

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**KATEDRA SILNIČNÍCH STAVEB**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
POSOUZENÍ VLIVU REJUVENÁTORŮ NA  
VLASTNOSTI ASFALTOVÉ SMĚSI S VYSOKÝM  
OBSAHEM R-MATERIÁLU

2022

Jiří Jindra



## ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Jindra Jméno: Jiří Osobní číslo: 440831

Zadávající katedra: katedra silničních staveb

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Posouzení vlivu rejuvenátorů na vlastnosti asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu

Název diplomové práce anglicky: Evaluation of rejuvenators' effect on asphalt mix characteristics with elevated content of reclaimed asphalt

Pokyny pro vypracování:

Identifikujete a popíšete vlivy rejuvenátorů při jejich použití u asfaltových směsí a to včetně závislosti na množství R-materiálu či typu používaných asfaltových směsí. Shrňte slabé a silné stránky tohoto přístupu k recyklaci. Navrhněte asfaltovou směs typu ACL, která se bude vyznačovat obsahem 30-50 % R-materiálu, a použijte soubor min. 7 různých rejuvenátorů.

Experimentálně porovnejte experimentálně vliv rejuvenátorů asfaltovou směs s vyšším obsahem R-materiálu souborem laboratorních zkoušek (tuhost, odolnost proti šíření trhliny, odolnost proti účinku vody, vliv laboratorního stárnutí, stanovení komplexního modulu). Vyhodnotte vliv rejuvenátorů na chování směsi.

Seznam doporučené literatury:

ČSN 73 6121, ČSN 73 6141 a související technické předpisy pro navrhování a zkoušení asfaltových směsí

EAPA: Recommendations for the use of rejuvenators in hot and warm asphalt production, 2018.

Diplomové práce katedry se zaměřením na tematiku recyklace, odborné publikace s tematikou recyklace asfaltových směsí.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Jan Valentin, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 23.09.2021 Termín odevzdání diplomové práce: 02.01.2022  
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

29. 9. 2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)



## ANOTACE

Tato diplomová práce se zaměřuje na problematiku asfaltových směsí se zvýšeným podílem R-materiálu a využití rejuvenátorů nebo vhodných typů asfaltových pojiv. Obecně je shrnut účel rejuvenačních přísad, jakož i jejich odlišnost od změkčovačů, se kterými se lze v silniční praxi rovněž setkat. Zkoumán je vliv různých typů rejuvenátorů na vybrané parametry asfaltové směsi s vysokým podílem R-materiálu, který byl v diplomové práci stanoven hodnotou 50 % náhrady kameniva a pojiva. Jelikož dnes na trhu existuje rostoucí množství různých látek, které lze použít pro oživení či omlazení asfaltové směsi s R-materiálem, jsou vybrány a posuzovány jak rejuvenátory na bázi přírodních olejů, tak produkty z ropných derivátů. Rovněž jsou vyhodnoceny tuzemské a zahraniční zkušenosti s používáním rejuvenátorů v reálných podmínkách a u realizovaných pokládek asfaltových vrstev. Krátce je také popsán fenomén stárnutí asfaltového pojiva, který s problematikou úzce souvisí a v případě rejuvenátorů či změkčovačů je neméně důležitý, protože tyto látky nemají docílit potřebného účinku pouze v době výroby asfaltové směsi, ale i později během provozu na pozemní komunikaci.

Praktická část se zabývá laboratorním zkoušením a hodnocením jednotlivých variant asfaltové směsi typu asfaltový beton pro ložné vrstvy (ACL) se zaměřením na maximální objemovou hmotnost, mezerovitost, odolnost vůči mrazu a vodě (trvanlivost), odolnost vůči vzniku a šíření trhliny, charakteristiku tuhosti při různých zkušebních teplotách a dále na změny hodnot modulu tuhosti a dynamického komplexního modulu tuhosti v důsledku simulovaného účinku stárnutí. Posouzeny jsou varianty s celkově 12 rejuvenátory. Ty jsou dále porovnány s referenční variantou bez jakéhokoliv omlazení či oživení zestárnutého asfaltového pojiva v R-materiálu a také s variantou, kde je zvoleno měkké silniční asfaltové pojivo. Jako určitý bonus je diplomová práce rozšířena o variantu využívající polymerem modifikované asfaltové pojivo PMB RC a pryží modifikované pojivo CRMB. Na základě získaných výsledků je provedeno porovnání a doporučení pro další uplatnění rejuvenátorů při návrhu asfaltové směsi s vyšším podílem R-materiálu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

asfaltová směs; rejuvenátor; R-materiál; měkké asfaltové pojivo; polymerem modifikovaný asfalt; kamenivo; modul tuhosti; komplexní modul tuhosti; šíření trhliny; trvanlivost; organický olej; anorganické látky



## ABSTRACT

This master's thesis focuses on problems of asphalt mixtures with the higher amount of RA (reclaimed asphalt) and use of a rejuvenators or a suitable type of bituminous binder. Generally, the purpose of rejuvenating agent is summarized and it defines the difference between rejuvenators and plasticizers (softeners), which are also common in road construction practice. Impact of various types of rejuvenators on some characteristics of asphalt mixture with the higher amount of RAP, which was in this thesis determined to 50 % replacement of aggregate and binder was investigated. Due to a huge number of various agents which could be used for a regeneration or a rejuvenation of asphalt mixture with a RA, rejuvenators based on natural oils as well as products made from petroleum derivatives were selected and evaluated. Domestic and foreign experiences with use of rejuvenators in real conditions and realized laying of asphalt layers were also evaluated. In brief, the effect of ageing of asphalt binder is described, which is closely connected with these problems and it is very important in case of rejuvenators or plasticizers, because these agents have to reach required effect on asphalt mixture not only in time of production, but also during whole lifetime period of asphalt layer.

The practical part of the thesis is devoted to laboratory testing and evaluation of individual versions of asphalt mixture – type asphalt concrete for binder layer (ACL). The evaluation is focused on maximum bulk density, air voids content, resistance to the effect of water and frost (durability), resistance to crack initiation and propagation, stiffness characteristics at various testing temperatures and changes of stiffness modulus and complex stiffness modulus after the simulated ageing. The versions with 12 various types of rejuvenators were evaluated. These were compared with a reference version with no restoration or rejuvenation of aged asphalt binder in the RA. They were also compared with a version with softer bituminous binder. In addition, this thesis deals with the version of asphalt mixture with polymer modified bitumen designed for mixture with reclaimed asphalt (PMB RC) and crumb rubber modified bitumen (CRMB). Based on the results obtained a comparison and recommendation for next use of rejuvenators in design of asphalt mixture with higher amount of RAP is carried out.

## KEY WORDS

asphalt mixture; rejuvenator; reclaimed asphalt; soft bitumen; modified bitumen; aggregate; stiffness modulus; complex modulus; crack propagation; durability; organic oil; inorganic agents



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré informační zdroje, které jsem při zpracovávání použil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 2.1.2022

Jiří Jindra



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Valentinovi, Ph.D., vedoucímu diplomové práce, za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi byly velmi nápomocny při zpracování této práce. Zároveň bych rád poděkoval Ing. Pavle Vackové, Ph.D., Majdě Belhaj, MSc., Jaroslavu Kasalickému a ostatním zaměstnancům silniční laboratoře za pomoc a ochotu při přípravě vzorků a laboratorních zkouškách a jejich vyhodnocení. Rovněž nelze opomenout poděkování společnosti Pozemní komunikace Bohemia a.s., která poskytla kamenivo a zvýšené množství R-materiálu, jenž bylo pro vyhotovení zkušebních těles jednotlivých variant asfaltových směsí potřebné. Současně jsem měl díky jejich probíhajícímu výzkumnému projektu FW01010512 Technologické agentury České republiky možnost využít a porovnat i tři typy nových a v rámci daného projektu navržených rejuvenátorů. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za pomoc při eliminaci stylistických vad a nedostatků a podporu během dosavadního studia.



# OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A ZNAČEK .....	9
1 ÚVOD .....	10
1.1 STÁRNUTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA .....	11
1.1.1 Metody simulace stárnutí asfaltových pojiv.....	12
1.2 REJUVENÁTORY V SILNIČNÍM STAVITELSTVÍ.....	13
1.3 VYUŽITÍ REJUVENÁTORŮ VE SVĚTĚ .....	17
1.4 VYUŽITÍ REJUVENÁTORŮ V ČESKÉ REPUBLICCE.....	20
2 POUŽITÉ MATERIÁLY .....	22
2.1 KAMENIVO.....	22
2.2 R-MATERIÁL.....	22
2.3 ASFALTOVÁ SMĚS ACL 16+ .....	22
2.4 PARAMO REJUVENÁTOR 182 .....	23
2.5 REJUVENÁTOR SYLVAROAD RP 1000.....	23
2.6 AV REJUVENÁTOR „A“ .....	23
2.7 AV REJUVENÁTOR „B“ .....	23
2.8 AV REJUVENÁTOR „C“ .....	23
2.9 REJUVENÁTOR RAPFix .....	24
2.10 REJUVENÁTOR ACF .....	24
2.11 REJUVENÁTOR JRS.....	24
2.12 REJUVENÁTOR VIATOP RC.....	24
2.13 REJUVENÁTOR ERVO .....	24
2.14 REJUVENÁTOR ENVI .....	25
2.15 REJUVENÁTOR ANOVA .....	25
2.16 ASFALTOVÉ POJIVO .....	25
3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	26
3.1 VÝROBA MARSHALLOVÝCH TĚLES.....	26
3.2 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH DESEK.....	28
4 MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....	30
4.1 STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI SMĚSI.....	30
4.2 MĚŘENÍ PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU .....	30
4.3 MĚŘENÍ MODULU TUHOSTI .....	31
4.4 MĚŘENÍ ODOLNOSTI PROTI ŠÍŘENÍ TRHLINY.....	33
4.5 STANOVENÍ KOMPLEXNÍHO DYNAMICKÉHO MODULU TUHOSTI.....	34
5 NÁVRH ASFALTOVÉ SMĚSI.....	39



5.1	NAVRŽENÁ RECEPTURA.....	39
6	VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK.....	40
6.1	ZRNITOST A OBSAH ASFALTOVÉHO POJIVA .....	40
6.2	MEZEROVITOST A MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÁ HMOTNOST .....	43
6.3	PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU A MODUL PRUŽNOSTI.....	45
6.4	MODULY TUHOSTI .....	47
6.4.1	Asfaltová směs ACL 16+ s 50 % R-materiálu – nezestárnutá tělesa .....	48
6.4.2	Asfaltová směs ACL 16+ s 50 % R-materiálu – zestárnutá tělesa .....	51
6.5	ODOLNOST VŮČI ŠÍŘENÍ TRHLINY.....	54
6.5.1	Lomová houževnatost .....	55
6.5.2	Lomová energie .....	56
6.5.3	Index stárnutí .....	59
6.6	KOMPLEXNÍ DYNAMICKÝ MODUL TUHOSTI.....	60
6.6.1	Master curve (řídící křivka) komplexního dynamického modulu tuhosti.....	60
6.6.2	Black space diagram .....	64
6.6.3	Master curve (řídící křivka) fázového úhlu .....	67
6.6.4	Index stárnutí .....	70
7	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	72
8	ZÁVĚR .....	75
9	PŘEHLED ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY.....	76
10	PŘÍLOHY.....	79
10.1	VÝSLEDKY MĚŘENÍ KOMPLEXNÍHO DYNAMICKÉHO MODULU TUHOSTI .....	79





## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A ZNAČEK

- A – AV rejuvenátor „A“
- ACF7 – rejuvenátor ACF v množství 7 %
- ACF10 – rejuvenátor ACF v množství 10 %
- ACL – asfaltový beton pro ložné vrstvy vozovky
- ACO – asfaltový beton pro obrusné vrstvy vozovky
- AN – rejuvenátor Anova
- AV rejuvenátor – rejuvenátor vyvíjený ve spolupráci s Akademií věd ČR
- B – AV rejuvenátor „B“
- C – AV rejuvenátor „C“
- CRMB – crumb rubber modified bitumen (pojivo modifikované namletou pryží)
- $d$  – průměr zkušebního tělesa
- $\delta_{\max}$  – maximální naměřené přetvoření
- $E_{\text{dry}}$  – modul pružnosti měřený na suchých tělesech (MPa)
- $E_{\text{wet}}$  – modul pružnosti měřený na tělesech vystavených účinkům vody (MPa)
- $E_{\text{w+f}}$  – modul pružnosti měřený na tělesech vystavených účinkům vody a mrazu (MPa)
- $E^*$  - visko-elastický (dynamický) komplexní modul tuhosti (MPa)
- $E_1$  – reálná složka komplexního modulu (MPa)
- $E_2$  – imaginární složka komplexního modulu (MPa)
- $F_{\max}$  – maximální naměřená zatěžovací síla
- $\phi$  – fázový úhel modulu materiálu (°)
- $h$  – výška (tloušťka) zkušebního tělesa
- ITS – indirect tensile strength (pevnost v příčném tahu)
- ITSR – indirect tensile strength ratio (poměr pevností v příčném tahu)
- JRS – J. Rettenmaier & Söhne GmbH + CO. KG (německá firma)
- LDPE – low density polyethylene (nízko hustotní polyethylen)
- MC – master curve (řídící křivka)
- $\nu$  – Poissonovo číslo
- PAR – rejuvenátor PARAMO REJU 182
- PMB – polymer modified bitumen (polymerem modifikované pojivo)
- $R_{\text{dry}}$  – pevnost v příčném tahu měřená na suchých tělesech (MPa)
- $R_{\text{wet}}$  – pevnost v příčném tahu měřená na tělesech vystavených účinkům vody (MPa)
- $R_{\text{w+f}}$  – pevnost v příčném tahu měřená na tělesech vystavených účinkům vody a mrazu (MPa)
- RA – R-materiál
- RFX – rejuvenátor RAPFix
- $\rho_{\text{mv}}$  – maximální objemová hmotnost asfaltové směsi v Megagramech na kubický metr ( $\text{Mg/m}^3$ )
- S6 – rejuvenátor Sylvaroad RP 1000 v množství 6 %
- S10 – rejuvenátor Sylvaroad RP 1000 v množství 10 %
- VT3 – rejuvenátor Viatop RC v množství 3 %
- VT6 – rejuvenátor Viatop RC v množství 6 %



# 1 ÚVOD

S pokračujícím rozvojem silniční dopravy rapidně vzrůstají nároky na vozovky pozemních komunikací. Zvýšené nároky jsou způsobeny jednak větším množstvím vozidel, která se po komunikacích pohybují, ale nezanedbatelný aspekt představuje také narůstající hmotnost vozidel (toto se týká především nákladních vozidel) a to včetně počtu a úpravy náprav. V dnešní době jsou značné požadavky kladeny především na obrusné vrstvy, v širším kontextu se však také oprávněně požadují zvýšené nároky na celé asfaltové souvrství (tj. i ložní a podkladní vrstvy). Základním a nejrozšířenějším kompozitním materiálem používaným pro tyto vrstvy je již po mnoho desetiletí asfaltová směs, byť se samozřejmě u nejzatíženějších vozovek setkáváme velmi často i s cementobetonovými kryty. Tato směs se skládá z kameniva a asfaltového pojiva (dvoufázový systém u litých asfaltů), případně obsahuje navíc vzduchové mezery (třífázový systém u hutněných asfaltových směsí).

Jednou z negativních vlastností asfaltových vozovek je vznik a rozvoj trvalých deformací, existuje však i celá řada dalších potenciálních poruch, kterým mají asfaltové vrstvy v maximální možné míře předcházet. Jedná se především o různé druhy trhlin (příčné, podélné, mozaikové a síťové), ztrátu drsnosti (ztráta mikro a makrotextury a obecně ztráta protismykových vlastností), deformace krytu (hrboly, podélné vlny a koleje) a další konstrukční poruchy. Tyto poruchy znamenají jednak snížení jízdního komfortu, horší ekonomiku jízdy, v krajním případě až ohrožení bezpečnosti provozu. Dalším důležitým faktorem, zejména v hustě obydlených oblastech, jsou opravy těchto poruch. Časté opravy krytu vedou k dopravním komplikacím, nižší propustnosti komunikace, zvyšování časových ztrát uživatelů pozemní komunikace a v neposlední řadě ke zvýšenému hluku a znečištění v dané lokalitě.

Po celém světě a zejména v západní Evropě a Severní Americe narůstají tendence k vývoji asfaltového krytu, u kterého by byly zásadně sníženy požadavky na údržbu (tzv. nízkoúdržbový kryt), resp. u kterého by došlo k optimalizaci cyklů periodických oprav a ke zrychlení vlastního procesu provádění jednotlivých zásahů údržby a oprav znamenajících například výměnu některé z konstrukčních vrstev. Další velmi silnou motivací tohoto vývoje je dopad výroby asfaltových směsí na životní prostředí. Spolu s vývojem nízkoúdržbového krytu je rovněž propagována snaha co nejvíce používat asfaltový R-materiál, který vzniká odstraněním původních konstrukčních vrstev nebo celé konstrukce vozovky.

Použití R-materiálu ve větší míře nicméně způsobuje významné změny ve vlastnostech asfaltových směsí. Při vyšším množství R-materiálu ve směsi dochází k zvýšení tuhosti a snížení odolnosti vůči únavovému a teplotnímu namáhání. Rostoucí tuhost směsi je způsobena zestárlým pojivem obsaženým v R-materiálu. U zestárlého pojiva dochází ke shlukování asfalténů (nerozpustné pevné látky obalené pryskyřicemi) a pronikání fluxačních olejů do kameniva. To vede ke křehnutí pojiva, které ztrácí svou pružnost. Aby se tomuto jevu zabránilo, začínají se ve zvýšené míře používat při výrobě asfaltových směsí tzv. oživovací přísady.

Použití oživovacích přísad sebou přináší mj. i další výhody v oblasti technologií a logistiky. Patří k nim možnost takřka neomezeného použití R-materiálu (snížení nároků na těžbu kameniva a objem přepravovaného materiálu) a jednoduché přidání přísady (odpadá nutnost zřízení dalšího skladovacího síla v areálu obalovny).



V současnosti se na trhu vyskytuje více druhů výrobků, které lze zařadit do skupiny oživovacích přísad. Tyto výrobky lze obecně rozdělit na dvě skupiny [1]:

- 1) Změkčovadla
  - jedná se o tzv. fluxační přísady (plasticizers), které pouze snižují viskozitu pojiva
- 2) Rejuvenátory
  - cílem je obnovit chemickou strukturu pojiva a přerušit proces shlukování asfalténů

Pro použití v silničním stavitelství jsou tedy v určitém ohledu výhodnější rejuvenátory, protože úspěšně přeruší shlukování asfalténů a z dlouhodobého hlediska mohou zabránit (nebo přinejmenším oddálit) vznik únavových a nízkoteplotních trhlin. Proces rejuvenace navíc ochrání asfaltové vrstvy před pronikáním vzduchu, vody a chemických látek do konstrukce. Díky tomu dojde ke zpomalení oxidace a také ke zpomalení celkového zhoršování kvality směsi, což vede k prodloužení životnosti a trvanlivosti vozovky. [4]

Tato práce se zaměřuje na použití různých druhů rejuvenátorů aplikovaných na asfaltovou směs s vysokým podílem recyklovaného kameniva. Byl zkoumán vliv těchto rejuvenátorů na charakteristiky směsi jako je množství asfaltového pojiva, modul tuhosti, pevnost v příčném tahu, odolnost proti vzniku a šíření trhliny a další. Rejuvenátory byly použity v jedné asfaltové směsi. Jednalo se o asfaltovou směs ACL 16+ s 50 % R-materiálu.

## 1.1 STÁRNUTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA

Stárnutí ovlivňuje všechny vlastnosti asfaltové směsi a největší vliv má na asfaltové pojivo. Asfaltové pojivo prochází termooxidačním procesem, tedy jeho vlastnosti se mění v průběhu času vlivem klimatických podmínek, atmosférických vlivů, přítomnosti kyslíku, ultrafialového (UV) záření atd. Rychlost stárnutí závisí na typu asfaltového pojiva (nemodifikované, modifikované apod.), na jeho zdroji, na výrobním procesu (destilované, polofoukané apod.), typu a množství použitých modifikantů nebo přísad, podmínkách skladování, tloušťce asfaltového filmu atd.

Dalším významným faktorem je přítomnost R-materiálu. Ačkoli je použití R-materiálu ve vozovkách ekonomicky a ekologicky vhodné, při příliš vysokém procentuálním zastoupení R-materiálu bez řádného návrhu a dostatečného zkoušení může dojít ke zhoršení vlastností výsledné asfaltové vrstvy a tím k celkovému snížení životnosti vrstvy. V takovém případě je nutné dbát zvýšené pozornosti při návrhu a kontrole kvality vyráběné asfaltové směsi.

Vlivem stárnutí dochází do jisté míry k nárůstu pevnostních charakteristik (pevnosti a tuhosti) a ke zlepšení odolnosti vůči trvalým deformacím – zoxidované asfaltové pojivo se stává tvrdším (snižuje se hodnota penetrace a narůstá bod měknutí) a tím jsou ovlivněny pevnostní i deformační charakteristiky asfaltové směsi. Pojivo je sice tvrdší (tužší), ale na druhou stranu se zpravidla stává křehčím a méně odolným proti náhlým změnám klimatických podmínek v kombinaci s opakovaným účinkem zatížení. Zestárlé pojivo je méně pružné, a tak může docházet k snadnější iniciaci a následné propagaci trhlin, což se týká mrazových (obecně teplotně indukovaných) i únavových trhlin.

Proces stárnutí asfaltového pojiva je tedy významný aspekt, který je třeba zohlednit při použití R-materiálu. Pro lepší vyhodnocení vlivu stárnutí (dlouhodobého i krátkodobého) na asfaltové pojivo byla v průběhu let vyvinuta řada zkušebních metod, které se běžně používají v laboratořích pro vyhodnocení vlivu stárnutí. Při simulaci (urychleného) stárnutí v laboratorních podmínkách je rovněž velmi důležité porovnat výsledky zkušebních vzorků s vzorky odebranými *in situ*, které byly vystaveny reálným klimatickým podmínkám. Na základě toho lze stanovit účinnost a průkaznost dané metody.



Nicméně je třeba zdůraznit, že je to velmi obtížné a prakticky neexistuje univerzální postup, jak porovnávat laboratorní a reálné podmínky z pohledu komplexního procesu stárnutí asfaltového pojiva.

