně třikrát pro každý vzorek asfaltového pojiva. Je důležité dodržovat předepsanou vzdálenost vpichů 10 mm od stran nádoby i mezi jednotlivými vpichy. [69]



Obrázek č. 28: Penetrometr s penetrační jehlou

5.1.1.4 Vyhodnocení zkoušky

Aritmetickým průměrem tří platných měření, zaokrouhleným na celé číslo, se stanovuje konečná hodnota penetrace. Z normy jsou známé maximální rozdíly platných výsledků měření, získaných při daných podmínkách (teplota 25 °C, zatěžovací hmotnost 100 g a doba zatěžování 5 s). Jednotlivé naměřené hodnoty jsou považované za platné, pokud se od sebe neliší o více než hodnoty uvedené v tabulce č. 30. Tato tabulka slouží pouze jako orientační pro měření probíhající za jiných podmínek nebo pro penetraci vzorků modifikovaných asfaltů. [78]

Tabulka č. 30: Maximální rozdíl platných stanovení [78]

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

5.1.2 Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427

Zkouška stanovení bodu měknutí je popsána normou *ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička*. [79]

Vrchní vrstva asfaltového pojiva uvnitř kovového kroužku je ponořena do kapalné lázně, která je postupně ohřívána. Na této vrstvě asfaltového pojiva spočívá kovová kulička. Výsledkem této zkoušky je teplota, při které se vrchní vrstva asfaltového pojiva změkčí natolik, že kulička pronikne do vrstvy a protáhne vrstvu na délku 25 mm. Tato zkouška je známá jako „kroužek a kulička“ (Ring & Ball). [69]

5.1.2.1 Přístroje a pomůcky

Během zkoušky bodu měknutí se využívá automatizovaného zařízení, které zahrnuje odlévací destičku, dva mosazné kroužky a dvě korozivzdorné ocelové kuličky, umístěné do středících prstenců. Vzorky se pak umísťují do skleněné nádoby naplněné kapalnou lázní a vybavené míchadlem. Tabulka č. 31 poskytuje klíčové teploty bodu měknutí, které slouží jako směrnice pro volbu vhodné kapaliny v lázni. Teplota je přesně monitorována pomocí zařízení pro měření teploty.

Tabulka č. 31: Kapalinová lázeň pro stanovení bodu měknutí

Bod měknutí	Kapalinová lázeň	Počáteční teplota lázně
$\leq 80\text{ °C}$	Vodní lázeň	$(5 \pm 1)\text{ °C}$
$> 80\text{ °C}$	Glycerin	$(30 \pm 1)\text{ °C}$

5.1.2.2 Příprava na zkoušku

Určení bodu měknutí začíná odebráním zkušební vzorku. Dva mosazné kroužky jsou zahřáty na teplotu, která odpovídá očekávanému bodu měknutí (nikoli přesahující 100 °C) a umístěny na odlévací destičku, která je opatřena separačním prostředkem. Do každého kroužku se nalije ohřáté asfaltové pojivo s mírným přebytkem a vzorky se následně chladí na laboratorní teplotu po dobu 30 minut. Po ochlazení analytických vzorků se nadbytečné asfaltové pojivo odstraní a zarovná se s okrajem kroužku pomocí nahřáté špachtle. [79]



Obrázek č. 29: Příprava zkušebních vzorků pro zkoušku stanovení bodu měknutí

Kroužky naplněné asfaltovým pojivem se připraví a umístí do otvorů nerezového stojanu, který je vybaven středícími prstenci. Celá soustava se pak umístí do kádinky s vybranou tekutinou a spolu s ocelovými kuličkami se nechá chladit na teplotu (5 ± 1) °C po dobu 15 minut. Po vyjmutí kádinky z chladicího zařízení se kuličky umístí do středících prstenců a kádinka se položí na topnou desku, následně se spustí měření.

5.1.2.3 Postup zkoušky

Díky magnetickému míchadlu se teplota kapaliny rovnoměrně zvyšuje v celé kádince. Teplota stoupá rychlostí 5 °C za minutu. S rostoucí teplotou dochází postupně k deformaci vrstvy asfaltového pojiva, což způsobuje, že ocelová kulička postupně propadne do vrstvy.

Zkouška je ukončena v okamžiku, kdy ocelová kulička obalená pojivem propadne na délku $25 \pm 0,4$ mm, a tuto událost detekuje světelný paprsek. Každý propad ocelové kuličky je zachycen a současně jsou automaticky zaznamenány teploty, při kterých k propadům došlo. [69]



Obrázek č. 30: Provádění zkoušky stanovení bodu měknutí

5.1.2.4 Vyhodnocení zkoušky

Z výsledných teplot se vypočítá aritmetický průměr, který je označován jako bod měknutí pro zkoušené asfaltové pojivo. Pokud rozdíl mezi těmito dvěma teplotami překročí 1 °C pro bod měknutí do 80 °C nebo více než 2 °C pro bod měknutí nad 80 °C, je nutné zkoušku opakovat.

5.2 Zkoušky funkční

Z důvodu omezené spolehlivosti a limitované výpovědní schopnosti empirických zkoušek asfaltových pojiv byl v USA v období let 1987 až 1993 proveden výzkum Strategic Highway Research Program. Tento výzkum přispěl k vývoji nových metod pro testování a charakterizaci asfaltových pojiv. Jednou z těchto nových metod je zkoušení asfaltových pojiv pomocí dynamického smykového reometru, který slouží k charakterizaci viskoelastického chování asfaltových pojiv a k posouzení odolnosti proti vytváření stop. Mezi další užitečné testy patří také test Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR). [77]

5.2.1 Stanovení komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu podle ČSN EN 14770

Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu je popsáno normou ČSN EN 14770 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR)*. [80]

5.2.1.1 Podstata zkoušky

Dynamický smykový reometr se používá ke zkoušení lineárního viskoelastického chování. Na zkušební vzorek asfaltového pojiva se aplikuje oscilující smykové napětí a měří se odezva deformace pojiva nebo se aplikuje smykové přetvoření a měří se vzniklé napětí. V této normě je popsána oscilace ve smyku, což je metoda měření, která umožňuje stanovení komplexního smykového modulu G^* a fázového úhlu δ . Zkušební vzorek asfaltového pojiva se vkládá mezi dvě destičky dynamického smykového reometru. Spodní destička je pevná a horní destička je pohyblivá a vytváří oscilující smykové napětí, které odpovídá zatěžování vozovky. [81]

Komplexní smykový modul určuje celkový odpor pojiva proti deformaci, které je vystaveno opakujícím smykovým zatížením. Skládá se ze dvou složek – elastické a viskózní. Elastická neboli vratná složka vyjadřuje reálnou část komplexního smykového modulu a je označována jako G' . Viskózní neboli nevratná složka označována jako G'' vyjadřuje ztrátový modul. Jejich vzájemný poměr vratné a nevratné deformace určuje fázový úhel δ . Vlastnosti asfaltového pojiva (veličiny G^* a δ) jsou závislé na teplotě a frekvenci zatěžování.

Za nízkých teplot se asfaltové pojivo chová jako elastická látka, která je schopna navrácení do původního stavu. Komplexní smykový modul G^* roste a fázový úhel δ se blíží nule. Tomuto jevu odpovídá elastická složka, kdy $\delta = 0^\circ$. Naopak za vysokých teplot se pojivo chová jako viskózní kapalina, která není schopna navrátit se do původního stavu. Komplexní smykový modul G^* je nejmenší a fázový úhel δ se blíží 90° . V tomto případě převládá viskózní složka, kdy $\delta = 90^\circ$. Na obrázku č. 31 jsou vykresleny jednotlivé složky komplexního smykového modulu. [82]

G^* – komplexní smykový modul

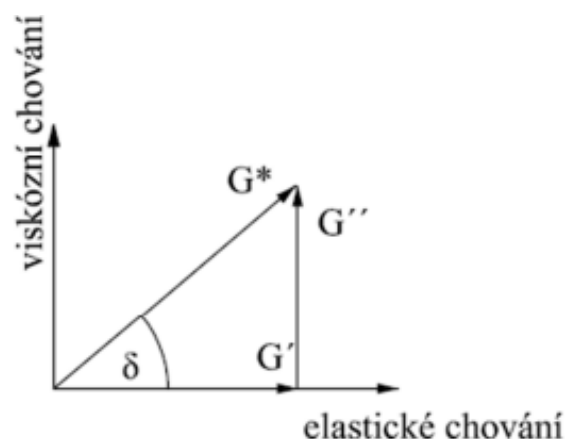
G' – elastická (vratná) složka

G'' – viskózní (nevratná) složka

δ – fázový úhel

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2}$$

$$\operatorname{tg} \delta = G'' / G'$$



Obrázek č. 31: Složky komplexního smykového modulu [82]

5.2.1.2 Příprava reometru

Stanovení komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu bylo provedeno v Dynamickém smykovém reometru Kinexus. Reometr se připraví podle příručky od výrobce. Nejprve je potřeba zapnout kompresor, který pohání hlavu reometru, až poté se může odstranit pojistná ochranná hrazdička, která brání posunu hlavy reometru. Nezbytnou součástí reometru je také chlazení. Reometr je ovládán přes dodaný program rSpace.

Výběr správné geometrie a její mezery se provede dle doporučení normy ČSN EN 14770. Pro potřeby diplomové práce byla zvolena horní a dolní geometrie typu deska-deska o průměru 25 milimetru a nastavena mezera o velikosti 1 milimetr.



Obrázek č. 32: Dynamický smykový reometr Kinexus

5.2.1.3 Přístroje a pomůcky

Potřebné přístroje a pomůcky pro stanovení komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu:

- podložka z nepřilnavého materiálu – slouží pro rozlití vzorků asfaltového pojiva. Podložka musí být z materiálu, který nepřilne ke zkušebnímu vzorku asfaltového pojiva, například silikonová,
- špachtle k oříznutí stlačeného vzorku asfaltového pojiva,
- dynamický smykový reometr (DSR) – samotný přístroj pro měření reologických vlastností asfaltových pojiv,
- kompresor a chladicí zařízení – součást DSR,
- zkušební geometrie – v diplomové práci použita deska-deska o průměru 25 milimetrů,
- počítač se softwarem R-space.

5.2.1.4 Příprava zkušebních vzorků

Rozehřáté asfaltové pojivo na požadovanou teplotu se rozlije do silikonových forem, překryje se vhodnou nádobou z důvodu zamezení kontaminace vzorku nečistotami a nechá se vychladnout na laboratorní teplotu minimálně po dobu 30 minut.



Obrázek č. 33: Příprava zkušebních vzorků

5.2.1.5 Postup zkoušky

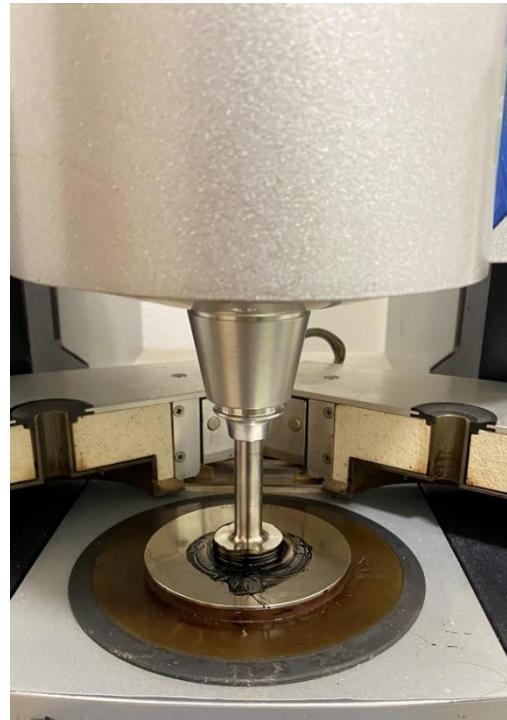
Vzorek asfaltového pojiva se uvolní ze silikonové formy a umístí do reometru na přibližný střed soupravy určené k měření (obrázek č. 34). Destičky reometru jsou předehřáté na teplotu 70 °C, aby došlo ke spojení destiček s pojivem. Poté se nastaví mezera o 0,050 milimetru větší, než je požadovaná mezera a přebývající pojivo se odřízne (obrázek č. 35) nožem nebo nahřátou špachtlí. Mezera se poté sníží na požadovanou

hodnotu zkoušky – 1 milimetr. Vzorek asfaltového pojiva je tímto připraven ke zkoušení.
[69]

Z nabídky softwaru se zvolí vhodná šablona pro měření a vzorek se nechá ustálit na počáteční teplotu zkoušky. Zkouška se zahájí při zvolené počáteční teplotě 70 °C, začíná se nejnižší frekvencí a postupně se pokračuje k nejvyšší. Zkouška se provádí v celém rozsahu teplot od 70 °C do 40 °C s krokem po 5 °C a frekvencí 10 – 0,1 Hz. Po ukončení zkoušky se výsledky z počítačového softwaru uloží do počítače.



Obrázek č. 34: Vzorek asfaltového pojiva umístěn do přibližného středu reometru [77]



Obrázek č. 35: Stlačený vzorek asfaltového pojiva (vlevo) a seřiznutý vzorek (vpravo)

5.2.1.6 Vyhodnocení zkoušky

Při jednotlivých zkušebních teplotách a frekvencích se do tabulky zaznamená absolutní hodnota komplexního modulu ve smyku G^* [kPa] na tři platná čísla a úhel fázového posunu δ [°] na nejbližší 0,1 °. [80]

Výsledky oscilace se zobrazují nejčastěji graficky pomocí izochrony nebo izotermy. Izochrona je křivka vyjadřující chování pojiva při konstantní frekvenci. Izoterma je křivka vyjadřující chování pojiva při konstantní teplotě. Další možnosti grafického znázornění výsledků je pomocí Blackova diagramu, který udává závislost mezi komplexním smykovým modulem a úhlem fázového posunu nebo pomocí hlavních (kmenových) křivek, při jejichž konstrukci se využívá superpozice času a teploty. [82]

5.2.2 Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) podle ČSN EN 16659

Zkouška Multiple Stress Creep Recovery (dále MSCR) byla vyvinuta poměrně nedávno v USA. V roce 2015 byla zkouška schválena v CEN a byla vydaná evropská norma s označením EN 16659 Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test). [54] [83]

Metoda se užívá ke stanovení elastické odezvy asfaltu a asfaltových pojiv za podmínek smykového dotvarování a následného zotavení stanoveného při dvou různých hodnotách smykového napětí 0,100 kPa a 3,200 kPa při teplotě 60 °C a 70 °C. Pro lepší představu o chování zkoušených asfaltových pojiv byla do zkoušky přidána třetí hodnota smykového napětí 10,000 kPa. Tento postup sice není v souladu s normou ČSN EN 16659, nicméně výsledky zkoušky nijak neovlivňuje. Vzorek je zatěžován tímto smykovým napětím až naposled.

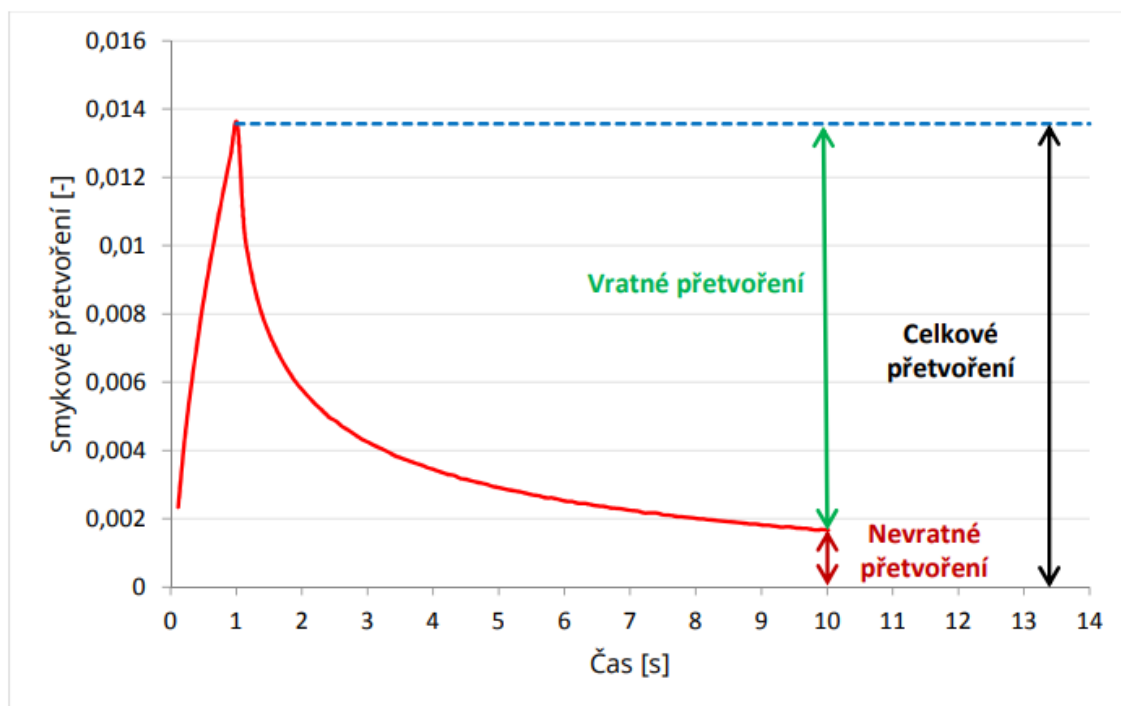
Elastická odezva materiálu je kvantifikována měřením procentuálního zotavení R a nevratné smykové poddajnosti J_{nr} asfaltového pojiva proti tvorbě trvalých deformací při opakovaném zatížení.

Příprava reometru, příprava zkušebních těles, potřebné přístroje a pomůcky jsou stejné jako v případě stanovení komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu popsané v kapitole 5.2.1.

5.2.2.1 Postup zkoušky

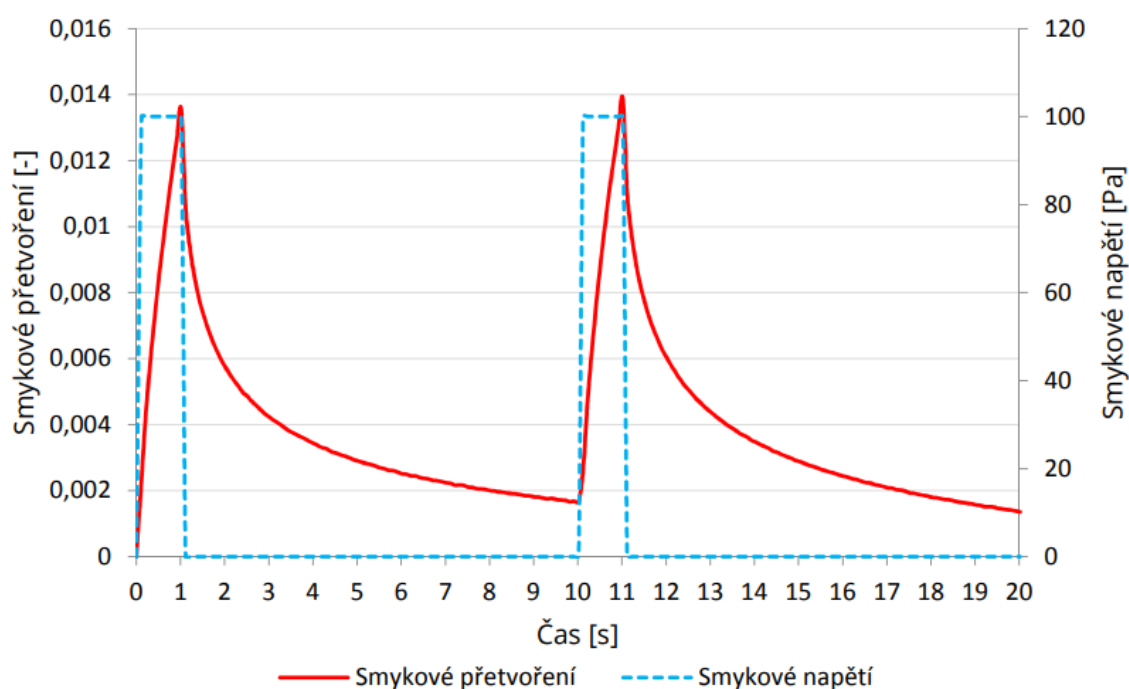
Pro měření se používá dynamický smykový reometr s geometrií deska-deska o průměru 25 milimetrů s nastavením mezery na 1 milimetr. Zkušební vzorek je zatížen konstantním napětím po dobu 1 sekundy, poté je po dobu 9 sekund umožněno jeho zotavení. Provede se celkem 10 cyklů při smykovém napětí 0,100 kPa následovaných dalšími 10 cykly při smykovém napětí 3,200 kPa. Nakonec se provede 10 cyklů při smykovém napětí 10,000 kPa. [84]

Vzorek asfaltového pojiva je umístěn mezi dolní a horní geometrií reometru. V této konfiguraci se mezera mezi geometriemi upraví na rozpětí 1,050 milimetru a nadměrné pojivo se odstraní při zkušební teplotě. Po oříznutí se geometrie přesune na mezeru 1,000 milimetru. Vzorek je zatížen konstantním smykovým napětím 0,100 kPa po dobu jedné sekundy pro fázi deformace, následovanou obdobím zotavení při nulovém smykovém napětí, trvajícím devět sekund. Během fáze deformace a zotavení se hodnoty napětí a deformace zaznamenávají každých 0,10 sekund. Graf č. 1 zobrazuje typický cyklus zatížení po dobu 1 sekundy a následného odlehčení po dobu 9 sekund. [84]



Graf č. 1: Typický cyklus dotvarování a zotavení asfaltového pojiva [84]

Norma ČSN EN 16659 předepisuje zkušební teploty 40, 50, 60 nebo 70 °C, kterou lze vybrat dle uvážení. Ostatní teploty mohou být provedeny pro srovnávací účely. Jedná se například o teploty, které jsou předepsány v návrhovém systému používaném v USA. V České republice je teplota 50 °C považována za optimální pro zkoušku zkoumání odezvy asfaltových pojiv, nicméně podle odborníků je tato teplota považována za nízkou a má omezenou schopnost spolehlivě určit chování asfaltových pojiv ohledně trvalých deformací, proto byla zvolena zkušební teplota 60 °C. Graf č. 2 zobrazuje průběh dvou cyklů MSCR testu. [83]



Graf č. 2: Průběh dvou cyklů MSCR testu [84]

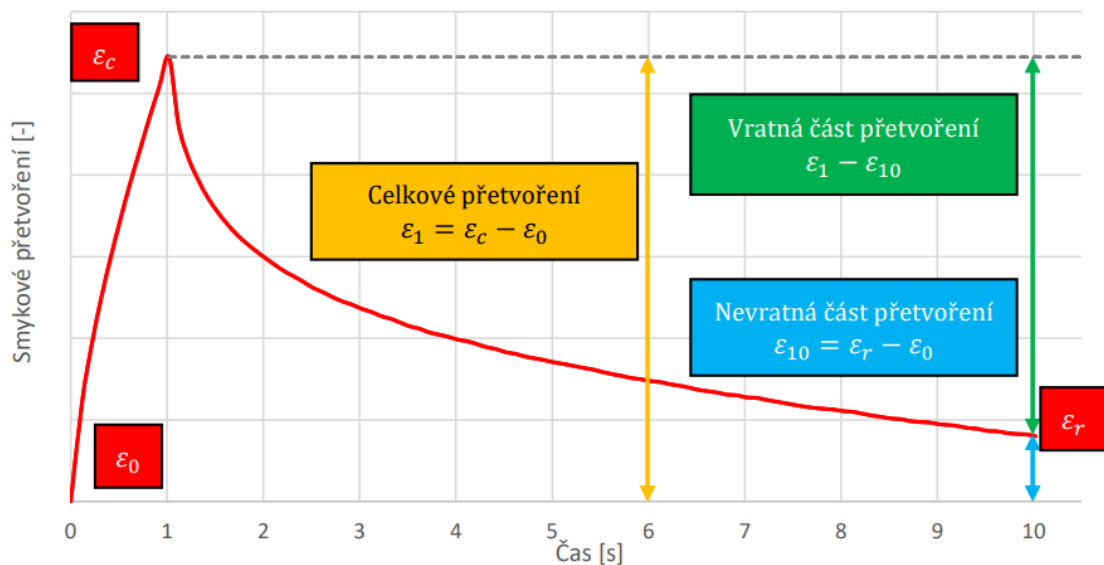
5.2.2.2 Vyhodnocení zkoušky

Využitím výsledků ze zkoušky se pro asfaltová pojiva určí průměrné procentuální zotavení a nevratná smyková poddajnost na hladině smykového napětí 0,100 kPa a 3,200 kPa zaokrouhlená na nejbližší 0,1 %. Pro každý z deseti cyklů se vypočítá procentuální zotavení.

Výstupem testu MSCR je průměrné elastické zotavení R_N , které se vypočítá pro obě velikosti zatěžovacího napětí. S rostoucí hodnotou této veličiny roste návratnost pojiva do původního stavu. Je tedy zřejmé, že čím je tato hodnota vyšší, tím je pojivo více elastické a mělo by lépe odolávat trvalým deformacím.

Dalším smykovým parametrem je nevratná smyková poddajnost J_{nr} , která se opět zjišťuje pro obě sady zatížení (0,1 kPa a 3,2 kPa). Zde je patrné, že čím je hodnota nižší, tím je pojivo odolnější vůči trvalým deformacím.

Nevratná smyková poddajnost J_{nr} je závislá na velikosti smykového napětí a teplotě. Při srovnání průběhu smykového napětí a nevratné smykové poddajnosti lze vypořádat, že průběh závislosti má tvar obrácené hokejky. Na počátku je J_{nr} přibližně konstantní, ale po překročení limitního napětí je zaznamenán strmý nárůst velikosti J_{nr} . Tento zlom se většinou nachází v přechodu do nelineární viskoelastické oblasti. U MSCR testů prováděných při teplotě 60 °C leží mnohdy tento bod až za hranicí smykového napětí 3,200 kPa, a to zejména u silničních asfaltů nižší a střední gradace a dále u modifikovaných asfaltových pojiv. Trvalé deformace vznikají u asfaltových pojiv především v nelineární viskoelastické oblasti, která je ve zmíněných případech ovšem posunuta až za hranici 3,200 kPa, a tudíž celý test MSCR probíhá v lineární viskoelastické oblasti. Z tohoto důvodu se jeví vhodné provádět test i při vyšším napětí než 3,200 kPa. [54]



ϵ_1 – celkové přetvoření [%]

ϵ_{10} – nevratná část přetvoření [%]

Graf č. 3: Průběh přetvoření [54]

5.2.3 Stabilita použitých rejuvenátorů

V diplomové práci byly použity celkem dva druhy rejuvenátorů. Vzhledem k různorodým vlastnostem a různému, mnohdy nejasnému složení jednotlivých rejuvenátorů, byla nad rámec současných platných norem provedena zkouška stability Rejuvenátoru I. a Rejuvenátoru II. Konkrétně se jedná o změnu hmotnosti vyjádřenou v procentech během temperace na teploty, které se běžně vyskytují na obalovnách asfaltových směsích.

Jak je zmíněno výše, tato zkouška není součástí žádných platných norem, postup zkoušení je jiný a bez návaznosti na jakoukoliv normu. Zkouška se pokouší ověřit fyzikální vlastnosti jednotlivých použitých rejuvenátorů. Zkouška je inspirována platnou normou *ČSN EN 12607-1 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu – Část 1: Metoda RTFOT*. [57]

5.2.3.1 Přístroje a pomůcky

Pro provedení zkoušky se používají běžné laboratorní přístroje a laboratorní sklo. Nejdůležitější je sušárna, která má dvojitou stěnu a elektrický ohřev. Sušárna se odvětrává prouděním vzduchu a musí být vybavena termostatem schopným udržovat stálou teplotu s maximální odchylkou $\pm 0,5$ °C. Sušárna je vybavena vzduchovou tryskou tak, aby foukala ohřátý vzduch do každé nádoby rovnoměrně.

Skleněná nádoba vyrobená z teplovzdušného skla slouží pro nalití vzorku rejuvenátoru, který je podroben zkoušce. [57]

5.2.3.2 Příprava na zkoušku

Nejprve je nutné zajistit, aby byl laboratorní vzorek homogenní a nebyl kontaminován. Je nutné dodržet všechny bezpečnostní předpisy a zajistit, aby vzorky byly reprezentativní a výsledky nebyly ničím ovlivněny. Vzorek se homogenizuje mícháním. Jednohodinové predehřátí sušárny je obvykle dostačující, prověří se, zda je sušárna schopna udržovat zvýšenou teplotu.

Nejméně dvě skleněné nádoby se zváží odděleně. Do každé skleněné nádoby se nalije ($30,0 \pm 2,0$ g) vzorku. Počet nádobek musí být dostatečný k provedení všech plánovaných zkoušek.

5.2.3.3 Postup zkoušky

Každý vzorek je zkoušen na celkem 3 zkušební teploty a na tyto teploty je temperován po dobu 1, 2, 3 a 4 hodin. Vybrané teploty i doba temperace vychází z běžně dosahujících hodnot při výrobě asfaltových směsí s R-materiálem na obalovnách.

- Teplota 120 °C představuje teplotu recyklátu v paralelním bubnu obalovny, na který se aplikuje oživovací přísada,
- teplota 160 °C představuje spodní hranici asfaltové směsi a teplotu při separaci pojiva,
- teplota 180 °C představuje horní hranici asfaltové směsi.

Označené nádoby se vzorky se nejprve nechají zchladnout na laboratorní teplotu asi 1 hodinu, samostatně se zváží a zjistí se jejich hmotnost.

Poté se nádoby vloží do předehřáté sušárny na stanovenou zkušební teplotu. Jestliže se do 15 minut nedosáhne zkušební teploty, zkouška se přeruší. Jednotlivé vzorky se po každé hodině zváží.

5.2.3.4 Vyhodnocení zkoušky

V případě této zkoušky bude docházet ke ztrátě hmotnosti jednotlivého rejuvenátoru. Ztráta hmotnosti se vyjádří jako kladná změna v procentech zaokrouhlených na 0,1 %. Stanovení změny hmotnosti v % se provede podle rovnice (1). Jednotlivé výsledky se vyhodnotí do přehledné tabulky a pro lepší představu budou prezentovány v grafu.

$$\text{změna hmotnosti v \%} = 100 * \frac{m_2 - m_1}{m_1 - m_0} \quad (1)$$

m_0 – skleněná nádoba bez vzorku

m_1 – skleněná nádoba se vzorkem (rejuvenátor)

m_2 – zvážená skleněná nádoba po uplynuté době temperace

6 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

V této kapitole diplomové práce jsou uvedeny výsledky provedených zkoušek. Jedná se o stanovení penetrace jehlou dle ČSN 1426, stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427, stanovení komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu dle ČSN EN 14770, zkoušku MSCR dle ČSN EN 16659 a zkoušku stability použitých rejuvenátorů. Postupy provádění jsou popsány v kapitole 5 *Použité zkušební metody*.

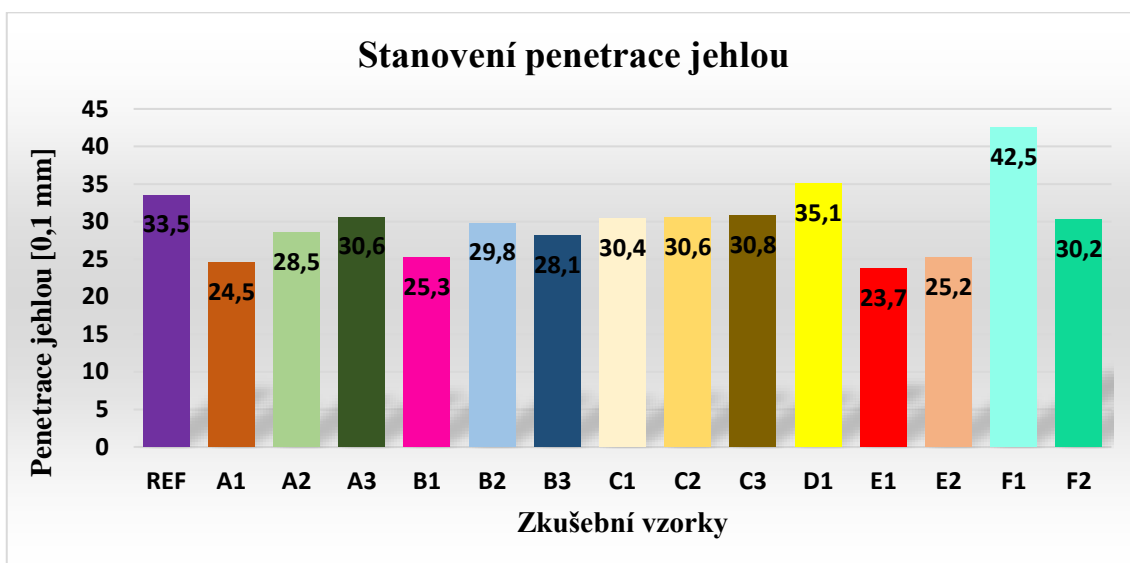
Výsledky, porovnání a vzájemné vztahy jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v tabulkách, okomentovány a pro lepší znázornění jsou také zpracovány graficky.

6.1 Penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

Postup stanovení penetrace jehlou je podrobně popsán v kapitole 5.1.1 *Penetrace jehlou dle ČSN EN 1426*. Zkouška byla provedena na všech 15 vzorcích zpětně získaného asfaltového pojiva. U každého vzorku pojiva byly provedeny 3 měření. V tabulce č. 32 jsou zaznamenány všechny naměřené hodnoty penetrace jehlou.