V ČR je stárnutí asfaltových pojiv primárně simulováno metodami RTFOT a RTFOT+PAV. Pokud je použita pouze metoda RTFOT, je následně zkoumán primárně bod měknutí, hodnota penetrace a změna hmotnosti. Podle potřeby jsou pak provedena další měření, např. pomocí dynamického smykového reometru (Dynamic Shear Rheometer, DSR). V případě, že je použita metoda RTFOT+PAV, je zkoumána změna modulové charakteristiky a tuhost v oboru nízkých teplot pomocí BBR (Bending Beam Rheometer; reometr určený pro zkoušení trámek). Protože pokles teploty, který vyvolá tahová napětí ve vozovce, je pomalý proces, je nutné sledovat chování zestárlého asfaltového pojiva v DSR při velmi malých frekvencích zatížení ( $f = 0,1 - 10$  Hz). Protože by však takové zkoušky trvaly delší dobu, využívá se časově teplotní superpozice.[12]

Nejvýrazněji se na degradaci asfaltové směsi podílí termooxidační stárnutí. Jedná se o soubor radikálových řetězových reakcí, které závisí na teplotě a přístupu vzdušného kyslíku k pojivu. Tento druh stárnutí se projevuje nejvíce ve fázi výroby, dopravy a pokládky směsi (pojivo je zahřáto na vysoké teploty a oxidaci je vystavena velká plocha materiálu). [11]

Dalším typem stárnutí je tzv. strukturální stárnutí (tvrdnutí). To se projevuje zejména při nízkých teplotách a jejich dlouhodobém působení na pojivo. Většinou se jedná o vratný proces, který není spojen s chemickými změnami materiálu. [11]

### 1.1.1 Metody simulace stárnutí asfaltových pojiv

Pro možnost simulace stárnutí v laboratorních podmínkách bylo vyvinuto několik zkušebních metod. Obecně lze tyto metody rozdělit dle toho, zda simulují krátkodobé, nebo dlouhodobé stárnutí asfaltového pojiva. [11] Krátkodobé stárnutí (během několika hodin) začíná během výroby asfaltové směsi a probíhá po dobu její dopravy na místo určení, pokládky a zhutnění ve vozovce. Naproti tomu dlouhodobé stárnutí začíná probíhat po dokončení pokládky a zhutnění asfaltové směsi a pokračuje po celou dobu životnosti konstrukční vrstvy (několik let).

#### 1.1.1.1 Krátkodobé stárnutí

Metoda RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test)

- 8 zkušebních nádob (á 35 g) s pojivem umístěných v horkovzdušné peci je zahříváno po dobu 85 minut
- zkušební teplota: 163 °C
- kromě stárnutí posuzována i změna hustoty pojiva a ztráta hmotnosti

Metoda RFT (Rotating Flask Test)

- pojivo umístěno v baňce, která se otáčí (rychlost otáčení je 20 ot. /min) ve vodní lázni o teplotě 165 °C po dobu 150 minut
- otáčením baňky je materiál vzorku neustále v pohybu a je tak zabráněno vytvoření povlaku na jeho povrchu
- vliv tepla a vzduchu se určí změnou hmotnosti nebo změnou charakteristik pojiva (např. penetrace, bod měknutí nebo dynamická viskozita před a po stárnutí)

Modifikovaná metoda RTFOT

- jedna z variant modifikace spočívá v prodloužení zkušební doby (5–8 hodin)
- další variantou je využití dusíku (NRTFOT – Nitrogen Rolling Thin Film Oven Test), což vede k vyšší přesnosti měření ztráty hmotnosti
- kromě dusíku je také možné využít ozonovou atmosféru (toto bývá někdy využíváno např. v experimentálních laboratořích)

### 1.1.1.2 Dlouhodobé stárnutí

#### Metoda PAV (Pressure Aging Vessel)

- vzorky na zkušebních miskách (10x50 g) umístěny v tlakové nádobě
- simulován stav pojiva po cca 5 až 10 letech
- zkušební teplota: 90 °C, 100 °C, 110 °C
- doba zkoušení: 20 h

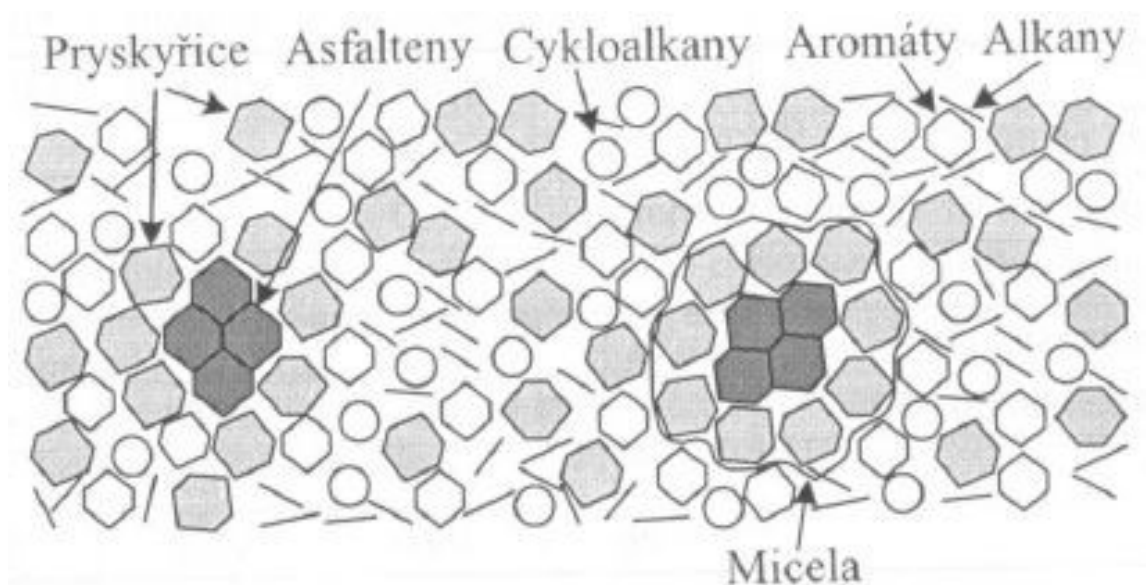
#### Metoda RCAT (Rotating Cylinder Ageing Test)

- princip je podobný jako u RTFOT
- zkušební zařízení sestává z válce, který je na obou koncích zaslepen, přičemž na jednom konci je ponechán malý otvor pro vkládání pojiva
- po vložení pojiva (500 g), je instalován nerezový váleček
- během otáčení hlavního válce menší nerezový váleček rozprostírá pojivo po stranách válce (cca 2 mm silná vrstva)
- stárnutí je simulováno kontinuálním prouděním kyslíku skrze zkušební aparaturu; zkouška probíhá při teplotách 70–110 °C
- během zkoušky je postupně odebíráno menší množství pojiva (20-25 g) a na těchto vzorcích jsou zkoumány postupné chemické změny

## 1.2 REJUVENÁTORY V SILNIČNÍM STAVITELSTVÍ

Na celém světě probíhá řada výzkumných projektů specializujících se na zjišťování vlastností rejuvenátorů a jejich vliv na asfaltové směsi. Z fyzikálního hlediska je rejuvenátor látka, která snižuje viskozitu zestárnutého pojiva (snížení bodu měknutí a zvýšení hodnoty penetrace) a zároveň také obnovuje původní visko-elastické vlastnosti pojiva.

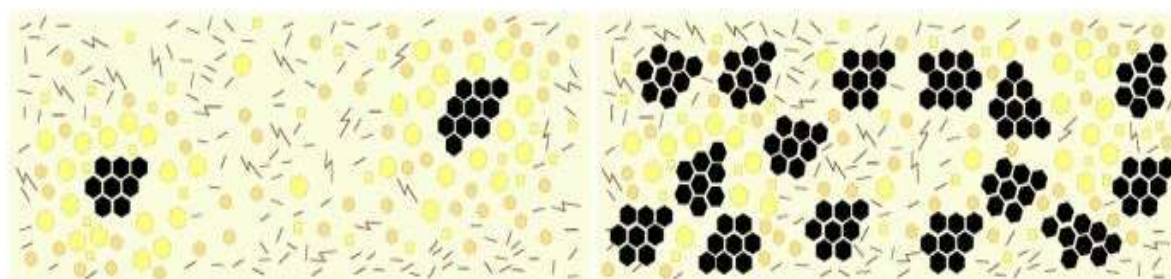
Jedním z negativních jevů, který se vyskytuje během životního cyklu vozovek z asfaltových směsí, je stárnutí asfaltového pojiva. To se mj. projevuje tzv. migračními procesy. Při nich dochází k nárůstu velikosti koloidních částic. Asfaltény (nerozpustné látky), které jsou promíchány s maltény (látky rozpustné v nízkomolekulárních parafinických rozpouštědlech), se shlukují do větších útvarů a tím dochází k vytvrzování (křehnutí) asfaltového pojiva, které tak ztrácí plasticitu a pružnost.



Obr. 1 - Struktura asfaltových pojiv

Rejuvenátory se spolu se změkčovadly řadí mezi tzv. oživovací přísady. Jejich primárním cílem je obnovit chemickou strukturu pojiva a přerušit proces shlukování asfalténů. To vede ve výsledku k obnově rovnováhy mezi asfaltény a maltény. Požadovaným výsledkem je, aby se pojivo obsažené v R-materiálu svými reologickými vlastnostmi co nejvíce přiblížilo původnímu pojivu v nezestárnuté směsi. Působení rejuvenátoru spočívá v obnově původního poměru asfalténů a malténů. Maltenické části pojiv jsou tvořeny především nafteny (cyklické alifatické uhlovodíky, např. cyklohexan), saturáty (nepolární alifatické uhlovodíky) a polyaromáty (polycyklické aromatické uhlovodíky, PAU) s menším počtem aromatických jader oproti asfalténům. Tato maltenická fáze se též někdy dělí na polární látky, 2 typy tzv. acidafinů a saturáty. Vzhledem k relativně vysoké reaktivitě malténů se během oxidačního stárnutí jejich část změně na asfaltény, což v důsledku vede ke změně poměru asfaltény : maltény. Nejvyšší konverze probíhá většinou u polárních látek, zatímco u acidafinů a saturátů je reaktivita výrazně menší. Díky obnově původní rovnováhy mezi maltény a asfaltény v asfaltovém pojivu vykazuje asfaltová směs vyšší odolnost proti tvorbě a propagaci únavových trhlin a proti porušení při nízkých teplotách.

Naproti tomu při použití změkčovadla (fluxační oleje) nedochází k rozptýlení shluků asfalténů v asfaltovém pojivu, ale pouze ke zředění malténové fáze a tím ke snížení viskozity pojiva. Tím, že proces shlukování asfalténů není přerušeno, nelze z dlouhodobého hlediska zabránit vzniku teplotně indukovaných a únavových trhlin. Navíc tyto látky vykazují vyšší míru volatility (snadněji při zvýšené teplotě těkají), což může zapříčinit migraci oživovacích přísad při vyšších provozních teplotách. To ve svém důsledku způsobí v podstatě eliminaci oživovacího efektu.[1]



Obr. 2 - Rozdíl mezi působením změkčovadla (vlevo) a rejuvenátoru (vpravo)

Složení jednotlivých rejuvenátorů se může lišit. Základní dělení vytváří 2 hlavní skupiny rejuvenátorů. Jednak to jsou látky vzniklé na bázi biomasy a dalších rostlinných produktů a dále přípravky vzniklé z fosilních zdrojů.

Do první skupiny lze zařadit rejuvenátory, které se získávají z obnovitelných přírodních látek. Sem patří přísady vzniklé z rostlinných olejů. Např. produkt Rejuvenátor 182 od firmy Paramo je rafinovaný rostlinný řepkový olej, především využívaný jako složka některých maziv. Další možností je produkce na bázi frakcí získaných z tálových olejů. Tyto oleje vznikají jako vedlejší produkt v papírenském průmyslu při výrobě celulózy depolymerizací ligninu, což je chemická látka nacházející se v borovém dřevu. Při tomto postupu je nejčastěji použit sulfátový neboli Kraft proces (dřevní hmota se vaří v roztoku NaOH a Na<sub>2</sub>S při teplotě 165-175 °C). Jedním z příkladů takového produktu je přísada Sylvaroad RP 1000. V neposlední řadě se k výrobě rejuvenátorů používají také těžší frakce bioolejů při rychlé pyrolýze dřeva a rovněž probíhá výzkum zkoumající využití zbytkových kuchyňských olejů z gastronomických provozů. Studie prokázaly, že použitím těchto olejů coby oživující přísady lze dosáhnout původní hodnoty bodu měknutí. Rovněž dochází k obnově původních hodnot duktility. Je ovšem nutno dále zkoumat ideální množství přidávaného oleje, protože při vyšším obsahu dochází



k ovlivnění dalších vlastností asfaltové směsi, což nemusí být vždy žádoucí. Ze studií vyplývá, že optimální množství by se mělo pohybovat mezi 1-4 %. Dále bylo prokázáno zlepšení odolnosti vůči účinkům vody (zkoušky byly prováděny na Marshallových tělesech s podílem R-materiálu až 45 %). [26]

Při použití ligninu bylo zjištěno, že tato přísada vede k poklesu penetračního indexu a duktility, asfaltové pojivo se stává tvrdším. Zároveň roste hodnota bodu měknutí a modulu tuhosti. Z hlediska odolnosti vůči stárnutí se přidání ligninu příznivěji projevuje až při dlouhodobém stárnutí. Kromě ligninu lze využít i přírodní pryskyřice (především z jehličnatých stromů). Příkladem takové přísady je produkt Prephalt FBK.

Rejuvenátory řadící se do druhé skupiny vznikly při zpracování ropy a jedná se tak o ropné deriváty (např. výrobky STORFLUX a STORBIT od německé firmy Storimpex). U těchto produktů může být prvotní ropný derivát pro lepší vlastnosti kombinován s dalšími přísadami (např. vosky). Z fosilních zdrojů lze využít jak asfalty vyšších gradací, tak i další frakce vzniklé při rafinaci surové ropy. V literatuře lze nalézt např. použití středně těžké frakce (tato frakce odpovídá mazacím olejům). [45] Dále se využívají produkty vakuové destilace ropy (někdy nazývané druhá rafinace ropy), kdy je ze spodní části destilační kolony odčerpáván vakuový zbytek. Příkladem takového produktu je látka Storflux, která patří do skupiny speciálních fluxačních olejů a slouží pouze jako změkčovadlo. Další podobnou látkou je Storbit, který oproti přísadě Storflux funguje jako změkčovadlo i tvrdidlo, a navíc umožňuje i snížení teploty zpracované asfaltové směsi. V poslední době probíhá také množství výzkumných projektů na využití vyjetého motorového oleje. Stejně jako u odpadního kuchyňského oleje i zde jsou pozorovány pozitivní trendy ve zlepšování vlastností asfaltové směsi, byť v některých případech se jeví jako lepší použití kuchyňského oleje. Znatelně horší výsledky vykazoval vyjetý motorový olej především při posuzování zlepšení duktility. Naopak při zkoušce viskozity dosáhly směsi s motorovým i kuchyňským olejem podobných hodnot. Obecně lze říci, že použitím vyjetého motorového oleje dochází z větší části k obnově původních vlastností asfaltové směsi.

Dalším důležitým aspektem v procesu využití rejuvenátorů je jejich správné dávkování. To záleží na několika faktorech:

- Konstrukční možnosti vybrané obalovny
- Množství R-materiálu, které je přidáno do asfaltové směsi  
Množství pojiva se většinou odvíjí od požadavků výrobce, který je zároveň limitován možnostmi obalovny a normami a předpisy. Maximální přípustné množství R-materiálu v asfaltové směsi se liší pro jednotlivé druhy směsí a v České republice je upraveno normami řady ČSN EN 13 108, resp. normou ČSN 73 6211 a ČSN 73 6120 v případě směsí VMT
- Obsah a vlastnosti pojiva obsaženého v R-materiálu (např. míra zestárnutí apod.)  
Tento aspekt musí být zohledněn v případě, že R-materiál použitý v asfaltové směsi má vyšší obsah pojiva než výsledná požadovaná asfaltová směs. V takovém případě může dojít k předávkování pojiva v dané směsi. Pro zjištění vlastností pojiva obsaženého v R-materiálu lze využít empirické (např. extrakce) i funkční zkoušky (např. stanovení přilnavosti ke kamenivu). Konkrétní požadavky na R-materiál jsou specifikovány v normě ČSN 73 6141.
- Cílový obsah pojiva v nově vyráběné směsi
- Požadované vlastnosti nově vyráběné směsi  
Při vyšším podílu R-materiálu může směs vykazovat tendence k vyšší tuhosti. To může mít pozitivní vliv na odolnost vůči těžké nákladní dopravě (vyjíždění tzv. „kolejí“). Na druhou stranu je zde riziko větší náchylnosti ke vzniku a rozvoji trhlin.
- Druh rejuvenátoru a jeho účinnost
- Způsob hodnocení účinnosti rejuvenátoru



Nedílnou součástí výzkumu a vývoje nových rejuvenátorů je jejich laboratorní zkoušení a následné stanovování vlastností.

V první fázi je z asfaltové směsi získáno pojivo, na němž jsou poté provedeny zkoušky základních parametrů. K tomuto účelu se využívá extrakce. Následně je připraveno zestárnuté pojivo tak, aby jeho vlastnosti co nejvíce odpovídaly pojivu extrahovanému ze směsi. V této fázi je nutno optimalizovat podmínky laboratorního stárnutí (to lze provést např. změnou doby trvání zkoušky stárnutí). Rejuvenátory jsou následně přidávány do laboratorně zestárnutého pojiva tak, aby způsobily jeho omlazení do předem určeného stavu – např. na určitou gradaci dle evropského systému, nebo dle systému performance grade tříd (PG-tříd), jak je v minulosti vymezil americký výzkumný program SHRP (Strategic Highway Research Program). Pro účely vyhodnocení rejuvenačního efektu je zvláště výhodné optimalizovat obsah přísady tak, aby došlo ke změkčení pojiva zhruba na původní stav před stárnutím. Následně lze přímo porovnávat kvalitativní parametry původního a obnoveného pojiva, a tedy i pozitivní či negativní vliv použitého rejuvenátoru.

Stanovení účinnosti rejuvenátoru, tj. míry obnovení původních vlastností asfaltového pojiva lze provést dle různých kritérií. Používají se například testy, které posuzují koloidní stabilitu pojiva. Stárnutím pojiva dochází ke snížení jeho koloidní stability a cílem rejuvenátoru je tedy obnovení, nebo minimálně zlepšení koloidní stability zestárnutého pojiva. Jedním z testů pro posouzení koloidní stability je například tzv. kapková zkouška (oliensis test). Výsledky této zkoušky při použití vhodných rozpouštědel korespondují se stupněm peptizace asfaltů lehčími složkami obsaženými v pojivu, čímž je značně ovlivněna koloidní stabilita. Nicméně dle stávajících zkušeností nejsou výsledky směrodatné při použití modifikovaných pojiv nebo u pojiv s příměsí syntetických vosků.

Dalším metodou, podle které lze principiálně posuzovat účinnost rejuvenátorů je standardní stanovení penetračního indexu, což je běžně rozšířená metoda pro zkoušení asfaltových pojiv. Změna teplotní citlivosti, která v pojivu probíhá jako důsledek stárnutí, je totiž pozorovatelná jako zvýšení penetračního indexu.

Další možností je použití tzv. analýzy SARA (Saturate, Aromatic, Resin and Asphaltene). Při této metodě jsou z asfaltového pojiva separovány asfaltény a následně je výsledný extrakt dále rozdělen na saturáty, aromáty a pryskyřice. Pro rozdělení na jednotlivé složky je využita jejich rozdílná polarizovatelnost a polarita. Např. aromáty jsou jen nepatrně polarizovatelné. Z poměru jednotlivých složek lze určit peptizační index, dle kterého lze následně porovnat koloidní stabilitu hodnocených vzorků. Kromě této metody se také používá technika FTIR (Fourier-transform infrared spectroscopy), která je založená na absorpci infračerveného světla při průchodu vzorkem, při které proběhnou změny energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. [19]

V neposlední řadě je vhodné testovat rovněž difuzivitu rejuvenátoru. Při reálné aplikaci je totiž rozhodující jeho schopnost difúze do pojiva asfaltového recyklátu. Při nízké difuzivitě nemusí za dobu, po kterou je připravována recyklovaná asfaltová směs s přísadkou nového pojiva a/nebo rejuvenátoru, dojít k požadované homogenizaci směsi. Rejuvenátor tak zůstává rozptýlen na povrchu zrn R-materiálu, vytváří separátní fázi a dochází k oddělování od asfaltové směsi.

Dále je třeba neustále pamatovat rovněž na to, že účinnost rejuvenátorů při reálné výrobě asfaltových směsí v obalovnách je vždy nižší oproti stavu ideálního promísání, kterého je dosaženo v laboratorních podmínkách. [17]





Rejuvenátory se v optimálním případě projeví v několika ohledech. Jednak dojde k obnovení chemické struktury pojiva a dále také ke zlepšení mechanicko-fyzikálních vlastností včetně odolnosti vůči termooxidačním změnám. Existuje několik základních podmínek, které musí použité rejuvenátory splňovat: [1]

- oživení zestárnutého asfaltového pojiva, za účelem snížení jeho tuhosti a u některých vlastností opětovné dosažení hodnot odpovídajících silničnímu asfaltu dané kategorie
- změna vlastností asfaltového pojiva v R-materiálu tak, aby nedošlo ke snížení trvanlivosti asfaltové směsi v dlouhodobém časovém výhledu
- zajištění dostatečného množství pojiva v asfaltové směsi, aby bylo zajištěno řádné obalení zrn kameniva ve směsi a zároveň, aby byly splněny požadavky kladené na asfaltové směsi
- absence dopadů na životní prostředí v průběhu výroby, aplikace a během celé doby životnosti asfaltové směsi s aplikovaným rejuvenátorem

V roce 2018 byl publikován článek o vlivu rejuvenátorů na vlastnosti asfaltových směsí recyklovaných za horka. Autoři se zaměřili na zkoumání reologických vlastností asfaltových pojiv recyklovaných za horka po celou dobu životnosti. Byly simulovány podmínky výroby a pokládky směsi, stav na konci životnosti původní vrstvy, recyklace a konec životnosti recyklované vrstvy. Byl zkoumán vliv stárnutí na reologické vlastnosti u původního pojiva a dále u pojiva po přidání rejuvenátoru. Z výsledků vyplynulo, že při použití rejuvenátoru došlo k poklesu komplexního modulu pružnosti ve smyku a pojivo se tak stávalo měkčím. Zároveň byl pozorován nárůst fázového úhlu materiálu. Dále bylo prokázáno, že směsi s rejuvenovaným pojivem jsou více odolné vůči účinkům stárnutí. Celkově tedy ze studie vyplynulo, že pokud se při výrobě směsi použije vysoký podíl recyklovaných asfaltových vrstev a do pojiva je aplikován rejuvenátor, snižuje se vliv stárnutí a směs se stává méně tuhou. [5]

Při posuzování účinnosti rejuvenátoru je rovněž nutné sledovat jeho vliv na parametry asfaltové směsi při různých teplotách. Obecně lze vymezit 3 oblasti (spektra) zkušebních teplot, přičemž pro každou oblast jsou využívány jiné druhy zkoušek. První oblast představují teploty okolo 60 °C, při které začíná pojivo měknout. Pro tuto oblast je vhodná např. tzv. zkouška „kroužek a kulička“ (KK). Další sledovanou oblastí je rozmezí teplot mezi 20 a 30 °C. To lze považovat za střední teplotu, které bude směs v průběhu životnosti vystavena. Při těchto teplotách lze využít metodu penetrace jehlou. Poslední oblastí je oblast nízkých teplot (mezi -10 až -25 °C). Chování při těchto teplotách je velice důležité z hlediska vzniku a šíření trhlin, které mohou významně narušit konstrukci vozovky. Nízkoteplotní vlastnosti jsou u směsí s vysokým podílem R-materiálu velmi důležité, protože s vyšším podílem recyklátu narůstá tuhost a směs se tak stává křehčí. To ještě umocňuje riziko vzniku trhlin.

### 1.3 VYUŽITÍ REJUVENÁTORŮ VE SVĚTĚ

První pokusy o vyvinutí rejuvenátoru se datují do poloviny 50. let 20. století. Tento výzkum probíhal intenzivně především v USA. V roce 1960 uvedla společnost Golden Bear Oil Company na trh jeden z prvních rejuvenátorů. Jednalo se o produkt pojmenovaný Reclamite. Vývoj rejuvenátorů byl vyvolán výsledky zkoumání chování asfaltových směsí. Ty prokázaly, že v důsledku stárnutí se asfaltové pojivo stává křehčím a současně v něm probíhají další fyzikální změny. Účelem nově vyvíjené látky bylo znovu obnovit původní vlastnosti asfaltového pojiva. S tím souvisí požadavek na zastavení smršťování (a s tím související vznik vlasových trhlin), zpomalení vzniku výtlučků a redukce vodopropustnosti. Tento koncept se s dílčími úpravami udržel až do dnešních dnů. [36]

V řadě zemí se již delší dobu používají rejuvenátory ve všech konstrukčních vrstvách vozovky. Zároveň probíhá intenzivní výzkum ve snaze co možná nejvíce zvýšit podíl R-materiálu v asfaltové směsi.



V některých zemích (např. Německo, Nizozemsko, Japonsko a USA aj.) pokračil vývoj asfaltových směsí s vysokým podílem R-materiálem velmi kupředu a tyto směsi jsou v praxi běžně používány. Existují již pokusy se směsí se 100 % R-materiálu. Tento postup je někdy označován jako „úplná recyklace“ (z angl. „total recycling“). Byl vyzkoušen např. v americkém státě New Jersey. Zde bylo na několika úsecích vyzkoušeno celkem 6 typů rejuvenátorů spolu se směsí, která byla ze 100 % z R-materiálu. Na základě publikovaných dat lze usuzovat, že lepších výsledků bylo dosaženo při použití rejuvenátorů na organické bázi. Dále například New York City Department of Transportation (NYCDOT) umožnil ve svých předpisech používat pro městské komunikace ve státě New York směsi obsahující až 100 % R-materiálu již v roce 2015. V Evropě je patrně nejdále v tomto směru německá spolková země Hamburk, kde byly realizovány zkušební úseky s obsahem R-materiálu až 90 %. Takový postup, při němž je používána směs skládající se až ze 100 % z R-materiálu ovšem vyžaduje velmi důkladnou kontrolu kvality použitého R-materiálu. V ČR zatím pro takto vysoký podíl není opora v normách a předpisech. [3]

Ruku v ruce s využitím R-materiálu jde i používání rejuvenátorů. Ty mohou být použity také jako prostředek k prodloužení životnosti stávající obrusné vrstvy. V anglické terminologii se pro tento postup používá termín „fog seal“, v ČR označovaného jako regenerační postřiky. Při něm je aplikována tenká vrstva asfaltové emulze na povrch zestárnuté asfaltové směsi. Rejuvenátory zde slouží k obnově lehké frakce v pojivu (maltény) do hloubky 5–10 mm. [4]

Vzhledem k velikosti tamní silniční sítě a ekonomickým možnostem společností a výzkumných institucí probíhá rozsáhlý výzkum ve Spojených státech amerických. V roce 2020 byly publikovány výsledky studie, která se zabývala využitím rejuvenátoru ANOVA od americké společnosti Cargill. Měření probíhala na 2 zkušebních úsecích ve státech Minnesota a Virginie. Úseky byly zkoumány po dobu 2 let ve spolupráci s ministerstvem dopravy (Department of Transport) jednotlivých států a National Center for Asphalt Technology (NCAT) z Auburn University ve státě Alabama. Podíl R-materiálu v asfaltové směsi činil 45 %. Dle publikovaných výsledků nevykazoval zkušební úsek na konci sledovaného období žádné trhliny a deformace. Navíc bylo naměřeno mírné zlepšení indexu IRI (International Roughness Index). Na daných úsecích nicméně stále probíhá sledování, které zhodnotí fungování použité směsi z dlouhodobého hlediska, což může vést k přehodnocení příznivého vlivu rejuvenátoru na tvorbu trhlin. Další zkušební úsek byl vybudován r. 2013 v americkém státě Indiana. Zde byla použita 100 % recyklovaná směs. Při následných zkouškách byly naměřeny velmi podobné parametry asfaltového pojiva a volumetrické vlastnosti kontrolní směsi a směsi s R-materiálem. [23]

Další zemí, kde je využití R-materiálu v asfaltových směsích na velmi vysoké úrovni, je Německo. V rámci výzkumného projektu společnosti Basalt-Actien-Gesellschaft byl poblíž Hamburku vybudován zkušební úsek, který byl následně sledován po dobu 3 let. Bylo zkoumáno více typů rejuvenátorů a výsledky ve většině případů prokázaly jejich značný přínos ke zlepšení vlastností asfaltové směsi. Další výzkumné projekty probíhají na univerzitě v Braunschweigu. Jsou zde zkoumány jednak vlastnosti rejuvenátorů a také jejich optimální dávkování. [24] [47]

Významnou institucí je také americké výzkumné centrum NCAT (National Center for Asphalt Technology). V roce 2015 zde byla provedena studie zkoumající vlastnosti konstrukce vozovky s aplikovaným rejuvenátorem Sylvaroad RP 1000 při použití recyklovaných asfaltových vrstev (RAP – reclaimed asphalt pavement). Předmětná směs byla testována na krátkodobé a dlouhodobé stárnutí a rovněž byl za pomoci dynamického smykového reometru (DSR) určen komplexní modul pružnosti ve smyku  $G^*$  a fázový úhel  $\phi$ . Všechny zkoušky byly provedeny dle specifikací organizace AASHTO (American Association of State Highway and Transport Officials). Dávkování rejuvenátoru činilo 5 % resp. 10 %. Výsledky ukázaly poměrně značné zlepšení v oblasti nízkých teplot. Relativně lepších výsledků bylo dosaženo při zkoušce relaxace, kdy při užití 10 % podílu rejuvenátoru došlo ke snížení



nejnižší kritické teploty o 21 °C. Naopak nebyl pozorován významný vliv rejuvenátoru na objemové vlastnosti směsi. Dále byla pozorována významně nižší pevnost v tahu u vzorků bez rejuvenátoru a dále nižší tuhost u vzorků s rejuvenátorem. Z toho lze usuzovat na lepší únavové vlastnosti při použití rejuvenátoru. [3]

Jedním z příkladů spolupráce firem zabývajících se vývojem a výrobou rejuvenátorů a orgánů státní správy, je několik projektů v německém Münsteru realizovaných koncem roku 2017. Na dvou úsecích městských komunikací o celkové výměře 2500 m<sup>2</sup> zde byla položena asfaltová obrusná vrstva ze směsi AC 8 s polymerem modifikovaným asfaltovým pojivem 25/55-55 a ložná vrstva ze směsi AC 16 B C s pojivem 30/45. Rejuvenační přísadou byl v tomto případě rejuvenátor s obchodním názvem „Additive 2.0“. Rejuvenátor byl použit v koncentraci 1,5 % z množství pojiva R-materiálu pro obrusnou vrstvu a 1,75 % pro ložnou vrstvu. Množství R-materiálu ve směsi se pohybovalo mezi 44,4 a 55,6 %. Pro pozdější zkoušky bylo odebráno celkem 20 vzorků od každé asfaltové směsi. Výsledky zkoušek prokázaly mj. snížení bodu měknutí (měřeného metodou „kroužek-kulička“) až o 6 °C. Rovněž byl naměřen pokles tuhosti a nárůst viskozity, což dokazuje účinnost rejuvenátoru. Rovněž byl prokázán předpoklad pouze mírného výkyvu hodnot modulu tuhosti. Dále bylo zaznamenáno zlepšení tahové pevnosti a teploty, při níž dochází ke vzniku trhliny. Obecně tedy lze pozorovat zlepšení nízkoteplotních vlastností směsi. Mimoto se v Münsteru tamní oddělení radnice pro výstavbu dopravní infrastruktury rozhodlo začít uplatňovat tzv. Sustainable Asset Management System (SAM). Primárními cíli tohoto systému je stanovení požadavků kladených na vozovky pozemních komunikací a následné stanovení systému údržby a oprav s přihlédnutím k nákladům, životnímu prostředí a celkovým nákladům životního cyklu. Dalším cílem radnice v Münsteru je snaha o vytvoření systému pro cyklické nakládání s materiálem z vozovek (tzv. „flow management“), který by dále omezil energetickou a environmentální náročnost oprav komunikací. [35]

Jako zajímavost lze zmínit výzkumný projekt z Číny, který zkoumal možnosti použití odpadního kuchyňského a motorového oleje coby oživovací přísady. Bylo zkoumáno několik směsí s různým podílem R-materiálu. Při 45 % RA se jako optimální dávkování oživovací přísady ukázalo rozmezí 1-4 % z množství pojiva v R-materiálu. Dle výsledků zveřejněných v roce 2020 nemělo přidání odpadního oleje negativní vliv na chemické vlastnosti a přispělo k obnovení původních vlastností směsi. [26]

Výzkum použití vyjetého motorového oleje coby oživovací přísady probíhá také již dlouhou dobu v USA. Zde byla vyvinuta řada přísad založených na principu REOB (recycled engine oil bottom). Bohužel se v praxi postupně ukázalo, že zejména z pohledu dlouhodobého stárnutí není toto řešení přínosem. Studie sice prokázaly krátkodobé změkčení pojiva, nicméně z dlouhodobého hlediska dochází k opětovnému ztvrdnutí asfaltového pojiva, které vykazuje ještě horší výsledky než zestárnuté pojivo bez jakékoliv přísady. To mělo následně velmi negativní dopad na odolnost vůči šíření trhlin. Studie ukazují, že směsi s tímto druhem rejuvenátoru jsou díky tomu velmi náchylné ke vzniku a šíření teplotně indukovaných a únavových trhlin. [42] Dalším významným negativem tohoto řešení je zvýšený podíl polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU), což jsou vysoce nebezpečné karcinogenní látky.

Z publikovaných studií většinou vyplynulo, že přidání rejuvenátoru do asfaltové směsi nemá negativní vliv na její vlastnosti. V určitých případech došlo k významnému zlepšení parametrů, ale byly rovněž zaznamenány případy, kdy se přidání této přísady na vlastnostech směsi nijak výrazně neprojevovalo, nebo vedlo dokonce k mírnému zhoršení.

## 1.4 VYUŽITÍ REJUVENÁTORŮ V ČESKÉ REPUBLICE

V České republice se odborníci fenoménem recyklace asfaltových vozovek začali intenzivně zabývat teprve v 90. letech. Asfaltový R-materiál se nejprve využíval spíše pro druhořadé účely (polní cesty, dosypání krajnic apod.). [33] Obecně lze říci, že v České republice není zatím použití asfaltových směsí s vyšším podílem R-materiálu příliš rozšířené. Většinou se jedná pouze o krátké zkušební úseky na méně zatížených komunikacích. To následně vede k nízkému využití rejuvenátorů. Tato situace je způsobena více faktory, mezi něž patří absence legislativy, která by motivovala výrobce a investory k jejich masivnějšímu používání a v neposlední řadě určitá nedůvěra mezi odpovědnými činiteli k novým technologiím. Do jisté míry patří k omezujícím faktorům i skutečnost, že maximální množství R-materiálu v asfaltové směsi je omezeno. Dle norem činí tato limitní hodnota 15-25 % pro obrusné vrstvy, 30-40 % pro ložní a až 60 % pro podkladní vrstvu (v závislosti a kvalitativní třídě použité směsi).

Jedním z úseků pozemních komunikací v ČR, na kterém byla vyzkoušena asfaltová směs s vyšším podílem R-materiálu a rejuvenátorem, byl cca 1,5 km dlouhý úsek silnice II/212 mezi obcemi Pochlovice a Kaceřov (okr. Sokolov), která je ve správě Karlovarského kraje. Na tomto úseku byla provedena výměna obrusné a ložní vrstvy. V asfaltové směsi pro obrusnou vrstvu bylo použito 50 % R-materiálu a pro ložní vrstvu 60 % R-materiálu. Celkem bylo vyzkoušeno 6 variant asfaltové směsi – čtyři se syntetickými vosky, jedna se zpěněným asfaltem a jedna bez přísady. Z výsledků sice nevyplývá, že by nějaká přísada svými přínosy významně dominovala nad ostatními, nicméně celkově se použití vyššího obsahu R-materiálu a rejuvenátoru neprojevovalo negativně na vlastnostech asfaltové směsi. Tento fakt je důležitý jak pro další výzkum, tak i celkově jako motivační aspekt pro další rozšíření používání R-materiálu a rejuvenátorů. [15]

Další úsek, kde byly zkušebně položeny konstrukční vrstvy SMA s obsahem R-materiálu, se nachází na silnici II/236 mezi obcemi Kačice a Smečno (okr. Kladno). Na tomto úseku bylo vyzkoušeno více variant směsi typu SMA, které se lišily maximální velikostí zrna kameniva a množstvím použitého R-materiálu. Další pokusný úsek se nacházel na silnici III/23631 mezi obcemi Libušín a Kladno (rovněž okr. Kladno). Zde bylo na 10 úsecích vyzkoušeno více variant směsí pro obrusné a ložní vrstvy. Byl zkoumán různý podíl R-materiálu (0–60 %) a zároveň různé dávkování rejuvenátoru. [32]

V roce 2013 byla na 2 úsecích silnic II/233 a II/235 (Prašný Újezd – křižovatka se silnicí III/23317 resp. Terešovská Huť – Terešov; oba okr. Rokycany) zároveň s vyšším podílem R-materiálu ve směsi vyzkoušena i tzv. nízkoteplotní asfaltová směs. Byla vyzkoušena jak varianta s rejuvenátorem (v tomto případě Storbit), tak i varianta bez rejuvenátoru. Podíl R-materiálu ve směsi činil 20-75 %. Kontrolní vizuální zkoušky provedené po 10 měsících od pokládky ukázaly, že stav obrusné vrstvy je velmi dobrý bez poruch a lokálních segregací. Směs byla uzavřená a s dobrou makrotexturou povrchu. [27]

Na úseku silnice II/204 Mrtník – Kaznějov (okr. Plzeň – sever) bylo vyzkoušeno přidávání R-materiálu do obrusné i do ložné vrstvy. Dávkování činilo 20-40 % u obrusné vrstvy a 30-50 % u ložní vrstvy. Je to tedy většinou více, než připouští doposud platná norma ČSN 73 6121 pro asfaltové betony. Cílem tohoto projektu bylo mj. ukázat možnost zvýšení podílu R-materiálu v asfaltové směsi. Jako rejuvenátor byla použita přísada Storflux, resp. Storbit, které umožnily nejen změkčení ztvrdlého pojiva v R-materiálu, ale i snížení teploty zpracování asfaltové směsi. Na jiném úseku této silnice bylo dále v roce 2015 položeno celkem 8 zkušebních směsí do ložních a obrusných vrstev. Jako pojivo byl použit běžný silniční asfalt 50/70 a dále polymerem modifikovaný asfalt PMB 45/80-55. Podíl R-materiálu činil 0-60 % pro ložní vrstvy, resp. 0-50 % pro obrusné vrstvy. Jako oživovací přísada byla použita látka Storelastic. Jedná o pryžový granulát o max. velikosti granulí 1 mm, který kromě granulátu obsahuje i rejuvenátor Storflux. Kontrolní zkoušky provedené 6 měsíců po pokládce mj. vykazovaly zvýšení hodnoty penetrace, a to až o 94 %. To je v rozporu s obecným trendem, kdy pojivo během své životnosti vlivem



stárnutí stává tužší. Zde se naopak asfaltové pojivo stalo měkčím. Došlo rovněž ke snížení bodu měknutí v rozmezí 0,1 – 5,2 °C. [27]

Asfaltová směs s R-materiálem byla také využita při opravě silnice I/61 na v okrese Kladno, kde bylo investorem ŘSD. Předmětný úsek se nacházel mezi okružní křižovatkou na okraji obce Buštěhrad (napojuje na silnici I/61 ulice Kladenská a Tyršova) a křižovatkou, kde se odpojuje silnice na Kročehlavy a Netřeby. Na tomto úseku byla použita jednak směs ACO 11S s 30 % R-materiálu a rejuvenátorem REJU 182 a dále směs ACL 22S s 40 % a 50 % R-materiálu a rejuvenátorem REJU 182. Použití rejuvenátoru bylo patrné především v oblasti deformačních charakteristik. Bylo dosaženo vyšších hodnot modulu tuhosti a velmi dobré odolnosti proti trvalým deformacím. I v oblasti odolnosti vůči účinkům vody byly zaznamenány velmi dobré výsledky. Nicméně vzhledem k tomu, že byly zkoumány pouze 2 směsi s jedním typem vstupních složek, nelze tyto konkrétní výsledky zobecňovat. [33]

Další pokusný úsek se nacházel na silnici II/272 mezi obcemi Bříství a Kounice (okr. Nymburk). Byla zhotovena jednak směs ACO 11+ s 20 % R-materiálu a dále směs ACL 16+ s 40 % R-materiálu. Jako oživující přísada byly použity 2 druhy rejuvenátorů a sice na bázi přírodních olejů z extraktů z borového dřeva (SR) a z minerálních olejů (RF). V rámci následného monitoringu nebyly zjištěny zásadní vady, které by významně ohrožovaly bezpečnost provozu a jízdní komfort. Na několika místech se sice vyskytovaly lokální vlhké mapy, ale to je pravděpodobně způsobeno horší mírou zhutnění. [32] Použitá směs v laboratorních zkouškách dále vykazovala vysoké hodnoty tuhosti, a tedy dobrou odolnost vůči trvalým deformacím, což je u ložních vrstev důležitý parametr. Při zkouškách lomové houževnatosti vykazoval lepší výsledky rejuvenátor RF, naopak při stanovení pevnosti v tahu za ohybu byly lepší výsledky zaznamenány u varianty s rejuvenátorem SR. Posouzením obou rejuvenátorů bylo zjištěno, že jejich účinek je patrný, nicméně nelze pozorovat jednoznačný trend. [34]

V neposlední řadě lze zmínit zkušební úsek na silnici II/440 mezi obcemi Potštát a Olšovec (okr. Přerov). Zde byly použity směsi ACO a ACL (v obou bylo shodně 50 % R-materiálu) a asfaltové pojivo 70/100 s oživovací přísadou Prephalt FBK (na bázi přírodních pryskyřic). Stejně jako u předchozích úseků, byl u směsi s rejuvenátorem pozorován pokles penetrace a nárůst bodu měknutí. I když v tomto případě nebylo dosaženo požadovaného stupně rejuvenace, lze konstatovat, že účinky rejuvenátoru na zestárlé asfaltové pojivo jsou patrné i po delší době a mají pozitivní vliv. [31]

V České republice se rejuvenátory i přímo vyrábějí. Jedním ze zástupců je rejuvenátor PARAMO Reju 182 z produkce pardubické společnosti PARAMO.

## 2 POUŽITÉ MATERIÁLY

### 2.1 KAMENIVO

Veškeré kamenivo použité v předmětné směsi ACL 16+ pocházelo z kamenolomu Zbraslav (Praha), přičemž současně byla část podílu frakce 0/4 tvořena kamenivem z lokality Lašovice (část obce Kovářov, okr. Písek). Vápencový přídavný filer pocházel z lokality Velké Hydčice (okr. Klatovy).

### 2.2 R-MATERIÁL

Norma ČSN 73 6141 definuje R-materiál jako produkt předrcení a přetřídění asfaltové směsi z existujících vozovek pozemních komunikací, dopravních a jiných ploch, nebo jako produkt neshodné či nadbytečné výroby. Při splnění výrobních specifikací jsou směsi s příměsí R-materiálu kvalitativně srovnatelné s asfaltovými směsmi bez R-materiálu.

Pro použití ve vozovkách musí asfaltový R-materiál splnit řadu kritérií. Při použití nepředeřátého recyklátu platí požadavek na hrubozrnnost R-materiálu. Pro obrusné vrstvy platí limit 0/11 a pro ložní a podkladní vrstvy 0/32. Použití R-materiálu je rovněž závislé na druhu vrstvy, do které je přidáván. Např. R-materiál z obrusné vrstvy lze využít do jakékoliv vrstvy vozovkového souvrství i do litého asfaltu, ale R-materiál z litého asfaltu lze znovu využít pouze pro litý asfalt. Při dávkování více než 15 % R-materiálu do asfaltové směsi musí být zestárlé asfaltové pojivo ošetřeno při výrobě směsi tak, aby jeho vlastnosti (bod měknutí, penetrace) odpovídaly pojivu uvedenému v názvu asfaltové směsi. Mezi způsoby ošetření zestárlého asfaltového pojiva patří použití rejuvenační přísady, přidání měkčího asfaltu (např. 70/100), nebo aplikace polymerem modifikovaného asfaltu typu RC. [37]

V současné době lze použít asfaltový R-materiál u vrstev z asfaltového betonu v rozmezí 15 % (u některých druhů obrusných vrstev) až 60 % (u některých druhů podkladních vrstev). Konkrétní hodnoty pro jednotlivé směsi jsou uvedeny v ČSN 73 6121. [37] Při použití R-materiálu je nutno spolu s protokolem o zkoušce typu předložit technologický předpis na získávání, skladování, úpravu a zkoušení R-materiálu v souladu s normou ČSN 73 6141. Zároveň musí být splněny požadavky stanovené v TKP 7. [38]

Veškerý R-materiál použitý ve zkušebních asfaltových směsích pocházel z obalovny Kladno společnosti Pozemní komunikace Bohemia a.s. Použit byl R-materiál frakce 0/8 mm.

### 2.3 ASFALTOVÁ SMĚS ACL 16+

Tato směs byla navržena pro použití v ložné vrstvě. Používá se především při vyšším dopravním zatížení. Dále se vyznačuje plynulou křivkou zrnitosti a možností použít libovolné asfaltové pojivo.

Směs byla připravena v několika variantách, které se lišily použitým typem rejuvenátoru. Jedna varianta směsi byla vyrobena bez přidání rejuvenátoru, pouze s pojivem 70/100, a představovala tak referenční směs pro porovnání naměřených hodnot. Druhou referenční směsí byla rovněž varianta bez rejuvenátoru, kde bylo ale použito asfaltové pojivo 50/70. Dále byla také zkoumána další směs bez rejuvenátoru, ve které bylo použito pojivo s modifikovaným pryžovým granulátem/prachem. Jedná se o tzv. CRMB – Crumb Rubber Modified Bitumen – které se v ČR vyrábí a používá v souladu s normou ČSN 65 7222-2. Jako zdroj pryže se používají namleté staré pneumatiky. Podíl přísady CRMB v asfaltovém pojivu činil 15 %. Množství pojiva ve směsi bylo stejné jako v ostatních případech. Tato směs rovněž sloužila pro porovnání získaných výsledků směsí s rejuvenátory. Pro porovnání byla dále vyrobena také směs s asfaltovým pojivem modifikovaným 5 % odpadního LDPE (polyetylen s nízkou hustotou). I u této směsi bylo použito pojivo 50/70 a nebyl přidán rejuvenátor. LDPE byl do silničního



asfaltu vmíchán při teplotě 170 °C, a to s dobou míchání 40-50 minut a rychlostí míchání 350-400 ot./min.

Použitým asfaltovým pojivem u všech variant byl, kromě výše zmíněné varianty s pojivem 70/100, silniční asfalt 50/70 s bodem měknutí minimálně 65 °C (PMB 50/70-65 dle ČSN EN 14023 resp. ČSN 65 7222-1).