Tabulka č. 32: Výsledky stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

Označení vzorku	PENETRACE [0,1 mm]			Ø [0,1 mm]
REF	33,3	33,5	33,8	33,5
A1	24,5	24,1	25,0	24,5
A2	28,2	29,2	28,1	28,5
A3	30,1	31,2	30,5	30,6
B1	25,6	25,4	24,8	25,3
B2	29,8	29,4	30,2	29,8
B3	28,8	28,2	28,1	28,1
C1	29,9	31,0	30,4	30,4
C2	31,0	30,2	30,5	30,6
C3	30,3	31,2	31,0	30,8
D1	35,8	34,1	35,4	35,1
E1	24,1	23,2	23,9	23,7
E2	25,9	24,6	25,1	25,2
F1	42,7	42,8	42,1	42,5
F2	29,8	30,4	30,5	30,2



Graf č. 4: Výsledky stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

V grafu č. 4 jsou zobrazeny výsledky zkoušek penetrace jehlou pro jednotlivá zpětně získaná asfaltová pojiva. Z výsledků je patrný velký rozdíl mezi hodnotami penetrace jehlou, který se pohybuje v rozmezí 23,7 až 42,5 [0,1 mm]. U vzorků pojiv A1-A3, kde je obsaženo 50 % R-materiálu je patrný rozdíl výsledných penetrací v závislosti na dávkování oživovací přísady – Rejuvenátoru I. Z grafu je patrné, že u těchto vzorků se zvyšujícím dávkováním této rejuvenační přísady narůstá hodnota penetrace.

Vzorky pojiv B1-B3 s obsahem 50 % R-materiálu byly ožiovány Rejuvenátorem II. ve stejném dávkování jako vzorky pojiv A1-A3. Zde je viditelný pouze rozdíl v asfaltovém pojivu B1, které je z jmenovaných vzorků nejtvrďší.

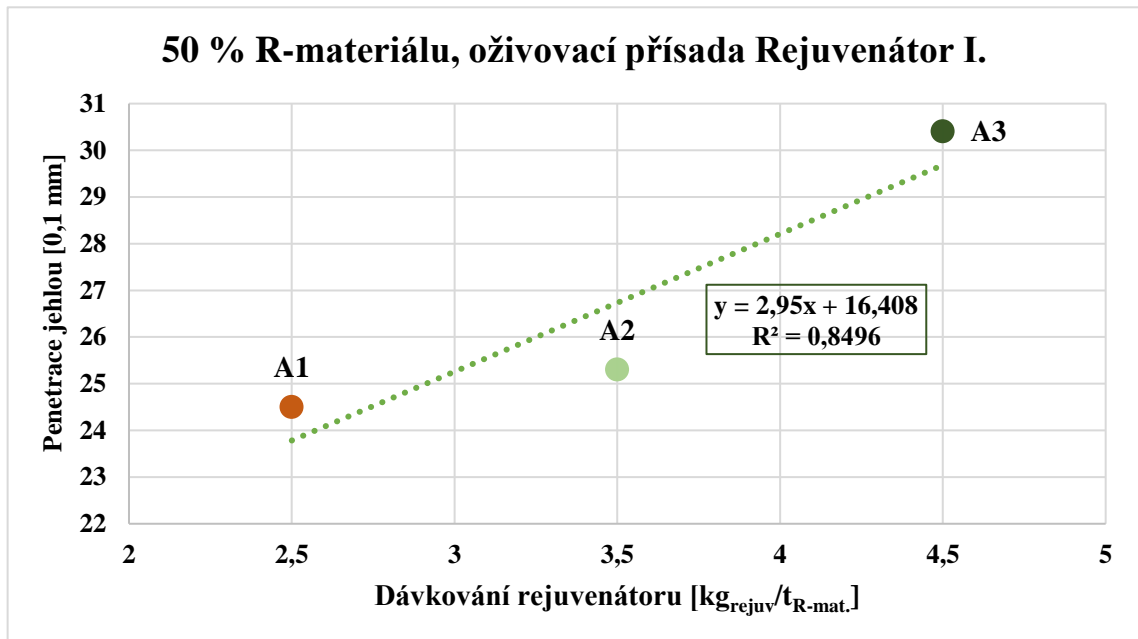
Podobný trend pokračuje u zpětně získaného asfaltového pojiva ve vzorcích C1-C3, kde rozdíl v dávkování Rejuvenátoru II. není téměř znát.

Zpětně získané pojivo ve vzorku D1 bylo ožiováno asfaltovým pojivem vyšší gradace a vykazuje vyšší hodnoty penetrace než referenční směs.

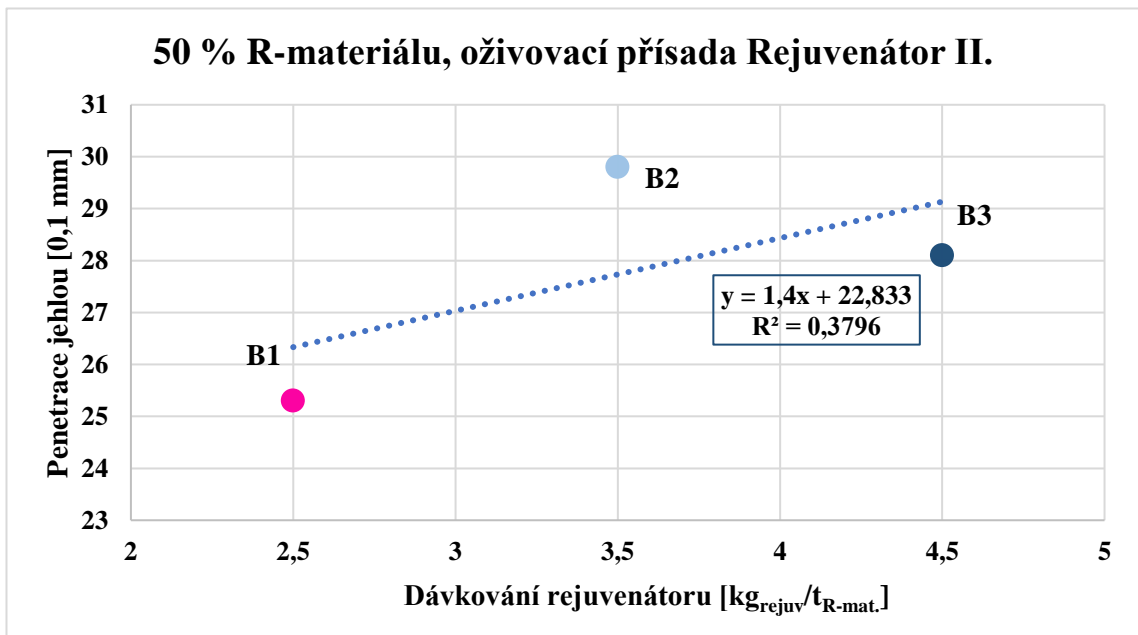
Vzorek pojiva E1 s obsahem 50 % R-materiálu byl ožiován kombinací Rejuvenátoru II. se silničním pojivem 70/100 v dávkování 1,5 kg rejuvenátoru na 1 tunu R-materiálu a vykazuje nižší hodnoty penetrace než vzorek pojiva E2 se stejným obsahem R-materiálu, stejnou metodou oživení, ale větším dávkování, konkrétně 2,5 kg rejuvenátoru na 1 tunu R-materiálu.

Vzorky pojiv A1, A2, B1, B2, B3, E1 a E2 nespĺnily normou pŕedepsanou gradaci zpĕtnĕ získanĕho asfaltovĕho pojiva 50/70 podle tabulky ě. 2.

Vzorek pojiv F1 i F2 splnil normou pŕedepsanou gradaci 25/55 podle tabulky ě. 3. Pouze na základĕ hodnot penetrace se jeví jako nejúčinnĕjší oživovací pŕísada použití asfaltovĕho pojiva vyšší gradace a asfaltovĕho pojiva typu RC.



Graf ě. 5: Závislost hloubky penetrace na množství oživovací pŕísady Rejuvenátor I.



Graf ě. 6: Závislost hloubky penetrace na množství oživovací pŕísady Rejuvenátor II.

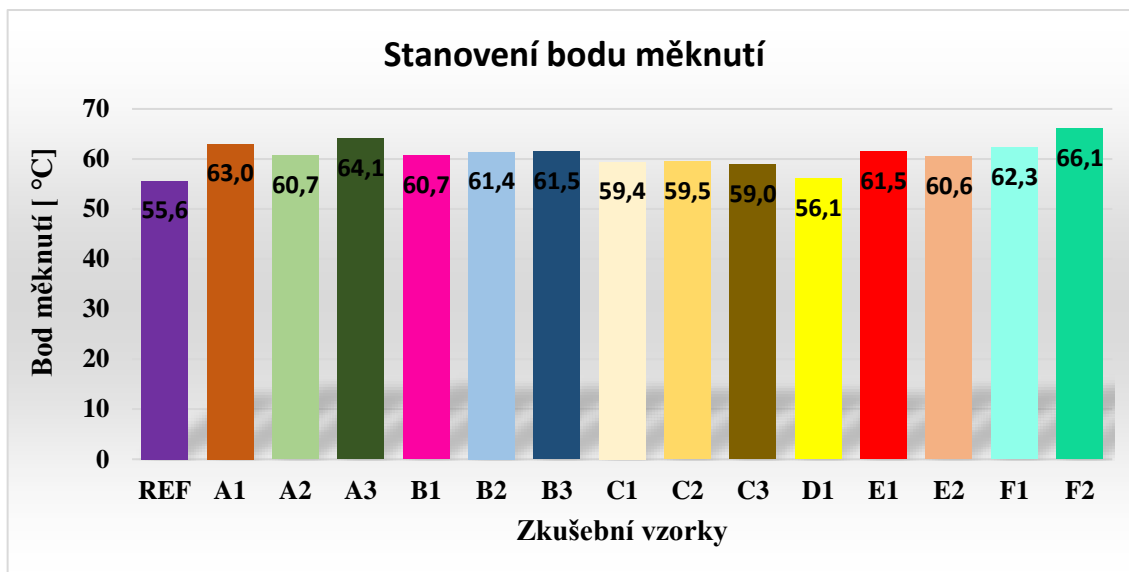
Z výsledků je patrné, že se zvýšením dávkování oživovací přísady – Rejuvenátoru I. se zvyšuje hloubka penetrace, tato závislost je patrná na grafu č. 5, je zde velmi silná závislost, odpovídá tomu vysoký koeficient determinace. U Rejuvenátoru II. je koeficient determinace u zpětně získaných asfaltových pojiv ze směsi s obsahem 50 % R-materiálu (vzorky pojiv B1-B3) nízký, závislost na jeho dávkování je zde slabá.

6.2 Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427

Postup zkoušky je popsán v kapitole 5.1.2 Stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427. Všechna zpětně získaná asfaltová pojiva byla podrobena dvěma měřeními za předepsaných podmínek. Pro účely přesnější korelace nebyly výsledky zaokrouhleny podle normy ČSN EN 1427 na nejbližší 0,2 °C, ale na nejbližší 0,1 °C. Výsledky zkoušky bodu měknutí metodou kroužek a kulička jsou uvedeny v tabulce č. 33 a porovnány v grafu č. 7.

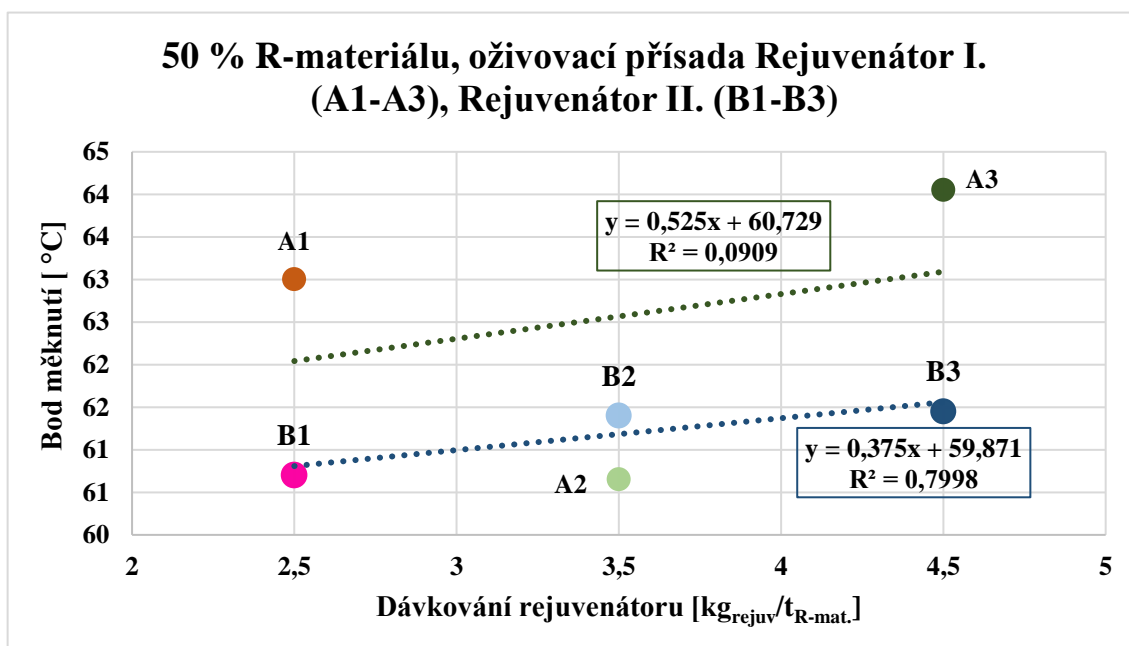
Tabulka č. 33: Výsledky stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427

Označení vzorku	BOD MĚKNUTÍ [°C]		Ø [°C]
REF	55,9	55,3	55,6
A1	63,0	63,0	63,0
A2	60,4	60,9	60,7
A3	63,9	64,2	64,1
B1	60,6	60,8	60,7
B2	61,0	61,8	61,4
B3	61,4	61,5	61,5
C1	59,2	59,6	59,4
C2	59,5	59,4	59,5
C3	59,0	58,9	59,0
D1	56,0	56,1	56,1
E1	61,4	61,6	61,5
E2	60,4	60,7	60,6
F1	62,5	62,0	62,3
F2	66,4	65,7	66,1



Graf č. 7: Výsledky stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427

Referenční vzorek dosáhl bodu měknutí 55,6 °C. U zkoušky stanovení bodu měknutí se projevil vliv použití asfaltového pojiva z R-materiálu, u kterého bylo použito pojivo modifikované. Dle normy ČSN 73 6141 Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí se v případě doložení přítomnosti polymerem modifikovaného asfaltu v R-materiálu omezení teploty bodu měknutí shora ruší. Vzorek pojiva D1 dosáhl bodu měknutí nejbližze referenční směsi. Nejvyšší hodnotu vykazuje vzorek pojiva F2, který obsahuje 40 % R-materiálu a asfaltové pojivo bylo oživeno asfaltovým pojivem typu RC.



Graf č. 8: Závislost bodu měknutí na množství oživovací přísady Rejuvenátor I. a II.

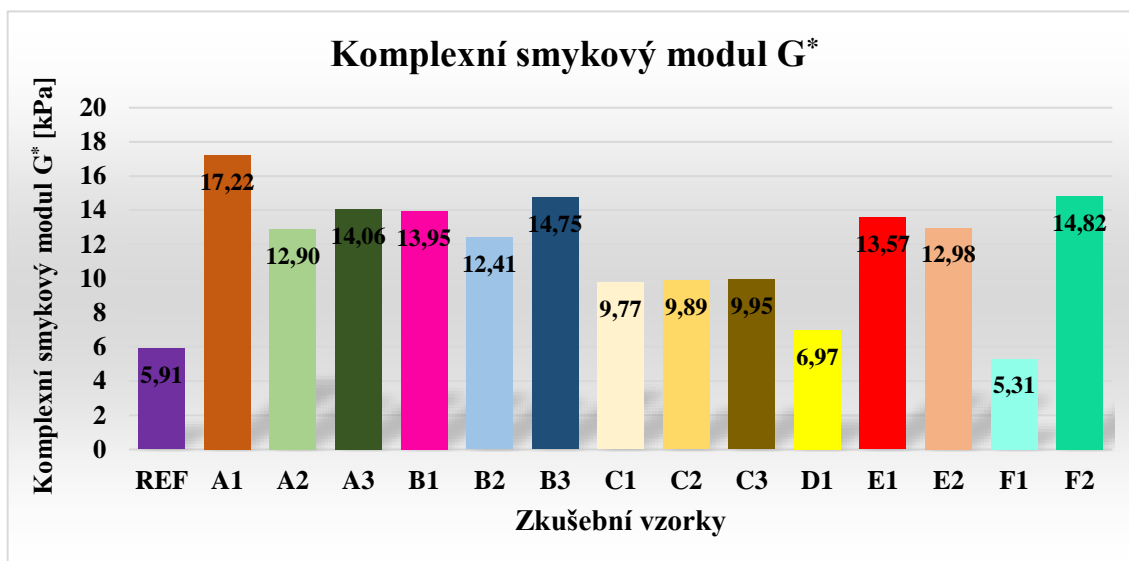
6.3 Stanovení komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu dle ČSN EN 14770

Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu bylo provedeno dle ČSN EN 14770. Postup zkoušky je definován v kapitole 5.2.1. Pro stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu byl použit dynamický smykový reometr s geometrií typu deska-deska o průměru 25 mm s tloušťkou vzorku 1 mm. Pro zkušební geometrii 25 mm byl definován teplotní interval od 70 °C do 40 °C s krokem po 5 °C. Komplexní smykový modul a fázový úhel byl stanoven na všech 15 vzorcích v režimu oscilace s řízeným smykovým přetvořením. Při měření byl nastaven frekvenční rozsah zatěžování od 0,1 do 10 Hz.

Vyhodnocení komplexního smykového modulu a fázového úhlu se provedlo při zkušební teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz. Výsledky měření komplexního modulu a fázového úhlu jsou prezentovány v tabulce č. 34 a v grafech č. 9 a 10.

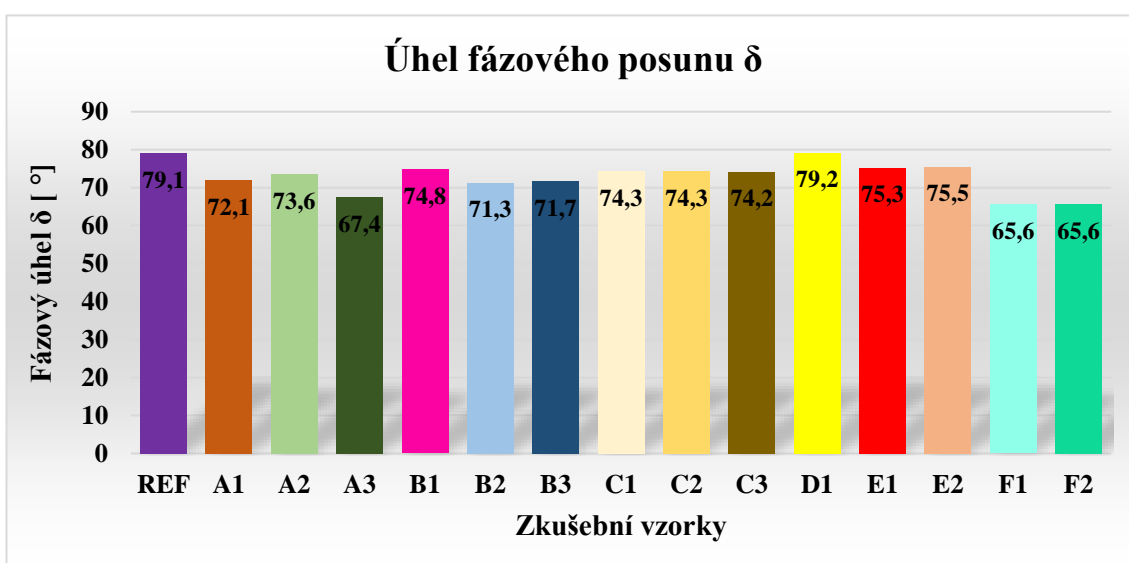
Tabulka č. 34: Výsledky zkoušky DSR při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz

Označení vzorku	Komplexní smykový modul G^* [kPa]	Úhel fázového posunu δ [°]
REF	5,91	79,1
A1	17,22	72,1
A2	12,90	73,6
A3	14,06	67,4
B1	13,95	74,8
B2	12,41	71,3
B3	14,75	71,7
C1	9,77	74,3
C2	9,89	74,3
C3	9,95	74,2
D1	6,97	79,2
E1	13,57	75,3
E2	12,98	75,5
F1	5,31	65,6
F2	14,82	65,6



Graf č. 9: Komplexní smykový modul G^* při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz

Z grafu č. 9 je zřejmé, že nejvyšší hodnoty komplexního smykového modulu dosáhl vzorek zpětně získaného asfaltového pojiva z asfaltové směsi ACP 22S 50/70 s 50 % obsahem R-materiálu, kde bylo zestárlé pojivo oživeno Rejuvenátorem I. (vzorek pojiva A1) s hodnotou 17,22 kPa. Nejnižších hodnot dosáhlo zpětně získané asfaltové pojivo ACP 22S PMB 25/55-65 s 50 % obsahem R-materiálu, kde bylo zestárlé pojivo oživeno asfaltovým pojivem typu RC (vzorek pojiva F1) s hodnotou 5,31 kPa. Podobného výsledku, konkrétně 5,91 kPa, dosáhl vzorek pojiva získaný z referenční směsi ACO 8 50/70, která neobsahuje žádný R-materiál.

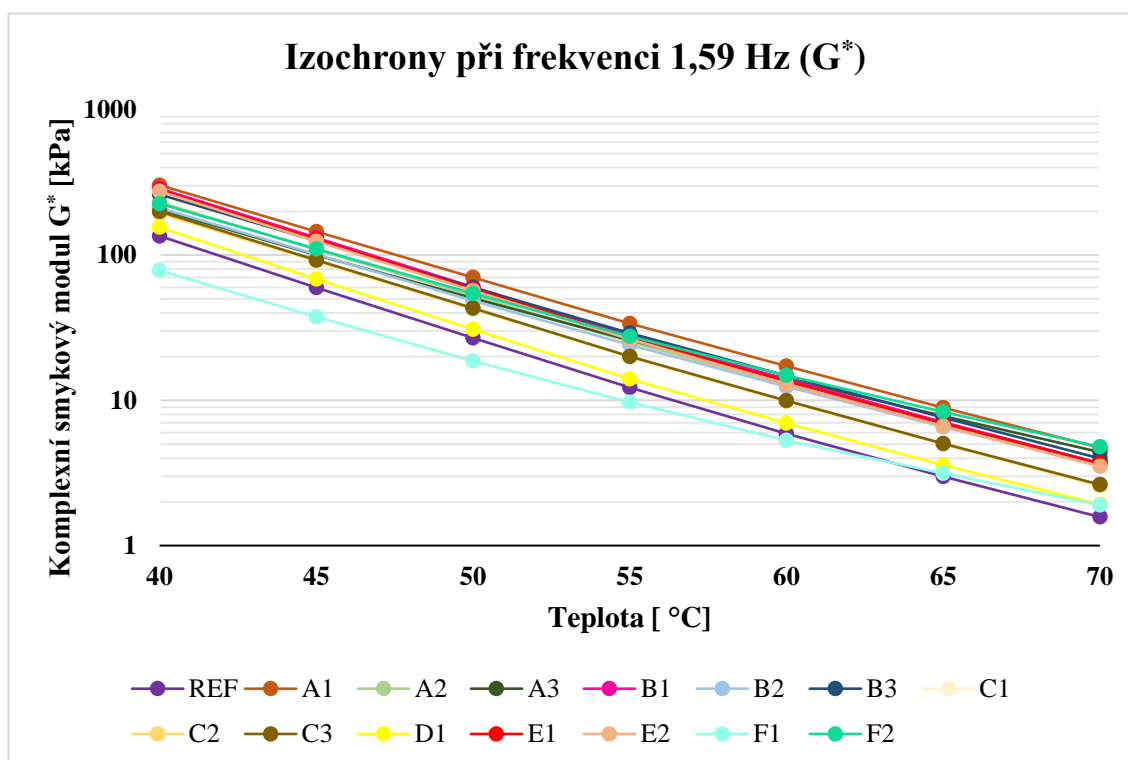


Graf č. 10: Úhel fázového posunu δ při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz

Dle grafu č. 10 je velikost fázových úhlů téměř všech zkoumaných zpětně získaných asfaltových pojiv vůči srovnávacímu pojivu nižší (vzorek pojiva REF), což znamená, že u těchto pojiv převahuje elastická oproti viskózní složce srovnávacího zpětně získaného asfaltového pojiva (vzorek pojiva REF). Hodnoty fázových úhlů se pohybují od 65,6° (vzorek pojiva F1) do 79,2° (vzorek pojiva D1). Podle výsledků komplexního smykového modulu a úhlu fázového posunu se jeví jako efektivní metoda pro oživení zestárlého pojiva užití asfaltového pojiva vyšší gradace. Vzorek pojiva D1 se velmi přibližuje výsledkům referenční směsi, která neobsahuje žádný R-materiál.

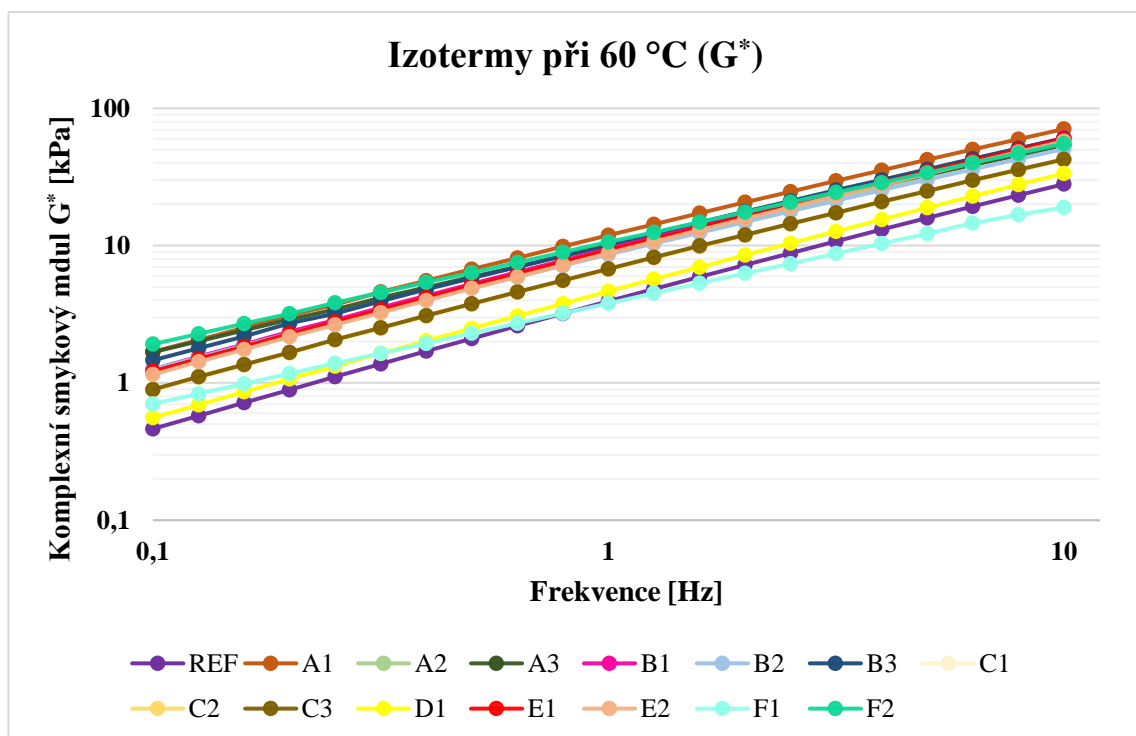
Hodnoty komplexního modulu i fázových úhlů nabývají značných rozdílů u jednotlivých vzorků. Například vzorek pojiva A1 dosáhl o přibližně 191 % vyššího komplexního modulu než referenční vzorek pojiva. Naopak vzorky pojiv F1 a F2 dosáhly o přibližně 21 % nižšího fázového úhlu než referenční vzorek pojiva.

Dalším způsobem, jak vyhodnotit data získané ze zkoušky DSR je využívání izochron a izoterm. Izochrony jsou křivky, které vyjadřují chování pojiva při konstantní frekvenci. Teplotní závislost komplexních smykových modulů je zachycena v grafu č. 11 izochronami komplexních modulů při frekvenci 1,59 Hz.



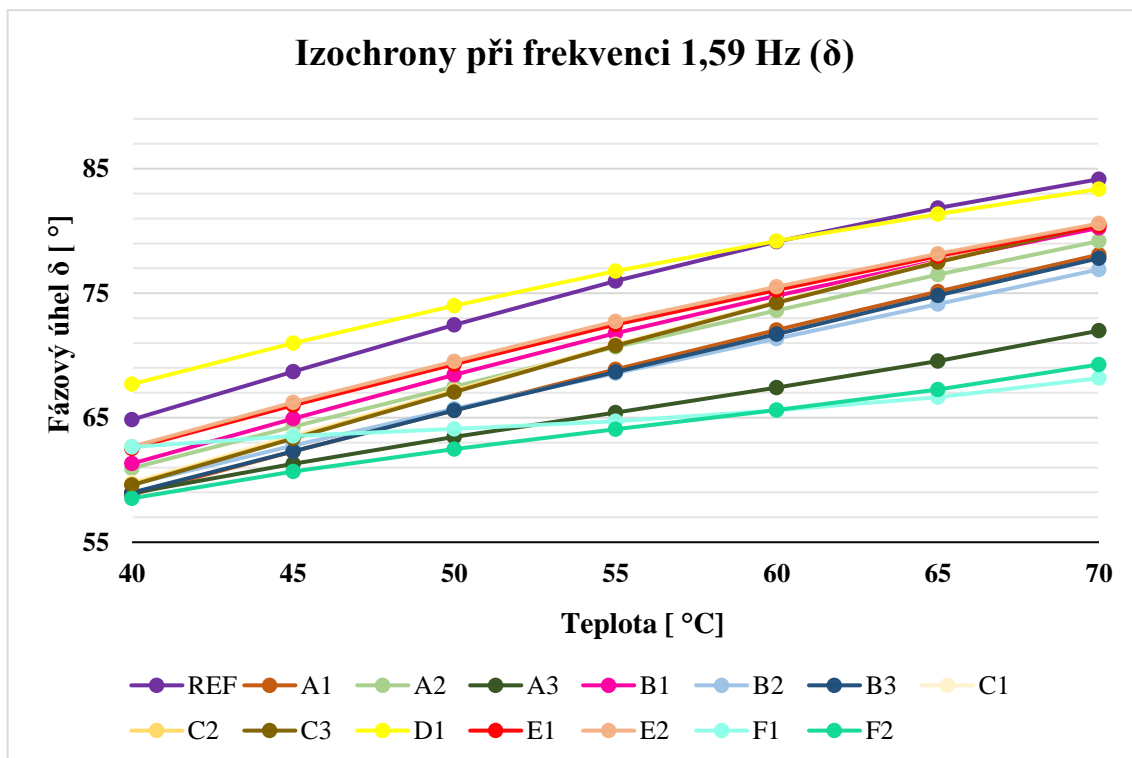
Graf č. 11: Izochrony komplexního smykového modulu při frekvenci 1,59 Hz

V grafu č. 11 jsou zobrazeny průběhy komplexních smykových modulů všech zpětně získaných asfaltových poživ, jejich hodnoty komplexních smykových modulů s rostoucí teplotou klesají. Frekvenční závislost komplexních smykových modulů je zachycena v grafu č. 12 izotermami komplexních modulů při teplotě 60 °C. Z grafu č. 12 je vidět silná závislost zpětně získaných asfaltových poživ na frekvenci zatěžování, kdy s rostoucí frekvencí zatížení roste komplexní smykový modul asfaltových poživ. Z Grafu č. 11 je evidentní, že nejnižších hodnot komplexního smykového modulu dosáhl vzorek F1, a naopak nejvyšších hodnot dosáhl vzorek A1. Dále je patrné, že se zvyšující se teplotou mají jednotlivé vzorky hodnotu komplexního modulu nepatrně více podobnou než u nižších teplot.

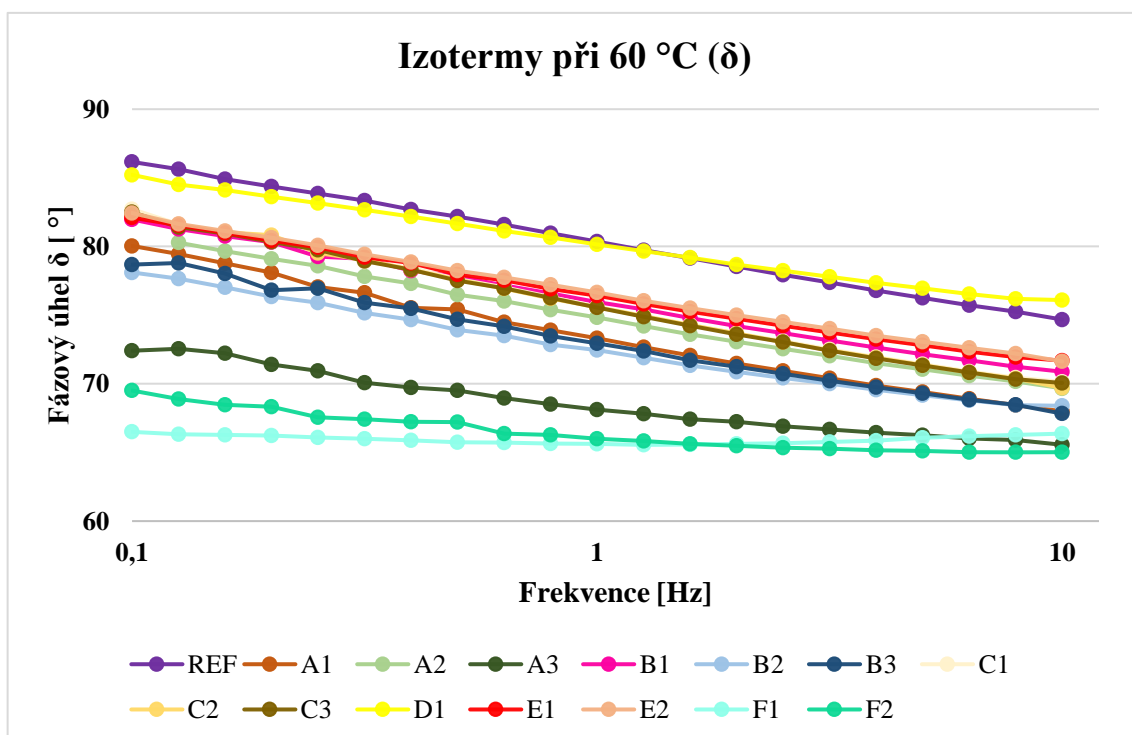


Graf č. 12: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 60 °C

Se zvyšujícím množstvím polymerních přísad přidávaných do asfaltových poživ dochází ke snižování fázových úhlů a tím současně klesání viskózní složky asfaltů. Tento jev můžeme vidět v grafech č. 13 a 14. U grafu č. 13 je nutno poznamenat, že s rostoucí teplotou se fázový úhel zvyšuje. Je patrné, že nejnižších hodnot dosáhl vzorek pojiva F1, nejvyšších hodnot dosáhl vzorek referenční směsi. Se zvyšující se teplotou se hodnoty fázového úhlu jednotlivých vzorků od sebe více vzdalují. Vlivem stárnutí asfaltových poživ se fázový úhel zpětně získaných asfaltových poživ snižuje.