## 2.4 PARAMO REJUVENÁTOR 182

Tento rejuvenátor se vyrábí v rafinerii PARAMO v Pardubicích. Jedná se o rostlinný řepkový olej, tj. nažloutlou čirou viskózní kapalinu, dobře mísitelnou v minerálních olejích a v asfaltovém pojivu. Vzhledem ke své přírodní povaze nemá negativní vliv na životní prostředí.

Dávkování rejuvenátoru činilo 6 % z množství pojiva v R-materiálu.

## 2.5 REJUVENÁTOR SYLVAROAD RP 1000

Tento rejuvenátor je vyráběn firmou Kraton (dříve Arizona Chemical) sídlící v Houstonu v USA (stát Texas). Je získáván ze surového tálového oleje (někdy nazýván tekutá kalafuna) a surového terpentýnového oleje. Obě tyto složky jsou získávány během zpracování borovic (rozvláknování během výroby buničiny) v papírenském a dřevozpracujícím průmyslu. V porovnání s ostatními rejuvenátory pro asfaltová pojiva je dražší, ale zvýšená cena je částečně kompenzována menším množstvím rejuvenátoru. Další výhodou je funkčnost na molekulární úrovni, což umožňuje spojení staré a nové asfaltové vrstvy. To představuje značný rozdíl oproti jiným látkám, které pouze snižují viskozitu. Dle údajů výrobce může v budoucnu dosáhnout podíl recyklovaných asfaltových vrstev při realizaci silničních staveb 50 % v USA, resp. v některých oblastech Evropy 70–100 %.[2]

Tento rejuvenátor byl využit pro 2 varianty směsi s různým množstvím rejuvenátoru. Dávkování činilo 6 %, resp. 10 % z množství pojiva v R-materiálu.

## 2.6 AV REJUVENÁTOR „A“

Tento rejuvenátor je vyráběn jako vývojový produkt Akademie věd České republiky (AV ČR). Jedná se o odpadní živočišný tuk z jatek. Odpadní tuk byl získán z porážky Polička (okr. Svitavy), kde je provozována čistíčka odpadních vod, a právě odpadní tuky zde tvoří významnou složku vznikajících odpadů. Získaný tuk byl následně roztaven při teplotě 150 °C a část tuku byla přečištěna odstředěním, neboť tuk obsahoval nečistoty ve formě pevných částic. Takto částečně rafinovaný směsný tuk byl dále použit na optimalizaci esterifikační reakce. Neodstředěný tuk byl pak použit pro přípravu AV rejuvenátoru „A“.

Dávkování rejuvenátoru činilo 5 % z množství pojiva v R-materiálu.

## 2.7 AV REJUVENÁTOR „B“

Tento rejuvenátor je vyráběn jako vývojový produkt Akademie věd České republiky (AV ČR). Jedná se o směs výše popsaného AV rejuvenátoru „A“ a řepkového oleje v poměru 1:1.

Dávkování rejuvenátoru činilo 7 % z množství pojiva v R-materiálu.

## 2.8 AV REJUVENÁTOR „C“

Tento rejuvenátor je vyráběn jako vývojový produkt Akademie věd České republiky (AV ČR). Jedná se o destilovaný motorový olej. Vyjetý olej je nutné před destilací vyčistit od dalších složek a nečistot (významnou znečišťující složkou těchto olejů bývají různé hliníkové a železné špony apod.).



Vyjetý olej byl přefiltrován (odstraněny pevné částice) a filtrát byl následně převeden do děličky, kde byla oddělena znečišťující vodná fáze. Rejuvenátor byl připraven destilací vysušené olejové fáze. U rejuvenátoru bylo stanoveno množství sumy 16 PAU, které bylo ve výsledném produktu 9,2 mg/kg.

Dávkování rejuvenátoru činilo 7 % z množství pojiva v R-materiálu.

## 2.9 REJUVENÁTOR RAPFiX

Tento rejuvenátor je vyráběn společností Macismo International Ltd., která sídlí ve Velké Británii. Jedná se o produkt na bázi rostlinných olejů, světle hnědé barvy s nízkou hustotou. Pro lepší účinek v pojivu může být kombinován s dalšími chemickými přísadami.

Dávkování rejuvenátoru činilo 6 % z množství pojiva v R-materiálu.

## 2.10 REJUVENÁTOR ACF

Výrobce tohoto rejuvenátoru je italská společnost Activa. Jedná se o tmavě hnědou kapalinu, která funguje jako kationová povrchově aktivní látka/surfaktant (snižuje povrchové napětí). Je založena na esterech polyfosforečných kyselin rozpuštěných v esterech mastných kyselin a parafinových olejů.

U tohoto rejuvenátoru byly zkoumány 2 varianty směsi, které se lišily množstvím použití přísady. Dávkování rejuvenátoru činilo v jedné variantě 7 % z množství pojiva v R-materiálu a v druhé variantě byl tento podíl 10 %.

## 2.11 REJUVENÁTOR JRS

Tento rejuvenátor je německé provenience a je nabízen firmou J. Rettenmaier und Söhne GmbH (JRS). Je dodáván jako pevné bílé granulky, které jsou vytvořeny slisováním tekutého rejuvenátoru. Jejich složení je podobné jako u přísady Viatop RC, jedná se tedy o oživovací přísadu na přírodní bázi.

Dávkování rejuvenátoru činilo 3 % z množství pojiva v R-materiálu.

## 2.12 REJUVENÁTOR VIATOP RC

Tento rejuvenátor je na rozdíl od většiny ostatních přísad dodáván ve formě drobných pelet, a nikoliv jako kapalina. Jedná se o produkt německé firmy J. Rettenmaier und Söhne GmbH (JRS). Princip výroby spočívá ve slisování vláken celulózy a samotného rejuvenátoru.

Tento rejuvenátor byl použit pro 2 varianty směsi, přičemž u jedné varianty činilo dávkování 3 % z množství pojiva v R-materiálu a u druhé varianty byl podíl 6 %.

## 2.13 REJUVENÁTOR ERVO

Tento potenciální rejuvenátor má podobu oleje s velmi malou viskozitou. Olej vzniká recyklací různých odpadů, ze kterých jsou zpětně získávány původní vstupní produkty. Výhodou technologie ERVO je, že umožňuje zpracovávat netříděný a kontaminovaný odpad. Princip recyklace spočívá v katalytické depolymerizaci odpadu (tj. rozklad složitých polymerů na jednodušší monomery za pomoci různých katalyzátorů). V tomto případě byl výsledný olej získán depolymerizací odpadních plastů.

Dávkování činilo 7 % z množství pojiva v R-materiálu.





## 2.14 REJUVENÁTOR ENVI

Tento rejuvenátor je vyvinut a vyráběn v České republice. Pro potřeby diplomové práce byl zvolen pracovní název „ENVI“. Přesné složení této oživovací přísady je obchodním tajemstvím výrobce.

Dávkování činilo 6 % z množství pojiva v R-materiálu.

## 2.15 REJUVENÁTOR ANOVA

Tento rejuvenátor je dodáván ve formě hnědé olejovité kapaliny. Je vyráběn na přírodní bázi a neobsahuje polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU). Výrobce uvádí doporučené dávkování přísady v koncentraci 0,25 – 6 % z hmotnosti pojiva v R-materiálu. [20]

Dávkování činilo 6 % z množství pojiva v R-materiálu.

## 2.16 ASFALTOVÉ POJIVO

Pro výrobu jednotlivých variant bylo použito několik druhů asfaltových pojiv. Pro většinu směsí bylo použito standardní asfaltové pojivo s hodnotou penetrace 50/70. Dále byla vyrobena jedna varianta směsi se silničním asfaltem 70/100. Poté bylo také využito speciální pojivo modifikované polymerem se zvýšeným podílem elastomeru (PMB 25/55 RC), nízko-hustotním polyethylenem (LDPE) a rovněž pojivo s 15 % příměsí mleté pryže v podobě aktivovaného pryžového prachu dodávaného českou společností Lavaris (tzv. Crumb Rubber Modified Bitumen; CRMB).



## 3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Zkušební tělesa použitá pro jednotlivé laboratorní experimenty (Marshallova tělesa a desky) byla z větší části vyrobena v silniční laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze. Menší část zkoušených těles byla dodána z obalovny Kladno-Dubí.

### 3.1 VÝROBA MARSHALLOVÝCH TĚLES

Všechny posuzované varianty asfaltové směsi byly nejprve zahřáty na předepsanou teplotu (150 °C nebo 160 °C, v závislosti na druhu pojiva a přítomnosti rejuvenátoru). Před samotnou přípravou vzorků bylo vždy odebráno 1000–1200 g asfaltové směsi pro zkoušku určení maximální objemové hmotnosti dle ČSN EN 12697-5.[6] Během přípravy byly vyráběny vždy 2 typy zkušebních těles. První typ zkušebních těles měl hmotnost přibližně 1100 g a byl hutněn 2x25 údery hutnicího pěchu. Tato zkušební tělesa byla určena pro zkoušku stanovení odolnosti asfaltové směsi proti účinkům vody. Druhý typ zkušebních těles měl přibližně 1200 g a byl hutněn 2x50 údery hutnicího pěchu.

Odebrané navážky byly umístěny do předem připravených a nahřátých nádob (tzv. fanek) a dále 2 hodiny temperovány na požadovanou teplotu. Tento postup zajistil rovnoměrné prohřátí asfaltové směsi. Spolu s navážkami se rovněž temperovaly pomůcky pro přípravu těles (podložka, násypný trychtýř, válcová forma, horní nástavec a špachtle).

Po vytemperování byla sestavena hutnicí forma a pomocí špachtle a trychtýře do ní byla přesypána navážka, která byla následně ještě špachtlí urovnána. Případnému znečištění podložky nebo hutnicího pěchu horkou asfaltovou směsí bylo zabráněno použitím separačních papírových podložek. Po zhutnění předepsaným počtem úderů byla forma rozebrána (dle potřeby byla očištěna podložka a hutnicí pěch) a hotové těleso ve válcové formě bylo umístěno na kovovou destičku k vychladnutí. Po vychladnutí bylo těleso z formy vytlačeno pomocí lisu a označeno nesmazatelnou značkou pro pozdější rychlou identifikaci.

Pro každou variantu směsi bylo vyrobeno 15 Marshallových těles (9 vzorků hutněných 2x25 údery + 6 vzorků hutněných 2x50 údery). Vzorky hutněné 2x25 údery byly určeny pro stanovení pevnosti v příčné tahu a zkoušku odolnosti vůči působení vody a mrazu (zkouška ITSR). Pro stanovení modulu tuhosti na zestárnutých a nezestárnutých tělesech byly využity vzorky, které byly hutněné 2x50 údery hutnicího pěchu. Celkem bylo vyrobeno 300 zkušebních těles tohoto typu.



Obr. 3 – Hutní pec pro výrobu Marshallových těles



Obr. 4 – Marshallovo těleso

## 3.2 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH DESEK

Asfaltová směs byla nejprve opět nahřata na požadovanou teplotu (150 °C nebo 160 °C). Poté byla odebrána navážka. Množství navážky bylo určeno na základě rozměrů desky a objemové hmotnosti zhutněných Marshallových těles. Spolu se směsí byly rovněž temperovány ocelové formy, které se následně vložily do zhutňovacího zařízení, tzv. segmentového zhutňovače (postup dle ČSN EN 12697-33 [7]). Pro omezení nalepování směsi na formu na ni byl předem nanesen silikonový olej. Poté byla připevněna boční strana formy pomocí šroubů (tato strana byla rovněž opatřena nástřikem ze silikonového oleje). Do formy byla následně nasypána větší část navážky (cca 12 kg). Povrch se následně jemně urovnal. Následovalo nasazení vrchní části formy (tzv. „límeč“) a dosypání zbytku navážky (cca 3 kg). Následně se část směsi ve pomoci lopatky nahrnula směrem ke středu formy. Toto opatření má za cíl zabránění vytlačení většího množství materiálu po stranách formy. Proti přilnutí asfaltové směsi k hutnicímu zařízení byla mezi formu a hutnicí zařízení umístěna vrstva z voskovaného papíru. Následně bylo spuštěno hutnicí zařízení. Hutnicí deska je při tomto procesu přitlačována pomocí lisů k formě, která se rovnoměrně pohybuje. Celkem jsou vždy uskutečněny 4 série po 10 pojezdech desky s formou. Tento postup simuluje reálné hutnění asfaltové směsi na stavbě. Po ukončení hutnění byla deska z lamelového zhutňovače vyjmuta a umístěna na vyhrazené místo, aby vychladla.

Desky byly následně nařezány na zkušební trámky o rozměrech 50x50x400 mm. Tyto trámky byly dále podrobeny zkoušce na čtyřbodový ohyb při stanovených teplotách.

Pro každou variantu asfaltové směsi byla zpravidla vyrobena 1 zkušební deska. Rozměry vyrobených desek odpovídaly požadavkům obsažených v normě ČSN EN 12697-26, Příloha B. [9]



Obr. 5 – Segmentový zhutňovač pro výrobu zkušebních desek



*Obr. 6 – Zkušební trámek pro čtyřbodovou zkoušku dle ČSN EN 12697-26*

## 4 MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Veškerá měření vyrobených zkušebních těles probíhala v silniční laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze.

### 4.1 STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI SMĚSI

Maximální objemová hmotnost byla měřena pomocí pyknometru volumetrickým postupem dle normy ČSN EN 12697-5 [6] dle rovnice:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^6 \cdot V_p - (m_3 - m_2) / \rho_w}$$

$\rho_{mv}$  – maximální objemová hmotnost asfaltové směsi v Megagramech na kubický metr ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ), s přesností  $0,001 \text{ Mg}/\text{m}^3$

$m_1$  – hmotnost pyknometru, nástavce a pružiny v gramech (g)

$m_2$  – hmotnost pyknometru, nástavce, pružiny a zkušební vzorku v gramech (g)

$m_3$  – hmotnost pyknometru, nástavce, pružiny, zkušební vzorku a vody nebo rozpouštědla v gramech (g)

$V_p$  – objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce v metrech kubických ( $\text{m}^3$ )

$\rho_w$  – hustota vody v Megagramech na metr kubický ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )

Hustota vody při zkoušce v závislosti na teplotě vody, ve které byla tělesa ponořena, byla stanovena dle následujícího vztahu:

$$\rho_w = 1,000\,165\,84 + \frac{(7,93 * t - 5,29 * t^2)}{1\,000\,000}$$

$\rho_w$  – hustota vody v Megagramech na kubický metr ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ), s přesností  $0,001 \text{ Mg}/\text{m}^3$

t – teplota vody ve stupních Celsia ( $^{\circ}\text{C}$ )

Zkušební tělesa, která byla hutněna 50 úderů, byla nejprve zvážena za sucha, poté pod vodou a následně byla určena hmotnost osušených zkušebních těles dle ČSN EN 12697-6.[7] Ze získaných hodnot hmotnosti byla následně určena mezerovitost a maximální objemová hmotnost těchto těles. Z poměru mezi takto změřenou objemovou hmotností a maximální objemovou hmotností naměřenou volumetrickým způsobem (viz výše), byla stanovena mezerovitost jednotlivých variant asfaltové směsi.

### 4.2 MĚŘENÍ PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU

Zkušební tělesa, která byla hutněna 2x25 úderů, byla dále rozdělena dle hodnoty objemové hmotnosti do tří skupin. První skupina zkušebních těles byla podrobena zkoušce za sucha při teplotě  $15^{\circ}\text{C}$ . Druhá skupina zkušebních těles byla nejprve plně nasycena pomocí exsikátoru a následně ponechána minimálně 72 hodin ve vodní lázni o teplotě  $40^{\circ}\text{C}$ . Třetí skupina zkušebních těles byla podrobena zkoušce dle modifikované metody specifikované americkou organizací AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) v předpisu AASHTO T283. V souladu s postupem uvedeným v tomto předpisu je těleso opět nejprve plně nasyceno pomocí exsikátoru. Následně je minimálně 16 hodin ochlazováno na teplotu  $-18^{\circ}\text{C}$  a poté ponecháno minimálně 24 hodin ve vodní lázni o teplotě  $60^{\circ}\text{C}$ .



Na těchto skupinách byla poté provedena zkouška pevnosti v příčném tahu (ITS). Princip zkoušky spočívá v namáhání tělesa v jednoosém příčném tlaku. Zatěžování je prováděno pomocí lisu, jehož rychlost je stanovena normou na 50 mm/min. Ze záznamového zařízení, které je připojeno k lisu, byly následně odečteny hodnoty síly potřebné k porušení tělesa a příčné deformace. Z těchto údajů byly následně vypočteny hodnoty pevnosti v příčném tahu, poměrného přetvoření, modulu pružnosti. Z poměru průměrné pevnosti mokrých zkušebních těles a průměrné pevnosti suchých zkušebních těles byla poté vypočtena hodnota ITS<sub>R</sub> (poměr pevností v příčném tahu) dle následujícího vztahu a v souladu s požadavky a principy stanovenými v normě ČSN EN 12697-12:[8]

$$ITS_R = 100 * \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

*ITS<sub>R</sub>* – poměr pevností v příčném tahu v %

*ITS<sub>w</sub>* – průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých zkušebních těles v kPa

*ITS<sub>d</sub>* – průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles v kPa

Dle normy ČSN 73 6121:2019 musí tento poměr dosáhnout u směsi typu ACL 16+ minimálně hodnoty 70 %, a to bez ohledu na množství R-materiálu přidávaného do asfaltové směsi.

### 4.3 MĚŘENÍ MODULU TUHOSTI

Měření modulu tuhosti bylo provedeno na Marshallových zkušebních tělesech a odpovídalo normě ČSN EN 12697-26, příloha C. [9] Zkoušení probíhalo metodou IT-CY (nedestruktivní zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech) ve speciálním přístroji se servohydraulickým zatěžovacím pohonem. Před měřením při požadované teplotě byla zkušební tělesa vždy nejprve minimálně 4 hodiny temperována na požadovanou teplotu. Z hodnoty síly potřebné k vybuzení příčného přetvoření zkušebního tělesa o velikosti 5 μm (příp. v některých případech 3 μm, a to při zkušební teplotě 0 °C) byly pomocí počítačového programu získány hodnoty modulu tuhosti jednotlivých zkušebních těles. Základní vztah pro výpočet modulu tuhosti při známém napětí a přetvoření je následující:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

*E* – modul tuhosti

*σ* – aplikované maximální napětí

*ε* – naměřené maximální přetvoření

Použitý počítačový program pracuje s komplexnějším vztahem, který zahrnuje amplitudu pružné horizontální deformace a Poissonovo číslo. Na základě měření z 5 zatěžovacích pulzů pak vypočítá modul tuhosti pro každý zatěžovací pulz dle rovnice:

$$E = \frac{F \cdot (v + 0,27)}{(z \cdot h)}$$

*E* – modul tuhosti

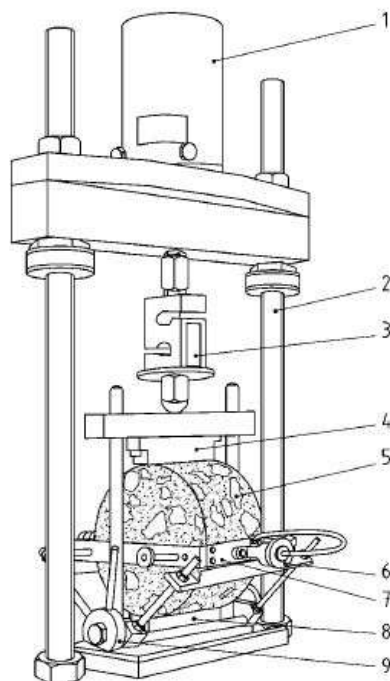
*F* – zatěžovací síla

*v* – Poissonovo číslo

*z* – amplituda pružné horizontální deformace zjištěná v průběhu zatěžovacího cyklu

*h* – průměrná tloušťka zkušebního tělesa

Měření probíhala při teplotách 0 °C, 15 °C a 27 °C v termostatické komoře. Měření byla prováděna vždy na 6 zkušebních tělesech.

**Legenda**

- 1 pneumatický zdroj zatížení<sup>(NF2)</sup>
- 2 ocelový zatěžovací rám
- 3 snímač síly
- 4 horní zatěžovací pás
- 5 zkušební těleso
- 6 LVDT nastavovací šroub
- 7 rámeček s LVDT
- 8 spodní zatěžovací pás
- 9 nastavovací podpěra rámečku

*Obr. 7 – Schéma zkušebního zařízení pro měření modulu tuhosti*

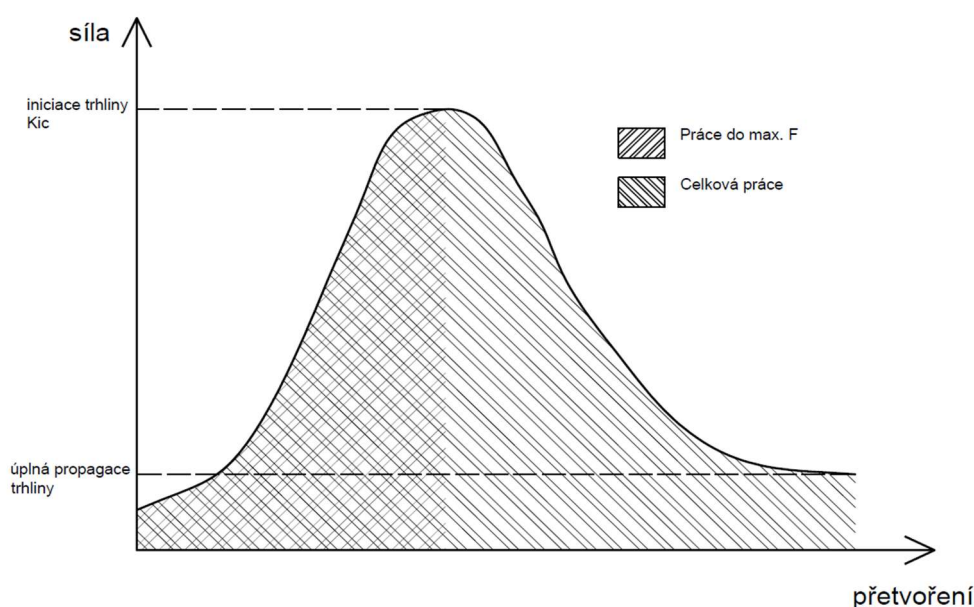
Následně byla tři předem vybraná zkušební tělesa vystavena procesu stárnutí. Tento proces je velmi důležitý kvůli zhodnocení chování asfaltové směsi v dlouhodobém měřítku, jakož i z hlediska skutečnosti, že asfaltové pojivo přirozeně podléhá vlivům stárnutí (termooxidativní degradace). V delším časovém horizontu se totiž v asfaltové směsi začínají projevovat trvalé deformace, dochází ke vzniku a propagaci teplotně indukovaných nebo únavových trhlin. Zároveň také dochází k celkové degradaci asfaltového pojiva, která se projevuje zvyšováním jeho tuhosti při současném nárůstu křehkosti. Tyto aspekty je potřeba důkladně sledovat a pečlivě analyzovat, neboť mají zásadní vliv na životnost celé konstrukce vozovky. Aby bylo možné studovat chování zestárnuté asfaltové směsi v reálném čase, je nutné proces stárnutí aproximovat v laboratorních podmínkách. Pro napodobení procesu stárnutí byla zkušební tělesa vystavena teplotě 85 °C po dobu 5 dnů v klimatické komoře, kde byla zajištěna stálá cirkulace vzduchu (jeden z možných postupů dle TS(prEN) 12697-52 [16]). Po simulaci procesu stárnutí byl u zkušebních těles všech asfaltových směsí znovu stanoven modul tuhosti při 0 °C a 15 °C. Zkušební tělesa nezestárnutých asfaltových směsí i zestárnutých asfaltových směsí byla následně připravena pro zkoušku šíření trhliny ohybem na půlválcovém zkušebním tělese.



## 4.4 MĚŘENÍ ODOLNOSTI PROTI ŠÍŘENÍ TRHLINY

U zkušebních těles hutněných 2x50 úderů bylo provedeno měření náchylnosti asfaltové směsi ke vzniku a šíření teplotně indukovaných trhlin. Zkouška byla prováděna dle normy ČSN EN 12697-44.[10] Při tomto měření je zkušební těleso nejprve seříznuto na výšku cca 50 mm a poté rozříznuto podél vertikální osy na 2 stejné poloviny. Do každého z takto vzniklých půlválcových zkušebních těles je následně vyříznuta 10 mm drážka umístěná uprostřed tělesa. Díky této úpravě zkušebního tělesa se koncentruje působící napětí do požadované oblasti. Také lze předem určit oblast, kde ve zkušebním tělese dojde ke vzniku trhliny. Těleso je poté s využitím principu třibodové zkoušky zatěžováno. Ze získaných hodnot je poté určena jednak lomová houževnatost a také práce nutná k propagaci trhliny na povrch vzorku. Z množství práce vykonané při propagaci trhliny pak lze určit přibližnou časovou rychlost s níž se trhlina prokopíruje, resp. v čase může prokopírovat na povrch vozovky v reálné konstrukci. Jedná se tedy o vhodnější ukazatel chování asfaltové směsi v porovnání s lomovou houževnatostí, jak ji vymezuje jako určující charakteristiku ČSN EN 12697-44. [10]

Následující pracovní diagram [43] ukazuje průběh přetvoření zkušebního půlválcového tělesa v závislosti na působící síle. Je znázorněna práce pro vyvolání maximální síly a celková práce vykonaná při zkoušce. Rovněž je znázorněn okamžik iniciace trhliny a následně okamžik její úplné propagace.



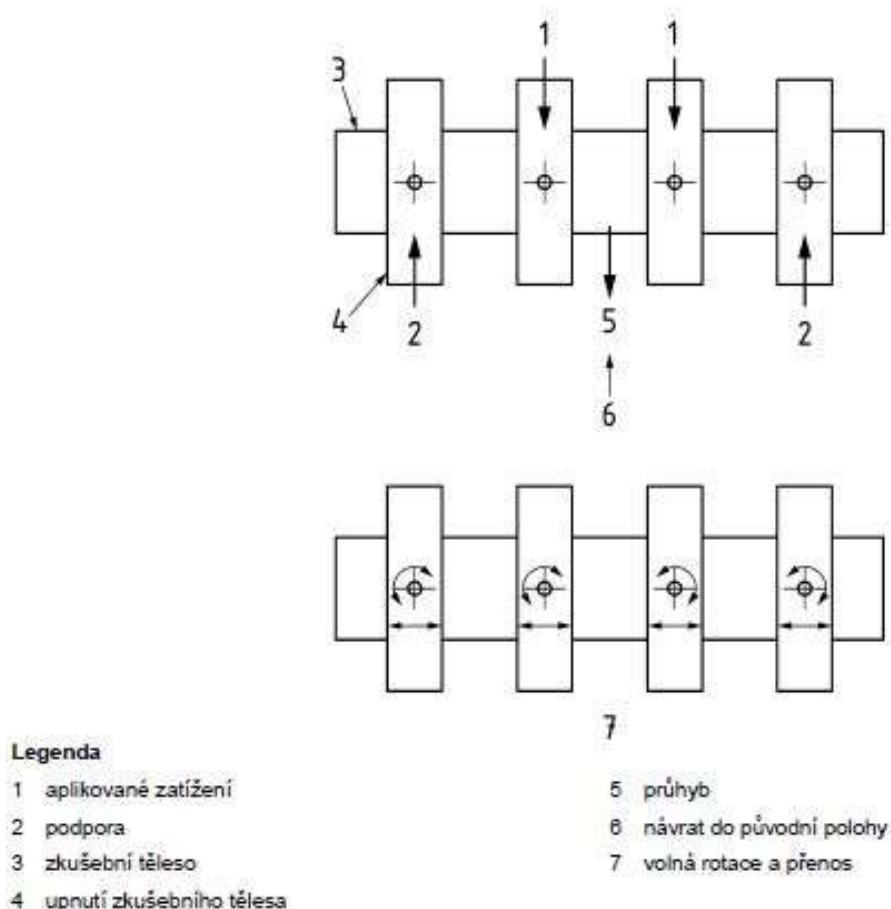
Graf 1 - Pracovní diagram šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese

Většina zkušebních postupů používaných v Evropě se zabývá pouze kritickou hodnotou napětí, při němž dochází k iniciaci trhliny. Naproti tomu měření při analýzách nízkoteplotního chování asfaltových směsí pro tuto práci se zabývala i dalšími hodnotami. Jednak se zkoumala celková práce (deformační/lomová energie) potřebná k úplné propagaci trhliny. Další měřenou veličinou byl čas potřebný pro dosažení maximálního napětí a celkový čas zkoušky. Z kritické hodnoty lomové houževnatosti lze určit sílu, při které dojde k propagaci trhliny. Celkový čas zkoušky slouží k určení doby, kdy dojde k propagaci trhliny na povrch vozovky. Tato hodnota je důležitá pro údržbu komunikace, neboť stanovuje přibližné období, po němž bude třeba vyměnit konstrukční vrstvu.

## 4.5 STANOVENÍ KOMPLEXNÍHO DYNAMICKÉHO MODULU TUHOSTI

Pro tuto zkoušku byly vyrobeny velké zkušební desky, které byly následně rozřezány na zkušební trámky o rozměrech cca 400x50x50 mm. Trámky byly testovány v klimatizační komoře při zkušebních teplotách 0 °C, 10 °C, 20 °C a 30 °C. Následně byly trámky podrobeny procesu laboratorního stárnutí po dobu 5 dní v klimatické komoře s nucenou cirkulací vzduchu při teplotě 85 °C a poté byly zkoušeny při zkušebních teplotách 10 °C a 20 °C. Zkoušení probíhalo dle principů stanovených v normě ČSN EN 12697-26. [9]

Při této nedestruktivní zkoušce jsou zkušební trámky zatěžovány tzv. čtyřbodovým ohybem. Vzorky jsou vystaveny opakovanému ohybu ve 4 bodech s volnou rotací a (horizontálním) posunem na všech zatěžovacích a podpěrných bodech. Ohyb je vyvozován pohybem 2 středních zatěžovacích bodů ve svislém směru kolmo k ose zkušebního tělesa. Svislá poloha dvou koncových bodů zůstává neměnná. Vyvozovaná opakovaná výchylka na obě strany je symetrická k základní nulové poloze, sinusová amplituda a amplituda výchylky musí být v čase konstantní. Síla potřebná k deformaci tělesa je potom funkcí času stejně tak jako fázové zpoždění mezi signálem síly a signálem výchylky. Zkušební těleso je vystaveno sinusové síle, aby bylo dosaženo požadovaného přetvoření ( $50 \pm 3$ ) mikrostrain. Z tohoto se vypočítá komplexní modul tuhosti zkoušeného materiálu. Zatížení je nanášeno v několika stanovených frekvencích (od 0,1 do 50 Hz). Schéma a princip zkoušky jsou zachyceny na obrázku níže.



Obr. 8 - Princip zkoušky čtyřbodovým ohybem



*Obr. 9 – Klimatizační komora se zařízením pro zkoušku čtyřbodovým ohybem*



*Obr. 10 – Zařízení pro zkoušku čtyřbodovým ohybem*



Komplexní modul tuhosti závisí na frekvenci  $\omega$  a zkušební teplotě  $\theta$ . Je možno ho charakterizovat 2 způsoby:

1. Reálnou složkou komplexního modulu  $E_1$  a imaginární složkou komplexního modulu  $E_2$

$$E_1 = |E^*| \cdot \cos(\phi)$$

$$E_2 = |E^*| \cdot \sin(\phi)$$

2. Absolutní hodnotou komplexního modulu tuhosti a fázového úhlu (tento způsob se využívá častěji):

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

$$\phi = \arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$

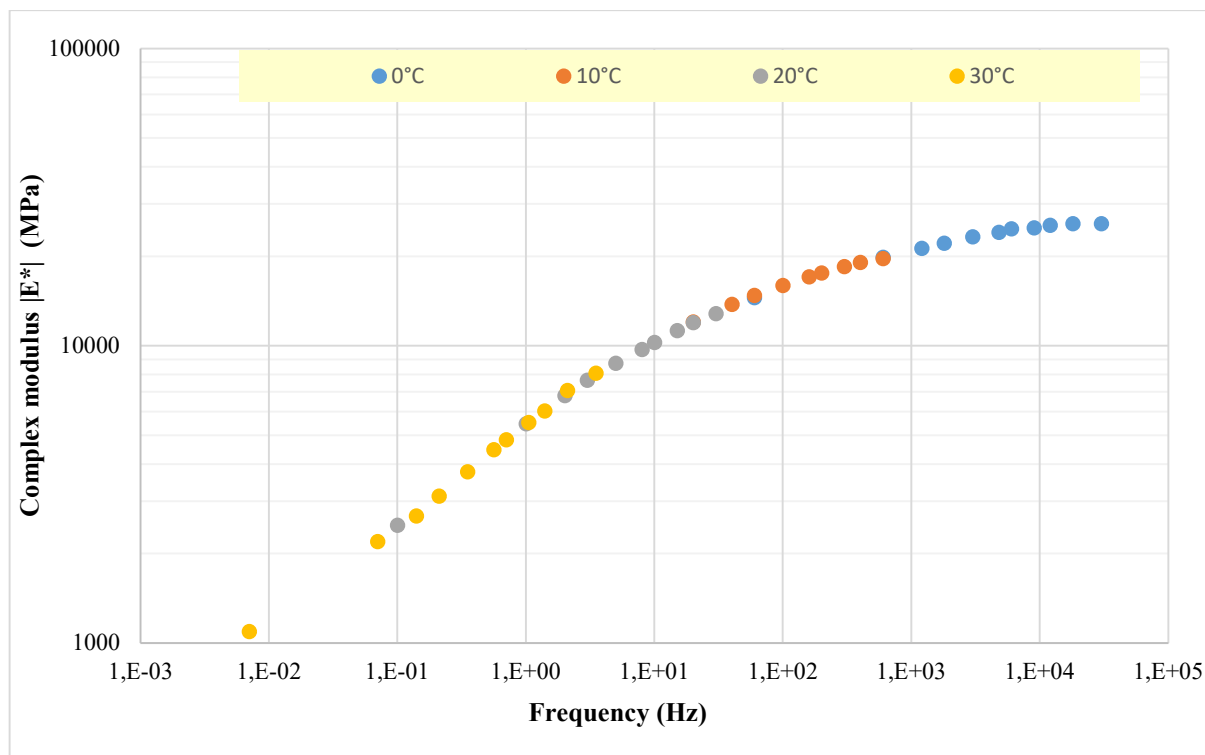
$E^*$  - visko-elastický komplexní modul tuhosti (MPa)

$E_1$  – reálná složka komplexního modulu (MPa)

$E_2$  – imaginární složka komplexního modulu (MPa)

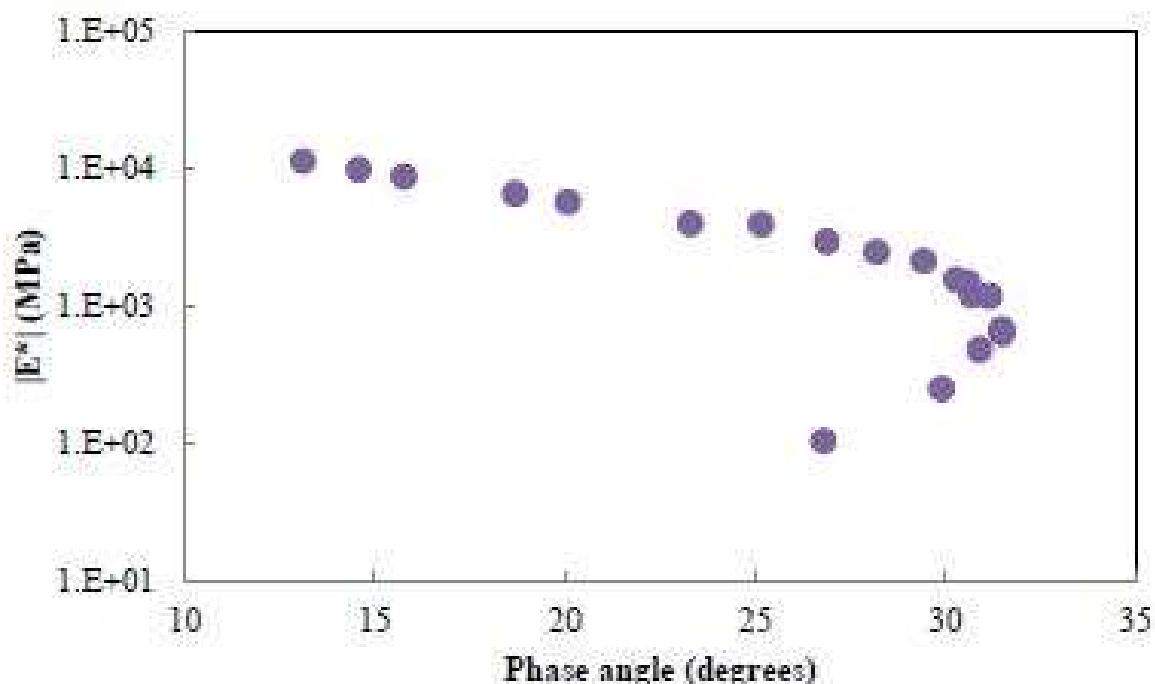
$\phi$  – fázový úhel modulu materiálu (°)

Ze získaných dat lze sestavit grafy závislosti komplexního modulu tuhosti a fázového úhlu na frekvenci a také závislost komplexního modulu tuhosti na úhlu fázového posunu. Typický příklad grafu závislosti dynamického modulu tuhosti na zkušební frekvenci je uveden níže. Jedná se o jednu z posuzovaných variant asfaltové směsi ACL 16+ s 50 % RA, konkrétně variantu s 6 % rejuvenátoru Sylvaroad (nezestárnutá tělesa). Jsou zobrazeny výsledky pro všechny čtyři zvolené zkušební teploty (0 °C, 10 °C, 20 °C a 30 °C). Je zobrazena tzv. master curve (řídící křivka), kde jsou výsledky všech čtyř zkušebních teplot zobrazeny v jedné křivce v logaritmickém měřítku. Je vidět, že při vyšších teplotách je těleso testováno s nižší frekvencí, a naopak při nižších teplotách jsou využity vyšší zkušební frekvence. Z hlediska materiálových vlastností asfaltové směsi je lepší, pokud se křivka hodnot přibližuje vodorovné ose, protože to znamená, že tuhost se příliš nezvětšuje, a současně směrnice logaritmické křivky není příliš strmá, což by jinak naznačovalo značnou teplotní citlivost kompozitu.



Graf 2 – Tzv. řídicí křivka (master curve) pro závislost dynamického modulu tuhosti na zkušební frekvenci (logaritmické měřítko) – varianta S6

Dalším možným výstupem je tzv. Black space diagram, který vyjadřuje závislost absolutní hodnoty dynamického modulu  $E^*$  na hodnotě fázového úhlu modulu materiálu, a to bez nutnosti provedení časově – teplotní superpozice. Z hlediska odolnosti vůči vzniku a propagaci trhlin je lepší, pokud jsou hodnoty v grafu blíže vodorovné ose. Naopak pokud se hodnoty nacházejí dále od vodorovné osy a blíže ke svislé, značí to omezenou schopnost relaxace asfaltového pojiva, vyšší tuhost a větší náchylnost ke vzniku trhliny (typicky např. u zestárnutého asfaltového pojiva). Typický příklad této křivky je zobrazen v grafu níže. Kromě jiného je velmi dobře patrný inflexní bod, kde je při střední hodnotě modulu tuhosti dosažena maximální hodnota fázového úhlu materiálu. Spodní část křivky odpovídá zkoušení při vyšších teplotách (40 °C), což je v některých studiích používáno při hodnocení asfaltového pojiva nebo směsi. [46] V této diplomové práci činila maximální použitá zkušební teplota pouze 30 °C, proto hodnoty tzv. Black space diagramu nemají zcela parabolický průběh.



Graf 3 – Tzv. Black space diagram pro závislost absolutní hodnoty komplexního dynamického modulu tuhosti na hodnotě fázového úhlu materiálu (semilogaritmické měřítko) [46]

## 5 NÁVRH ASFALTOVÉ SMĚSI

Pro výrobu jednotlivých variant byly vždy využity následující frakce kameniva z kamenolomů Zbraslav, Lašovice a Velké Hydčice:

- Zbraslav 11/16
- Zbraslav 8/11
- Zbraslav 4/8
- Zbraslav 0/4
- Lašovice 0/4
- vápencový přídatný filer Velké Hydčice

### 5.1 NAVRŽENÁ RECEPTURA

Při návrhu směsi se vycházelo z již používané receptury směsi ACL 16+. Na základě naměřených výsledků byla navržena receptura asfaltové směsi. Kamenivo pochází z kamenolomu Zbraslav (Praha), konkrétně frakce 11/16, 8/11, 4/8 a část frakce 0/4. Zbývající část podílu frakce 0/4 je tvořena kamenivem z lokality Lašovice (část obce Kovářov, okr. Písek). Vápencový přídatný filer pocházel z lokality Velké Hydčice (okr. Klatovy). Jako pojivo je navržen standardní silniční asfalt s hodnotou penetrace 50/70.

1 kg asfaltové směsi ACL 16+ s 50 % R-materiálu:

- Zbraslav 11/16 184,0 g
  - Zbraslav 8/11 107,0 g
  - Zbraslav 4/8 68,0 g
  - Zbraslav 0/4 52,5 g
  - Lašovice 0/4 52,5 g
  - vápencový přídatný filer 20,0 g
  - asfaltové pojivo 50/70 16,0 g
  - asfaltový R-materiál 0/8 500,0 g
- 1000,0 g**

Pro výrobu směsi je předepsána teplota míchání a hutnění 150 °C v případě použití silničního asfaltu v kombinaci s rejuvenátorem a 160 °C při použití pojiva CRMB, asfaltu modifikovaného LDPE a pojiva PMB RC. Tabulka níže uvádí hodnoty penetrace a bodu měknutí jednotlivých pojiv použitých pro výrobu zkušebních variant. Obsah pojiva v R-materiálu použitý pro návrh směsi činil 6 %.

Pojivo	Penetrace (x 0,1 mm)	Bod měknutí (°C)
asfalt z RA	20,0	65,4
50/70 ref.	59,0	59,0
70/100 ref.	75,0	44,2
PMB 25/55 RC	48,3	69,0

Tab. 1 – Hodnoty penetrace a bodu měknutí pro použitá asfaltová pojiva

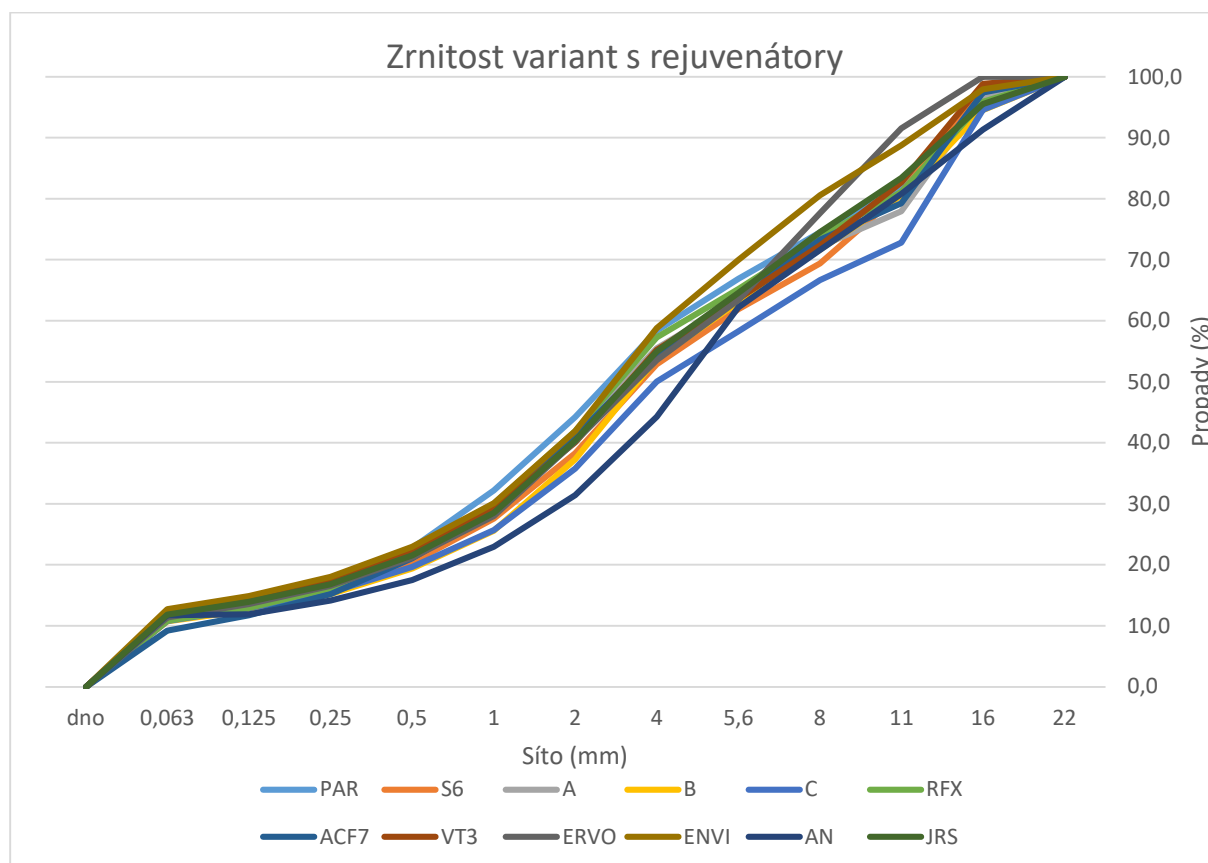
## 6 VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

Celkem bylo zkoumáno 20 variant asfaltové směsi ACL 16+ s 50 % RA. 15 variant obsahovalo rejuvenátory nebo oživovací přísady, 3 varianty byly bez rejuvenátoru, ale s upraveným pojivem a poslední 2 varianty (50/70, resp. 70/100) sloužily pro porovnání výsledků coby referenční.

### 6.1 ZRNITOST A OBSAH ASFALTOVÉHO POJIVA

Níže jsou uvedeny křivky zrnitosti jednotlivých variant asfaltové směsi. Všechny křivky zrnitosti byly stanoveny ze vzorků kameniva extrahovaného z asfaltové směsi.