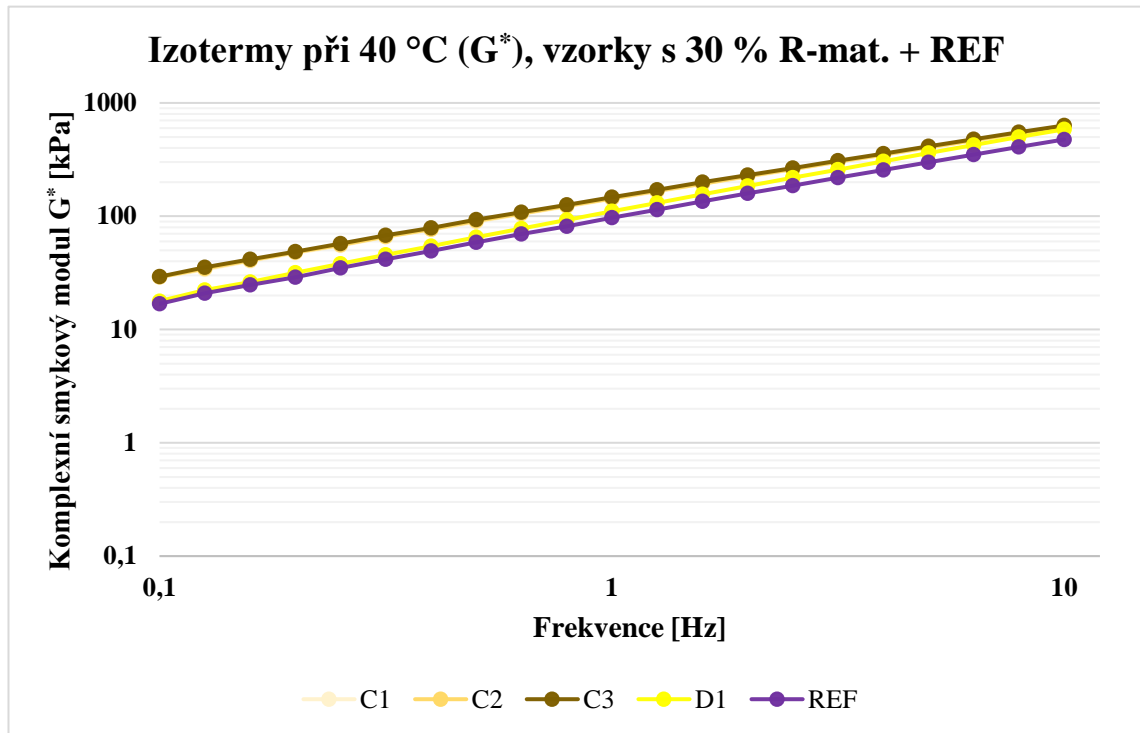


Graf č. 13: Izochrony fázových úhlů při frekvenci 1,59 Hz

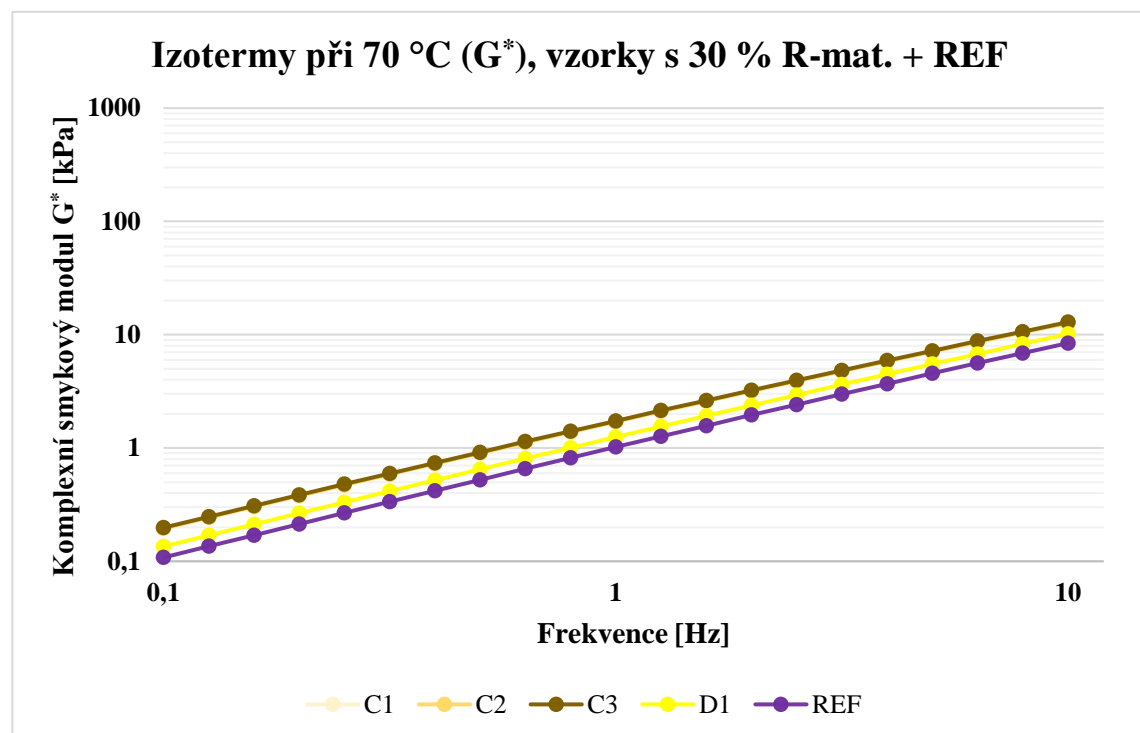


Graf č. 14: Izotermy fázových úhlů při teplotě 60 °C

V následujících grafech č. 15-20 jsou graficky znázorněny frekvenční závislosti komplexních smykových modulů izotermami při okrajových teplotách během provádění zkoušky pomocí dynamického smykového reometru. Pro lepší přehlednost jsou rozděleny podle obsahu R-materiálu a jsou vždy porovnávány s referenčním vzorkem.

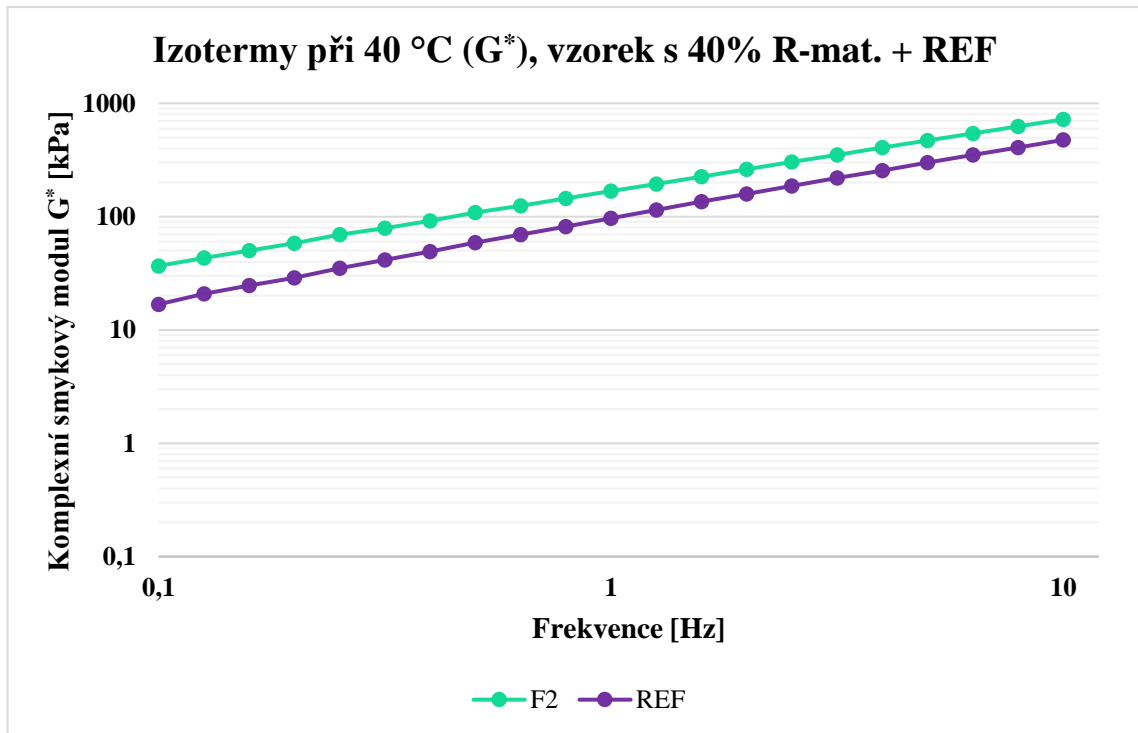


Graf č. 15: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 40 °C

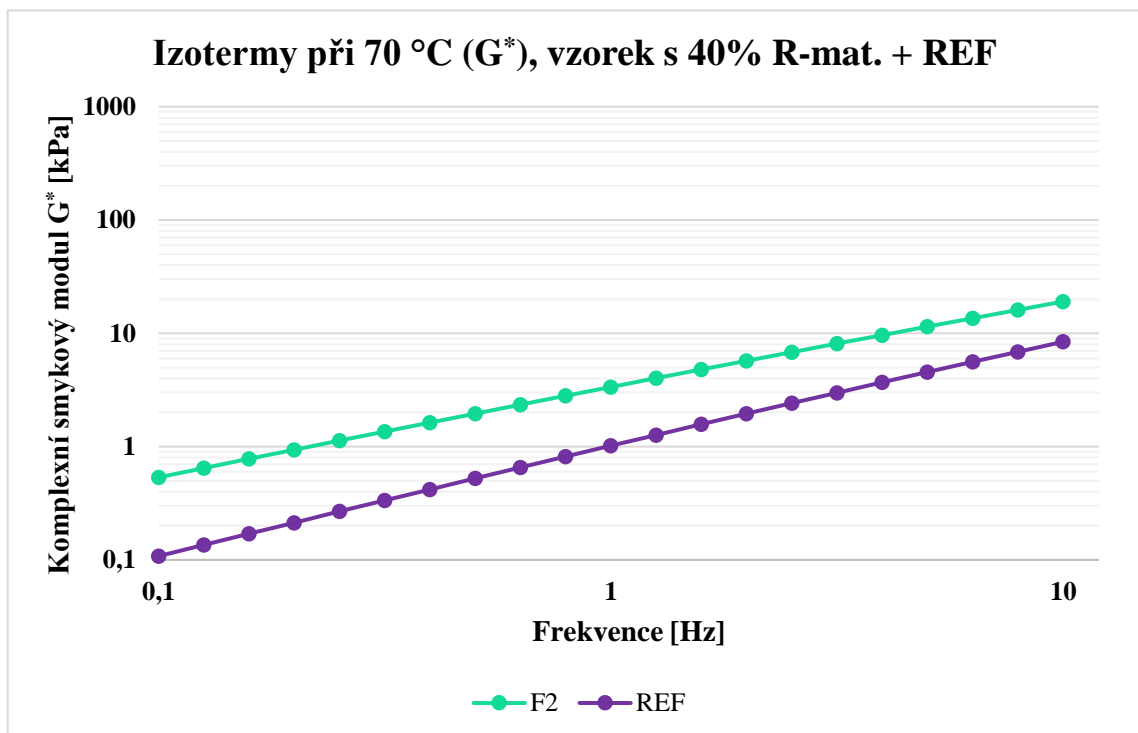


Graf č. 16: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 70 °C

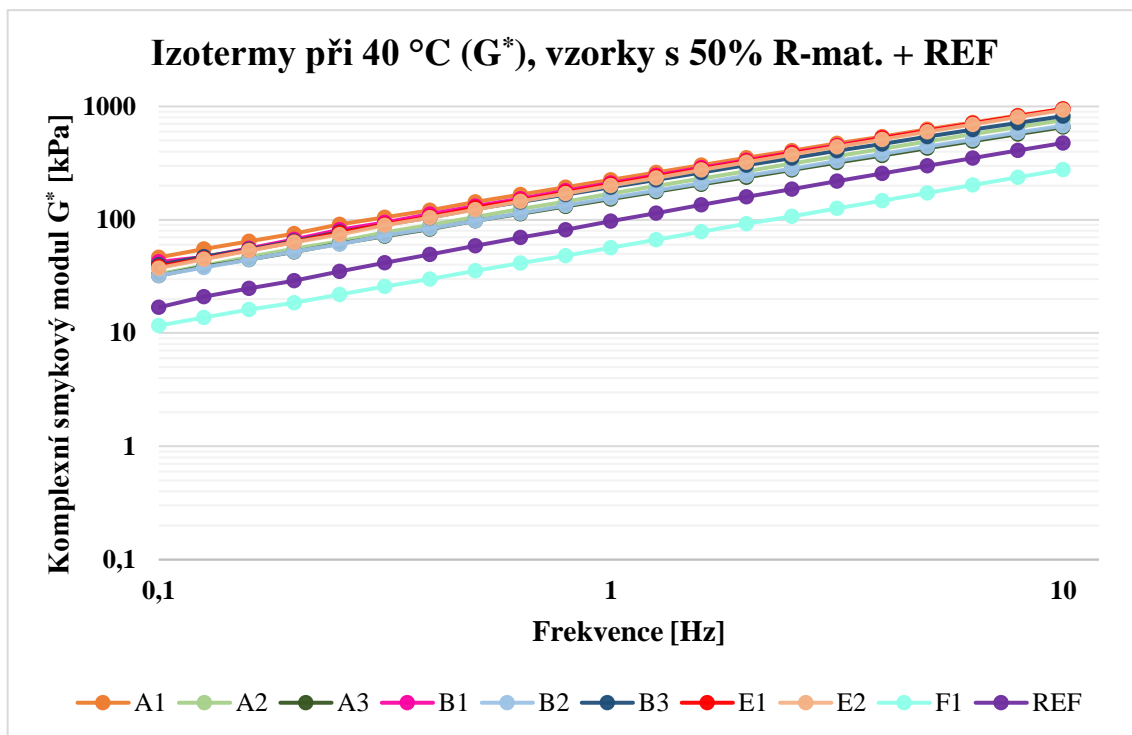
Z jednotlivých grafů je vidět silná závislost zpětně získaných asfaltových poživ na frekvenci zatěžování, kdy s rostoucí frekvencí zatížení roste komplexní smykový modul asfaltových poživ.



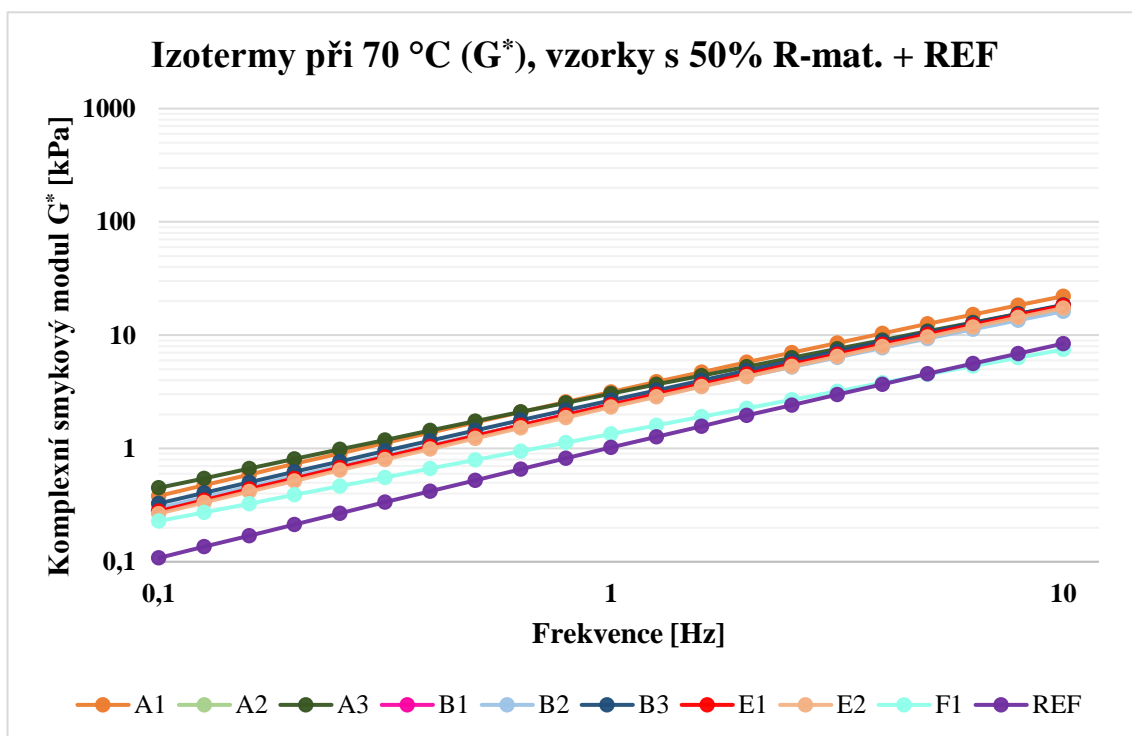
Graf č. 17: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 40 °C



Graf č. 18: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 70 °C

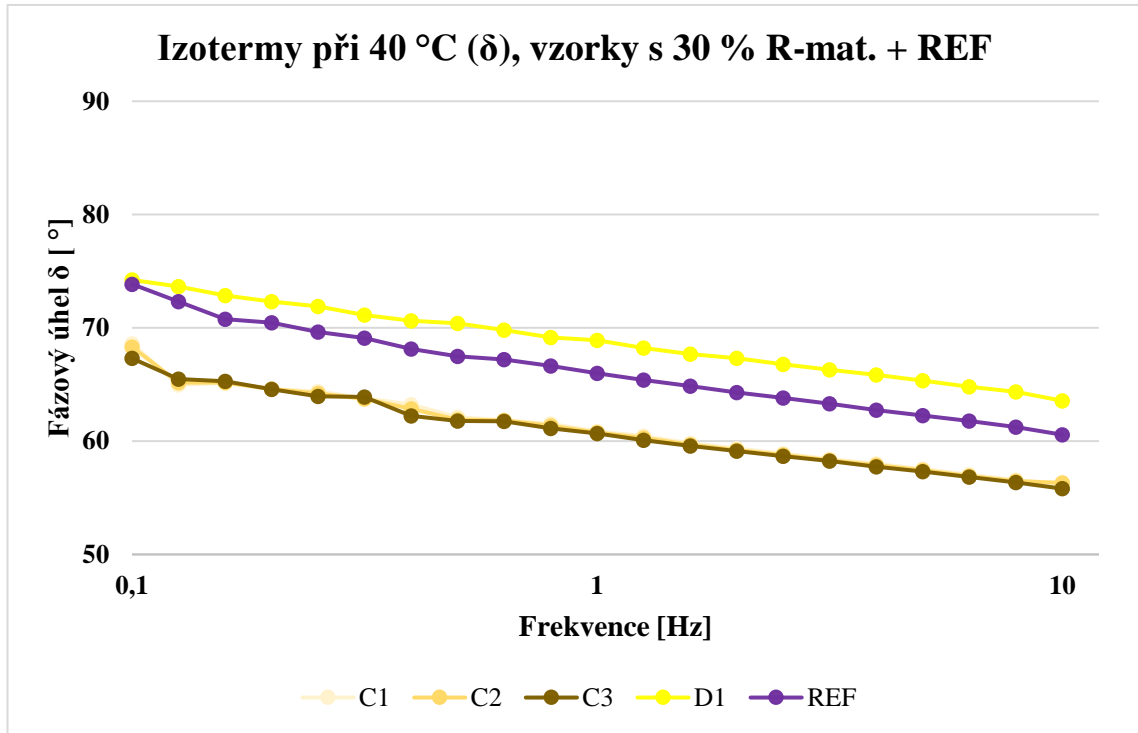


Graf č. 19: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 40 °C

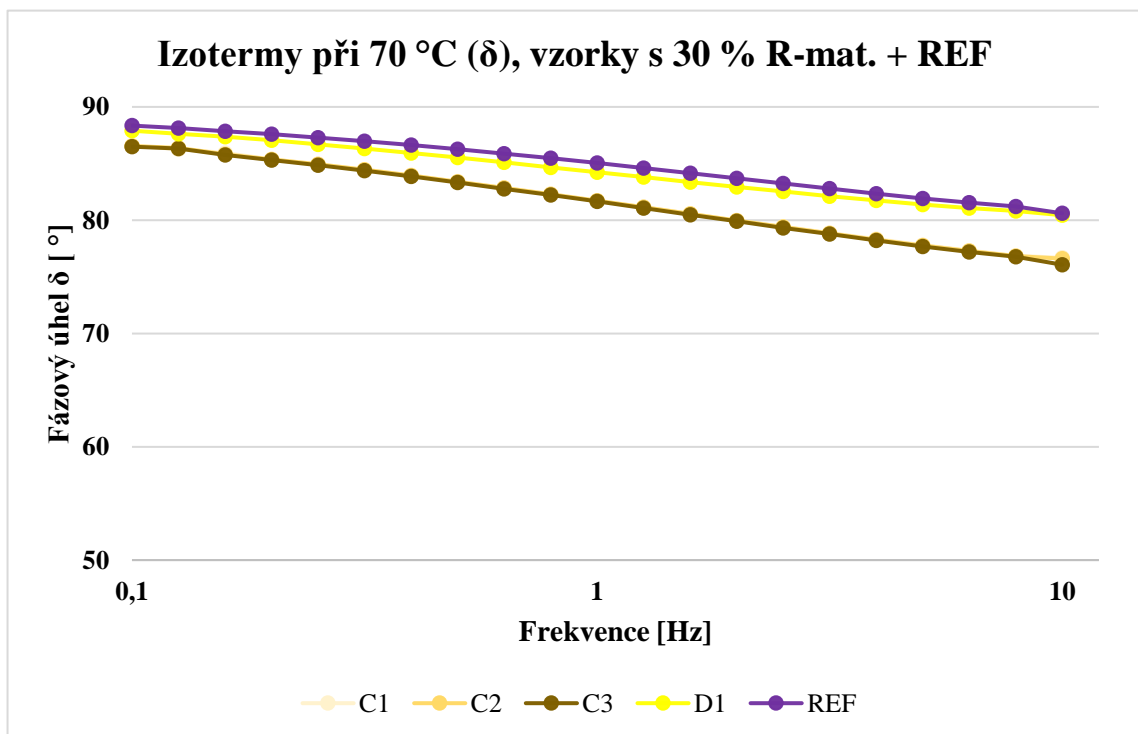


Graf č. 20: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 70 °C.

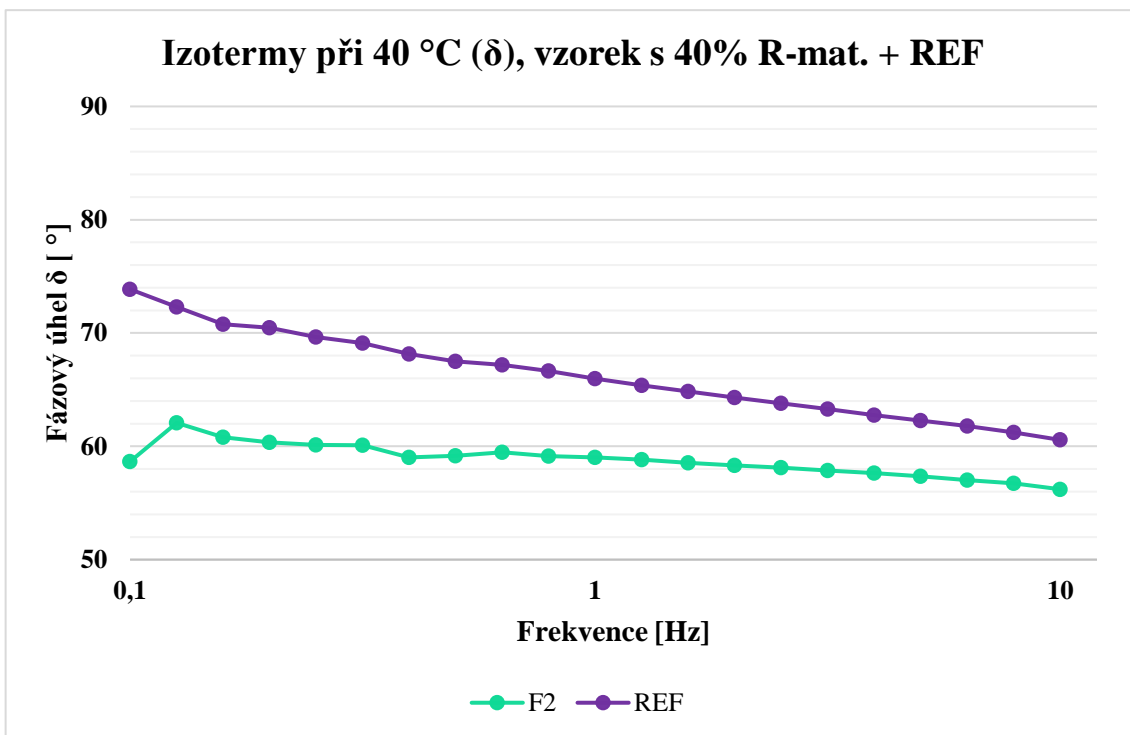
V následujících grafech č. 21-26 jsou graficky znázorněny frekvenční závislosti fázových posunů izotermami při okrajových teplotách během provádění zkoušky pomocí dynamického smykového reometru. Pro lepší přehlednost jsou rozděleny podle obsahu R-materiálu a jsou vždy porovnávány s referenčním vzorkem.



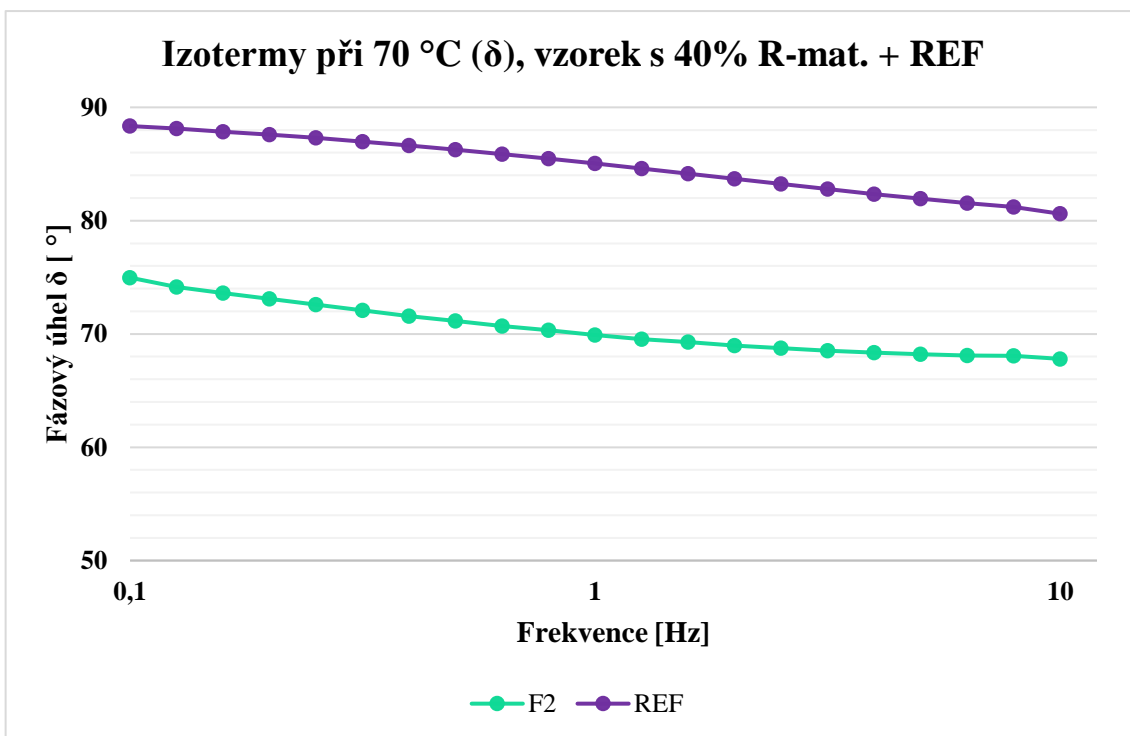
Graf č. 21: Izotermy fázových úhlů při teplotě 40 °C



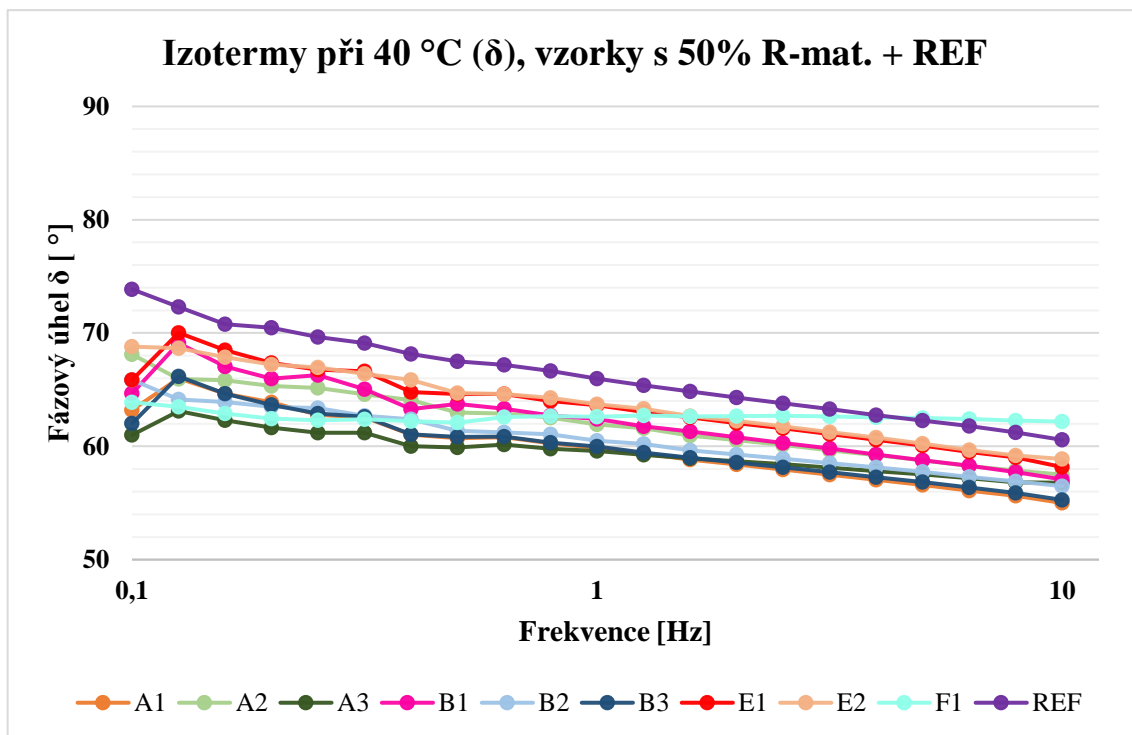
Graf č. 22: Izotermy fázových úhlů při teplotě 70 °C



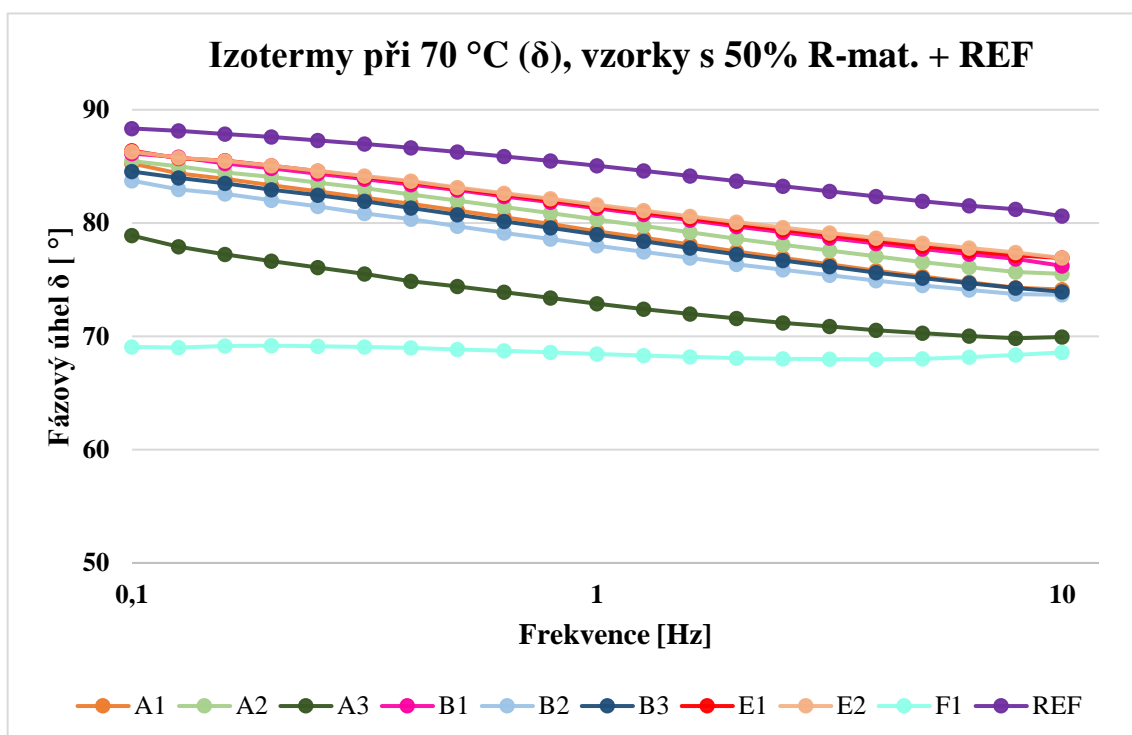
Graf č. 23: Izotermy fázových úhlů při teplotě 40 °C



Graf č. 24: Izotermy fázových úhlů při teplotě 70 °C



Graf č. 25: Izotermy fázových úhlů při teplotě 40 °C

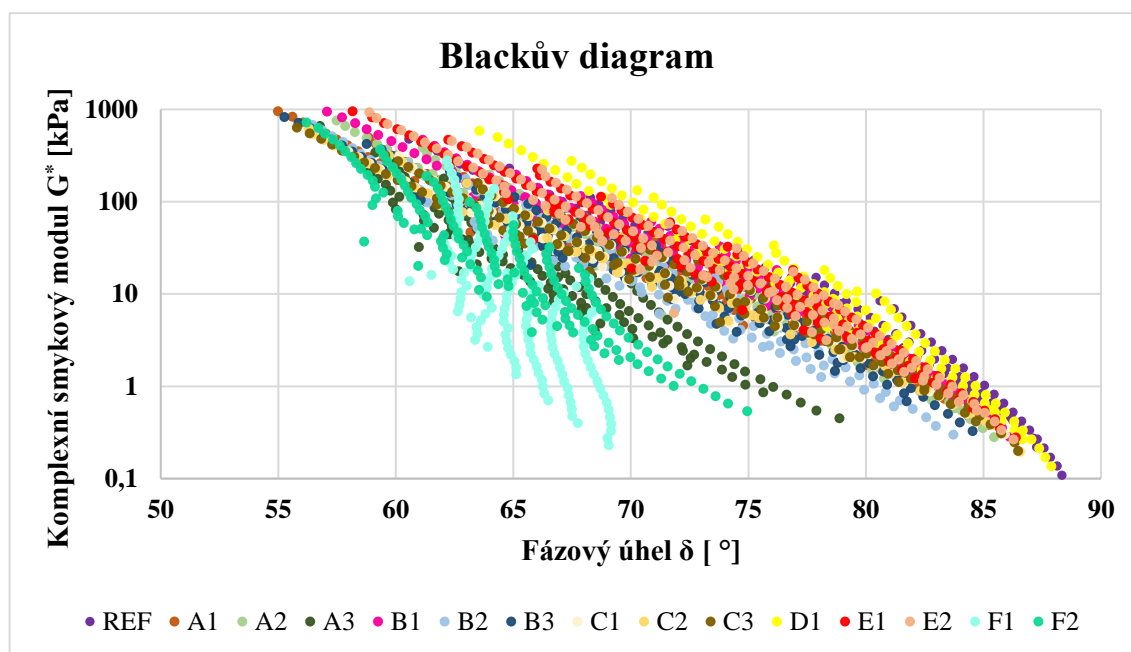


Graf č. 26: Izotermy fázových úhlů při teplotě 70 °C

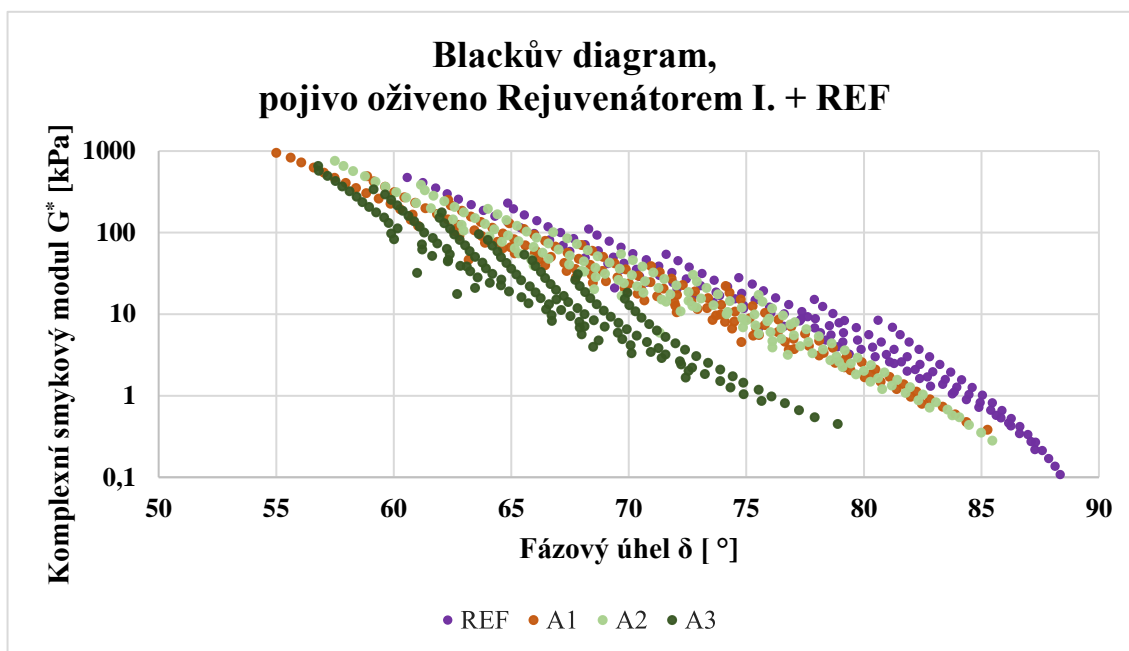
Dalším způsobem hodnocení asfaltových pojiv je možné provést podle tzv. *Blackových diagramů*. *Blackův diagram* udává závislost mezi komplexním modulem a fázovým úhlem. Tato závislost je zobrazena na grafu č. 27 pro veškeré vzorky zpětně získaných asfaltových pojiv. Grafy jsou následně rozděleny pro lepší přehlednost podle způsobu oživení zestárých asfaltových pojiv.

Obecně se dá *Blackův diagram* popsat tak, že pojivo zobrazené v grafu v levé dolní části je nejvíce elastické a nejvíce odolává trvalým deformacím. Směrem nahoru v grafu se pojivo stává více křehké.

Z grafů níže je zřejmé, že všechna zpětně získaná asfaltová pojiva vykazují podobný průběh, ačkoliv směsi s vyšším obsahem pojiva získaného z R-materiálu mají průběh protáhlejší. Charakteristické zakřivení některých vzorků je způsobeno modifikací pojiva, která při snižujících se hodnotách komplexního smykového modulu G^* udržuje hodnotu fázového úhlu níže. To znamená, že pojivo se i při vysokých teplotách stále chová poměrně výrazně elasticky, což zvyšuje jeho odolnost zejména vůči trvalým deformacím.

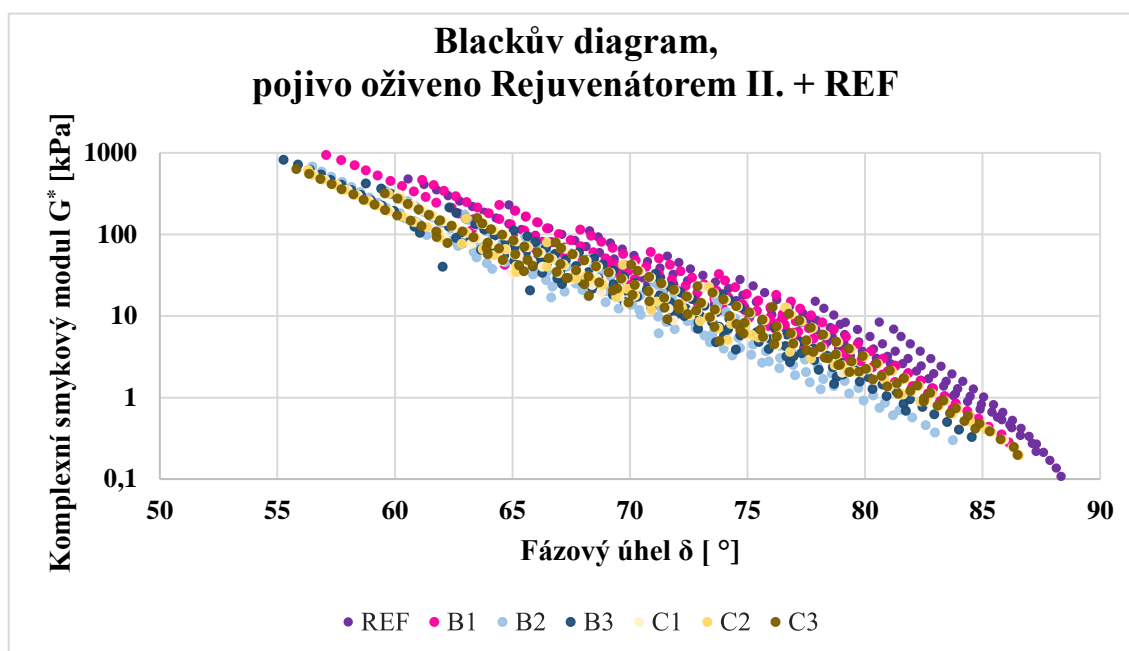


Graf č. 27: Blackův diagram, všechna zpětně získaná asfaltová pojiva

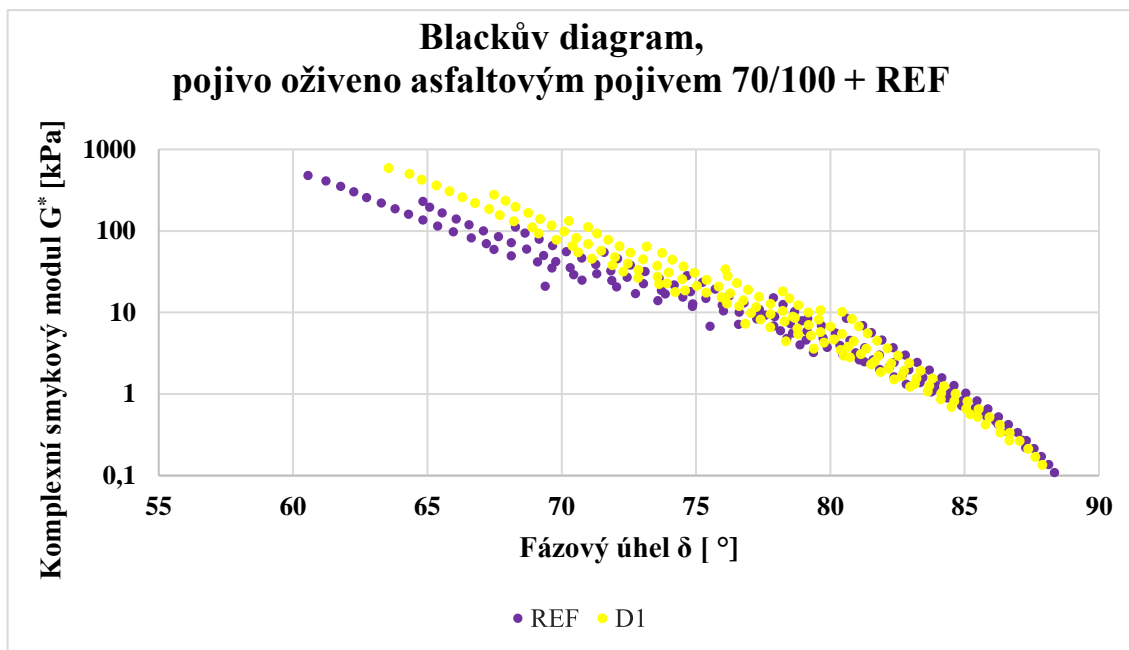


Graf č. 28: Blackův diagram pro vzorky pojiv A1-A3

Podle grafu č. 28 lze usoudit, že R-materiál obsažený ve směsi, ze které byl vyextrahován vzorek pojiva A3, pravděpodobně obsahoval polymerem modifikované asfaltové pojivo. Vzorky znázorněné v grafu č. 29 vykazují velmi podobné vlastnosti, přitom je použito různé dávkování Rejuvenátoru II. Vzorky pojiv B1-B3 obsahují 50 % R-materiálu, vzorky pojiv C1-C3 obsahují 30 % R-materiálu.

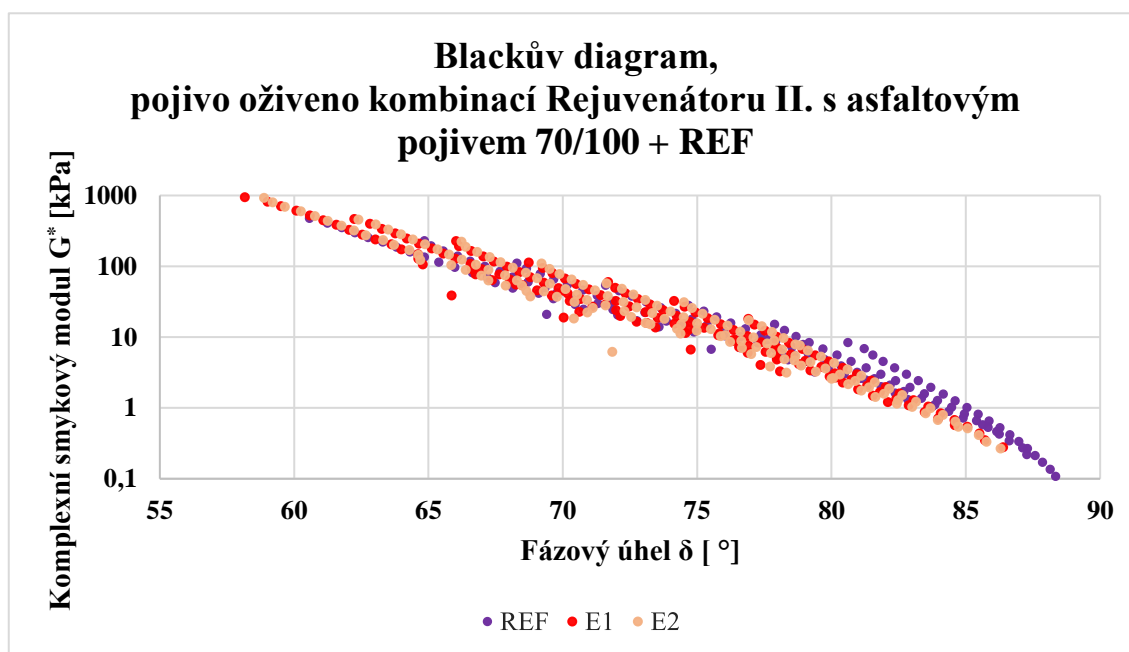


Graf č. 29: Blackův diagram pro vzorky pojiv B1-B3, C1-C3

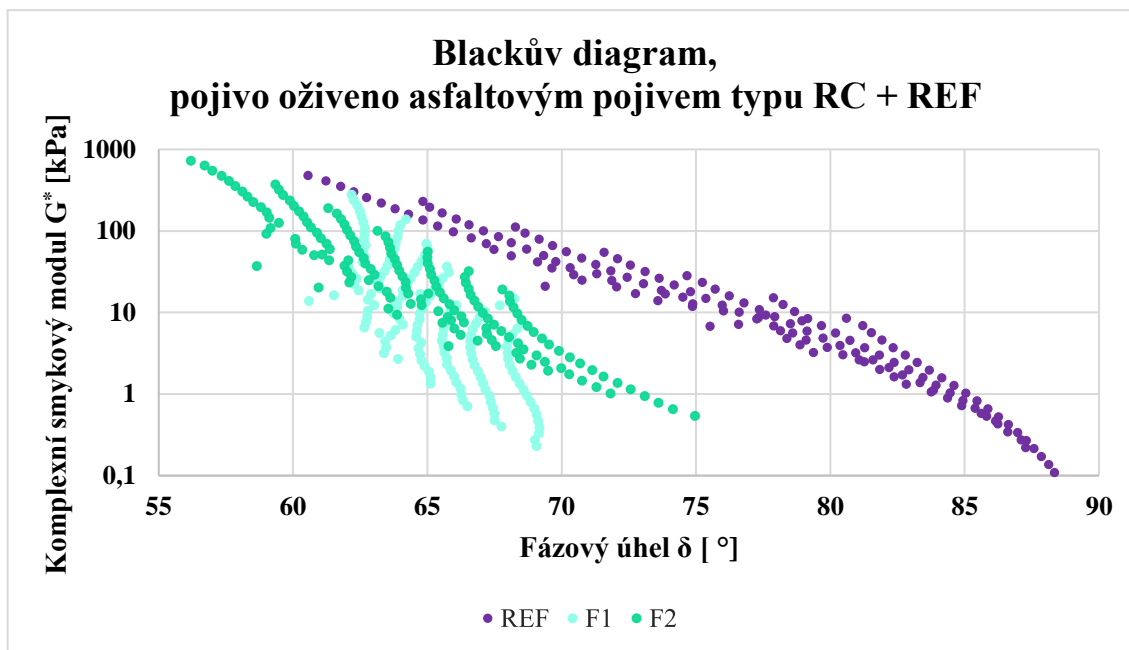


Graf č. 30: Blackův diagram pro vzorek pojiva D1

Zpětně získané asfaltové pojivo z asfaltové směsi ACL 16+ 50/70 s obsahem 30 % R-materiálu, kde bylo zestárlé pojivo oživeno silničním asfaltem 70/100 (vzorek pojiva D1) vykazuje podobné vlastnosti jako referenční směs, nicméně při zvyšujících hodnotách komplexního smykového modulu vykazuje větší fázový úhel, tudíž bude náchylnější k tvorbě trvalých deformací.



Graf č. 31: Blackův diagram pro vzorky pojiv E1 a E2



Graf č. 32: Blackův diagram pro vzorek pojiv F1 a F2

V grafu č. 32 můžeme vidět typické zakřivení pro polymerem modifikovaná pojiva, která při snižujících se hodnotách komplexního smykového modulu G^* udržuje hodnotu fázového úhlu níže. Tato vlastnost je velmi užitečná z pohledu dlouhodobých vlastností a životnosti asfaltové směsi a celé vozovky. Směs se stává odolnější vůči trvalým deformacím.



Obrázek č. 36: Nahřívání vzorku na zkušební teplotu na dynamickém smykovém reometru

6.4 Teplotní citlivost

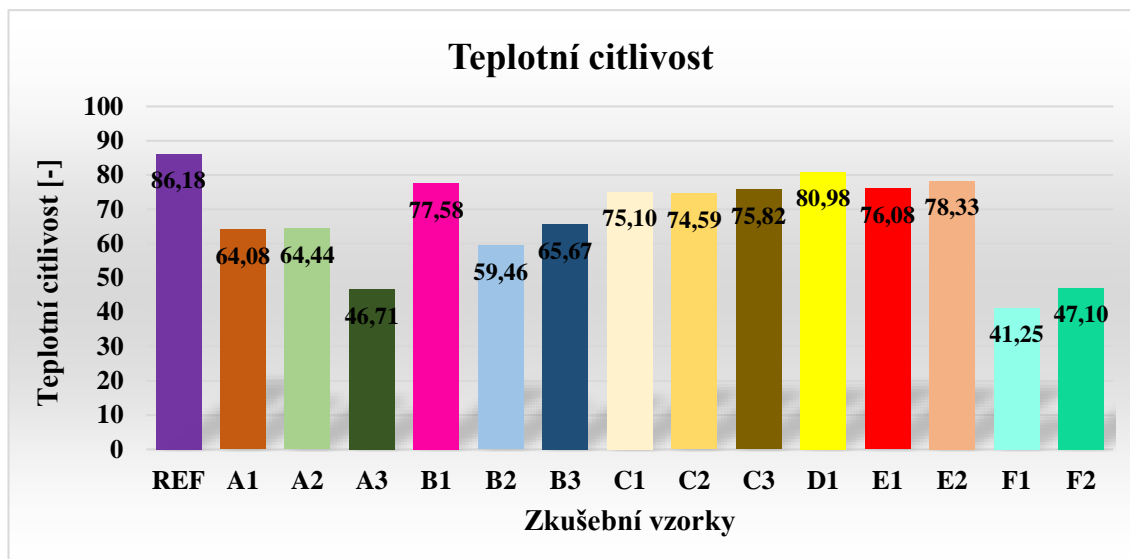
Teplotní citlivost vyjadřuje, jak reagují vlastnosti na změny teploty. Hodnoty teplotní citlivosti se pohybují od hodnoty 1, což značí minimální reakci pojiva na teplotní změny, k vyšším hodnotám, které představují zesílenou reakci na tyto změny. Tabulka č. 35 shrnuje výsledky teplotní citlivosti a graf č. 33 poskytuje srovnání teplotní citlivosti jednotlivých vzorků.

Teplotní citlivost byla vypočítána dle rovnice (2).

$$Tp = \frac{\text{Komplexní smykový modul při } 40 \text{ } ^\circ\text{C [kPa]}}{\text{Komplexní smykový modul při } 70 \text{ } ^\circ\text{C [kPa]}} \quad [-] \quad (2)$$

Tabulka č. 35: Teplotní citlivost jednotlivých zkušebních vzorků

Označení vzorku	G* při 40 °C [kPa]	G* při 70 °C [kPa]	TEPLOTNÍ CITLIVOST G* (40 °C) / G* (70 °C)
REF	135,31	1,57	86,18
A1	303,12	4,73	64,08
A2	230,68	3,58	64,44
A3	205,51	4,40	46,71
B1	287,06	3,70	77,58
B2	211,10	3,55	59,46
B3	261,38	3,98	65,67
C1	193,00	2,57	75,10
C2	193,93	2,60	74,59
C3	199,41	2,63	75,82
D1	155,48	1,92	80,98
E1	280,75	3,69	76,08
E2	274,94	3,51	78,33
F1	78,38	1,90	41,25
F2	225,63	4,79	47,10



Graf č. 33: Teplotní citlivost jednotlivých zkušebních vzorků

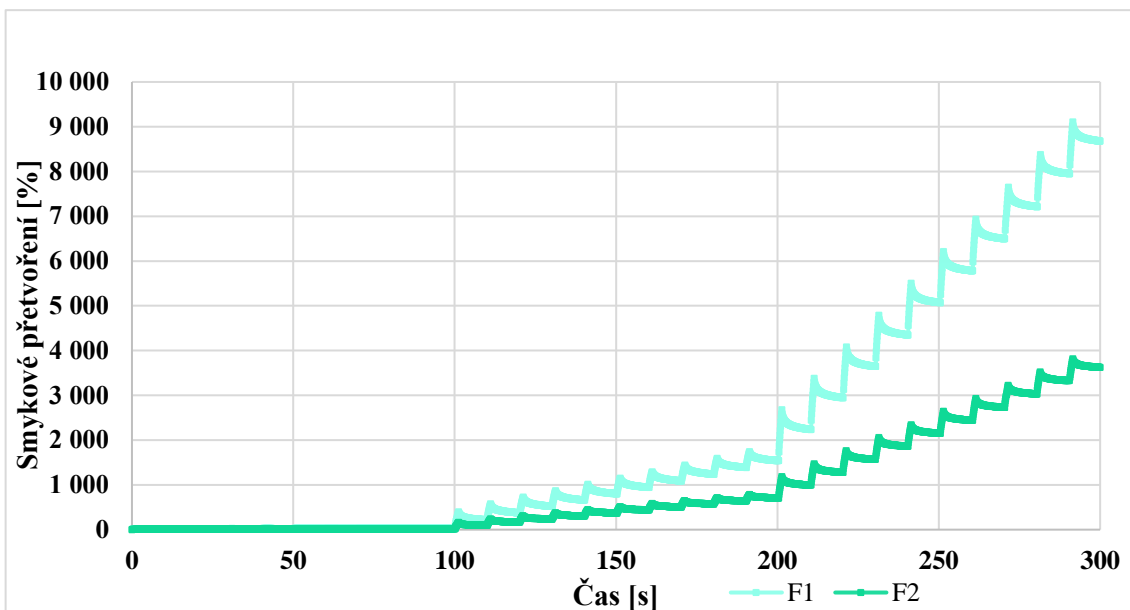
Z výsledků je patrné, že nejlepší teplotní citlivost má vzorek pojiva F1, jedná se o asfaltovou směs ACP 22S PMB 25/55-65 s obsahem 50 % R-materiálu. Vzorek pojiva A3 dosahuje v porovnání s ostatními vzorky nízké hodnoty. R-materiál obsažený v původní směsi pravděpodobně obsahoval polymerem modifikované pojivo. Naopak nejhůř na změnu teploty reaguje referenční směs, která neobsahuje žádný R-materiál.

Z výsledků lze obecně říci, že zpětně získané asfaltové pojivo, které bylo získáno z asfaltových směsí, kde bylo zestárlé pojivo oživeno Rejuvenátorem II., má horší teplotní citlivost (větší reakce na změnu teploty), než zpětně získané asfaltové pojivo z asfaltových směsí, kde bylo zestárlé pojivo oživeno Rejuvenátorem I.

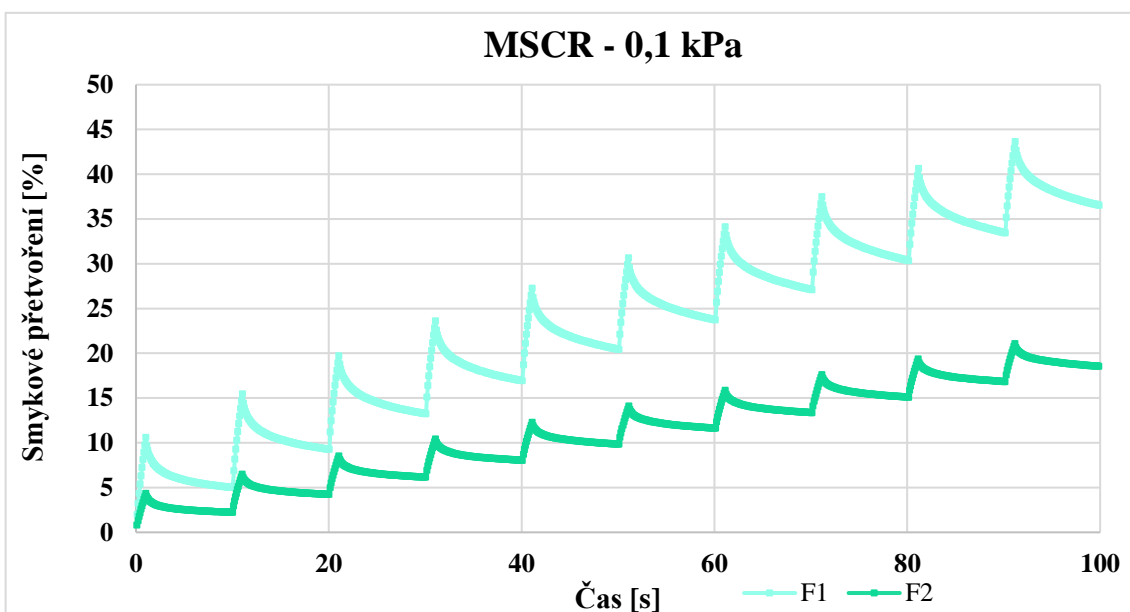
Velmi dobrých výsledků dosahují také vzorky pojiv F1 a F2, kde bylo zestárlé pojivo ožívováno asfaltovým pojivem typu RC.

6.5 Zkouška MSCR dle ČSN EN 16659

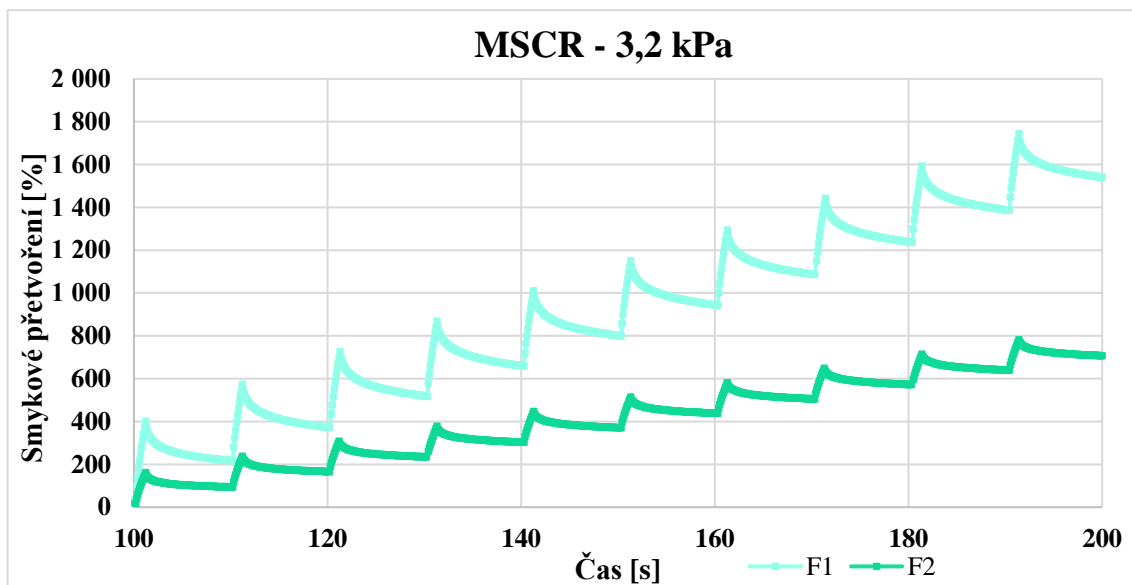
Poslední zkouška provedená pomocí dynamického smykového reometru je zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) dle normy ČSN EN 16659. Postup zkoušky je popsán v kapitole 5.2.2. Pro stanovení jednotlivých veličin byla použita geometrie deska-deska o průměru 25 mm s tloušťkou vzorku 1 mm. V této zkoušce byly testovány vzorky zpětně získaného asfaltového pojiva z asfaltových směsí s modifikovaným asfaltovým pojivem, tedy vzorky pojiv F1 a F2. Při měření byly vzorky pojiv zkoušeny pro teploty 60 °C.



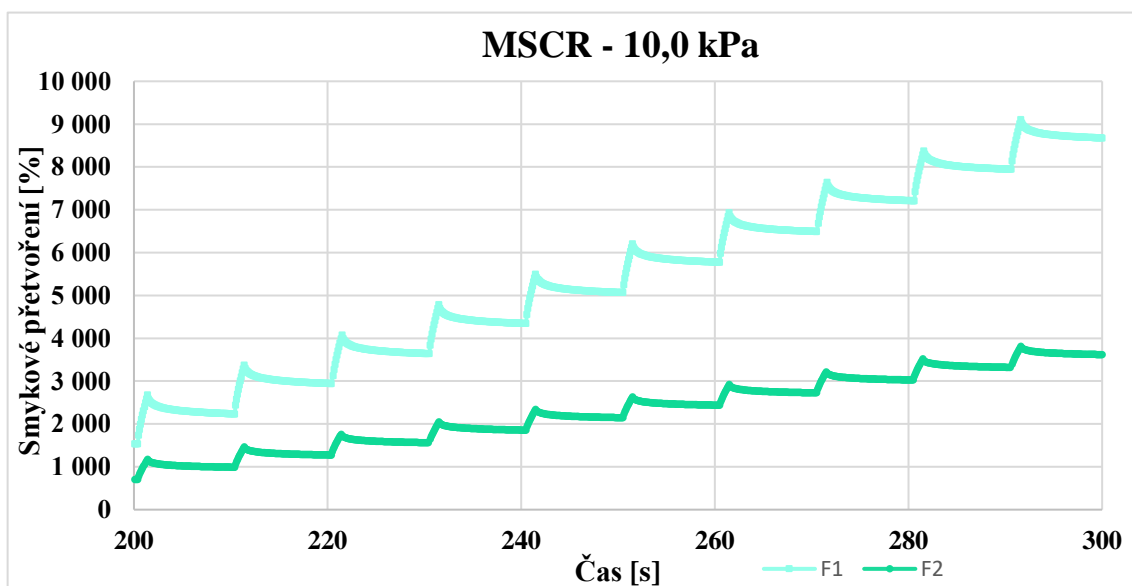
Graf č. 34: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při 60 °C



Graf č. 35: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při teplotě 60 °C při napětí 0,1 kPa



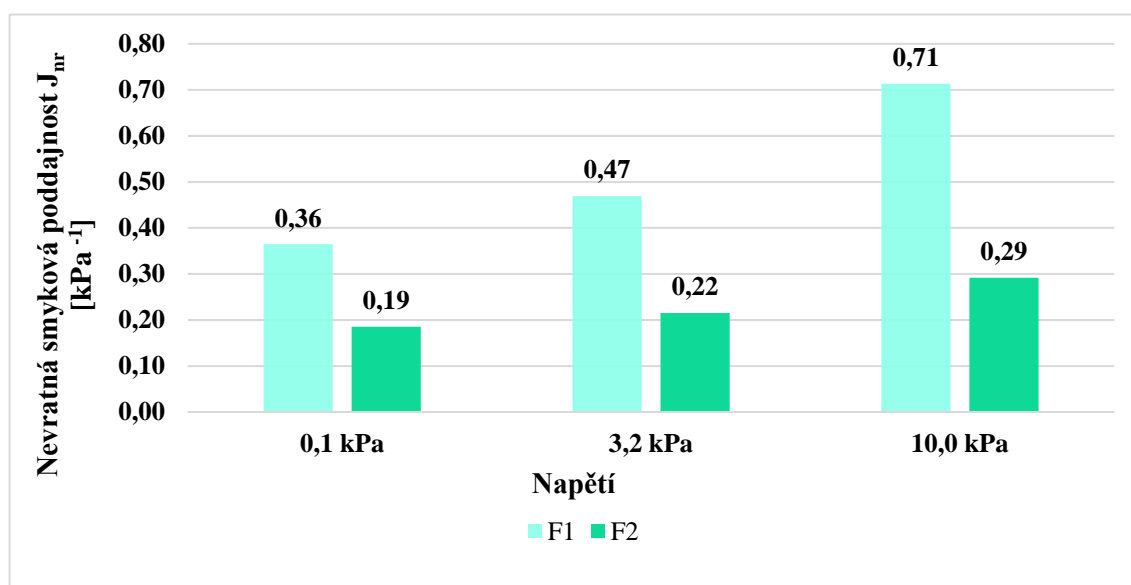
Graf č. 36: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při teplotě 60 °C při napětí 3,2 kPa



Graf č. 37: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při teplotě 60 °C při napětí 10,0 kPa

V grafech č. 34-37 je zobrazen průběh měření asfaltových pojiv metodou MSCR. Smykové přetvoření u zatěžovacího cyklu 0,1 kPa není tolik zřetelné jako u zatěžovacího cyklu 3,2 kPa nebo 10,0 kPa. Z grafů lze dojít k závěru, že největší smykové přetvoření nastalo u vzorku zpětně získaného asfaltového pojiva z asfaltové směsi ACP 22S PMB 25/55-65 (vzorek F1) při teplotě 60 °C. Vzorek zpětně získaného asfaltového pojiva z asfaltové směsi ACL 16S PMB 22/55-65 (vzorek pojiva F2) vykazuje podstatně nižší hodnoty smykového přetvoření.