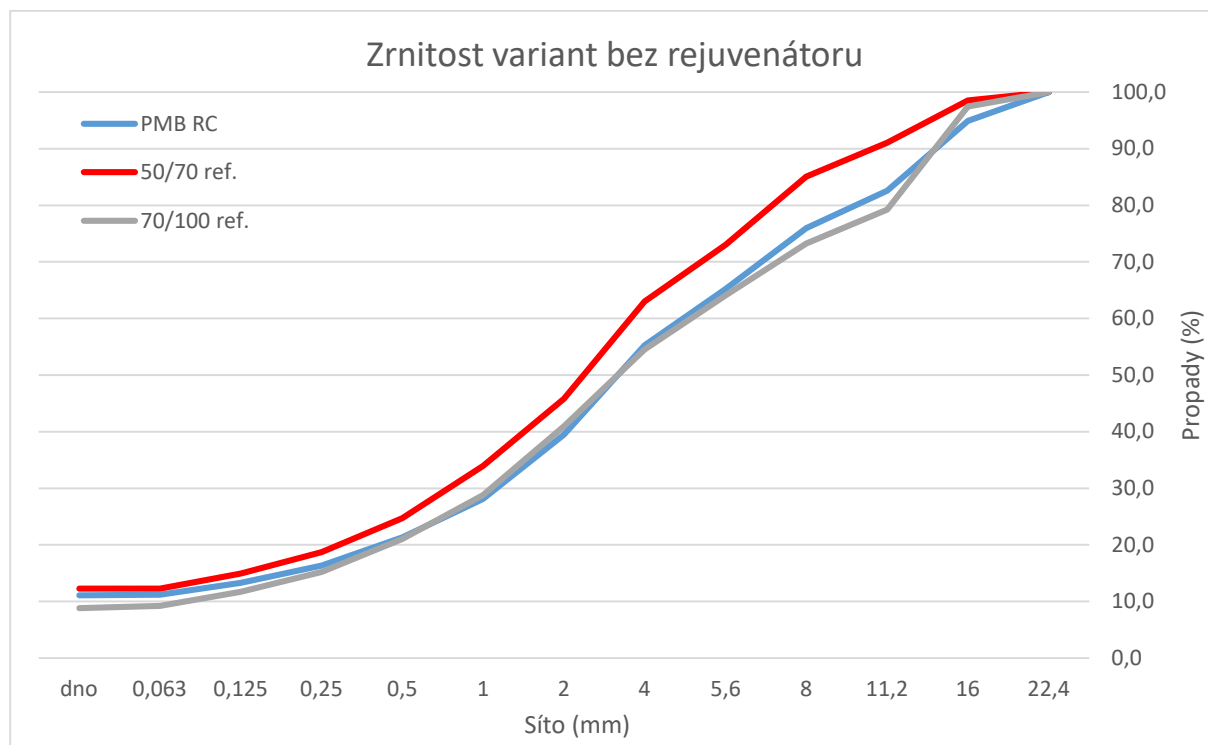
Je celkem jasně vidět, že všechny varianty s rejuvenátory mají prakticky stejný průběh křivky zrnitosti. Jedním z důvodů této skutečnosti je pravděpodobně i fakt, že byl využit R-materiál úzké frakce (0/8). Dalším nezbytným předpokladem je použití R-materiálu, který byl řádně skladován a přetříděn. Protože druh rejuvenátoru nemá na průběh zrnitosti prakticky žádný vliv, je u rejuvenátorů, kde byly použity 2 různé koncentrace, použita křivka pouze pro jednu z nich.



Graf 4 – Křivky zrnitosti jednotlivých variant asfaltové směsi s rejuvenátory



Pro porovnání jsou dále uvedeny také křivky zrnitosti variant bez přidaného rejuvenátoru. Ani zde nebyly zaznamenány výraznější odchylky.



Graf 5 – Křivky zrnitosti vybraných variant asfaltové směsi bez rejuvenátorů

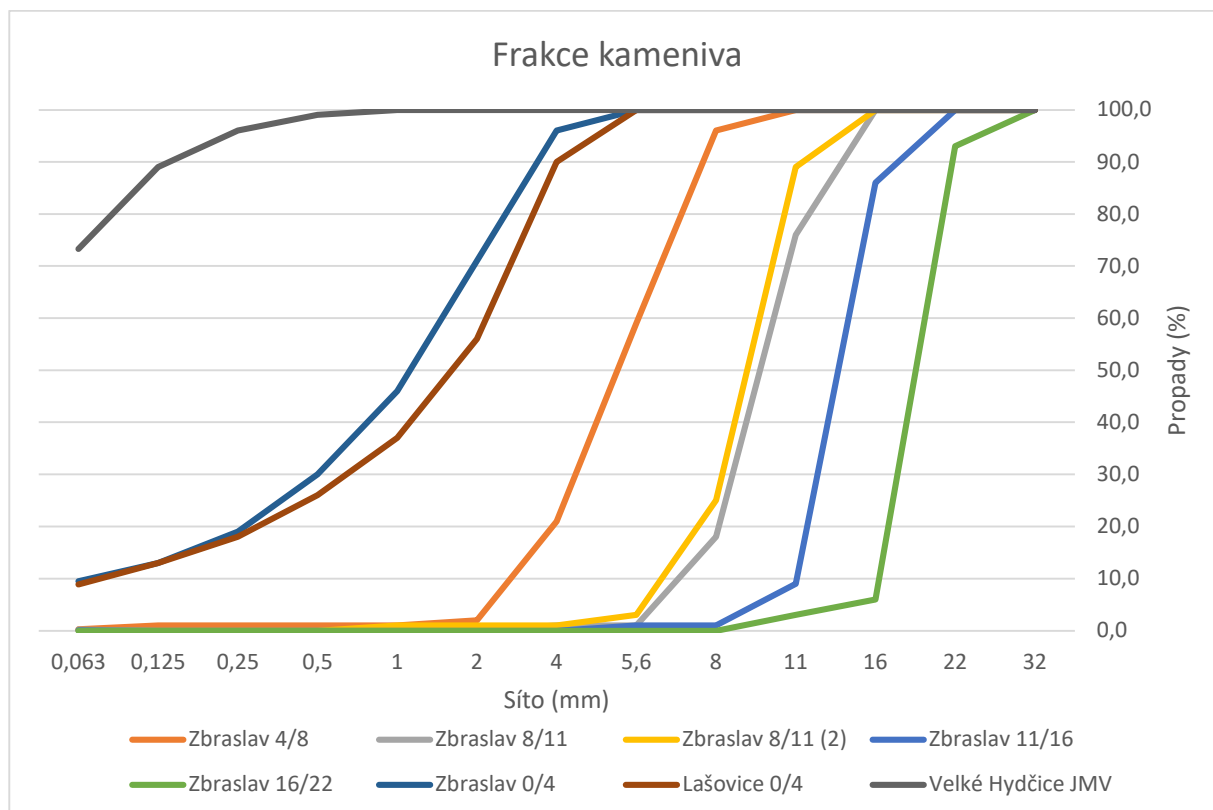
V následující tabulce je uveden obsah asfaltového pojiva v jednotlivých variantách zkoumané asfaltové směsi. Zároveň je uvedeno množství rejuvenátoru v poměru k obsahu pojiva v RA. Obsah pojiva se u jednotlivých variant pohyboval v rozmezí 4,3 – 5,5 % z navážky. Čerstvé pojivo bylo dávkováno v množství 1,6 % z navážky. Poměrně velký rozptyl obsahu pojiva může být způsoben několika faktory. Jedním z pravděpodobných důvodů je fakt, že ve vzorku R-materiálu pro rozbor činil obsah pojiva 6 %, ale nelze zaručit, že tento obsah byl stejný v celé navážce použitého R-materiálu. Důvodem je skutečnost, že R-materiál není získáván z jedné konkrétní vozovky a jedné konkrétní vrstvy, ale jedná se o postupné přetřídění a předrcení znovuzískané asfaltové směsi z různých staveb. Je nutno také zohlednit, že jednotlivé varianty zkoumané asfaltové směsi byly vyráběné v průběhu dvou let a vlastnosti průběžně odebíraného R-materiálu se mohly v průběhu této doby mírně měnit. Dalším faktorem může být jistá nepřesnost při výrobě směsi, kdy při dávkování pojiva do míchačky zpravidla ulpí část pojiva na stěnách dávkovací nádoby a toto množství nelze vždy spolehlivě určit. Vyloučit nelze ani chybu při měření, neboť s výjimkou 1-2 odlehlých hodnot (4,3 % u AV rejuvenátoru C a 4,5 % u varianty se silničním asfaltem 70/100) se všechny získané výsledky pohybovaly okolo hodnoty 5,0 %.

Varianta asfaltové směsi			Obsah pojiva (%)
Označení	Rejuvenátor / pojivo	Množství rejuvenátoru	
PAR	REJU 182	6 %	5,5
S6	Sylvaroad	6 %	5,4
S10	Sylvaroad	10 %	-
A	AV rejuvenátor A	5 %	5,2
B	AV rejuvenátor B	7 %	5,1
C	AV rejuvenátor C	7 %	4,3
RFX	RAPFix	6 %	5,2
ACF7	ACF	7 %	5,1
ACF10	ACF	10 %	-
VT3	Viatop RC	3 %	5,2
VT6	Viatop RC	6 %	4,8
ERVO	organický olej z depolymerizace plastů	6 %	4,7
ENVI		7 %	5,4
AN	Anova™ 1817	7 %	5,2
JRS	Rettenmeier & Soehne (rejuvenátor bez vláken)	3 %	4,8
CRMB	50/70 + 15 % CR	-	-
LDPE	50/70 + 5 % LDPE	-	-
PMB RC	PMB 25/55 RC	-	4,9
70/100 ref.	70/100 – referenční	-	4,5
50/70 ref.	50/70 - referenční	-	5,1

Tab. 2 – Množství rejuvenátoru a asfaltového pojiva v jednotlivých variantách posuzované asfaltové směsi ACL 16+ s 50 % RA

U variant s CRMB a LDPE nebyla provedena extrakce za účelem stanovení množství asfaltového pojiva ve směsi, neboť je zde značné riziko zanesení síta v extraktoru částicemi drcené pryže, případně nerozpuštěnými částicemi plastu. Po dohodě s vedoucím diplomové práce bylo rozhodnuto tento problém neriskovat.

Dále je zde také uveden graf, který zobrazuje křivky zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva, které byly použité při výrobě zkoumaných variant asfaltové směsi.



Graf 6 – Křivky zrnitosti jednotlivých frakcí použitého kameniva

## 6.2 MEZEROVITOST A MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÁ HMOTNOST

U všech posuzovaných variant asfaltové směs ACL 16+ s 50 % R-materiálu byla stanovena maximální objemová hmotnost a mezerovitost dle výše popsaných postupů. Hodnoty mezerovitosti byly poté porovnány s normovými požadavky pro tento druh směsi. Norma ČSN 73 6121 [40] požaduje pro typ asfaltové směsi ACL 16+ hodnotu mezerovitosti v rozsahu 3,0 – 8,0 % (pro kontrolní zkoušky). V tomto ohledu všechny varianty (s výjimkou varianty s rejuvenátorem A) směsi vyhověly.

Hledisko mezerovitosti je poměrně důležité, protože zjednodušeně řečeno, znamená nižší mezerovitost lepší zpracovatelnost směsi. To je významným faktorem při pokládce a tvoří předpoklad pro správné zhutnění asfaltové vrstvy.

Varianta směsi	Max. obj. hmotnost (g/cm <sup>3</sup> )	Mezerovitost (%)
PAR	2,516	5,19
S6	2,512	3,56
S10	2,521	3,05
A	2,499	2,53
B	2,519	5,29
C	2,515	5,08
RFX	2,527	3,71
ACF7	2,523	4,06
ACF10	2,536	4,23
VT3	2,553	5,65
VT6	2,549	5,63
ERVO	2,631	5,83
ENVI	2,566	4,10
AN	2,543	6,09
JRS	2,562	3,98
CRMB	2,537	6,71
LDPE	2,524	5,10
PMB RC	2,515	4,05
70/100 ref.	2,507	5,94
50/70 ref.	2,553	6,40

Tab. 3 – Maximální objemová hmotnost a mezerovitost u jednotlivých variant asfaltové směsi

U hodnot maximální objemové hmotnosti nedošlo k výraznějším odchylkám a u většiny směsí se tento parametr pohyboval okolo 2,500 – 2,600 g/cm<sup>3</sup>. Tato variabilita je zde dána skutečností, že posuzovaná asfaltová směs se vyznačuje vysokým podílem RA (50 %-hm.) a navíc R-materiál nebyl na vstupu tvořen jednou identickou znovuzískanou asfaltovou směsí, tedy materiálem získaným z jedné vozovky a jedné její vrstvy. Materiál získaný z deponie R-materiálu na obalovně PKB a.s. v Kladně je totiž získán zpracováním znovuzískaných asfaltových směsí z různých staveb.

Mezerovitost je základním volumetrickým parametrem asfaltových směsí, který ovlivňuje jejich vodopropustnost. Nižší mezerovitost má také pozitivní vliv na zpracovatelnost směsi, jak již bylo uvedeno výše. U variant s rejuvenátory došlo většinou k výraznému poklesu mezerovitosti. Nejvíce se to projevilo při použití AV rejuvenátoru A, kdy hodnota mezerovitosti oproti referenční směsi 50/70 poklesla o více než 60 %. Naopak u rejuvenátoru Anova<sup>TM</sup> 1817 a rejuvenační (omlazovací) přísady získané depolymerizací odpadních plastů – olej ERVO – byl pokles minimální. Rovněž některé směsi bez rejuvenátoru vykazovaly pokles hodnoty mezerovitosti oproti variantě 50/70. Nejvíce se to projevilo u varianty s polymerem modifikovaným pojivem PMB 25/55 RC, kde mezerovitost poklesla o 37 %. Jediná varianta, u které došlo k mírnému nárůstu mezerovitosti oproti referenční směsi, byla varianta s jemně mletou pryží použitou pro modifikaci pojiva 50/70 (CRMB).

Příčinou poklesu mezerovitosti může být oživení asfaltového pojiva pomocí účinku rejuvenátorů. Pojivo je pak následně vykazuje nižší hodnoty viskozity (lépe teče) a zaplní více mezer v asfaltové směsi.

## 6.3 PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU A MODUL PRUŽNOSTI

Níže uvedená tabulka uvádí výsledky měření modulu pružnosti a pevnosti v příčném tahu a celkového stanovení odolnosti proti účinkům vody (trvanlivosti) u jednotlivých směsí a jejich variant dle použitého druhu rejuvenátoru. Je zde proto samostatně uvedena i hodnota ITSR, tedy poměr jednotlivých hodnot pevnosti v příčném tahu v závislosti na podmínkách, při nichž byla tělesa zatěžována a kterým byla před vlastním zatěžováním vystavena. Hodnota  $ITSR_{EN}$  udává poměr pevností v příčném tahu mezi tělesy zkoušenými po nasycení vodou a za sucha. Hodnota  $ITSR_{AASHTO}$  pak udává poměr pevností v příčném tahu mezi tělesy zkoušenými po absolvování jednoho zmrazovacího cyklu a za sucha. Rovněž je zde uveden poměr vypočtených hodnot modulů pružnosti těles zkoušených za sucha a těles vystavených působení vody jako alternativní poměrový ukazatel pro účinek působící vody nebo vody a mrazu na zkušební těleso (v tabulce uvedeno ve sloupci „Modul ratio“). Pro větší přehlednost jsou hodnoty poměru pevnosti v příčném tahu (za mokra a po aplikaci jednoho zmrazovacího cyklu) uvedeny v samostatném grafu, kde lze dobře porovnat citlivost jednotlivých variant.

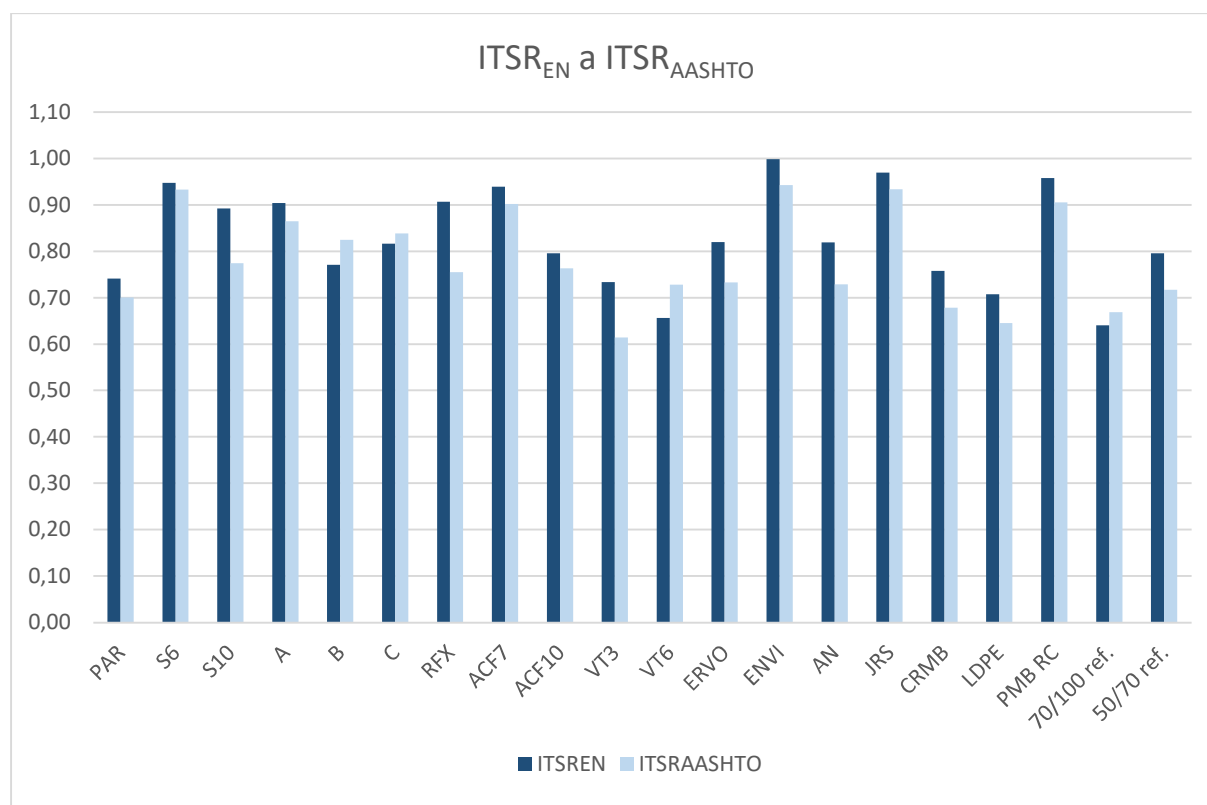
Tato zkouška je u směsí s vyšším podílem R-materiálu zvlášť důležitá, neboť zestárnuté pojivo obsažené v R-materiálu činí směs křehčí a potenciálně by mohla být současně i méně odolná vůči působení vody a mrazu. To by mohlo vést k rychlejšímu nebo snadnějšímu vzniku a šíření trhlin, které velmi oslabují konstrukci vozovky. Zjednodušeně tedy platí, že čím je poměr ITSR vyšší, tím delší lze předpokládat trvanlivost asfaltové směsi.

Velmi dobrou odolnost vykazují varianty s rejuvenátorem Sylvaroad, AV rejuvenátorem „A“, RAPFix, ENVI, JRS a ACF v koncentraci 7 %. Z variant bez rejuvenátoru byly dobré výsledky zaznamenány u polymerem modifikovaného pojiva PMB RC. Horší odolnost vůči působení mrazu a vody naopak vykazují varianty s rejuvenátorem REJU 182, AV rejuvenátorem „B“ a s rejuvenační přísadou Viatop RC. Ze směsí bez rejuvenátoru byly nižší hodnoty naměřeny u variant s pojivem modifikovaným pryžovým granulátem (CRMB) a pojivem modifikovaným nízko hustotním polyethylenem (LDPE).



Varianta směsi	Pevnost v příčném tahu			Modul pružnosti			ITSR <sub>EN</sub>	ITSR <sub>AASHTO</sub>	Modul ratio
	R <sub>dry</sub>	R <sub>wet</sub>	R <sub>w+f</sub>	E <sub>dry</sub>	E <sub>wet</sub>	E <sub>w+f</sub>			
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]			
PAR	2,38	1,76	1,66	101,66	67,41	58,88	<b>0,74</b>	<b>0,70</b>	0,66
S6	2,71	2,57	2,53	88,83	83,56	99,46	<b>0,95</b>	<b>0,93</b>	0,94
S10	2,19	1,95	1,69	85,37	83,02	56,78	<b>0,89</b>	<b>0,77</b>	0,97
A	2,64	2,39	2,29	106,63	98,01	84,55	<b>0,90</b>	<b>0,86</b>	0,92
B	1,91	1,47	1,57	78,09	39,06	46,25	<b>0,77</b>	<b>0,82</b>	0,50
C	2,10	1,71	1,76	71,38	52,84	60,02	<b>0,82</b>	<b>0,84</b>	0,74
RFX	2,50	2,27	1,89	98,00	88,85	67,88	<b>0,91</b>	<b>0,75</b>	0,91
ACF7	2,47	2,32	2,23	82,50	77,53	79,60	<b>0,94</b>	<b>0,90</b>	0,94
ACF10	2,03	1,62	1,55	90,74	58,81	53,88	<b>0,80</b>	<b>0,76</b>	0,65
VT3	3,06	2,25	1,88	128,30	97,74	68,66	<b>0,73</b>	<b>0,61</b>	0,76
VT6	2,92	1,91	2,12	111,25	64,92	73,65	<b>0,66</b>	<b>0,73</b>	0,58
ERVO	2,72	2,23	1,99	98,87	66,17	65,91	<b>0,82</b>	<b>0,73</b>	0,67
ENVI	2,44	2,44	2,30	75,19	79,08	69,03	<b>1,00</b>	<b>0,94</b>	1,05
AN	2,29	1,88	1,67	121,22	79,64	61,45	<b>0,82</b>	<b>0,73</b>	0,66
JRS	2,56	2,49	2,39	85,62	81,24	80,07	<b>0,97</b>	<b>0,93</b>	0,95
CRMB	2,48	1,88	1,68	116,11	93,85	69,54	<b>0,76</b>	<b>0,68</b>	0,81
LDPE	2,82	1,99	1,82	168,79	93,59	99,24	<b>0,71</b>	<b>0,65</b>	0,55
PMB RC	2,67	2,55	2,41	97,97	125,03	106,78	<b>0,96</b>	<b>0,91</b>	1,28
70/100 ref.	3,20	2,05	2,14	124,42	73,61	70,93	<b>0,64</b>	<b>0,67</b>	0,59
50/70 ref.	3,05	2,43	2,19	172,18	128,30	93,02	<b>0,80</b>	<b>0,72</b>	0,75

Tab. 4 – Hodnoty pevnosti v příčném tahu, modulu pružnosti a odolnosti vůči vodě a mrazu



Graf 7 – Porovnání hodnot odolnosti vůči vodě a mrazu s využitím ukazatele  $ITSR_{EN}$  a  $ITSR_{AASHTO}$

Z výsledků je mj. patrné, že varianty s vyšší koncentrací rejuvenátoru vykazují snížení odolnosti vůči namáhání v příčném tahu, a především snížení ukazatele ITSR. To lze chápat jako jistou nevýhodu, protože např. u modulu tuhosti většinou dochází při vyšších koncentracích rejuvenátoru ke zlepšení vlastností směsi. Na druhou stranu je zde nižší pevnost v příčném tahu logická, protože evidentně dochází ke změkčení degradovaného asfaltu v R-materiálu.