Zkouška MSCR se vyhodnocuje pomocí hodnoty nevratné smykové poddajnosti J_{nr} , která musí být co nejnižší, aby asfaltové pojivo ve směsi bylo odolné proti vzniku trvalých deformací. Hodnota nevratné smykové poddajnosti vypovídá zjednodušeně o tom, jak je jednotlivé pojivo „měkké“. V grafu č. 38 jsou vyneseny hodnoty nevratné smykové poddajnosti při napětí 0,1 kPa, 3,2 kPa a 10,0 kPa při teplotě 60 °C. Lze si povšimnout, že s rostoucím napětím při zatížení hodnoty nevratné smykové poddajnosti rostou. Tato skutečnost má za následek, že asfaltové pojivo bude ve směsi více náchylné na vznik trvalých deformací.

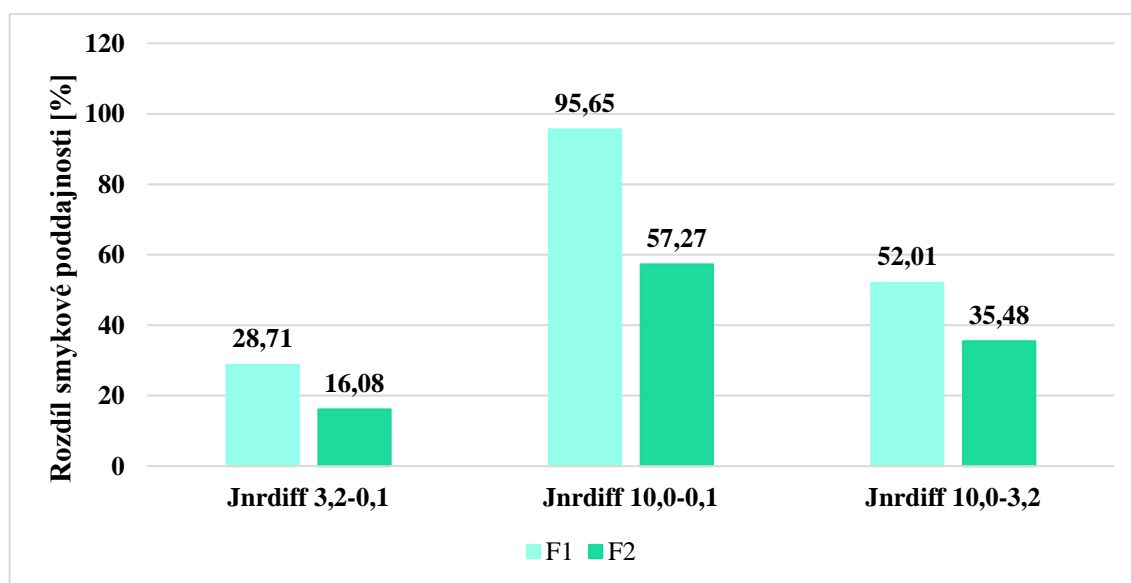


Graf č. 38: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 60 °C

Hodnota procentuálního rozdílu ve smykové poddajnosti porovnává první fázi zatěžování 0,1 kPa s druhou fází zatěžování 3,2 kPa, první fází zatěžování 0,1 kPa s třetí fází zatěžování 10,0 kPa a druhou fází zatěžování 3,2 kPa s třetí fází zatěžování 10,0 kPa. Podle normy je však platná jen hodnota procentuálního rozdílu pro první s druhou fází zatěžování. Maximální hodnota procentuálního rozdílu ve smykové poddajnosti dle požadavků USA je stanovena na hranici 75 %. Z grafu č. 39 si lze povšimnout, že při teplotě 60 °C splnily tuto podmínku oba vzorky.

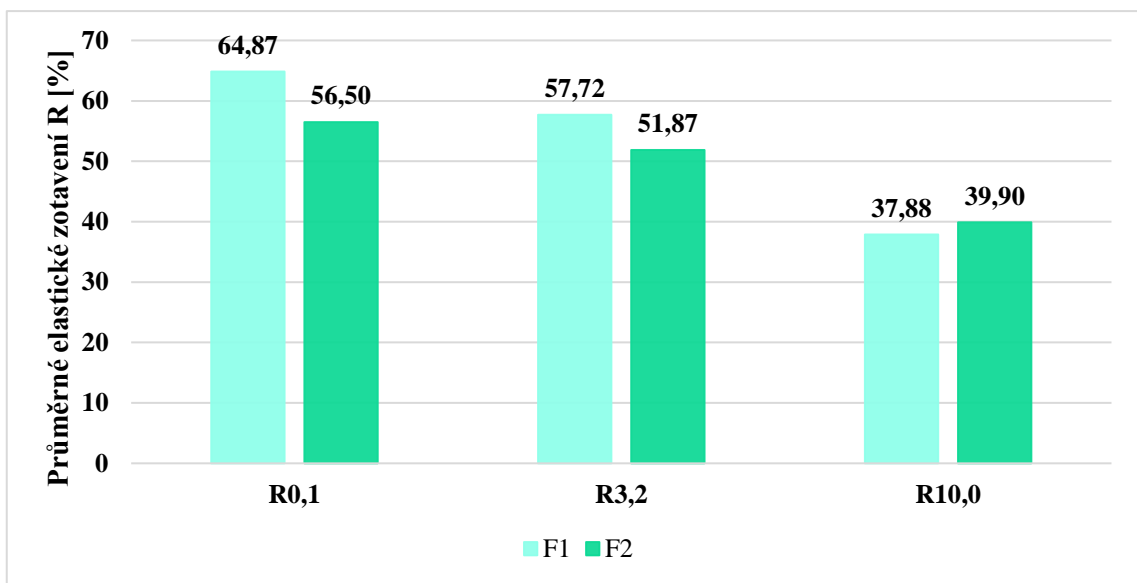
Tabulka č. 36: Procentuální rozdíl ve smykové poddajnosti při teplotě 60 °C

Procentuální rozdíl ve smykové poddajnosti	F1	F2
$J_{nr\text{diff } 3,2-0,1}$	28,71	16,08
$J_{nr\text{diff } 10,0-0,1}$	95,65	57,27
$J_{nr\text{diff } 10,0-3,2}$	52,01	35,48



Graf č. 39: Procentuální rozdíl ve smykové poddajnosti $J_{nr\text{diff}}$ při teplotě 60 °C

Dalším hodnotícím parametrem je hodnota průměrného elastického zotavení R, která popisuje odolnost asfaltového pojiva na vznik trvalých deformací. Vychází z předpokladu, že čím je větší hodnota průměrného elastického zotavení R, tím je asfaltové pojivo více odolné na vznik trvalých deformací a má vyšší schopnost se navracet do původního tvaru. Hodnota průměrného elastického zotavení vypovídá zjednodušeně o tom, jak je jednotlivé pojivo pružné. Jak je vidět na grafu č. 40, výsledné hodnoty průměrného elastického zotavení jsou u obou vzorků zpětně získaných asfaltových pojiv podobné, tudíž se zde dají očekávat podobné vlastnosti z pohledu náchylnosti ke vzniku trvalých deformací, například vyjetí kolejí.



Graf č. 40: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 60 °C

6.6 Stabilita použitých rejuvenátorů

Poslední provedenou zkouškou v rámci diplomové práce bylo posouzení stability použitých oživovacích přísad, konkrétně Rejuvenátoru I. a Rejuvenátoru II. Zkouška není součástí žádné platné normy, nicméně výsledky mají své vypovídající hodnoty. Postup zkoušky je podrobněji popsán v kapitole 5.2.3 *Stabilita použitých rejuvenátorů*.

V tabulce č. 37 a č. 39 jsou zaznamenány výsledky ze zkoušky stability Rejuvenátoru I., respektive Rejuvenátoru II. při teplotě na 120 °C, 160 °C a 180 °C. V tabulce č. 38 a č. 40 můžeme vidět vyhodnocení výsledků jednotlivých rejuvenátorů a jednotlivé změny hmotnosti vyjádřené v procentech.

V grafu č. 41 jsou přehledně zobrazeny výsledky změn hmotnosti vyjádřené v procentech jednotlivých rejuvenátorů.

Tabulka č. 37: Zaznamenané hmotnosti vzorku během zkoušky stability Rejuvenátoru I.

REJUVENÁTOR I.							
Teplota [°C]	Hmotnost vzorku [g]						
	Kádinka	Vzorek	Součet	1 hod	2 hod	3 hod	4 hod
120	80,35	31,05	111,40	111,35	111,35	111,35	111,35
160	78,45	30,30	108,75	108,70	108,65	108,65	108,65
180	60,75	31,65	92,40	92,30	92,30	92,30	92,25

Tabulka č. 38: Změny hmotnosti Rejuvenátoru I. při zkušebních teplotách

REJUVENÁTOR I.				
Teplota [°C]	Změna hmotnosti [%]			
	1 hod	2 hod	3 hod	4 hod
120	0,2	0,2	0,2	0,2
160	0,2	0,3	0,3	0,3
180	0,3	0,3	0,3	0,5

Tabulka č. 39: Zaznamenané hmotnosti vzorku během zkoušky stability Rejuvenátoru II.

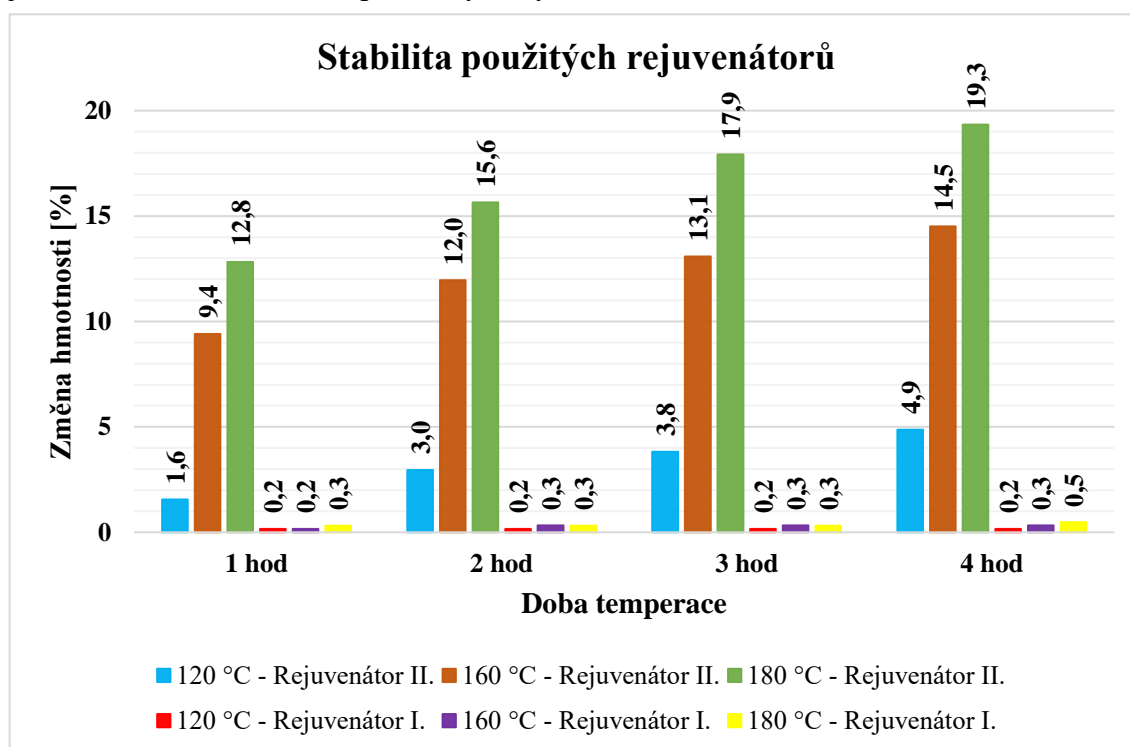
REJUVENÁTOR II.							
Teplota [°C]	Hmotnost vzorku [g]						
	Kádinka	Vzorek	Součet	1 hod	2 hod	3 hod	4 hod
120	80,95	28,75	109,70	109,25	108,85	108,60	108,30
160	79,35	31,35	110,70	107,75	106,95	106,60	106,15
180	58,55	28,45	87,00	83,35	82,55	81,90	81,50

Tabulka č. 40: Změny hmotnosti Rejuvenátoru II. při zkušebních teplotách

REJUVENÁTOR II.				
Teplota [°C]	Změna hmotnosti [%]			
	1 hod	2 hod	3 hod	4 hod
120	1,6	3,0	3,8	4,9
160	9,4	12,0	13,1	14,5
180	12,8	15,6	17,9	19,3

Již podle tabulky č. 38 je zřejmé, že Rejuvenátor I. je během zahřívání na běžné teploty na obalovnách velmi stabilní, nejvyšší změna hmotnosti proběhla při zahřívání na 180 °C po dobu 4 hodin, konkrétně se odpařilo 0,5 %. Podle výsledků je také zřejmé, že při zahřívání do teploty 180 °C po dobu 3 hodin se odpařilo maximálně 0,3 % Rejuvenátoru I.

V tabulce č. 40 si lze povšimnout velkých změn hmotnosti Rejuvenátoru II. již při zahřívání na teplotu 120 °C. Po 4 hodinách zahřívání na 180 °C se odpařilo přes 19 % původní hmotnosti. Rejuvenátor II. vykazuje podle této provedené zkoušky velkou nestabilitu při zahřívání na vyšší teploty. Poměrně velkou hmotnostní nestabilitu vykazuje již po jedné hodině zahřívání na teplotě 160 °C. Tato teplota i doba temperace je na obalovnách dosažena prakticky vždy.



Graf č. 41: Stabilita použitých rejuvenátoru při zahřívání na zkušební teploty

6.7 Souhrnná tabulka výsledků zkoušek

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty všech zkoušek zpětně získaných asfaltových pojev dle aktuálně platných norem.

Tabulka č. 41: Výsledky empirických i funkčních zkoušek všech zpětně získaných asfaltových pojev

Označení vzorku	Penetrace [0,1 mm]	Bod měknutí [°C]	G* [kPa]	Fázový úhel δ [°]	Teplotní citlivost
REF	33,5	55,6	5,91	79,1	86,18
A1	24,5	63,0	17,22	72,1	64,08
A2	28,5	60,7	12,90	73,6	64,44
A3	30,6	64,1	14,06	67,4	46,71
B1	25,3	60,7	13,95	74,8	77,58
B2	29,8	61,4	12,41	71,3	59,46
B3	28,1	61,5	14,75	71,7	65,67
C1	30,4	59,4	9,77	74,3	75,10
C2	30,6	59,5	9,89	74,3	74,59
C3	30,8	59,0	9,95	74,2	75,82
D1	35,1	56,1	6,97	79,2	80,98
E1	23,7	61,5	13,57	75,3	76,08
E2	25,2	60,6	12,98	75,5	78,33
F1	42,5	62,3	5,31	65,6	41,25
F2	30,2	66,1	14,82	65,6	47,10

Tabulka č. 42: Výsledky zkoušky MSCR

Označení vzorku	J _{nr0,1} [kPa ⁻¹]	J _{nr3,2} [kPa ⁻¹]	J _{nr diff 3,2-0,1} [%]	R _{0,1} [%]	R _{3,2} [%]	R _{diff 3,2-0,1} [%]
F1	0,36	0,47	28,7	64,87	57,72	11,01
F2	0,19	0,22	16,1	56,50	51,87	39,90

6.8 Korelace výsledků

Během zpracovávání diplomové práce bylo k vyhodnocení vlastností asfaltových pojiv použito empirického i funkčního přístupu. V diplomové práci je věnována pozornost především parametrům, které hodnotí chování pojiv za středních teplot. Pomocí těchto parametrů bylo možné komplexně posoudit chování všech zpětně získaných asfaltových pojiv, které jsou v práci popisovány. V této kapitole je i přes různorodost jednotlivých vzorků a velké množství vstupních hodnot, které výsledky mohou ovlivnit, snahou najít závislosti, které mezi jednotlivými parametry existují.

Korelace výsledků je znázorněna v následujících tabulkách, kde jsou veškeré vztahy vyhodnoceny koeficientem determinace. Jednotlivé korelace mezi prováděnými zkouškami jsou také znázorněny grafickou formou v příloze č. 1-3. Jednotlivé závislosti jsou popsány korelační funkcí s rovnicí křivky y a koeficientem determinace R^2 . Jestliže koeficient determinace nabývá hodnot blízkých se 1, pak se jedná o silnou závislost. Pokud je naopak jeho hodnota blízká 0, můžeme říci, že mezi proměnnými neexistuje žádná závislost.

V tabulce č. 43 jsou popsány závislosti mezi jednotlivými provedenými zkouškami. Z výsledků vyplývá, že pokud jsou do korelačního vztahu zahrnuta všechna pojiva, je korelační součinitel R^2 vesměs velmi malý, tudíž se jedná o slabou závislost. Největší hodnoty dosahuje korelační součinitel mezi hodnotou fázového úhlu a hodnotou teplotní citlivosti, konkrétně 0,9245. Závislost mezi hodnotou fázového úhlu a hodnotou bodu měknutí je také poměrně velká, konkrétně 0,7195.

Tabulka č. 43: Korelace výsledků – všechna zpětně získaná asfaltová pojiva

	Penetrace	Bod měknutí	Komplexní modul	Fázový úhel	Teplotní citlivost
Penetrace	1	0,0181	0,687	0,1454	0,2269
Bod měknutí	0,0181	1	0,3387	0,7195	0,5975
Komplexní modul	0,687	0,3387	1	0,0156	0,0022
Fázový úhel	0,1454	0,7195	0,0156	1	0,9245
Teplotní citlivost	0,2269	0,5975	0,0022	0,9245	1

Ve snaze najít závislosti, které mezi jednotlivými parametry existují, jsou jednotlivé skupiny pojiv vyhodnocovány samostatně:

- tabulka č. 44 odpovídá vzorkům pojiv, kde pro oživení zestárlého asfaltového pojiva bylo použito oživovací přísady Rejuvenátoru I. v různém dávkování, tedy vzorky pojiv A1-A3,
- tabulka č. 45 odpovídá vzorkům pojiv, kde pro oživení zestárlého asfaltového pojiva bylo použito oživovací přísady Rejuvenátoru II. v různém dávkování, tedy vzorky pojiv B1-B3 a C1-C3,
- tabulka č. 46 odpovídá vzorkům pojiva, kde zestárlé asfaltové pojivo bylo oživeno různými metodami (Rejuvenátorem I., Rejuvenátorem II., asfaltovým pojivem vyšší gradace a kombinací Rejuvenátoru II. + asfaltem 70/100). Pro tento účel byly vybrány vzorky zpětně získaných asfaltových pojiv A1, B1, D1, E2,
- tabulka č. 47 představuje vzorky asfaltových pojiv, kde bylo použito různé dávkování R-materiálu (30 %, 40 % a 50 % R-materiálu), jako zástupci byly vybrány vzorky pojiv A1, D1 a F2.

Tabulka č. 44: Korelace výsledků – Rejuvenátor I. v různém dávkování (vzorky pojiv A1-A3)

	Penetrace	Bod měknutí	Komplexní modul	Fázový úhel	Teplotní citlivost
Penetrace	1	0,0169	0,6709	0,3435	0,5684
Bod měknutí	0,0169	1	0,2136	0,7737	0,5617
Komplexní modul	0,6709	0,2136	1	0,0002	0,0579
Fázový úhel	0,3435	0,7737	0,0002	1	0,949
Teplotní citlivost	0,5684	0,5617	0,0579	0,949	1

Tabulka č. 45: Korelace výsledků – Rejuvenátor II. v různém dávkování (vzorky B1-B3,C1-C3)

	Penetrace	Bod měknutí	Komplexní modul	Fázový úhel	Teplotní citlivost
Penetrace	1	0,3204	0,6601	0,0052	0,0138
Bod měknutí	0,3204	1	0,7886	0,587	0,5543
Komplexní modul	0,6601	0,7886	1	0,2443	0,1666
Fázový úhel	0,0052	0,587	0,2443	1	0,957
Teplotní citlivost	0,0138	0,5543	0,1666	0,957	1

Z tabulky č. 44 je zřejmé, že zpětně získaná asfaltová pojiva, kde bylo zestárlé pojivo oživeno Rejuvenátorem I. v různém dávkování se silná závislost objevuje pouze mezi hodnotou fázového úhlu a hodnotou teplotní citlivosti. Relativně silná závislost se objevuje také mezi hodnotou fázového úhlu a hodnotou bodu měknutí, kde koeficient determinace dosahuje hodnoty 0,7737. Mezi ostatními provedenými zkouškami není významná žádná jiná silná závislost. Tyto výsledky ukazují, že pojivo oživeno tímto rejuvenátorem nemění výrazně své vlastnosti v závislosti na jeho dávkování.

Obdobných výsledků dosahují také zpětně získaná asfaltová pojiva, kde bylo zestárlé pojivo oživeno Rejuvenátorem II. v různém dávkování. Z tabulky č. 45 vyplývá, že největší závislost se objevuje mezi hodnotou fázového úhlu a hodnotou teplotní citlivosti. Vyšších hodnot koeficientu determinace dosahují také závislosti mezi hodnotou komplexního modulu a hodnotou penetrace a hodnotou bodu měknutí, konkrétně 0,6601, respektive 0,7886. Výsledky opět ukazují, že pojivo oživeno tímto rejuvenátorem nemění výrazně své vlastnosti v závislosti na jeho dávkování.

Tabulka č. 46: Korelace výsledků – Oživení zestárlého pojiva různými metodami (vzorky pojiv A1, B1, D1 a E2)

	Penetrace	Bod měknutí	Komplexní modul	Fázový úhel	Teplotní citlivost
Penetrace	1	0,8983	0,8678	0,7988	0,317
Bod měknutí	0,8983	1	0,9926	0,976	0,6355
Komplexní modul	0,8678	0,9926	1	0,9912	0,6683
Fázový úhel	0,7988	0,976	0,9112	1	0,7522
Teplotní citlivost	0,317	0,6355	0,6683	0,7522	1

Z tabulky č. 46, která vyhodnocuje pojiva, kde bylo zestárlé pojivo oživováno různými metodami, je evidentní velmi silná závislost mezi jednotlivými zkouškami. Korelační součinitel je nejsilnější mezi hodnotou komplexního modulu a hodnotou bodu měknutí, konkrétně 0,9926. Vysoké hodnoty korelačního součinitele v téměř každé závislosti značí, že správná volba použité metody oživení zestárlého pojiva hraje při výsledných vlastnostech asfaltové směsi klíčovou roli.

Tabulka č. 47: Korelace výsledků – Různý obsah R-materiálu (vzorky pojiv A1, D1 a F2)

	Penetrace	Bod měknutí	Komplexní modul	Fázový úhel	Teplotní citlivost
Penetrace	1	0,4111	0,8879	0,2389	0,2122
Bod měknutí	0,4111	1	0,7415	0,966	0,9535
Komplexní modul	0,8879	0,7415	1	0,5665	0,5347
Fázový úhel	0,2389	0,966	0,5665	1	0,999
Teplotní citlivost	0,2122	0,9535	0,5347	0,999	1

Závislosti zpětně získaných asfaltových pojiva z asfaltových směsí, kde byl použit různý obsah R-materiálu jsou představeny v tabulce č. 47. Největší závislost se objevuje mezi hodnotou fázového úhlu a hodnotou teplotní citlivosti, konkrétně 0,999. Velká hodnota korelačního součinitele je také mezi hodnotou komplexního modulu a hodnotou penetrace a také mezi hodnotou bodu měknutí a hodnotou fázového úhlu. Korelační součinitel zde dosahuje hodnoty 0,8879, respektive 0,966.

7 ZÁVĚR

Při použití R-materiálu při výrobě asfaltových směsí je nutno oživit zestárlé asfaltové pojivo, které je obsaženo v R-materiálu. Tohoto oživení je možno dosáhnout různými metodami. Za účelem obnovení vlastností zestárlého asfaltového pojiva je možné použít pojiva vyšší gradace nebo tzv. oživovací přísady.

Hlavním cílem diplomové práce bylo provést srovnání vlastností zpětně získaných asfaltových pojiv z asfaltových směsí s R-materiálem, u kterých bylo při jejich výrobě zestárlé asfaltové pojivo oživeno různými metodami. Diplomová práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části bylo cílem posluchače seznámit s danou problematikou. Zpočátku byl popsán samotný R-materiál, jak se získává, upravuje, skladuje a jaké jsou požadavky dle aktuálně platných norem. Dále byla popsána samotná výroba asfaltové směsi s R-materiálem. Bylo definováno stárnutí asfaltových pojiv a podrobně popsány jednotlivé možnosti oživení zestárlého pojiva. V další části diplomové práce byly uvedeny použité materiály a použité zkušební metody.

V praktické části diplomové práce byly na vzorcích zpětně získaných asfaltových pojiv provedeny zkoušky empirické a funkční. Ze zkoušek empirických byla provedena penetrace jehlou dle ČSN EN 1426 a byl stanoven bod měknutí metodou kroužek a kulička dle ČSN EN 1427. Ze zkoušek funkčních byl stanoven komplexní smykový modul a úhel fázového posunu v dynamickém smykovém reometru dle ČSN EN 14770. U polymerem modifikovaných asfaltových pojiv byla provedena zkouška MSCR dle ČN EN 16659. Nad rámec platných norem byla provedena zkouška stability použitých rejuvenátorů při zahřívání na vyšší teploty.

Celkem bylo odzkoušeno 15 vzorků různých zpětně získaných asfaltových pojiv, z toho 14 vzorků pojiv obsahovalo R-materiál, kde bylo zestárlé asfaltové pojivo oživeno různými metodami a 1 vzorek pojiva z referenční směsi, která neobsahovala žádný R-materiál. Oživovací přísady jako takové mají velmi rozdílné fyzikální i reologické vlastnosti. Tento stav je způsoben především absencí předpisů, které by upravovaly požadavky na oživovací přísady. V této diplomové práci byly zastoupeny všechny možnosti oživení zestárlých asfaltových pojiv.

Vzorky pojiv A1-A2, kde bylo zestárlé asfaltové pojivo oživeno Rejuvenátorem I., vzorky pojiv B1-B3, kde bylo zestárlé asfaltové pojivo oživeno Rejuvenátorem II. a vzorky pojiv E1-E2, kde bylo zestárlé pojivo oživeno Rejuvenátorem II v kombinaci s asfaltovým pojivem 70/100 nesplnily normou předepsanou gradací zpětně získaného asfaltového pojiva 50/70, podle tabulky č. 2 na stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426. Jednotlivé vzorky vykazují mezi sebou velmi podobné výsledky. Ostatní vzorky pojiv splnily požadavky na zpětně získané asfaltové pojivo gradace 50/70, respektive 25/55–65 podle tabulky č. 2 a 3.

Referenční vzorek zpětně získaného asfaltového pojiva vykazoval bod měknutí 55,6 °C, všechny ostatní vzorky pojiv vykazovaly vyšší hodnoty bodu měknutí dle ČSN EN 1427. Nejblíže referenční směsi se přiblížil vzorek pojiva D1, který obsahoval 30 % R-materiálu a zestárlé asfaltové pojivo bylo oživeno asfaltem 70/100. Z výsledků bodu měknutí je zřejmé, že téměř nezávisí na dávkování jednotlivých oživovacích přísad, jednotlivé výsledky byly mezi sebou opět srovnatelné.

Zkouškou na dynamickém smykovém reometru byly zjištěny komplexní smykové moduly a fázové úhly. Vlivem rostoucí teploty zkoušky dochází k poklesu komplexního smykového modulu a ke zvýšení fázového úhlu. S rostoucím obsahem R-materiálu a s různými oživovacími přísady se zvyšuje hodnota komplexního smykového modulu, přičemž nejnižších hodnot komplexního smykového modulu dosahoval vzorek pojiva referenční směsi a vzorek pojiva F1, který obsahoval 50 % R-materiálu a zestárlé asfaltové pojivo bylo oživeno asfaltovým pojivem typu RC.

Oživovací přísady nejsou schopny při jednom vypočítaném dávkování obnovit různé reologické parametry asfaltového pojiva stejně. Z toho vyplývá, že oživené pojivo má jiné reologické chování (vlastnosti) než silniční asfalt. Ve většině případů je však možné dosáhnout při oživení pojiv v R-materiálu takových vlastností, že oživené pojivo je možno kategorizovat dle ČSN 65 7204 jako silniční asfalt.

Dále byla stanovena stabilita použitých rejuvenátorů. Rejuvenátor II. vykazuje oproti Rejuvenátoru I. velkou nestabilitu při zahřívání na vyšší teploty, již po dvou hodinách zahřívání Rejuvenátoru II. na 160 °C se odpařilo 12 % z původní hmotnosti. U Rejuvenátoru I. došlo ke změně hmotnosti při zahřívání na 180 °C po dobu čtyř hodin o maximálně 0,5 %.

Podle výsledků zkoušek se jeví jako nejvhodnější metoda oživení zestárých pojiv v R-materiálu použití asfaltového pojiva vyšší gradace. Jedná se o jednoduchý způsob oživení zestárého pojiva v R-materiálu, výhoda této varianty ošetření R-materiálu spočívá v tom, že při dokonalém promísení může dojít nejen ke změkčení zestárého pojiva, ale i k obnově jeho fyzikálních a chemických vlastností. Nevýhodou této metody je ovšem omezené dávkování R-materiálu a fakt, že obalovna asfaltových směsí musí být vybavena dalším zásobníkem asfaltového pojiva, ve kterém je toto „měkčí“ pojivo skladováno.

Podle korelace výsledků má největší vliv na vlastnosti zpětně získaných asfaltových pojiv právě vhodně zvolena oživovací přísada pro oživení zestárých asfaltových pojiv. Samotné dávkování oživovací přísady výrazný vliv nemá. Všechny 14 vzorků zpětně získaného asfaltového pojiva se různě lišily v různých zkouškách oproti vzorku pojiva z referenční směsi. Výsledné hodnoty zkoušených pojiv jsou souhrnně zobrazeny v tabulce č. 41 a č. 42.

Do výsledků diplomové práce je také nutno zohlednit fakt, že asfaltové směsi, ze kterých bylo zpětně získané asfaltové pojivo vyextrahováno, byly vyrobeny v obalovně asfaltových směsí. Zpětně získaná asfaltová pojiva z asfaltových směsí vyrobených v laboratoři mohou vykazovat jiné výsledky.

Jak již bylo v diplomové práci zmíněno dříve, je žádoucí, aby se v České republice navrhovaly asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu. Pro správné fungování asfaltové směsi je nutné zvolit správný typ oživovací přísady a správnou technologii pro její výrobu.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] STRABAG. online. In: . Dostupné z: <https://work-on-progress.strabag.com/cz/materialy-a-obehove-hospodarstvi/recyklace-asfaltu/rozhovor-s-reinhardem-kerschnerem>. [cit. 2023-11-22].
- [2] COUFALÍKOVÁ, Iva a kol. *Metodika pro návrh dávkování oživovacích přísad: Použití oživovacích přísad pro prodloužení životnosti recyklovaných vozovek s vysokým obsahem R-materiálu*. Brno, 2019.
- [3] STRABAG. online. In: . Dostupné z: <https://work-on-progress.strabag.com/cz/materialy-a-obehove-hospodarstvi/recyklace-asfaltu>. [cit. 2023-11-22].
- [4] online. *EAPA*. 2021, s. 18. Dostupné z: <https://www.itafec.club/wp-content/uploads/2023/01/Asphalt-in-Figures-2023-con-Socios.pdf>. [cit. 2023-11-27].
- [5] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. Ed. 2. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [6] online. In: AZpark. Dostupné z: <https://www.az-park.cz/sortiment-asfaltovy-recyklat-fraction-obrus/>. [cit. 2023-11-27].
- [7] VALENTIN, Jan. Recyklace asfaltových vozovek. online. 2011, č. 22. [cit. 2023-11-27].
- [8] online. In: *Lectura-Specs*. Dostupné z: <https://www.lectura-specs.cz/cz/model/stavebni-stroje/silnicni-frezy-wirtgen/w-220-1151733>. [cit. 2023-11-27].
- [9] HLÁVKA, Filip. *Asfaltové směsi s vyšším podílem R-materiálu modifikované v míchacím procesu*. Diplomová práce. Praha: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb, 2021.
- [10] WIRTGEN. online. In: Wirtgen Group. Dostupné z: <https://www.wirtgen-group.com/en-us/news-and-media/wirtgen/cold-milling-machines-quality/>. [cit. 2023-11-28].

- [11] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. 2020.
- [12] online. In: Silnice+mosty. Dostupné z: [https://www.silnice-mosty.cz/1198-pri-recyklaci-asfaltovych-smesi-musi-byt-v-souladu-cely-retezec-jednotlivych-procesu/#:~:text=Srpen%202023%20\(1\)-,P%C5%99i%20recyklaci%20asfaltov%C3%BDch%20sm%C4%9Bs%C3%AD%20mus%C3%AD%20b%C3%BDt%20v%20souladu%20cel%C3%BD%20C5%99et%C4%9Bzec,se%20stalo%20v%C3%BDznamn%C3%BDm%20zdrojem%20surovin.](https://www.silnice-mosty.cz/1198-pri-recyklaci-asfaltovych-smesi-musi-byt-v-souladu-cely-retezec-jednotlivych-procesu/#:~:text=Srpen%202023%20(1)-,P%C5%99i%20recyklaci%20asfaltov%C3%BDch%20sm%C4%9Bs%C3%AD%20mus%C3%AD%20b%C3%BDt%20v%20souladu%20cel%C3%BD%20C5%99et%C4%9Bzec,se%20stalo%20v%C3%BDznamn%C3%BDm%20zdrojem%20surovin.) [cit. 2023-11-28].
- [13] online. In: ALS Global. 2019. Dostupné z: https://www.alsglobal.cz/aktuality/Asfalt-jiz-nemusi-byt-odpadem_1193. [cit. 2023-11-28].
- [14] online. In: *Zákony pro lidi*. 2019. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2019-130>. [cit. 2023-11-28].
- [15] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ A MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. online. In: *Zákony pro lidi*. 2023. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2023-283>. [cit. 2023-12-18].
- [16] online. In: ALS Global. 2020. Dostupné z: https://www.alsglobal.cz/zivotni-prostredi/aktuality/Optimalizace-stanoveni-PAU-ve-vzorcich-znovuziskanych-asfaltovych-smesi_1238. [cit. 2023-11-28].
- [17] ČSN EN 13043. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [18] HENKOVÁ, Svatava. Stroje a zařízení pro přípravu materiálů k výrobě betonové směsi. online. In: *Stavební stroje: Studijní opory*. Dostupné z: http://tstsw.cz/stavebni_stroj/predmet-bw03/prednaska-4#odrazov%C3%A9-drti%C4%8De. [cit. 2023-11-28].
- [19] TURČINEK, Andrej. *Mobilní zařízení pro drcení kameniva a recyklátů ze stavebních odpadů*. Bakalářská práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2017.
- [20] Studijní opory. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně.
- [21] online. In: *Brno Recyklace*. Dostupné z: <https://www.brnorecyklace.cz/asfaltovy-recyklat>. [cit. 2023-11-28].

- [22] CHRIST, Roman. *VYUŽITÍ R-MATERIÁLU V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH S VYSOCE MODIFIKOVANÝM POJIVEM (HIMA)*. Diplomová práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2021.
- [23] HÝZL, Petr. ČSN 73 6141 Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí. online. *STEPS 11 - Recyklace vozovek*. s. 24. [cit. 2023-11-30].
- [24] HÝZL, Petr a VARAUS, Michal. *Metodika aplikace R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA (Stone mastix asphalt)*. Metodika. Brno, 2017.
- [25] HÝZL, Petr. *Výroba, pokládka a hutnění asfaltových směsí*. Studijní opory. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2023.
- [26] ČSN 73 6141 OPRAVA 1. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [27] ČSN EN 12697-42. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [28] DAŠEK, Ondřej a HÝZL, Petr. Vlastnosti asfaltových pojiv obsahujících pojiva získaná z R-materiálů. online. 2022. Dostupné z: <https://silnice-zeleznice.cz/materialy-a-technologie/vlastnosti-asfaltovych-pojiv-obsahujících-pojiva-získana-z-r-materialu-696>. [cit. 2023-11-30].
- [29] ČSN 73 6121. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [30] VARAUS, Michal. Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu. online. *Školení o evropských a českých normách pro stavbu vozovek*. 2015, s. 9. [cit. 2023-12-02].
- [31] ČSN 65 7222-1. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [32] ČSN 73 6120. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [33] online. *Wirtgen Group*. 2019, s. 55. Dostupné z: <https://www.wirtgen-group.com/de-nl/news-und-media/wirtgen-group/asphaltrecycling/>. [cit. 2023-12-02].

- [34] MUSIL, Lukáš. *Recyklace asfaltových směsí pro nízké zatížené komunikace*. Bakalářská práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2022.
- [35] online. In: Obalovna Ostrava. Dostupné z: <https://www.obalovna-ostrava.cz/?oo=jak-se-vyrabi-asfaltova-smes>. [cit. 2023-12-03].
- [36] online. In: *Beton server*. Dostupné z: <https://www.betonserver.cz/imos-asfalt#gallery-2>. [cit. 2023-12-03].
- [37] HÝZL, Petr. *Využití R-materiálu v asfaltových směsích*. Habilitační práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2018.
- [38] BENNINGHOVEN. online. In: Wirtgen Group. Dostupné z: <https://www.wirtgen-group.com/en-cz/products/benninghoven/technologies/recycling/cold-recycling/>. [cit. 2023-12-03].
- [39] In: *FGSV Verlag GmbH*. 2009. ISBN 978-3-939715-98-6.
- [40] online. *SYNER*. 2021. Dostupné z: <https://syner.cz/aktuality/novy-paralelni-buben-pomaha-pri-recyklaci-starych-asfaltovych-povrchu>. [cit. 2023-12-03].
- [41] online. In: *Obalovna Herink*. Dostupné z: <https://www.obalovnaherink.cz/technologie>. [cit. 2023-12-03].
- [42] ZÍTKA, Patrik. *PROBLEMATIKA POUŽITÍ R-MATERIÁLU DO ASFALTOVÝCH SMĚSÍ*. Diplomová práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2015.
- [43] VARAUS, Michal. *Recyklace netuhých vozovek: Školení pracovníků laboratoří*. Přednáška. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2016.
- [44] online. In: University of Memphis. Dostupné z: <http://www.ce.memphis.edu/3137/slides/22%20-%20Asphalt%20Production%20and%20Paving.pdf>. [cit. 2023-12-04].
- [45] online. In: Astec Industries. Dostupné z: <https://www.astecindustries.com/products/details/double-barrel>. [cit. 2023-12-04].

- [46] ZHAO, Lingying a GU, Hairong. *Mixing uniformity of particles in a double barrel with differential velocity based on the discrete element method: Powder technology*. 2021.
- [47] COUFALÍKOVÁ, Iva a KOUDELKA, Tomáš. *Metodika pro návrh dávkování oživovacích přísad: Program Zéta*. Metodika. Brno, 2019.
- [48] COUFALÍKOVÁ, Iva. *POUŽITÍ R-MATERIALU DO ASFALTOVÝCH SMĚSI TYPU ASFALTOVÝ KOBEREK MASTIXOVÝ*. Disertační práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2019.
- [49] ZAUMANIS, M. a MALLICK, R. *Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art: International Journal of Pavement Engineering 16*. 2014.
- [50] HLÁVKA, Filip. *Analýza složení asfaltového R-materiálu a jeho využití v asfaltové směsi*. Bakalářská práce. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2019.
- [51] KOTOUŠOVÁ, Adriana. *Laboratorní simulace stárnutí asfaltové směsi a vliv na vybrané funkční charakteristiky*. Diplomová práce. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2016.
- [52] ALI NOTANI, Mohammad a HAJIKARIMI, Pouria. *Performance Evaluation of Using Waste Toner in Bituminous Material by Focusing on Aging and Moisture Susceptibility*. Článek. 2020.
- [53] online. *Silnice-železnice*. 2018. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/starnuti-a-disperzni-stabilita-silnicnich-asfaltu/>. [cit. 2023-12-05].
- [54] COUFALÍK, Pavel. *REOLOGICKÉ VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH POJIV*. Dizertační práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2017.
- [55] STAŇKOVÁ, Michaela. *Simulace stárnutí asfaltové směsi v laboratoři*. Bakalářská práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2019.
- [56] LINETRONIC TECHNOLOGIES. online. In: LINETRONIC TECHNOLOGIES. *Lin-tech*. Dostupné z: <https://www.lin-tech.ch/english/tf257000eng.html>. [cit. 2023-12-05].

- [57] ČSN EN 12607-1. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2015.
- [58] LINETRONIC TECHNOLOGIES. online. In: LINETRONIC TECHNOLOGIES. *Lin-Tech*. Dostupné z: <https://www.lin-tech.ch/english/rt255000eng.html>. [cit. 2023-12-05].
- [59] ČSN EN 12607-3. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [60] online. In: *Jet Materials*. Dostupné z: <https://jetmaterials.com/product/b065-rotovapor-rotary-evaporation-apparatus-bituminous-binders-resistance-of-hardening-rotating-flask-test-rft-method/>. [cit. 2023-12-05].
- [61] ČSN EN 15323. Český normalizační institut, 2007.
- [62] online. In: *NORMALAB*. Dostupné z: https://www.g-labo.de/media/attachments/2018/11/12/alterung-nach-rcat-modell_nrc210_941878_leaflet14_rev1-1.pdf. [cit. 2023-12-05].
- [63] ČSN EN 14769. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [64] online. In: *MATEST*. Dostupné z: <https://www.matest.com/en/product/b091n-pressure-ageing-vessel-pav>. [cit. 2023-12-05].
- [65] DAŠEK, Ondřej a HÝZL, Petr. *Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí: Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek*. Metodika v rámci projektu TAČR TA03030381. Brno, 2015.
- [66] JINDRA, Jiří. *POSOUZENÍ VLIVU REJUVENÁTORŮ NA VLASTNOSTI ASFALTOVÉ SMĚSI S VYSOKÝM OBSAHEM R-MATERIÁLU*. Diplomová práce. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2022.
- [67] online. *Rejuvaseal*. Dostupné z: <https://www.rejuvaseal.com/what-is-rejuvenation/>. [cit. 2023-12-11].
- [68] online. In: Web.rejuvenator. Dostupné z: <http://web.rejuvenator.eu/co-jsou-to-rejuvenatory.html>. [cit. 2023-12-12].

- [69] ČUMÍČKOVÁ, Markéta. *Dávkování oživovacích přísad do asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu*. Diplomová práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2019.
- [70] MASTNÝ, Jan. *Vliv syntetických vosků a rejuvenátorů na vlastnosti asfaltové směsi s R-materiálem*. Diplomová práce. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2017.
- [71] JUNTAO, Lin a PEIDA, Guo. Laboratory investigation of rejuvenator seal materials on performances of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*,. online. 2012, s. 45. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.008>. [cit. 2023-12-13].
- [72] PECHA, Marek. *VLIV PŘIDÁVÁNÍ ZESTÁRLÉHO ASFALTOVÉHO POJIVA NA VLASTNOSTI POLYMEREM MODIFIKOVANÝCH ASFALTŮ*. Bakalářská práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2018.
- [73] ŠEFRÁNKOVÁ, Radka. *VYUŽITÍ FLUXAČNÍCH PŘÍRAD PRO ÚPRAVU VLASTNOSTÍ ASFALTOVÝCH POJIV*. Diplomová práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2020.
- [74] TOTAL ČESKÁ REPUBLIKA S.R.O. online. In: TotalEnergies. Dostupné z: https://totalenergies.cz/sites/g/files/wompnd546/f/atoms/files/prehled_produkту_0.pdf. [cit. 2023-12-16].
- [75] TOTALENERGIES. online. In: Totalenergies. Dostupné z: https://totalenergies.cz/system/files/atoms/files/total_bitumen_katalog_2021_cz.pdf. [cit. 2023-12-16].
- [76] ČSN EN 12591. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [77] MĚŠŤANOVÁ, Petra. *Hodnocení vlastností pojiv typu PMB obsahujících pojivo z R-materiálu*. Diplomová práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2021.
- [78] ČSN EN 1426. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [79] ČSN EN 1427. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

- [80] ČSN EN 14770. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [81] TRNKA, Lukáš. *MOŽNOSTI MÍSENÍ POJIV TYPU PMB RC S POJIVEM Z R-MATERIÁLU*. Diplomová práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2021.
- [82] STŘASÁKOVÁ, Monika. *STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH POJIV*. Diplomová práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2016.
- [83] ČSN EN 16659. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [84] ZÁBRANSKÝ, Ivo. *VLASTNOSTI NÍZKOTEPLNÍCH POLYMEREM MODIFIKOVANÝCH ASFALTŮ*. Diplomová práce. Brno: Fakulta stavební VUT v Brně, 2019.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek č. 1: Životní cyklus asfaltových směsí [3].....	11
Obrázek č. 2: Vyfrézovaná znovuzískaná asfaltová směs [6]	12
Obrázek č. 3: Silniční fréza Wirtgen W 220 [8]	14
Obrázek č. 4: R-materiál různých frakcí [21]	16
Obrázek č. 5: Skladování, drcení a třídění R-materiálu [25]	18
Obrázek č. 6: Stanovení maximálního množství přidávaného R-materiálu [11].....	26
Obrázek č. 7: Obalovna asfaltových směsí, Česká republika – Žabčice [35].....	28
Obrázek č. 8: Dávkování R-materiálu stejnou cestou jako nové kamenivo [37]	29
Obrázek č. 9: Dávkování R-materiálu přes samostatnou váhu přímo do míchačky obalovny [37]	30
Obrázek č. 10: Požadovaná teplota nově přidávaného kameniva v závislosti na množství R-materiálu (10–40 %) a požadované výsledné teploty vyrobené směsi [38]	30
Obrázek č. 11: Obalovna s paralelním bubnem, Česká republika – Praha [40]	31
Obrázek č. 12: Schéma kontinuální obalovny [42].....	32
Obrázek č. 13: Systém přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu [43].....	32
Obrázek č. 14: Systém přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu [43].....	33
Obrázek č. 15: Separátní systém vysoušení R-materiálu [43]	33
Obrázek č. 16: Princip dvouplášťového bubnu [46].....	34
Obrázek č. 17: Schéma krátkodobého a dlouhodobého stárnutí vozovek [52].....	35
Obrázek č. 18: Zkušební zařízení pro zkoušku tepelné stálosti tenkého filmu [56]	38
Obrázek č. 19: Zkušební zařízení pro zkoušku tepelné stálosti v tenké pohybující se vrstvě [58]	39
Obrázek č. 20: Zkušební zařízení pro zkoušku krátkodobého stárnutí metodou RFT [60]	39
Obrázek č. 21. Zkušební zařízení pro zkoušku metodou rotujícího válce [62]	40
Obrázek č. 22: Zkušební zařízení pro zkoušku stárnutí v tlakové nádobě [64].....	40
Obrázek č. 23: Jednotlivé fáze difuze nového pojiva a pojiva z R-materiálu [36].....	43
Obrázek č. 24: Působení změkčující přísady [68]	45
Obrázek č. 25: Působení rejuvenační přísady [68]	45

Obrázek č. 26: Rejuvenátor I.	49
Obrázek č. 27: Rejuvenátor II.	51
Obrázek č. 28: Penetrometr s penetrační jehlou	61
Obrázek č. 29: Příprava zkušebních vzorků pro zkoušku stanovení bodu měknutí	63
Obrázek č. 30: Provádění zkoušky stanovení bodu měknutí	64
Obrázek č. 31: Složky komplexního smykového modulu [82]	66
Obrázek č. 32: Dynamický smykový reometr Kinexus	66
Obrázek č. 33: Příprava zkušebních vzorků	67
Obrázek č. 34: Vzorek asfaltového pojiva umístěn do přibližného středu reometru [77]	68
Obrázek č. 35: Stlačený vzorek asfaltového pojiva (vlevo) a seříznutý vzorek (vpravo)	68
Obrázek č. 36: Nahřívání vzorku na zkušební teplotu na dynamickém smykovém reometru	94

10 SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1: Klasifikace znovuzískané asfaltové směsi [14]	15
Tabulka č. 2: Požadavky na zpětně získané pojivo z asfaltové směsi v případě použití silničního asfaltu podle ČSN EN 12591 [26]	20
Tabulka č. 3: Požadavky na zpětně získané pojivo z asfaltové směsi v případě použití polymerem modifikovaného asfaltu podle ČSN EN 14023 [26].....	21
Tabulka č. 4: Minimální četnost pro stanovení vratné duktility podle ČSN EN 13398 v případě použití polymerem modifikovaného asfaltu [26].....	21
Tabulka č. 5: Požadavky na zpětně získané pojivo z asfaltové směsi v případě použití polymerem modifikovaného asfaltu podle ČSN EN 14023 [26].....	21
Tabulka č. 6: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi AC s nemodifikovaným asfaltem [29]	23
Tabulka č. 7: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi AC s modifikovaným asfaltem [29]	23
Tabulka č. 8: Specifikace pro silniční modifikované asfalty dle ČSN 65 7222-1, tab. 1 a tab. 3 (výběr) [31]	24
Tabulka č. 9: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi SMA [29]	24
Tabulka č. 10: Přípustné množství R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi AKO [29].....	24
Tabulka č. 11: Nejvyšší přípustný obsah R-materiálu v % hmotnosti asfaltové směsi VMT [32].....	25
Tabulka č. 12: Příklad pro charakteristiky R-materiálu (pro asfaltovou ložní vrstvu) [11]	26
Tabulka č. 13: Možnosti přidání upraveného R-materiálu do nově vyráběných směsí [11].....	27
Tabulka č. 14: Požadované vlastnosti silničních asfaltů gradace 50/70 a 70/100 po stárnutí metodou 3xRTFOT [65]	41
Tabulka č. 15: Fyzikální a chemické vlastnosti Rejuvenátoru I.	49
Tabulka č. 16: Fyzikální a chemické vlastnosti Rejuvenátoru II.....	50
Tabulka č. 17: Vlastnosti výrobku a tolerance silničního asfaltu 70/100 [74]	51

Tabulka č. 18: Vlastnosti výrobku a tolerance PMB 45/80-55 RC [75].....	52
Tabulka č. 19: Seznam zkoušených vzorků v diplomové práci.....	54
Tabulka č. 20: Základní parametry pojiva gradace 50/70. [76].....	55
Tabulka č. 21: Základní parametry pojiva gradace 70/100. [76].....	55
Tabulka č. 22: Základní parametry pojiva 45/80-55 RC. [31].....	55
Tabulka č. 23: Základní parametry pojiva 45/80-70 RC. [31].....	55
Tabulka č. 24: Základní zjištěné parametry zpětně získaného pojiva z R-materiálu.....	56
Tabulka č. 25: Parametry vzorku REF s 0 % R-materiálu.....	57
Tabulka č. 26: Parametry vzorků A1-A3, B1-B3 a F1 s 50 % R-materiálu	57
Tabulka č. 27: Parametry vzorků C1-C3 a D1 s 30 % R-materiálu.....	58
Tabulka č. 28: Parametry vzorků E1-E2 s 50 % R-materiálu.....	58
Tabulka č. 29: Parametry vzorku F2 s 40 % R-materiálu.....	58
Tabulka č. 30: Maximální rozdíl platných stanovení [78].....	61
Tabulka č. 31: Kapalinová lázeň pro stanovení bodu měknutí.....	62
Tabulka č. 32: Výsledky stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426	75
Tabulka č. 33: Výsledky stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427.....	78
Tabulka č. 34: Výsledky zkoušky DSR při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz.....	80
Tabulka č. 35: Teplotní citlivost jednotlivých zkušebních vzorků	95
Tabulka č. 36: Procentuální rozdíl ve smykové poddajnosti při teplotě 60 °C	100
Tabulka č. 37: Zaznamenané hmotnosti vzorku během zkoušky stability Rejuvenátoru I.	102
Tabulka č. 38: Změny hmotnosti Rejuvenátoru I. při zkušebních teplotách	102
Tabulka č. 39: Zaznamenané hmotnosti vzorku během zkoušky stability Rejuvenátoru II.....	102
Tabulka č. 40: Změny hmotnosti Rejuvenátoru II. při zkušebních teplotách.....	103
Tabulka č. 41: Výsledky empirických i funkčních zkoušek všech zpětně získaných asfaltových pojiv	104
Tabulka č. 42: Výsledky zkoušky MSCR.....	104
Tabulka č. 43: Korelace výsledků – všechna zpětně získaná asfaltová pojiva.....	105
Tabulka č. 44: Korelace výsledků – Rejuvenátor I. v různém dávkování (vzorky pojiv A1-A3).....	106

Tabulka č. 45: Korelace výsledků – Rejuvenátor II. v různém dávkování (vzorky B1- B3,C1-C3).....	106
Tabulka č. 46: Korelace výsledků – Oživení zestárlého pojiva různými metodami (vzorky pojiv A1, B1, D1 a E2).....	107
Tabulka č. 47: Korelace výsledků – Různý obsah R-materiálu (vzorky pojiv A1, D1 a F2).....	108

11 SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1: Typický cyklus dotvarování a zotavení asfaltového pojiva [84].....	70
Graf č. 2: Průběh dvou cyklů MSCR testu [84].....	71
Graf č. 3: Průběh přetvoření [54].....	72
Graf č. 4: Výsledky stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426	76
Graf č. 5: Závislost hloubky penetrace na množství oživovací přísady Rejuvenátor I. .	77
Graf č. 6: Závislost hloubky penetrace na množství oživovací přísady Rejuvenátor II.	77
Graf č. 7: Výsledky stanovení bodu měknutí dle ČSN EN 1427	79
Graf č. 8: Závislost bodu měknutí na množství oživovací přísady Rejuvenátor I. a II. .	79
Graf č. 9: Komplexní smykový modul G^* při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz.....	81
Graf č. 10: Úhel fázového posunu δ při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz	81
Graf č. 11: Izochrony komplexního smykového modulu při frekvenci 1,59 Hz.....	82
Graf č. 12: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 60 °C	83
Graf č. 13: Izochrony fázových úhlů při frekvenci 1,59 Hz	84
Graf č. 14: Izotermy fázových úhlů při teplotě 60 °C	84
Graf č. 15: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 40 °C	85
Graf č. 16: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 70 °C	85
Graf č. 17: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 40 °C	86
Graf č. 18: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 70 °C	86
Graf č. 19: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 40 °C	87
Graf č. 20: Izotermy komplexního smykového modulu při teplotě 70 °C.	87
Graf č. 21: Izotermy fázových úhlů při teplotě 40 °C	88
Graf č. 22: Izotermy fázových úhlů při teplotě 70 °C	88
Graf č. 23: Izotermy fázových úhlů při teplotě 40 °C	89
Graf č. 24: Izotermy fázových úhlů při teplotě 70 °C	89
Graf č. 25: Izotermy fázových úhlů při teplotě 40 °C	90
Graf č. 26: Izotermy fázových úhlů při teplotě 70 °C	90
Graf č. 27: Blackův diagram, všechna zpětně získaná asfaltová pojiva	91
Graf č. 28: Blackův diagram pro vzorky pojiv A1-A3	92
Graf č. 29: Blackův diagram pro vzorky pojiv B1-B3, C1-C3.....	92
Graf č. 30: Blackův diagram pro vzorek pojiva D1	93

Graf č. 31: Blackův diagram pro vzorky pojiv E1 a E2	93
Graf č. 32: Blackův diagram pro vzorek pojiv F1 a F2	94
Graf č. 33: Teplotní citlivost jednotlivých zkušebních vzorků.....	96
Graf č. 34: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při 60 °C.....	97
Graf č. 35: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při teplotě 60 °C při napětí 0,1 kPa	97
Graf č. 36: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při teplotě 60 °C při napětí 3,2 kPa	98
Graf č. 37: Smykové přetvoření zkoušených pojiv při teplotě 60 °C při napětí 10,0 kPa	98
Graf č. 38: Nevratná smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 60 °C	99
Graf č. 39: Procentuální rozdíl ve smykové poddajnosti $J_{nr,diff}$ při teplotě 60 °C.....	100
Graf č. 40: Průměrné elastické zotavení R při teplotě 60 °C.....	101
Graf č. 41: Stabilita použitých rejuvenátoru při zahřívání na zkušební teploty	103
Graf č. 42: Korelace výsledků penetrace jehlou – bod měknutí.....	130
Graf č. 43: Korelace výsledků penetrace jehlou – komplexní smykový modul G^*	130
Graf č. 44: Korelace výsledků penetrace jehlou – fázový úhel δ	131
Graf č. 45: Korelace výsledků penetrace jehlou – teplotní citlivost.....	131
Graf č. 46: Korelace výsledků bod měknutí – komplexní smykový modul G^*	132
Graf č. 47: Korelace výsledků bod měknutí – fázový úhel δ	132
Graf č. 48: Korelace výsledků bod měknutí – teplotní citlivost.....	133
Graf č. 49: Korelace výsledků komplexní smykový modul G^* - fázový úhel δ	133
Graf č. 50: Korelace výsledků komplexní smykový modul G^* - teplotní citlivost.....	134
Graf č. 51: Korelace výsledků fázový úhel δ – teplotní citlivost.....	134
Graf č. 52: Korelace výsledků penetrace jehlou – bod měknutí.....	135
Graf č. 53: Korelace výsledků penetrace jehlou – komplexní smykový modul G^*	135
Graf č. 54: Korelace výsledků penetrace jehlou – fázový úhel δ	136
Graf č. 55: Korelace výsledků penetrace jehlou – teplotní citlivost.....	136
Graf č. 56: Korelace výsledků bod měknutí – komplexní smykový modul G^*	137
Graf č. 57: Korelace výsledků bod měknutí – fázový úhel δ	137
Graf č. 58: Korelace výsledků bod měknutí – teplotní citlivost.....	138
Graf č. 59: Korelace výsledků komplexní smykový modul G^* - fázový úhel δ	138
Graf č. 60: Korelace výsledků komplexní smykový modul G^* - teplotní citlivost.....	139
Graf č. 61: Korelace výsledků fázový úhel δ – teplotní citlivost.....	139

Graf č. 62: Korelace výsledků penetrace jehlou – bod měknutí.....	140
Graf č. 63: Korelace výsledků penetrace jehlou – komplexní smykový modul G^*	140
Graf č. 64: Korelace výsledků penetrace jehlou – fázový úhel δ	141
Graf č. 65: Korelace výsledků penetrace jehlou – teplotní citlivost.....	141
Graf č. 66: Korelace výsledků bod měknutí – komplexní smykový modul G^*	142
Graf č. 67: Korelace výsledků bod měknutí – fázový úhel δ	142
Graf č. 68: Korelace výsledků bod měknutí – teplotní citlivost	143
Graf č. 69: Korelace výsledků komplexní smykový modul G^* - fázový úhel δ	143
Graf č. 70: Korelace výsledků komplexní smykový modul G^* - teplotní citlivost.....	144
Graf č. 71: Korelace výsledků fázový úhel δ – teplotní citlivost.....	144

12 SEZNAM ROVNIC

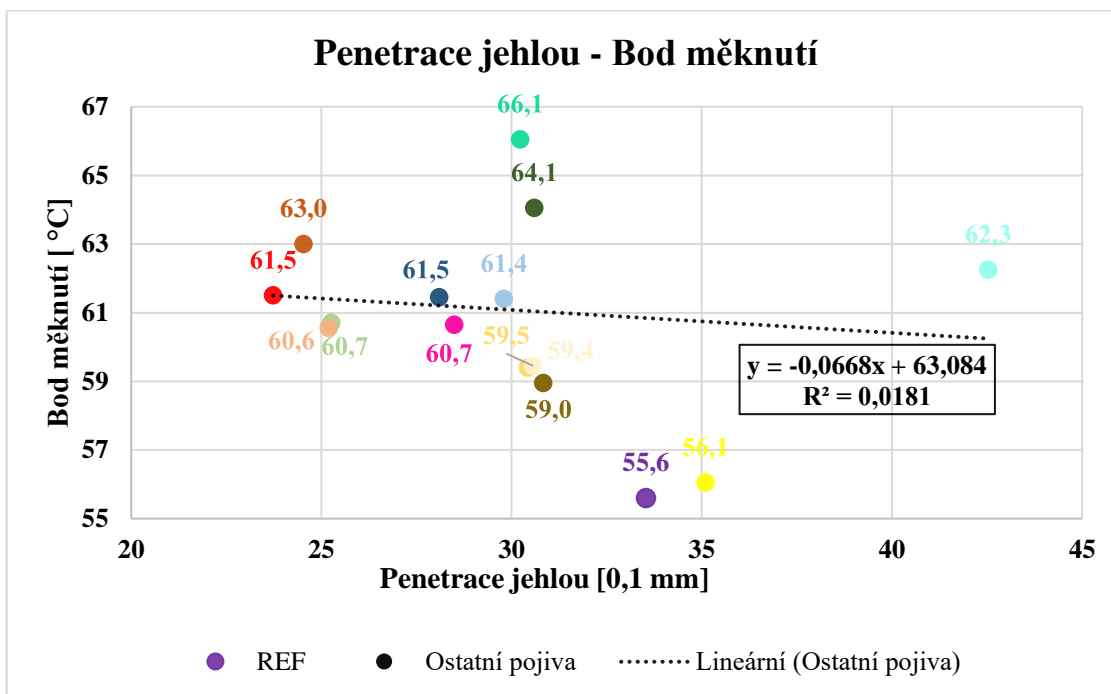
Rovnice (1): Výpočet změny hmotnosti v %	74
Rovnice (2): Výpočet teplotní citlivosti.....	95

13 SEZNAM PŘÍLOH

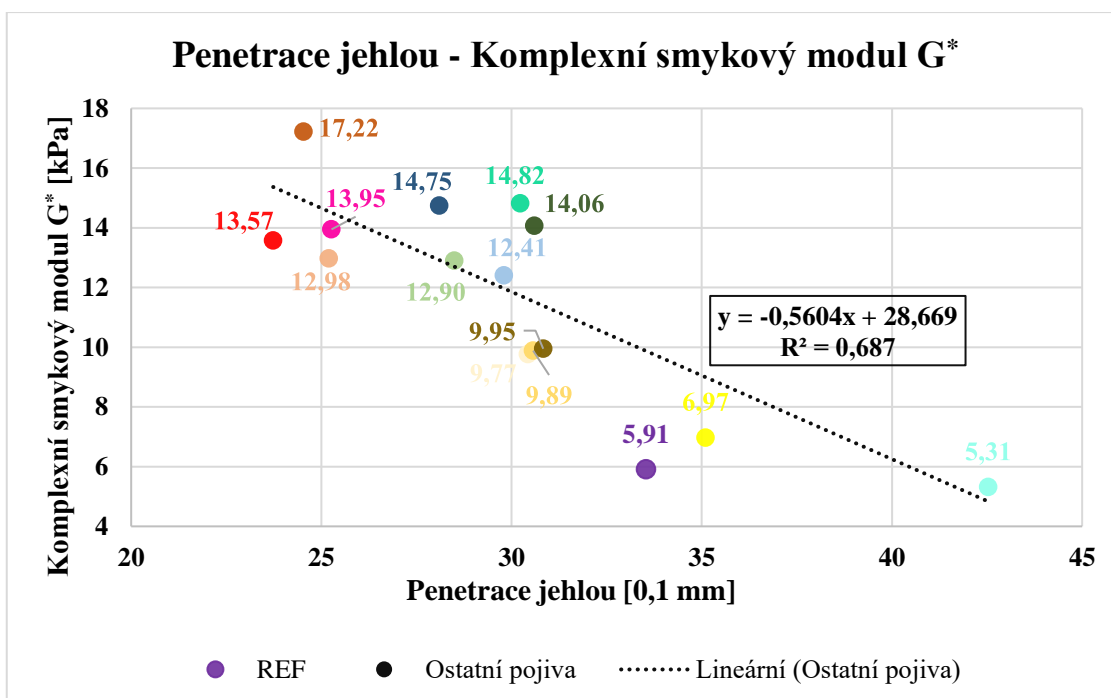
Příloha č. 1: Korelace výsledků – všechna zpětně získaná asfaltová pojiva	130
Příloha č. 2: Korelace výsledků – Rejuvenátor I. a Rejuvenátor II. v různém dávkování (vzorky poživ A1-A3, B1-B3, C1-C3)	135
Příloha č. 3: Korelace výsledků – Oživení zestárlého pojiva různými metodami (vzorky poživ A1, B1, D1 a E2) a různý obsah R-materiálu (vzorky poživ A1, D1 a F2) .	140

14 PŘÍLOHY

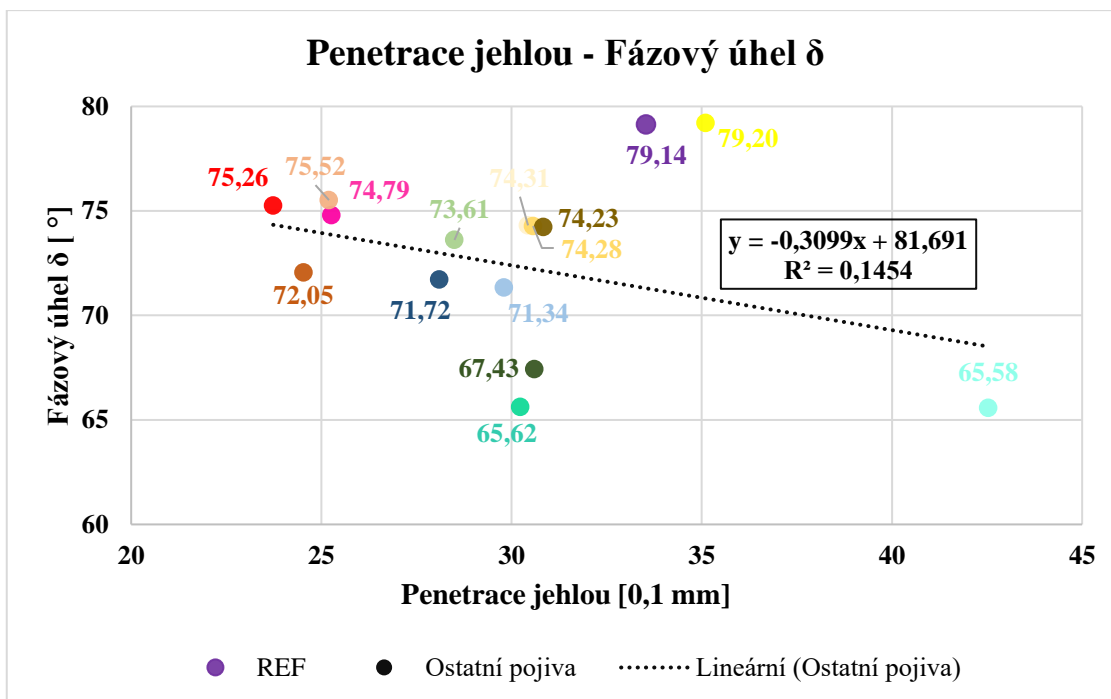
Příloha č. 1: Korelace výsledků – všechna zpětně získaná asfaltová pojiva