Norma ČSN 73 6121 uvádí požadavek na minimální poměr pevnosti v příčném tahu (ITSR) pro asfaltovou směs typu ACL 16+ min. 70 %. Jak je vidět z příloženého grafu (viz výše), tento limit nespĺňují referenční směs 70/100 a dále varianta s rejuvenátorem Viatop RC v koncentraci 6 %. Naopak velmi dobře si v tomto ohledu vedly varianty s rejuvenátorem Sylvaroad (v koncentraci 6 %), s AV rejuvenátorem „A“, RAPfix, ACF (v koncentraci 7 %), ENVI a také směs s modifikovaným asfaltovým pojivem PMB RC. Ve všech zmíněných případech dosahoval poměr ITSR hodnoty přes 90 %. To indikuje velmi malou náchylnost těchto variant k ovlivnění působením vody nebo mrazu, a tedy předpoklad dlouhodobé trvanlivosti směsi v konstrukci vozovky.

## 6.4 MODULY TUHOSTI

Níže uvedené grafy ukazují změny a trendy v hodnotách modulu tuhosti u nezestárnutých i zestárnutých zkušebních těles. Hodnoty modulu tuhosti nezestárnutých těles při základní zkušební teplotě 15 °C u všech sledovaných variant jsou uvedeny v prvním souhrnném grafu. V následujících grafech jsou barevně odlišeny výsledky jednotlivých variant asfaltové směsi při různých zkušebních teplotách.

Dle předpokladů by měla hodnota modulu tuhosti klesat se zvyšujícím se podílem rejuvenátoru. Tento předpoklad se projevil především u rejuvenátorů Sylvaroad a ACF.



#### 6.4.1 Asfaltová směs ACL 16+ s 50 % R-materiálu – nezestárnutá tělesa

V České republice je minimální hodnota modulu tuhosti z hlediska potřeb pro dimenzování vozovek (dle TP 170) pro směsi ACL+ při teplotě 15 °C 7500 MPa. [39] Tuto hodnotu překonaly mnohdy se značnou rezervou všechny varianty zkoumané asfaltové směsi.

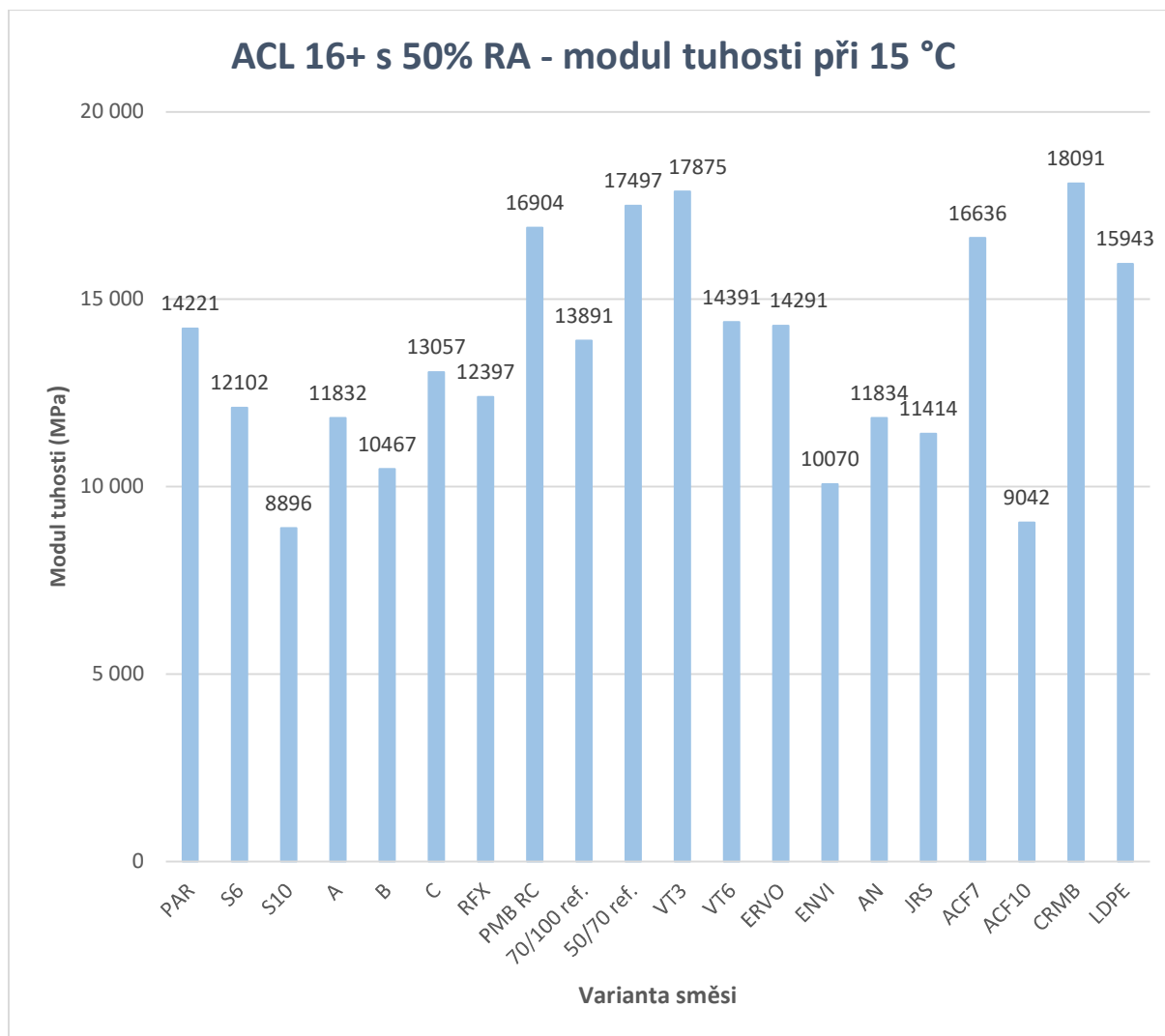
Při základní zkušební teplotě 15 °C došlo k největšímu poklesu tuhosti vůči referenčním směsím u varianty s 10 % koncentrací rejuvenátorů ACF a Sylvaroad a dále u rejuvenátoru ENVI. Naopak přidání rejuvenátoru Viatop RC v koncentraci 3 % se na tuhosti směsi v podstatě neprojevovalo a v porovnání s referenční směsí 70/100 došlo dokonce k nárůstu tuhosti o téměř 29 %. Tento fakt nelze na tomto místě ještě kvalifikovat jako nedostatek, nebo naopak výhodu, protože je třeba ho vnímat v souvislostech minimálně s hodnotami ITSR a výsledky zkoušky stanovení odolnosti proti šíření trhliny.

Zkoušky při teplotě 0 °C přinesly obdobné výsledky. Největší pokles byl zaznamenán u varianty s rejuvenátorem ENVI (vůči referenční směsi 50/70 se jedná o pokles o více jak 46 %). Rovněž varianty s 10 % rejuvenátoru Sylvaroad a ACF dosáhly podobných výsledků. Varianty s nižší koncentrací rejuvenátoru (3 % Viatop RC, resp. 7 % ACF) opět nevykázaly žádnou podstatnou změnu v modulu tuhosti.

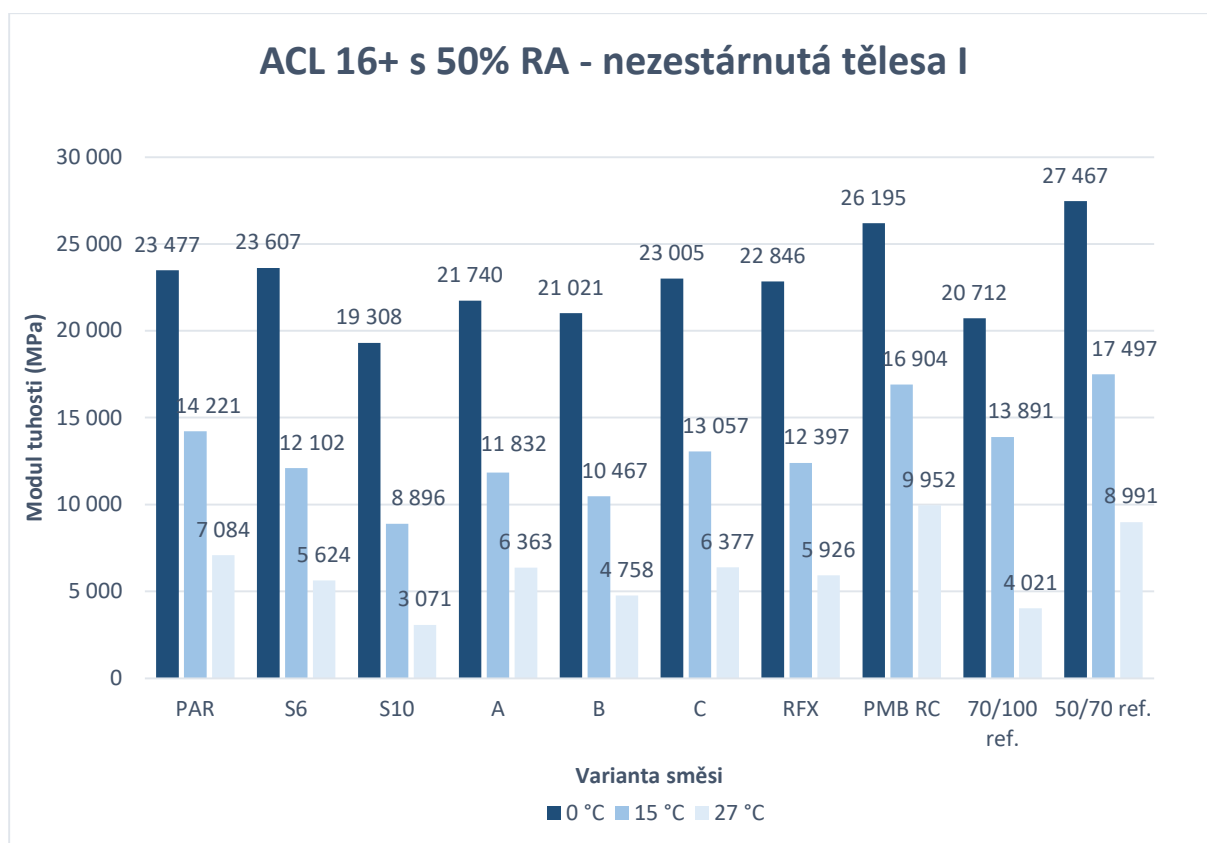
Měření modulu tuhosti při 27 °C víceméně potvrdilo trend z předchozích měření. Opět bylo dosaženo velmi výrazného poklesu tuhosti (až o polovinu) u rejuvenátorů ACF, Sylvaroad (v koncentraci 10 %) a ENVI. U varianty s 3 % koncentrací rejuvenátoru Viatop RC opět nebyla zaznamenána výraznější změna modulu tuhosti.

Varianty bez rejuvenátoru žádný významný pokles tuhosti nevykázaly. Pouze u varianty s pojivem 70/100 byly naměřeny hodnoty o 33–56 % menší v porovnání s variantou s pojivem 50/70, což lze předpokládat, neboť byl použit měkčí asfalt. U variant s modifikovaným pojivem (CRMB a PMB RC) došlo dokonce při teplotě 27 °C k nárůstu tuhosti vůči referenční směsi 50/70 o 12,4 %, resp. 10,7 %. Mírný nárůst modulu tuhosti oproti směsi s asfaltovým pojivem 50/70 byl u varianty s jemně namletou pryží (CRMB) zaznamenán i při zkušební teplotě 15 °C, kdy činil necelá 4 %. Zde je potom důležité nahlížet na celkový vývoj hodnot modulu tuhosti i skrze hodnotu teplotní citlivosti. Porovnáme-li např. dvě asfaltové směsi, které budou mít obdobné hodnoty při 15 °C a při 0 °C, avšak jedna bude mít vyšší hodnotu tuhosti při teplotě 27 °C, indikuje takový výsledek skutečnost, že tato směs bude méně teplotně citlivá. To může z hlediska provozních podmínek představovat výhodu.

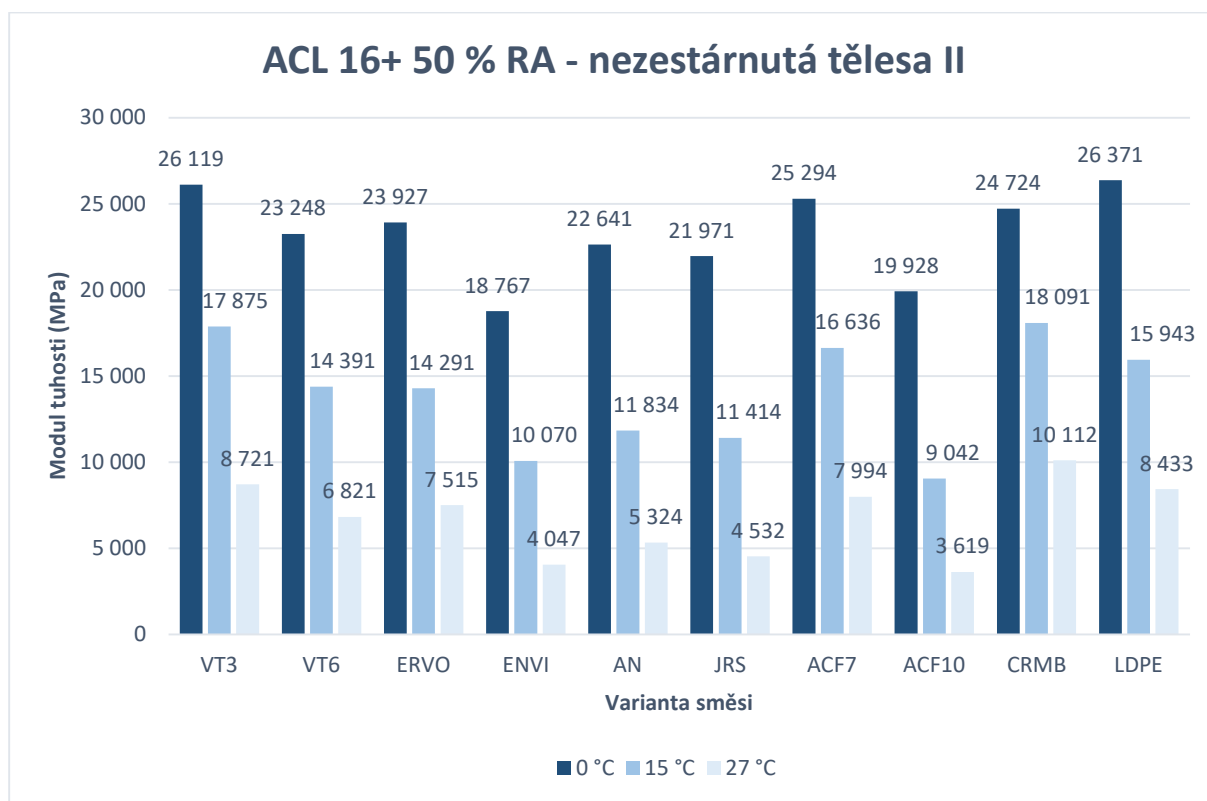




Graf 8 – Moduly tuhosti měřené na nezestárnutých Marshallových tělesech při 15 °C



Graf 9a – Moduly tuhosti měřené na nezestárnutých Marshallových tělesech při všech zkušebních teplotách (1. část)



Graf 9b – Moduly tuhosti měřené na nezestárnutých Marshallových tělesech při všech zkušebních teplotách (2. část)

Na základě naměřených údajů byla sestavena následující tabulka, ve které je uvedena teplotní citlivost pro jednotlivé varianty asfaltové směsi ACL 16+ s 50 % RA. Tento ukazatel udává poměr mezi modulem tuhosti při 0 °C a při 27 °C. Pokud se blíží hodnotě 1,0, lze konstatovat, že asfaltová směs je jen velmi málo citlivá na změny teploty. Jelikož se hodnoty vždy pohybují nad hodnotou 1,0, udává tento ukazatel míru citlivosti ke změnám chování asfaltové směsi v závislosti na změně teploty. Čím je poměrový ukazatel vyšší, tím je samozřejmě z hlediska sledované deformační charakteristiky citlivější i samotná asfaltová směs.

Nejvyšší teplotní citlivost byla naměřena u variant s vyšším podílem rejuvenátoru (Sylvaroad a ACF v množství 10 %) a dále u referenční směsi s měkčím silničním asfaltem 70/100. Z toho lze usuzovat, že změkčení asfaltového pojiva může vést k vyšší teplotní citlivosti asfaltové směsi, což může přínos rejuvenátoru do jisté míry omezit. Nejnižší hodnoty teplotní citlivosti byly pak zaznamenány u varianty s přísadou ERVO, 7 % rejuvenátoru ACF a 3 % přísady Viatop RC. U variant bez rejuvenátoru byly dosaženo ještě nižších hodnot oproti variantám s rejuvenátory (tj. menších, než 3,0). Týkalo se to variant s asfaltem modifikovaným mletou pryží (CRMB) a polymerem modifikovaným asfaltem (PMB 25/55 RC).

Varianta směsi	Teplotní citlivost (-)	Varianta směsi	Teplotní citlivost (-)
PAR	3,31	VT3	3,00
S6	4,20	VT6	3,41
S10	6,29	ERVO	3,18
A	3,42	ENVI	4,64
B	4,42	AN	4,25
C	3,61	JRS	4,85
RFX	3,86	CRMB	2,45
ACF7	3,16	LDPE	3,13
ACF10	5,51	PMB RC	2,63
50/70 ref.	3,05	70/100 ref.	5,15

Tab. 5 – Teplotní citlivost u jednotlivých variant asfaltové směsi

#### 6.4.2 Asfaltová směs ACL 16+ s 50 % R-materiálu – zestárnutá tělesa

U zestárnutých těles lze pozorovat oproti referenční směsi většinou zvýšení modulu tuhosti. Toto zvýšení je u jednotlivých variant asfaltové směsi různé.

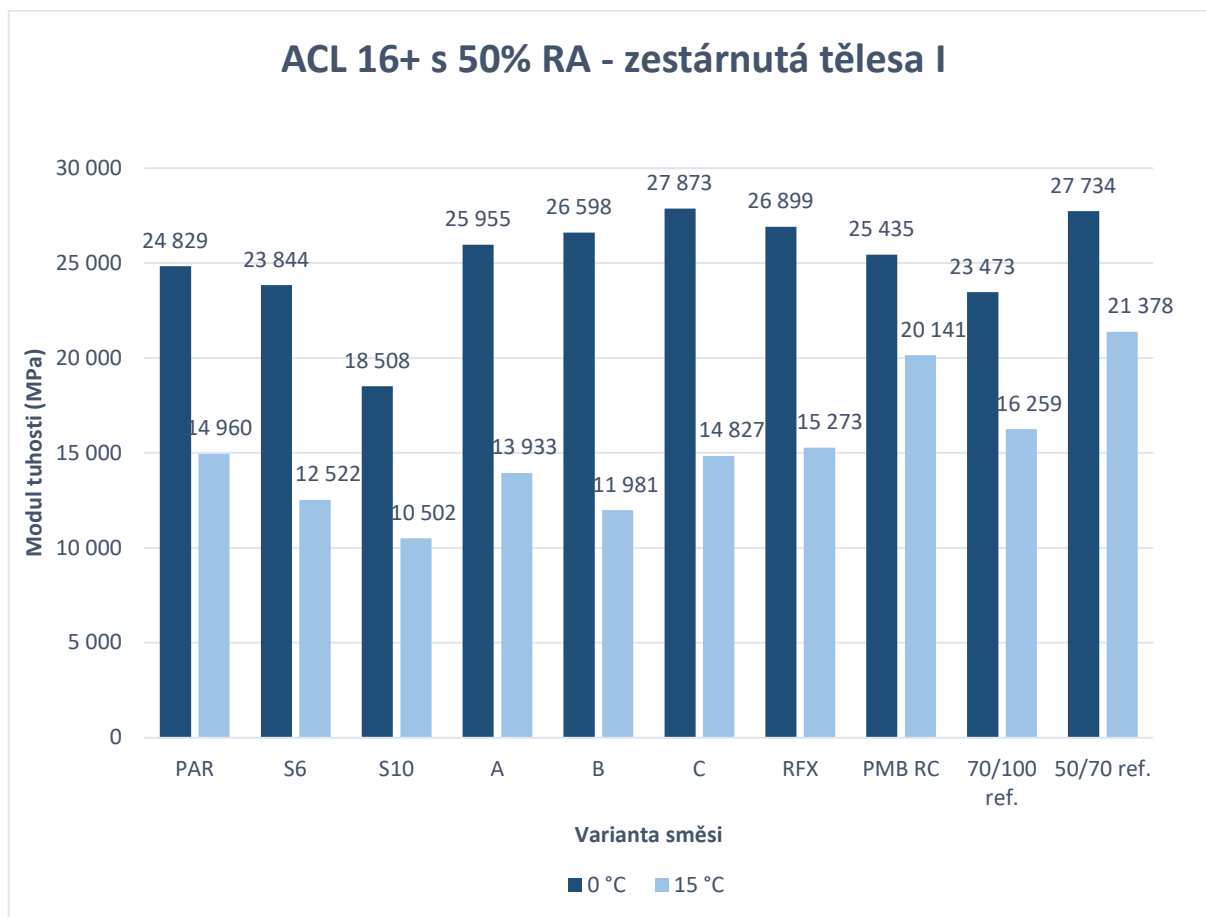
Ze zkoumaných variant vykazovaly největší odolnost vůči vlivu stárnutí při obou zkušebních teplotách (0 °C a 15 °C) varianty s rejuvenátorem REJU 182, Sylvaroad a ERVO. Ve všech těchto případech byl index stárnutí pod hodnotou 1,10.

Naopak u variant s AV rejuvenátory „A“, „B“, „C“ a RAPFix došlo k výraznému nárůstu tuhosti při obou zkušebních teplotách (v případě AV rejuvenátoru „B“ činil nárůst až 27 %). To je poměrně zásadní informace, protože nárůst tuhosti představuje do budoucna zvýšené riziko vzniku a propagace únavových a mrazových trhlin.