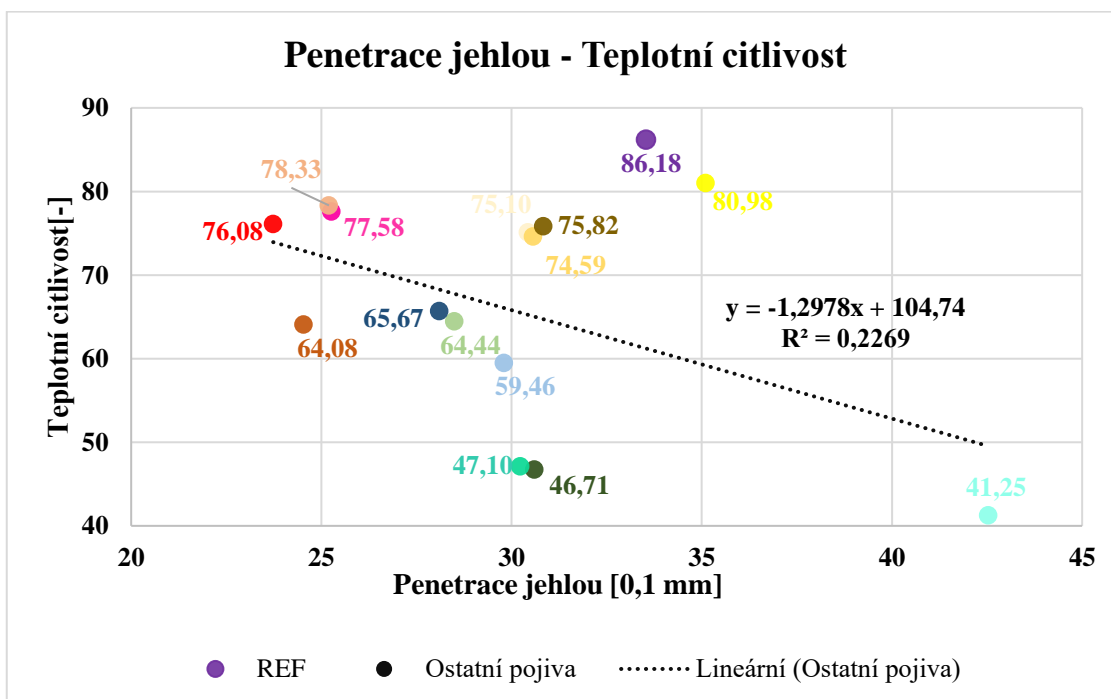
Graf č. 42: Korelace výsledků penetrace jehlou – bod měknutí



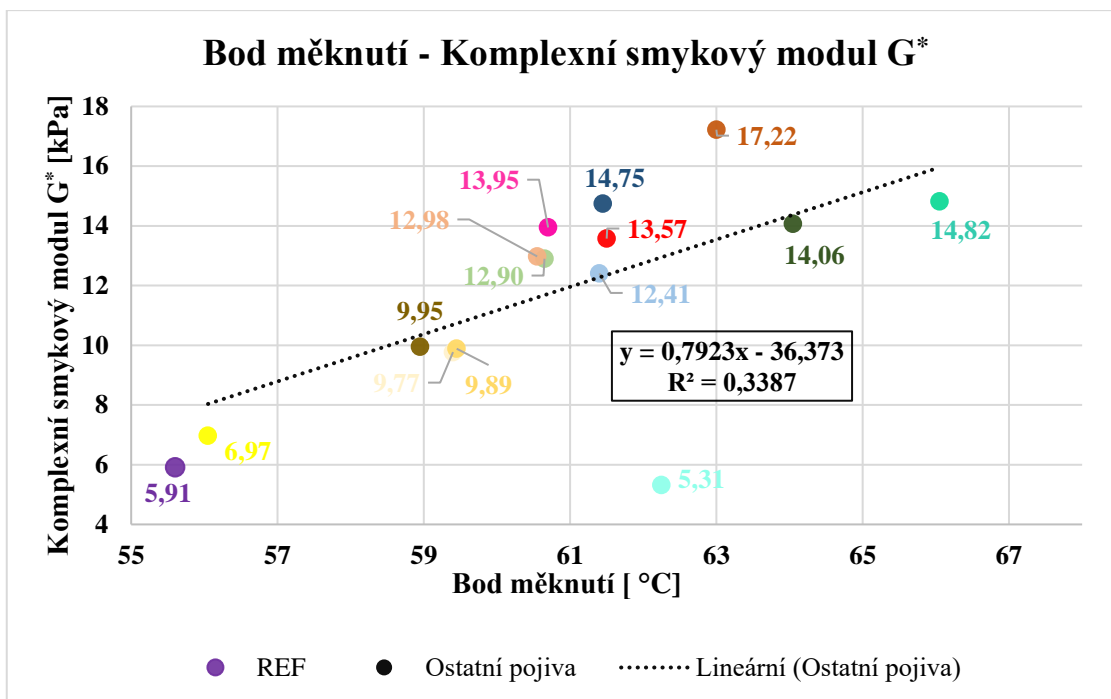
Graf č. 43: Korelace výsledků penetrace jehlou – komplexní smykový modul G*



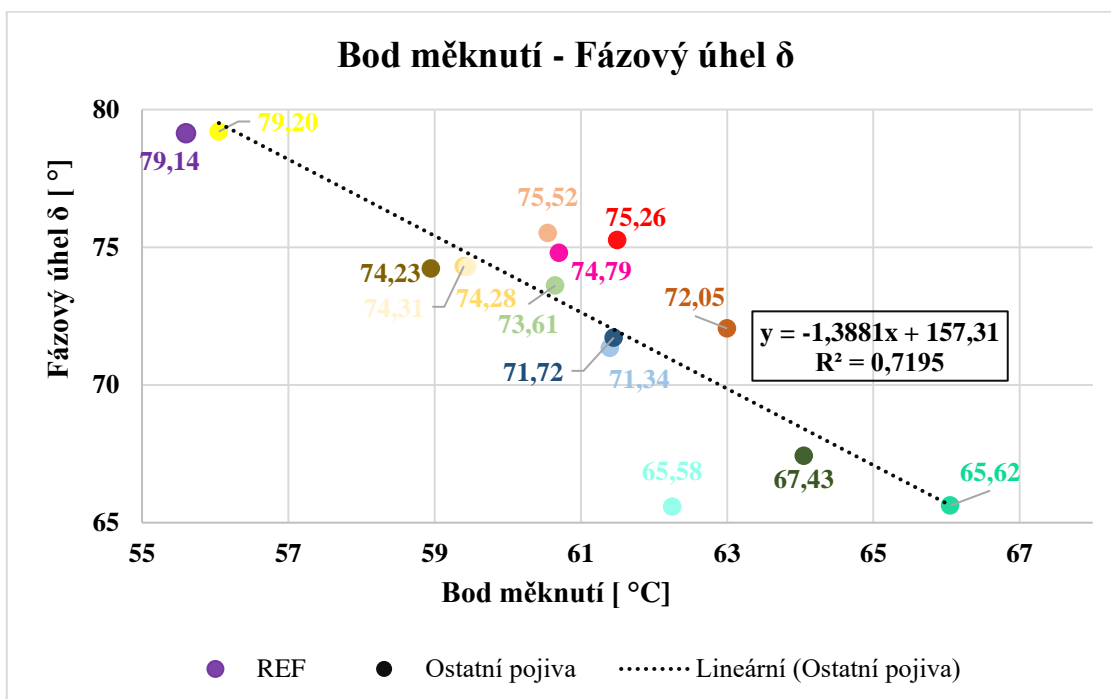
Graf č. 44: Korelace výsledků penetrace jehlou – fázový úhel δ



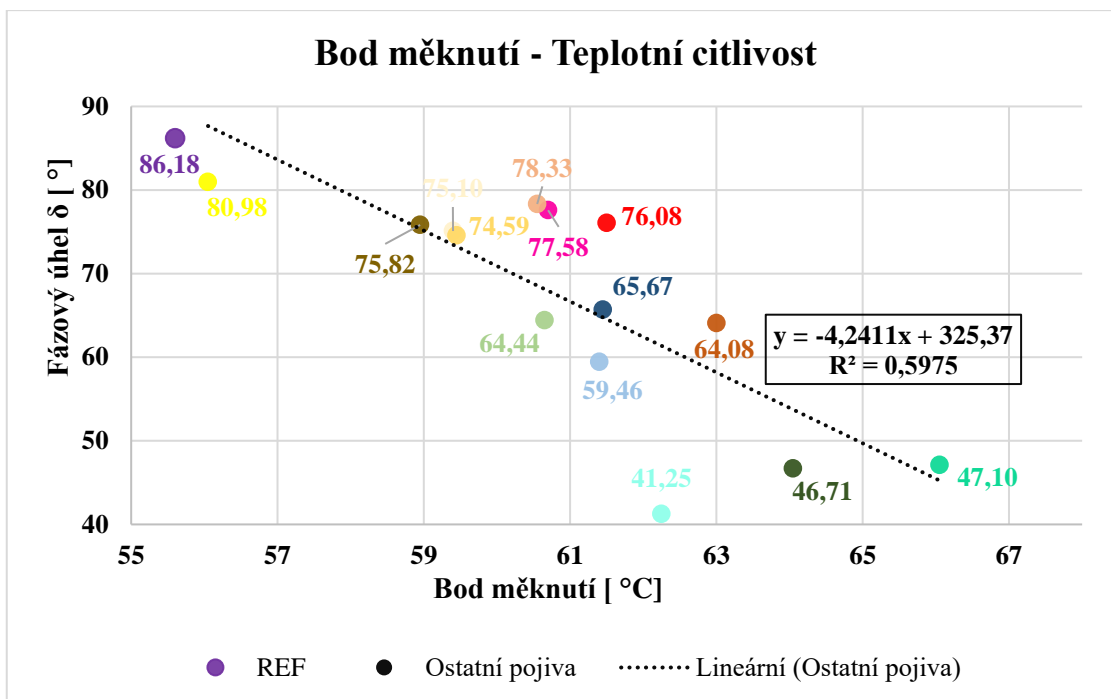
Graf č. 45: Korelace výsledků penetrace jehlou – teplotní citlivost



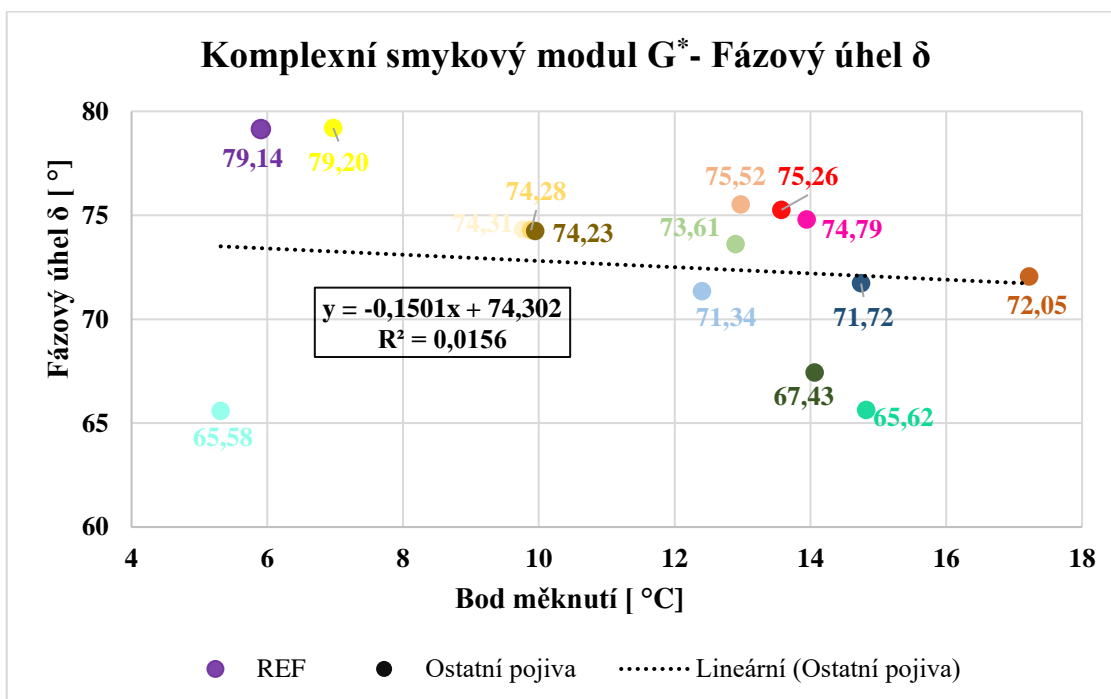
Graf č. 46: Korelace výsledků bod měknutí – komplexní smykový modul G*



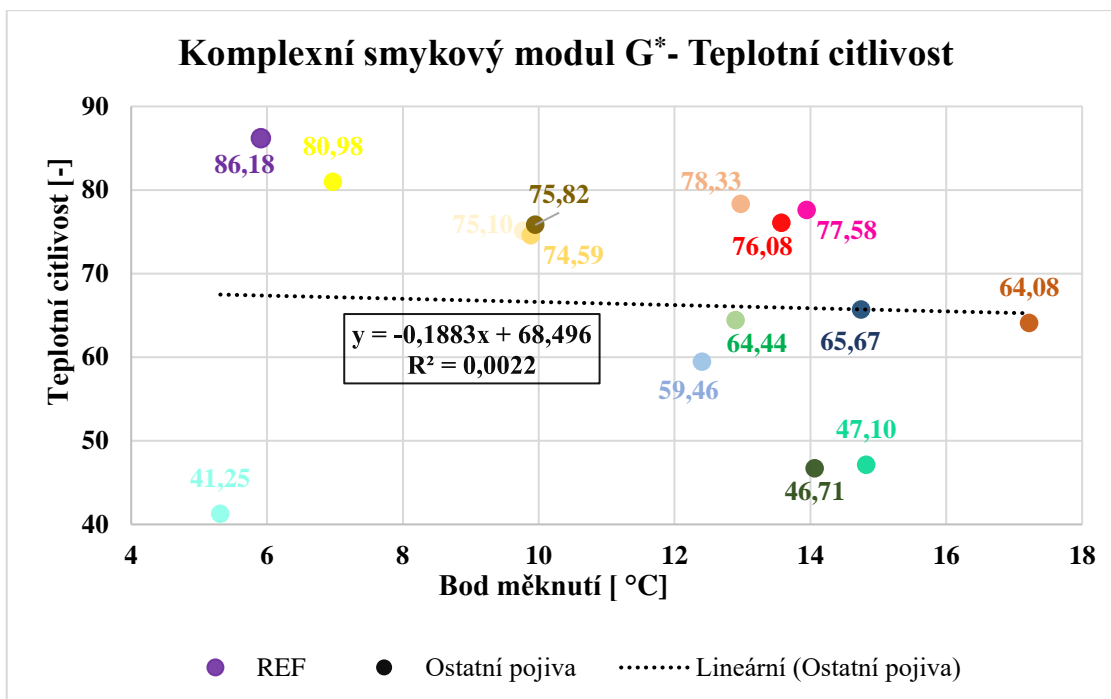
Graf č. 47: Korelace výsledků bod měknutí – fázový úhel δ



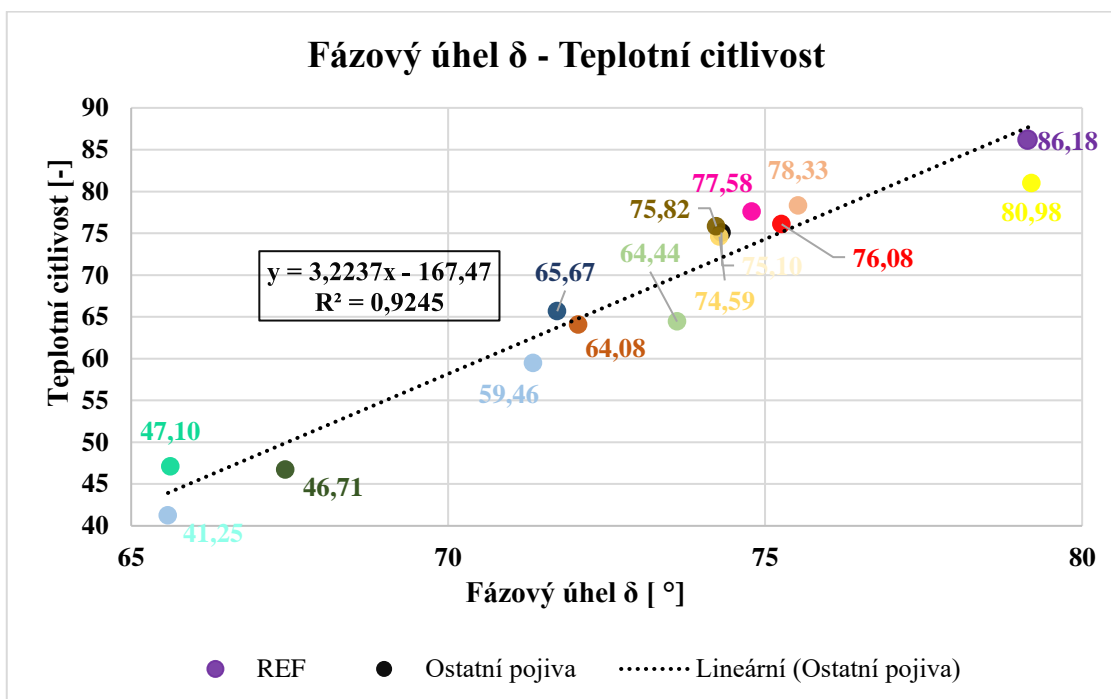
Graf č. 48: Korelace výsledků bod měknutí – teplotní citlivost



Graf č. 49: Korelace výsledků komplexní smykový modul G* - fázový úhel δ

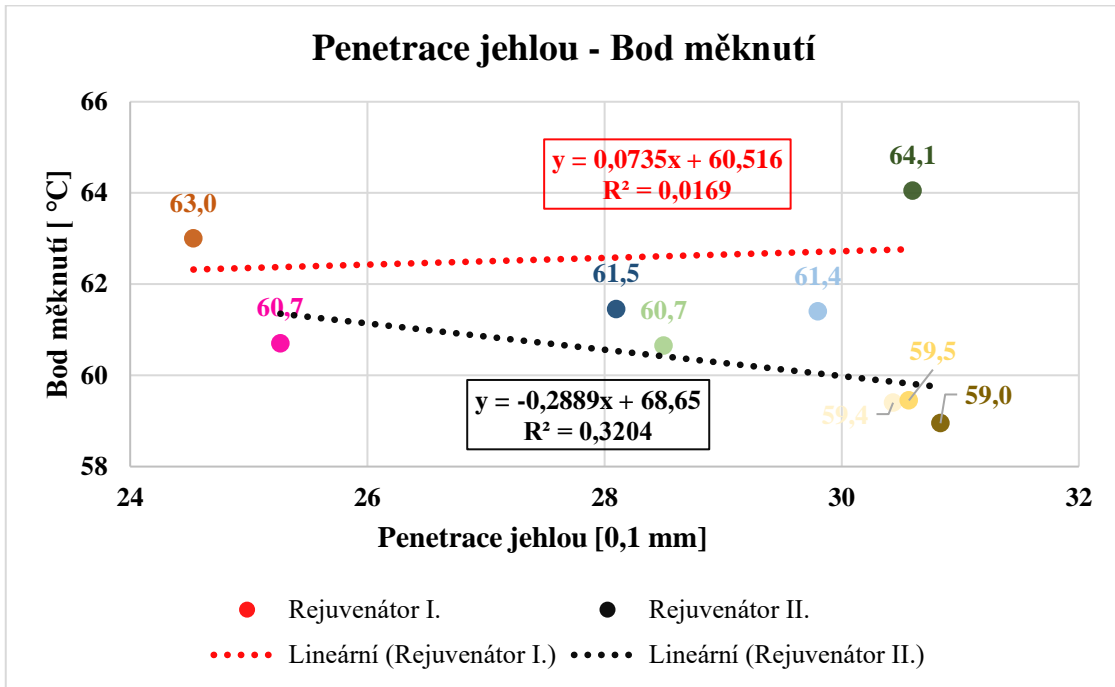


Graf č. 50: Korelace výsledků komplexní smykový modul G^* - teplotní citlivost

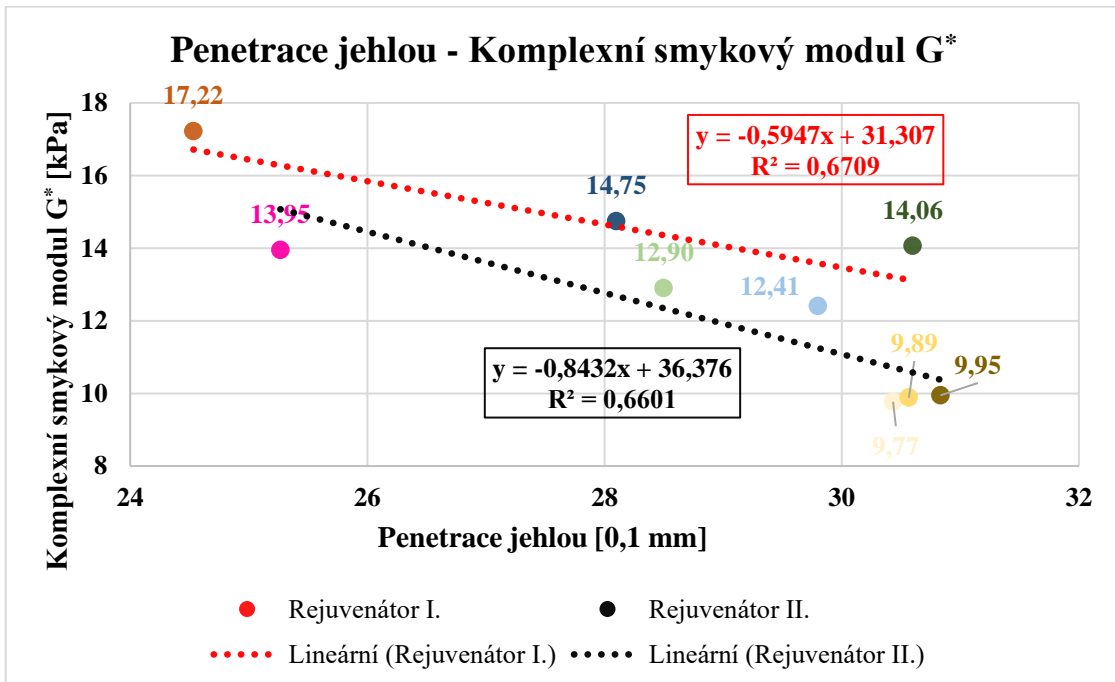


Graf č. 51: Korelace výsledků fázový úhel δ – teplotní citlivost

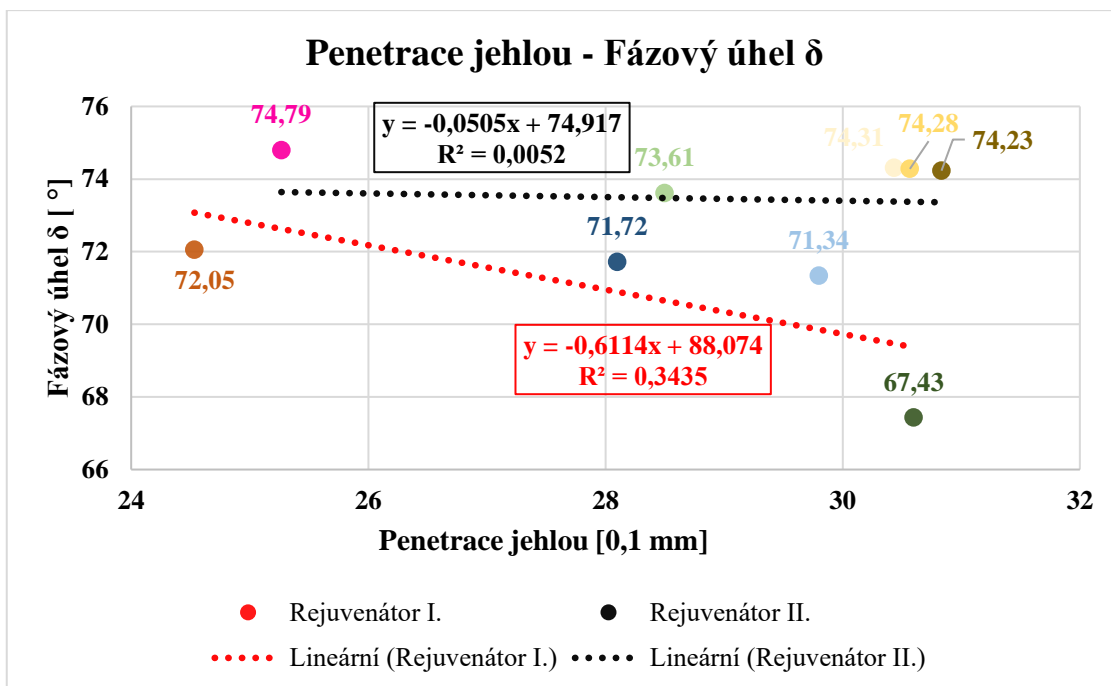
Příloha č. 2: Korelace výsledků – Rejuvenátor I. a Rejuvenátor II. v různém dávkování (vzorky pojiv A1-A3, B1-B3, C1-C3)



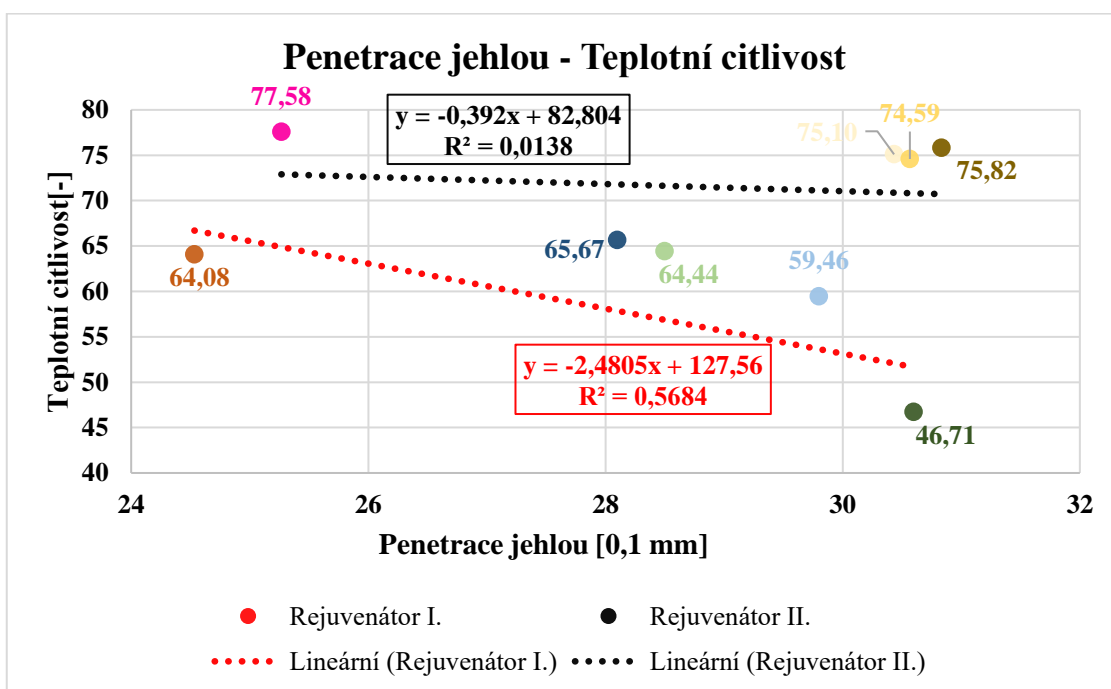
Graf č. 52: Korelace výsledků penetrace jehlou – bod měknutí



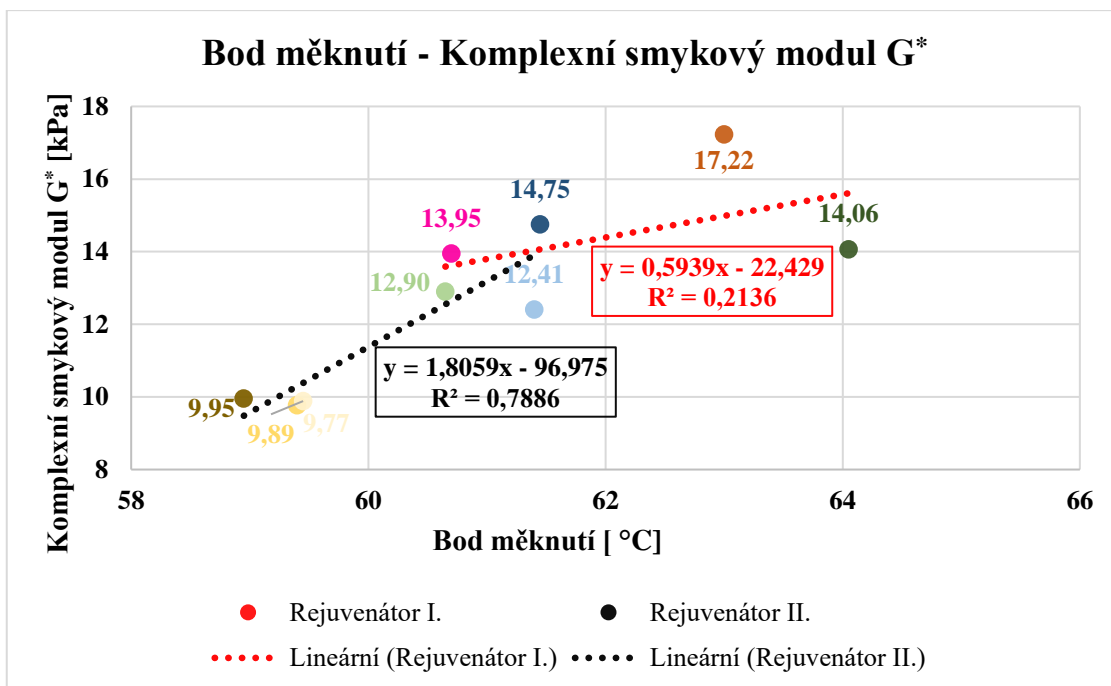
Graf č. 53: Korelace výsledků penetrace jehlou – komplexní smykový modul G*



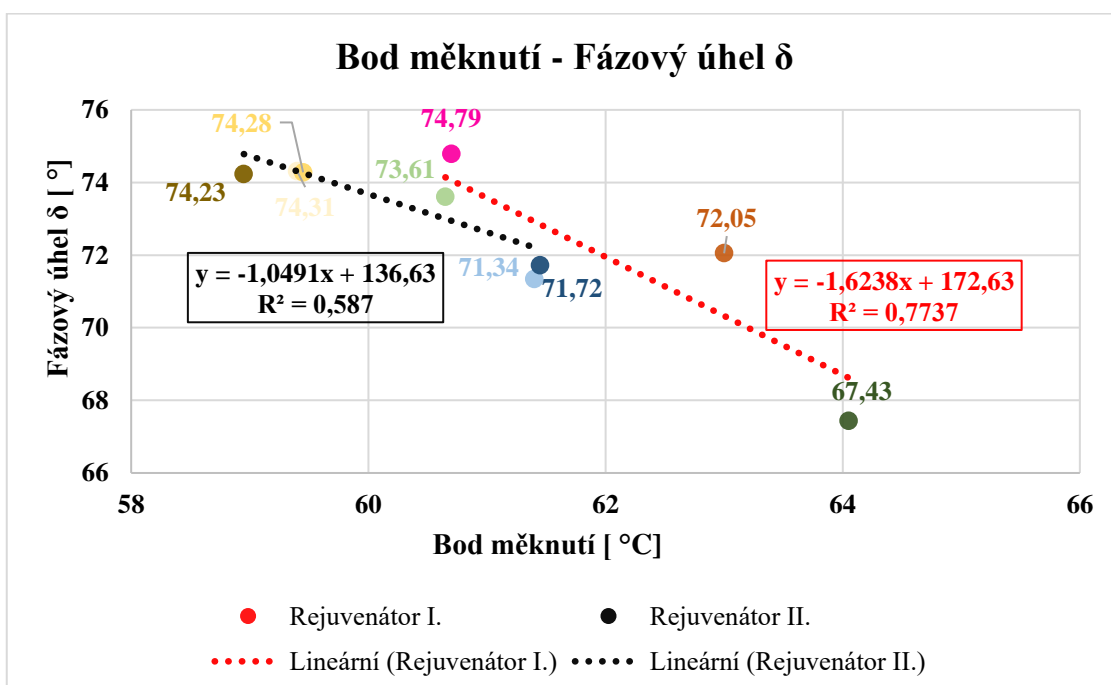
Graf č. 54: Korelace výsledků penetrace jehlou – fázový úhel δ



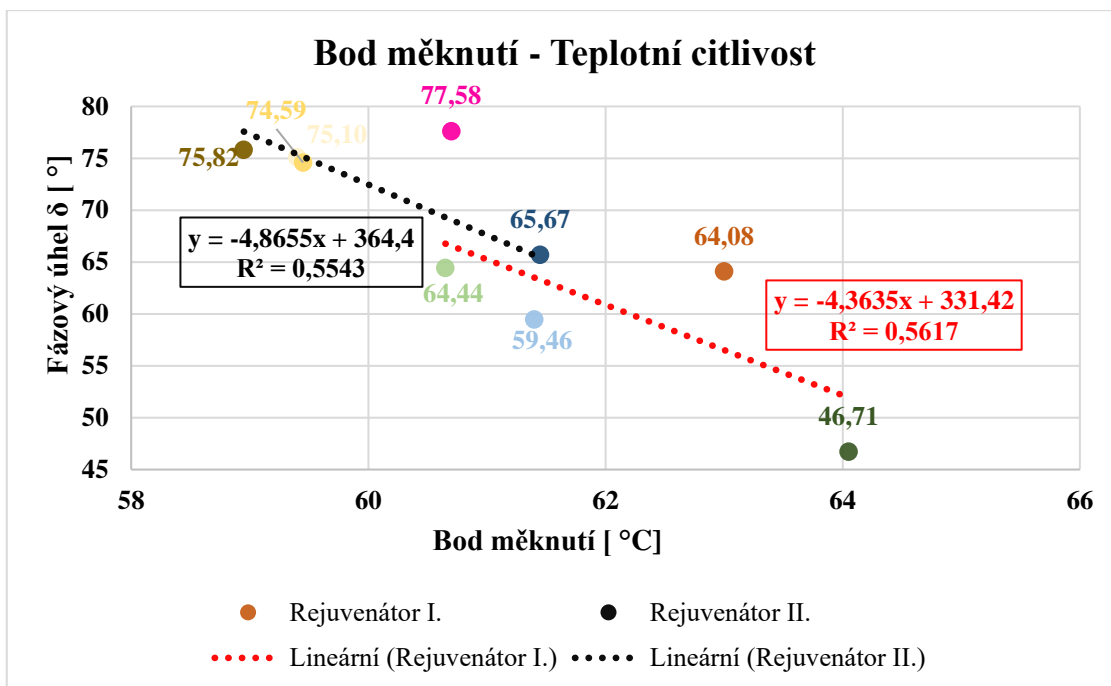
Graf č. 55: Korelace výsledků penetrace jehlou – teplotní citlivost



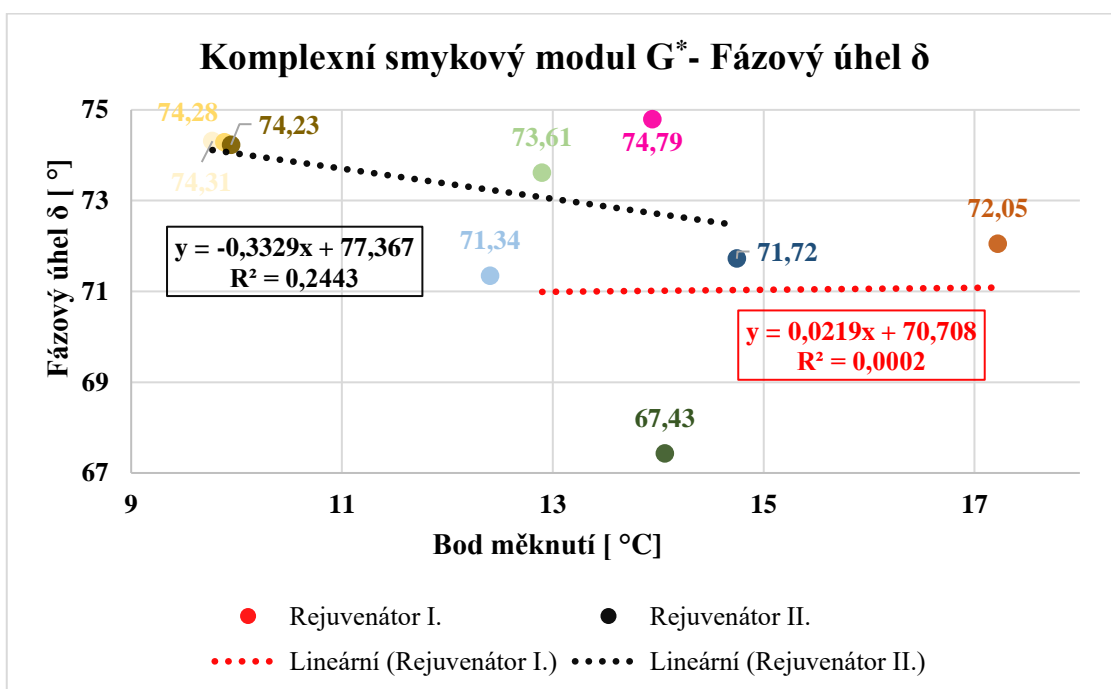
Graf č. 56: Korelace výsledků bod měknutí – komplexní smykový modul G*



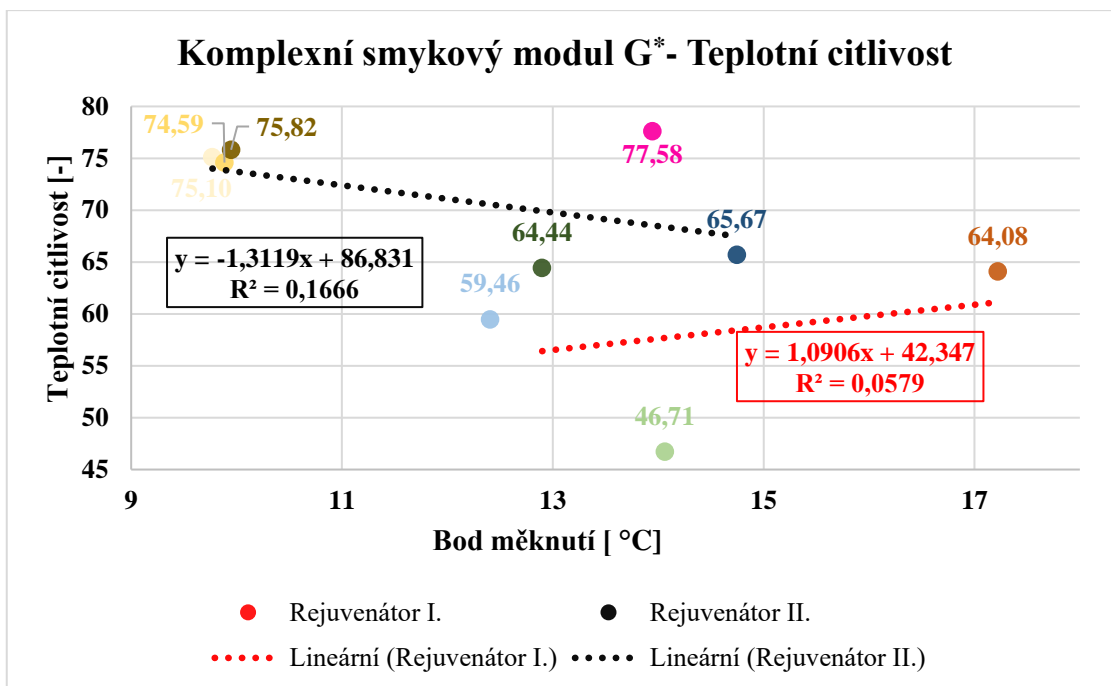
Graf č. 57: Korelace výsledků bod měknutí – fázový úhel δ



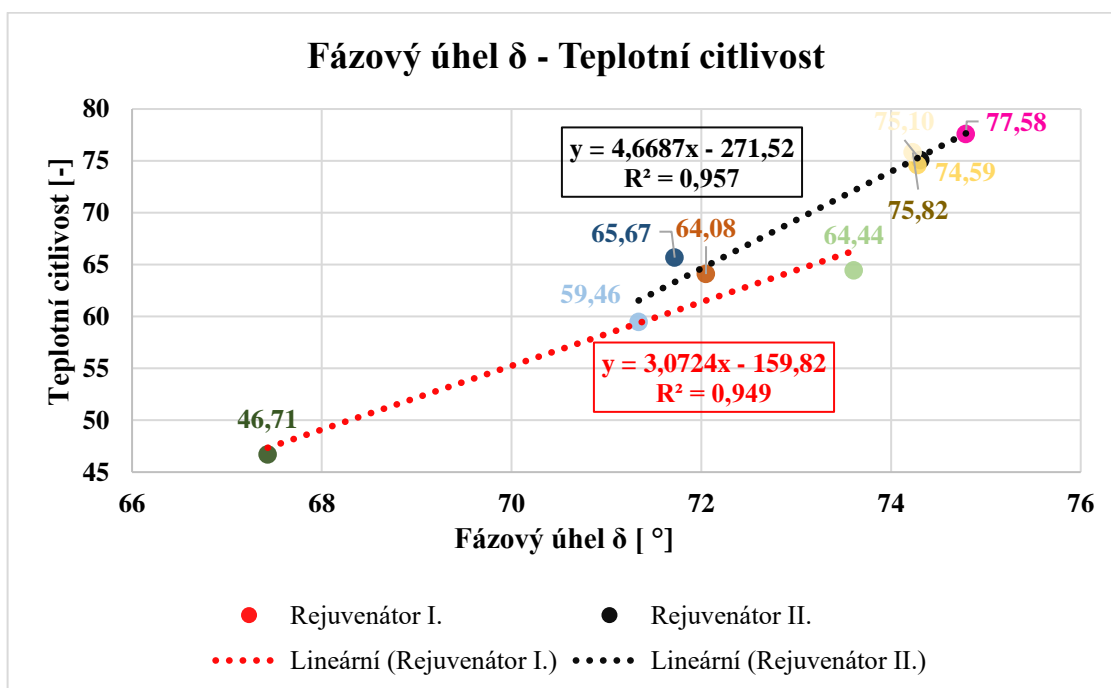
Graf č. 58: Korelace výsledků bod měknutí – teplotní citlivost



Graf č. 59: Korelace výsledků komplexní smykový modul G* - fázový úhel δ

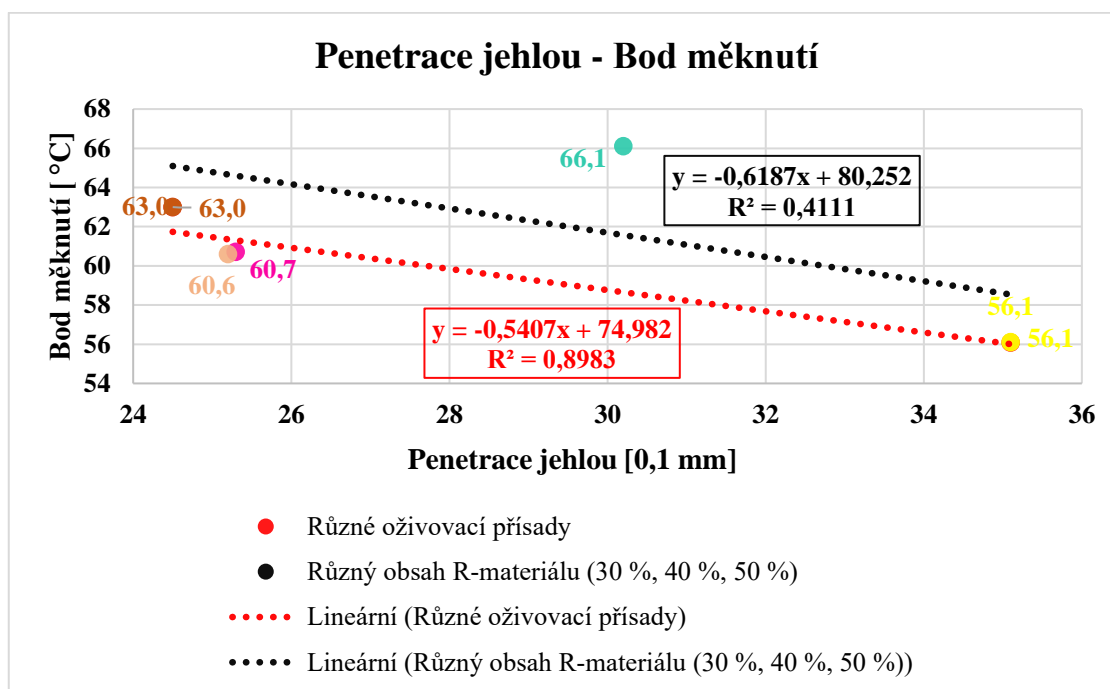


Graf č. 60: Korelace výsledků komplexní smykový modul G^* - teplotní citlivost

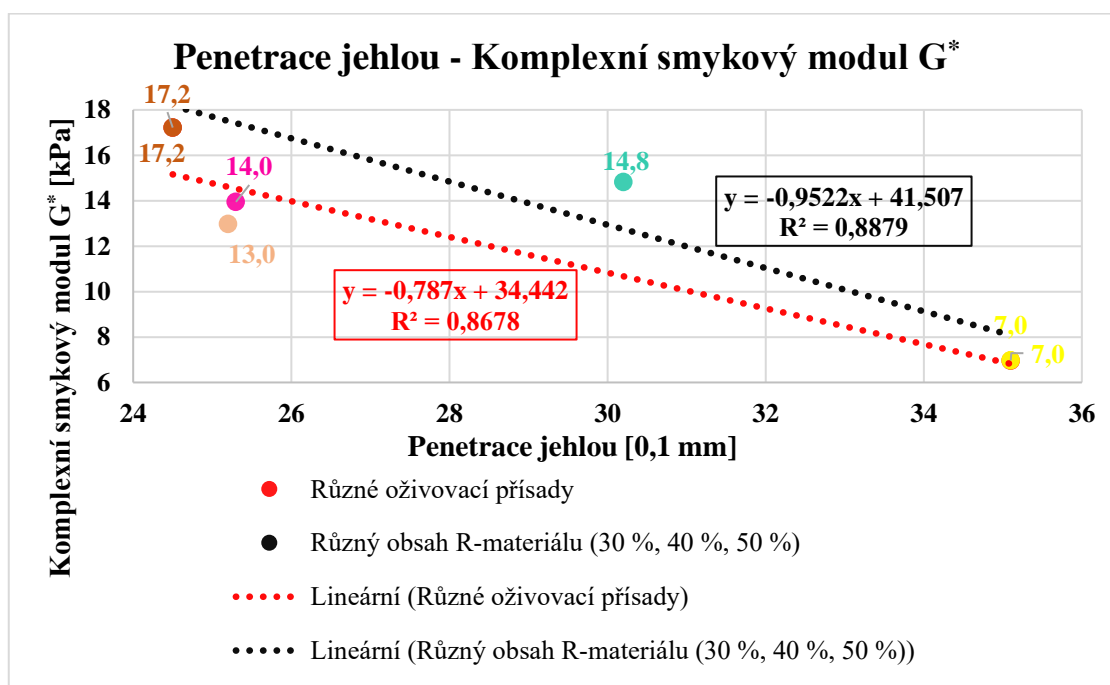


Graf č. 61: Korelace výsledků fázový úhel δ – teplotní citlivost

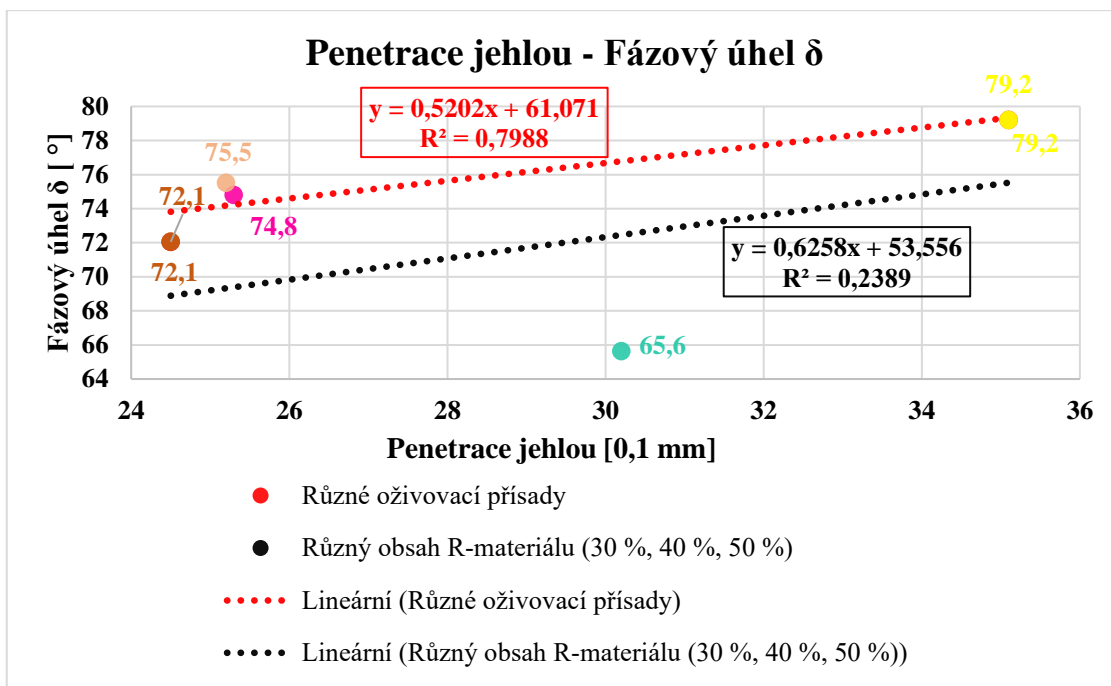
Příloha č. 3: Korelace výsledků – Oživení zestárlého pojiva různými metodami (vzorky pojiv A1, B1, D1 a E2) a různý obsah R-materiálu (vzorky pojiv A1, D1 a F2)



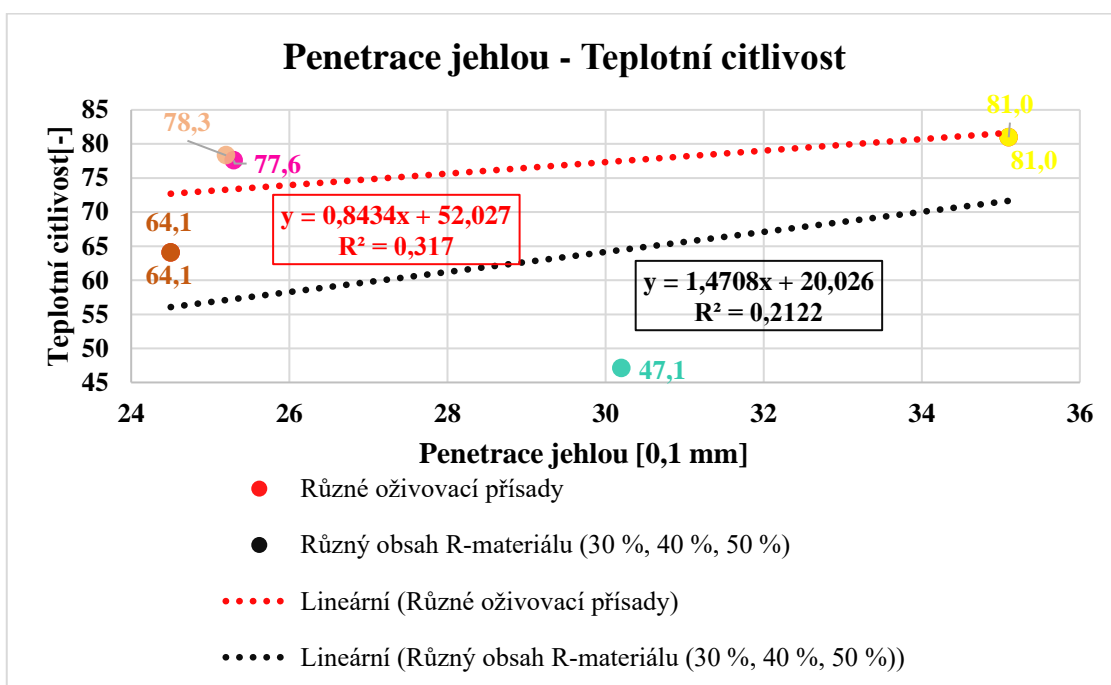
Graf č. 62: Korelace výsledků penetrace jehlou – bod měknutí



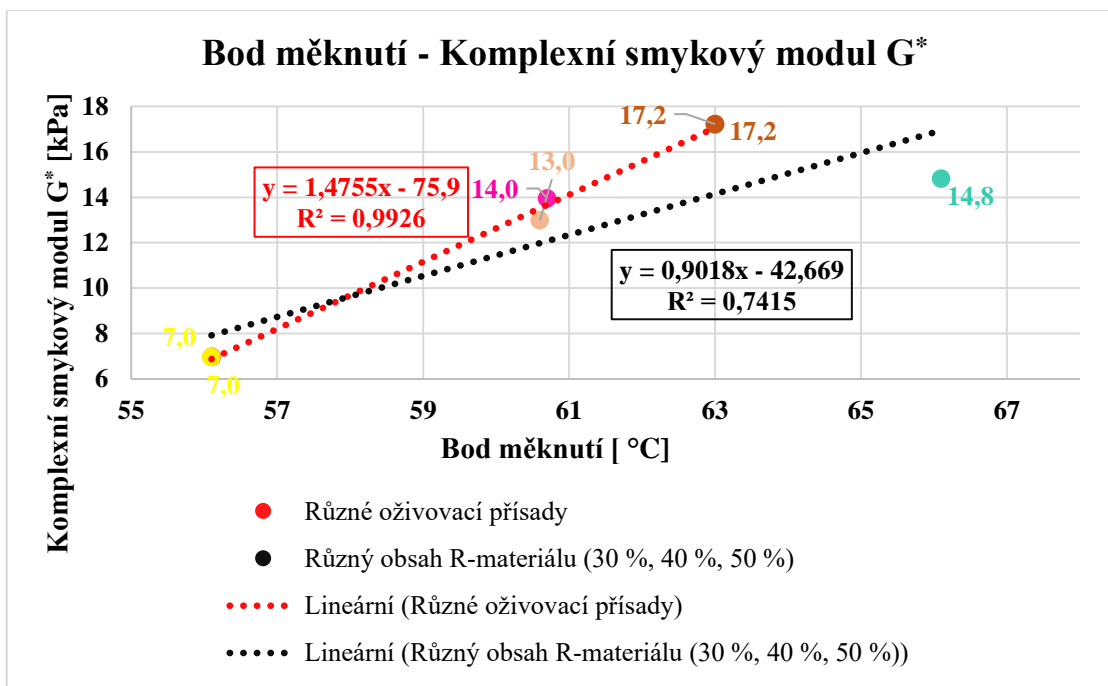
Graf č. 63: Korelace výsledků penetrace jehlou – komplexní smykový modul G*



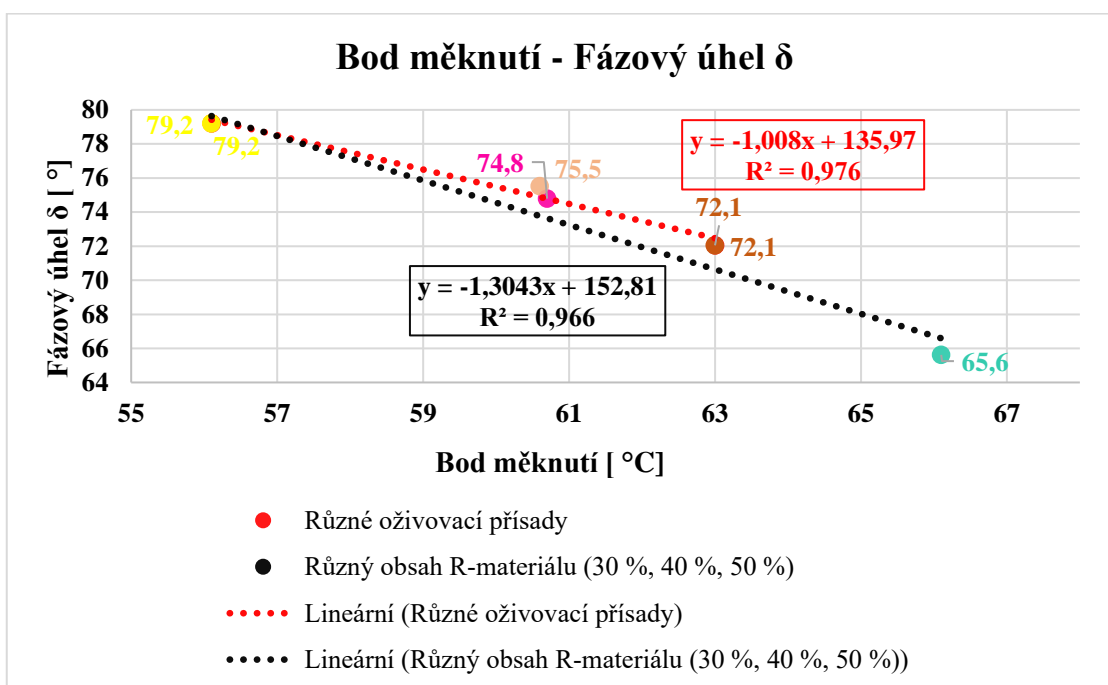
Graf č. 64: Korelace výsledků penetrace jehlou – fázový úhel δ



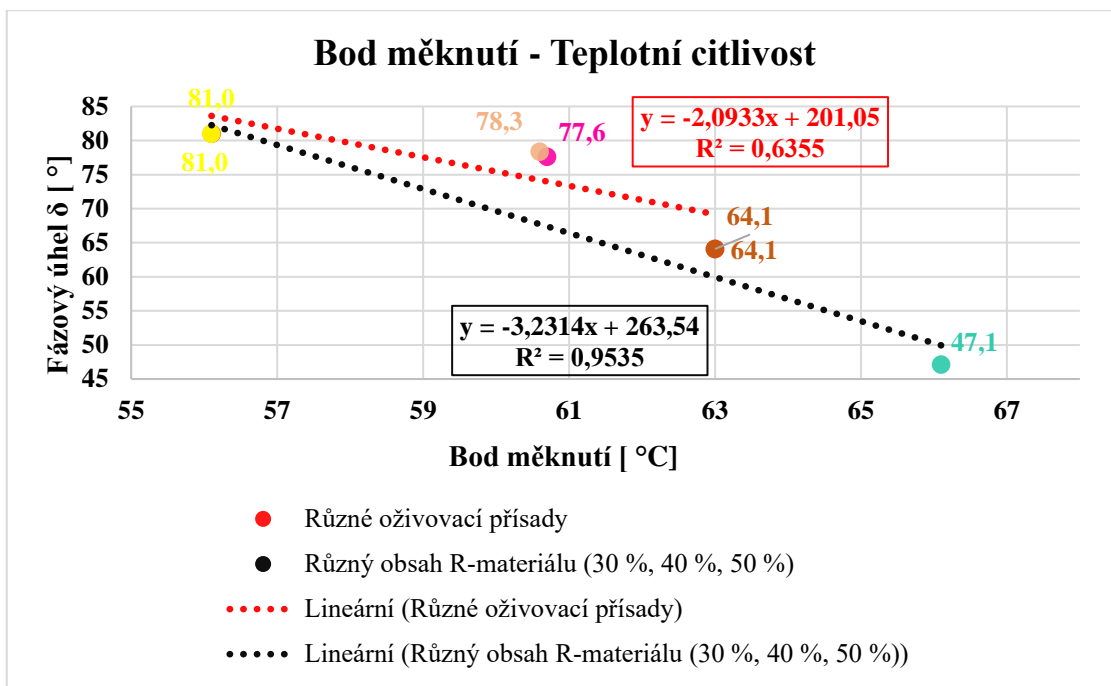
Graf č. 65: Korelace výsledků penetrace jehlou – teplotní citlivost



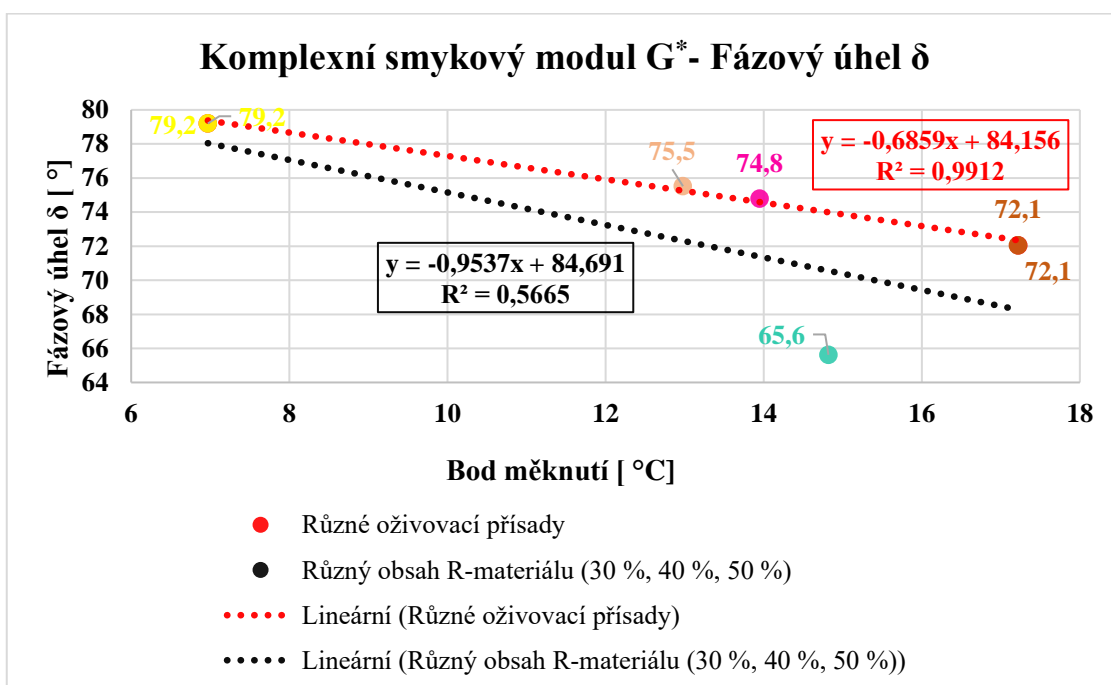
Graf č. 66: Korelace výsledků bod měknutí – komplexní smykový modul G*



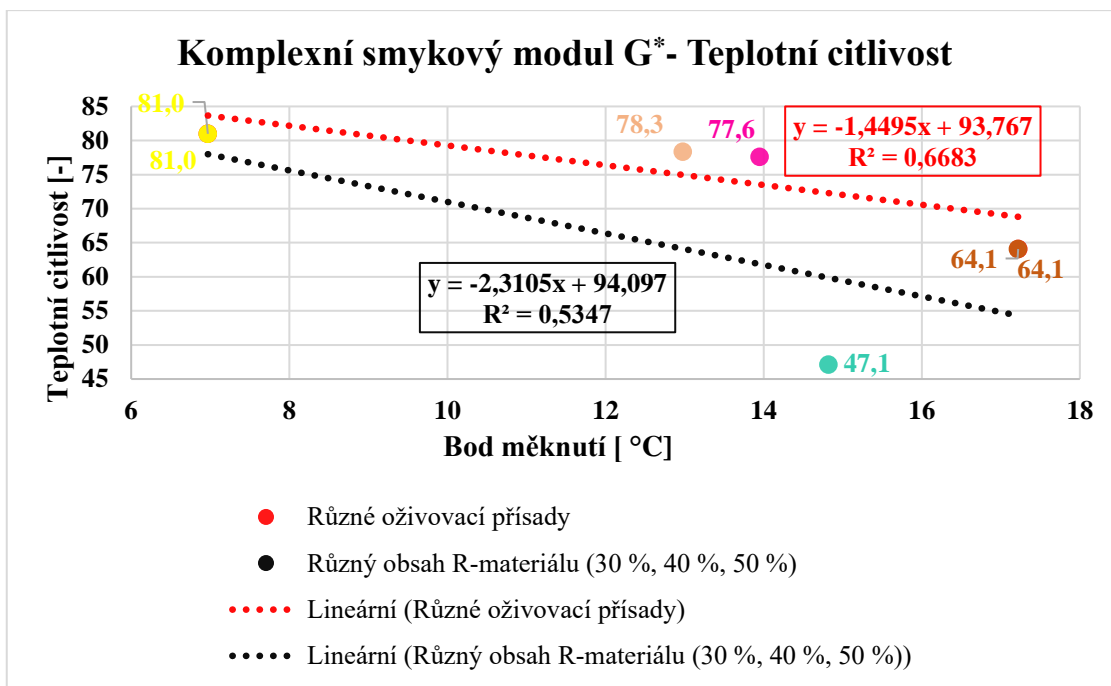
Graf č. 67: Korelace výsledků bod měknutí – fázový úhel δ



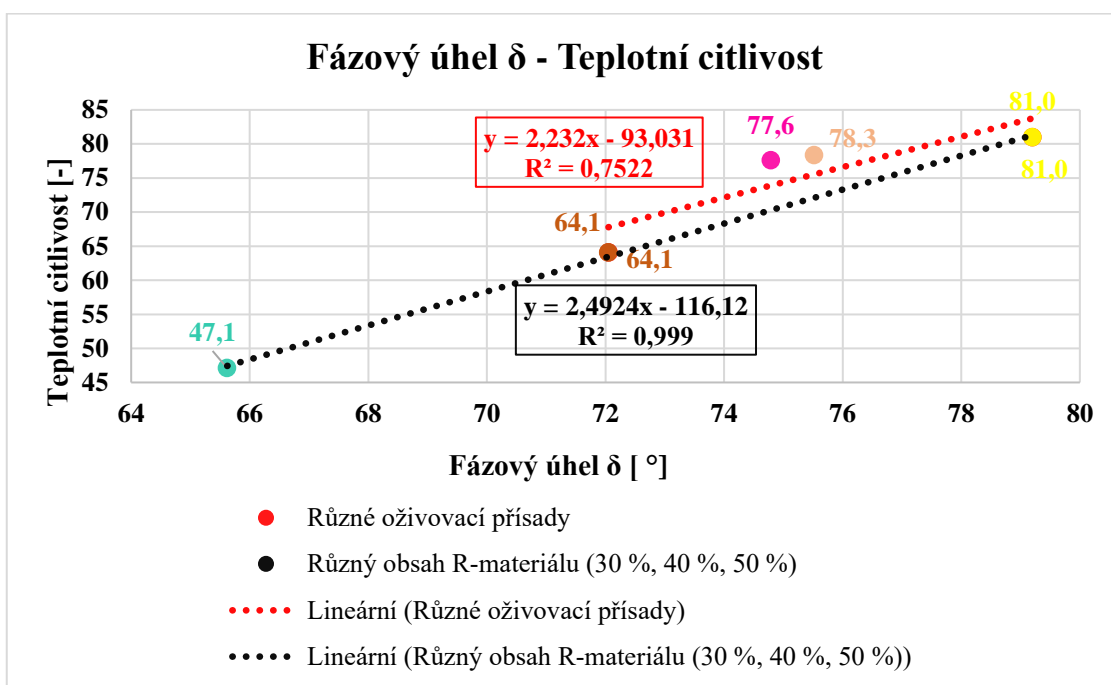
Graf č. 68: Korelace výsledků bod měknutí – teplotní citlivost



Graf č. 69: Korelace výsledků komplexní smykový modul G^* - fázový úhel δ



Graf č. 70: Korelace výsledků komplexní smykový modul G^* - teplotní citlivost



Graf č. 71: Korelace výsledků fázový úhel δ – teplotní citlivost