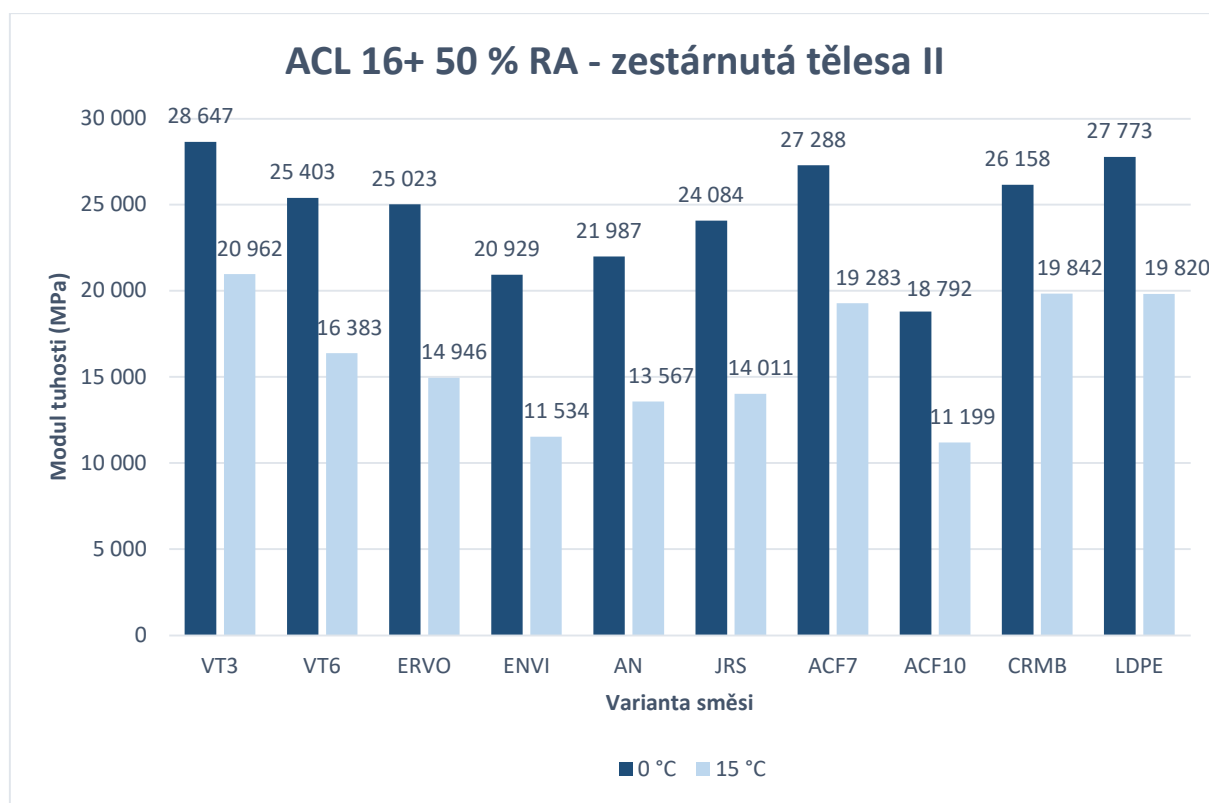
Jakou určitou zajímavost lze uvést fakt, že varianty s rejuvenátory ACF a Sylvaroad v koncentraci 10 % vykázaly při teplotě 0 °C mírný pokles hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých těles. Tento pokles činil 6 %, resp. 4 %. To je poměrně překvapivé a neodpovídá to většinovému trendu. Nicméně příčinou může být mj. i fakt, že byla zkoušena pouze 3 tělesa od každé varianty a odchylka je celkem

nížká, takže mohla vzniknout nepřesností měření. Každopádně to však poukazuje na dobrou odolnost těchto variant vůči stárnutí (což lze částečně předpokládat s ohledem na výsledky varianty se 6 % rejuvenátoru Sylvaroad). Při zkušební teplotě 15 °C došlo naopak k výraznému nárůstu tuhosti v porovnání s nezestárnutými tělesy o 18-24 %.

U variant směsi bez rejuvenátoru byl největší nárůst tuhosti naměřen u varianty s nízkou hustotním polyethylenem (LDPE) a referenční směsi 50/70 při teplotě 15 °C. Naopak při zkušební teplotě 0 °C byl nárůst minimální. To lze s opatrností interpretovat i jako fakt, že zde tuhost dosáhla již takové hodnoty (27 GPa), že stárnutím nedochází v oboru nízkých teplot k dalšímu výraznému zvyšování její hodnoty.



Graf 10a – Moduly tuhosti měřené na zestárnutých Marshallových tělesech (1. část)

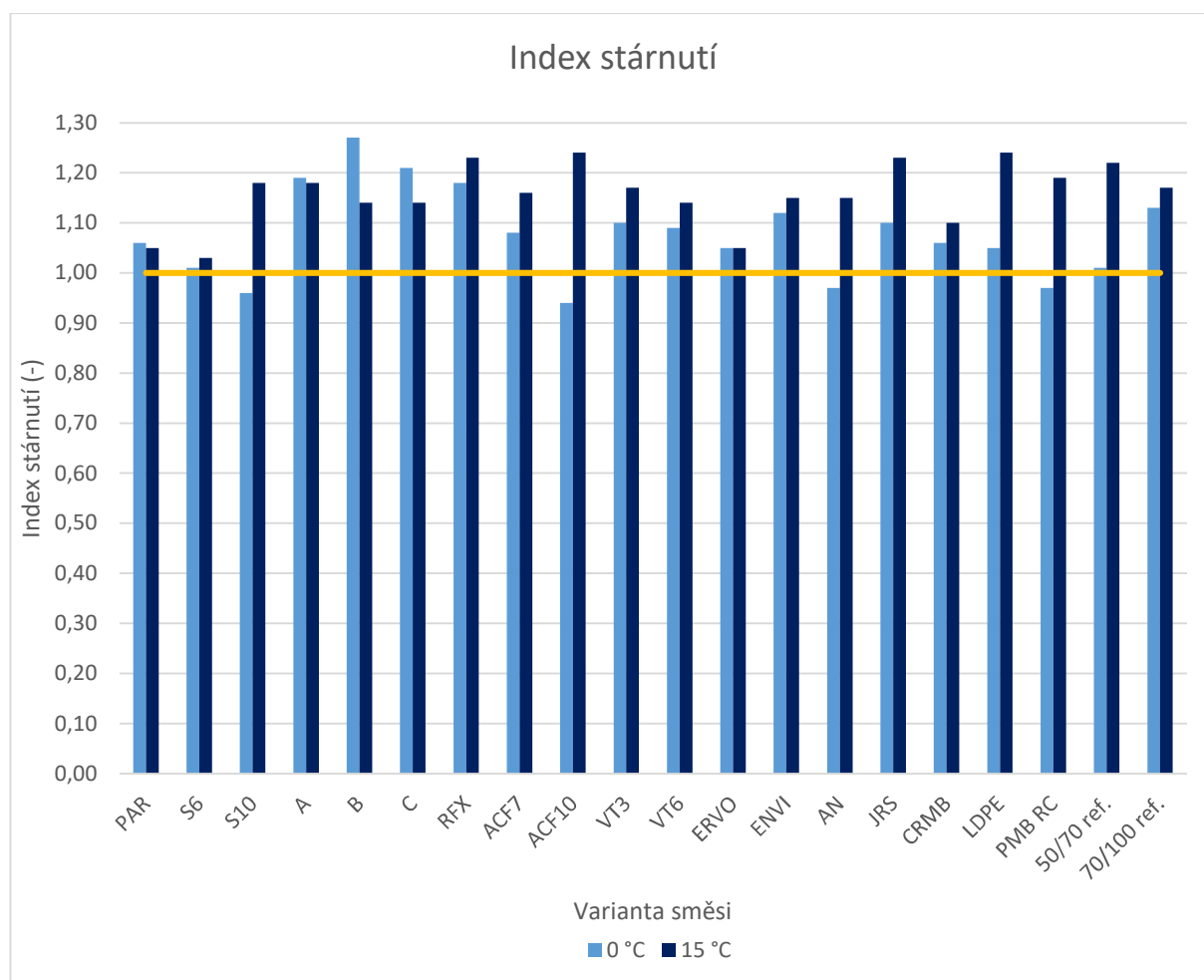


Graf 10b – Moduly tuhosti měřené na zestárnutých Marshallových tělesech (2. část)

Z naměřených dat byl pak dále určen index stárnutí, což je poměr hodnoty modulu tuhosti zestárnutého a nezestárnutého tělesa asfaltové směsi při konkrétní teplotě stanovení tuhosti. U většiny těles byla tato hodnota vyšší než 1,0, což ukazuje na nárůst tuhosti směsi během jejího stárnutí. Oproti nezestárnutým tělesům, byla tělesa po zestárnutí zkoušena pouze při teplotách 0 °C a 15 °C.

Největší odolnost vůči stárnutí v tomto ohledu vykazovalo několik variant. Velmi dobrá odolnost při obou zkušebních teplotách byla zaznamenána u varianty se 6 % rejuvenátoru Sylvaroad, dále s rejuvenátorem REJU 182 a s přísadou z depolymerizačního oleje ERVO. U variant s rejuvenátorem Viatop RC a 7 % ACF byla odolnost dobrá pouze při 0 °C a při 15 °C se mírně zhoršila (přibližně o 5-7 % oproti zkušební teplotě 0 °C). Z variant bez přidaného rejuvenátoru nejlépe vycházela směs s mletou pryží, která má dle získaných výsledků dobrou odolnost vůči stárnutí při obou zkušebních teplotách. Ostatní varianty bez rejuvenátoru vykazovaly lepší odolnost vůči stárnutí při teplotě 0 °C.

Jako určitou zajímavost lze uvést fakt, že u některých variant dosáhl index stárnutí hodnoty <1,0, tzn. u dané asfaltové směsi a při dané zkušební teplotě došlo v průběhu času ke snížení tuhosti. Jednalo se o varianty s 10 % Sylvaroad, s 10 % ACF, s rejuvenátorem Anova a referenční variantu s PMB 25/55 RC, které je určené pro asfaltové směsi se zvýšeným obsahem RA.



Graf 11 – Index stárnutí jednotlivých variant asfaltové směsi při 0 °C a 15 °C

## 6.5 ODOLNOST VŮČI ŠÍŘENÍ TRHLINY

Při návrhu asfaltové směsi je většinou kladen důraz pouze na zrnitost, obsah asfaltového pojiva, mezerovitost a případně ještě na odolnost vůči účinkům vody a trvalé deformaci – tzv. vyjíždění kolejí (to platí v případě návrhu asfaltových směsí pro vyšší dopravní zatížení). Mnohdy jsou tak zcela opomíjeny nízkoteplotní vlastnosti asfaltových směsí. Je to přitom velmi důležitý parametr a v rámci České republiky by měl být vždy nedílnou součástí návrhu, protože v ČR se během zimních měsíců pohybují průměrné teploty relativně výrazně pod bodem mrazu. To vede k poškození mrazovými trhlinami. Tyto poruchy následně představují slabé místo v konstrukci vozovky, kterými může do souvrství pronikat voda a způsobit tak rapidní rozvoj poškození.

Při vyhodnocování dat ze zkoušky měření odolnosti proti šíření trhliny byla důležitá především hodnota lomové houževnatosti (která byla určena na základě maximální naměřené síly  $F_{max}$  a tomuto odpovídajícího maximálního přetvoření  $\delta_{max}$ ). Zjednodušeně lze říci, že narůstající hodnota lomové houževnatosti (tzn. mj. vyšší hodnota  $F_{max}$ ) dává předpoklad pro lepší odolnost asfaltové směsi. Hodnota lomové houževnatosti byla stanovena na základě postupu uvedeného v normě ČSN 12697-44 2019. [10]

Dalším důležitým parametrem, který byl při zkoušení sledován, je hodnota lomové energie. Evropská norma vyžaduje hodnotu lomové energie pouze do dosažení hodnoty  $F_{max}$  (tj. okamžik iniciace trhliny). V této práci byla nicméně rovněž sledována celková lomová energie, tj. i včetně

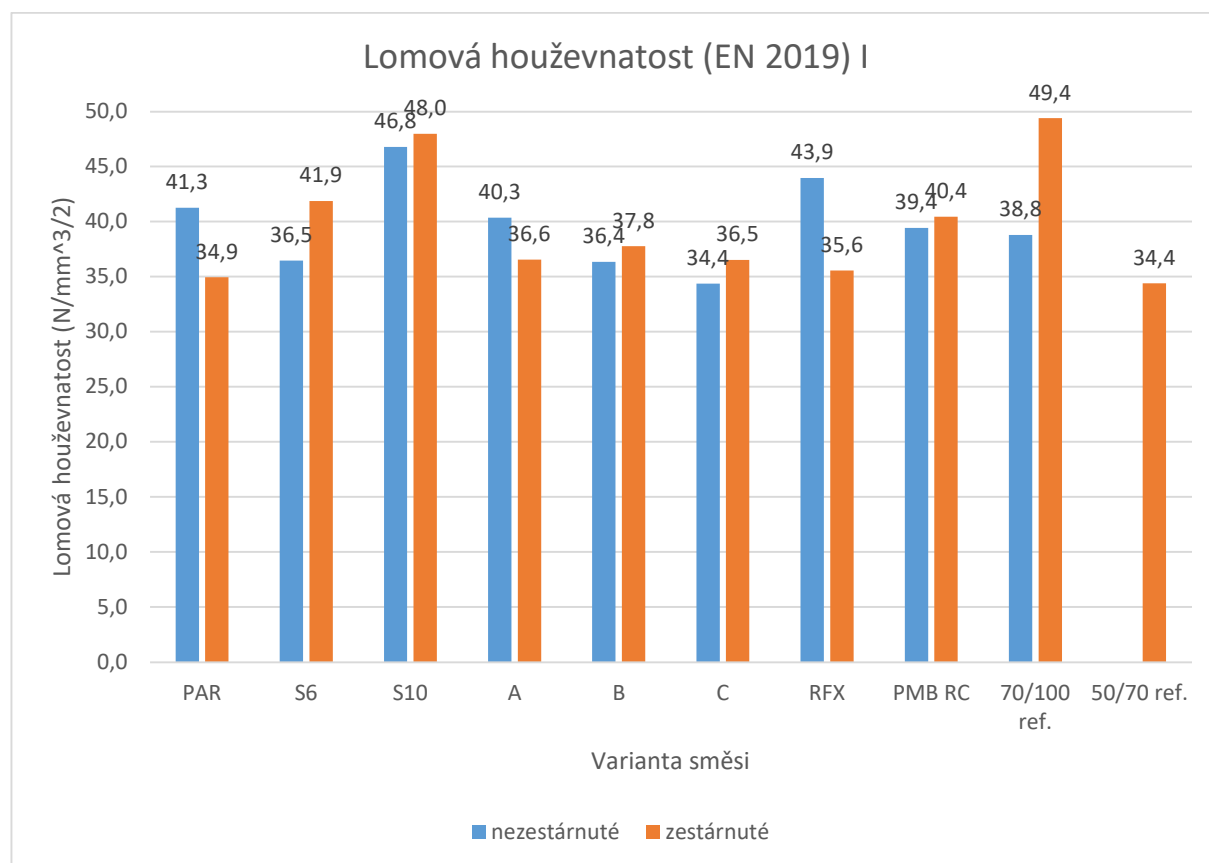
odtěžovací části křivky zatěžování (do okamžiku úplné propagace trhliny, kdy síla působící na těleso poklesla na hodnotu 0,3 kN) a to v souladu s [44]. Sledované hodnoty byly měřeny na nezestárnutých a na zestárnutých tělesech a následně byl u všech sledovaných veličin stanoven index stárnutí, jako poměr těchto dvou hodnot. Opět platí, že pokud se blíží hodnotě 1,0, lze konstatovat, že asfaltová směs je jen velmi málo citlivá na změny v důsledku stárnutí. Na základě toho lze pak usuzovat na větší trvanlivost dané asfaltové směsi. Nicméně je třeba k takovému postupu přistupovat obezřetně, protože popsaná metoda laboratorního stárnutí a následné zkoušení nemůže nahradit standardizovanou únavovou zkoušku.

Níže uvedené grafy zobrazují výsledky lomové houževnatosti a lomové energie (zvláště pro celkovou lomovou energii a pro lomovou energii pouze do dosažení maximální síly  $F_{max}$ ) u jednotlivých variant asfaltové směsi. Vedle sebe jsou vždy porovnány výsledky nezestárnutých a zestárnutých zkušebních těles. Veškeré uvedené hodnoty byly naměřeny při zkušební teplotě 0 °C. Bohužel v průběhu měření došlo ke ztrátě některých údajů u referenční směsi 50/70 a směsi CRMB.

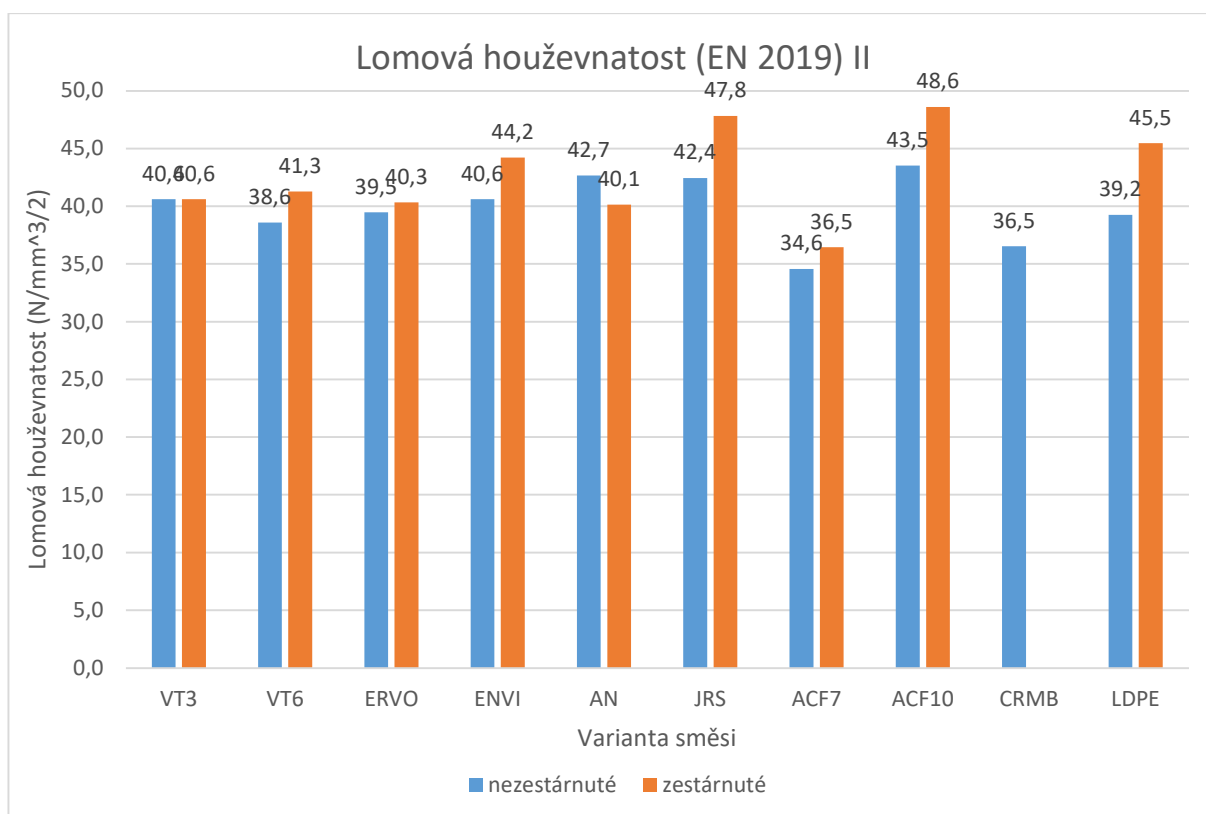
### 6.5.1 Lomová houževnatost

U variant s rejuvenátory bylo nejslibnějších výsledků dosaženo u variant s vyšším dávkováním rejuvenátoru ACF a Sylvaroad a také u varianty s oživovací přísadou JRS. Oproti referenční variantě 50/70 zde byl zaznamenán u zestárnutých těles nárůst až o téměř 40 %.

Rovněž je velice dobře vidět trend pozitivního vlivu přidání vyšší množství rejuvenační přísady do asfaltové směsi. To se zcela jasně prokázalo u rejuvenátorů Sylvaroad a ACF, kdy vyšší množství přísady znamenalo nárůst hodnot o více jak 25 % u nezestárnutých těles a o 15 %, resp. 33 % u těles podrobených laboratornímu stárnutí. Naopak u přísady Viatop RC se tento trend nepotvrdil a hodnoty zůstaly prakticky stejné nebo došlo k mírnému snížení.



Graf 12a – Hodnoty lomové houževnatosti (1. část)



Graf 12b – Hodnoty lomové houževnatosti (2. část)

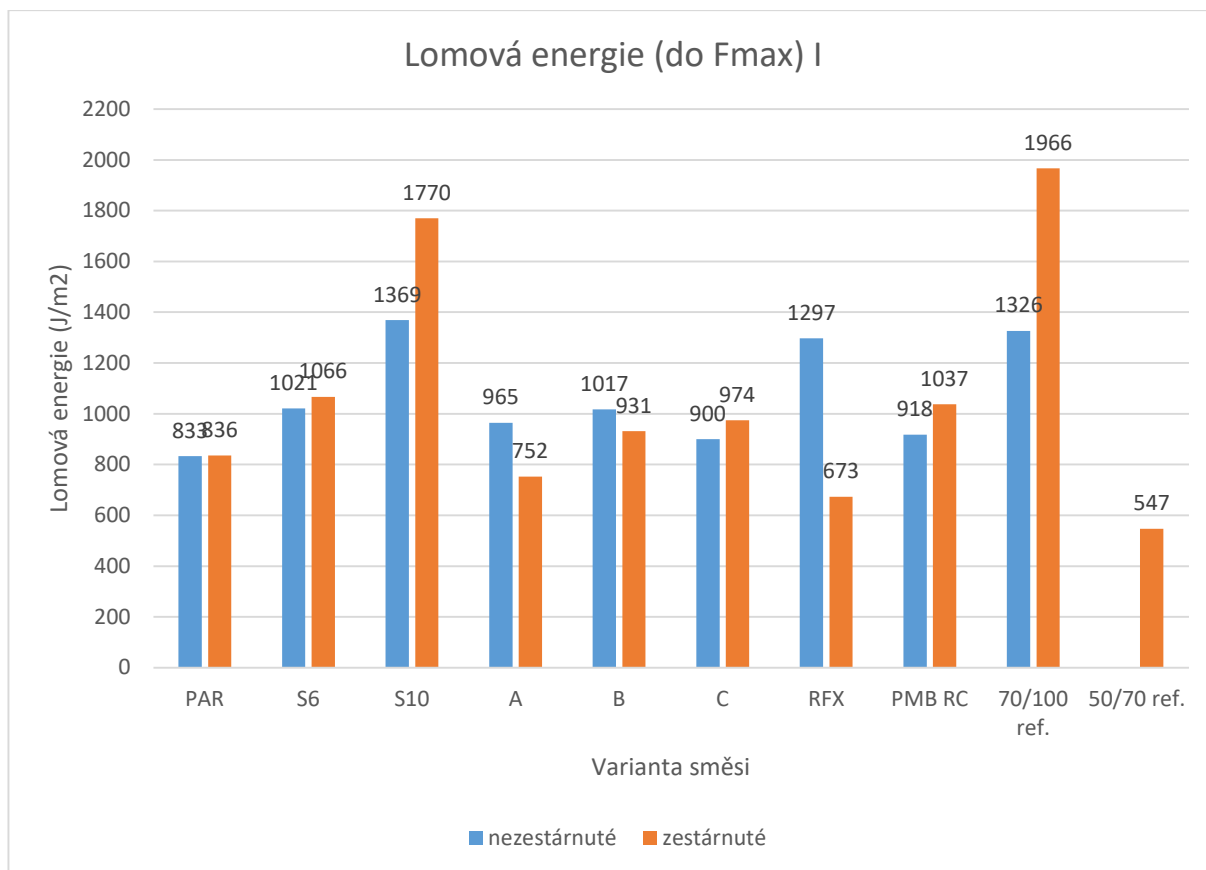
### 6.5.2 Lomová energie

Nejvyšší hodnoty lomové energie byly naměřeny u varianty s 10 % rejuvenátoru Sylvaroad. Toto se týkalo jak hodnoty lomové energie do dosažení maximální zatěžovací síly  $F_{max}$ , tak i celkové hodnoty lomové energie. Poměrně překvapivé byly výsledky u měkčího silničního asfaltu 70/100. Při použití tohoto pojiva bylo dosaženo nejvyšších hodnot ze všech posuzovaných variant.

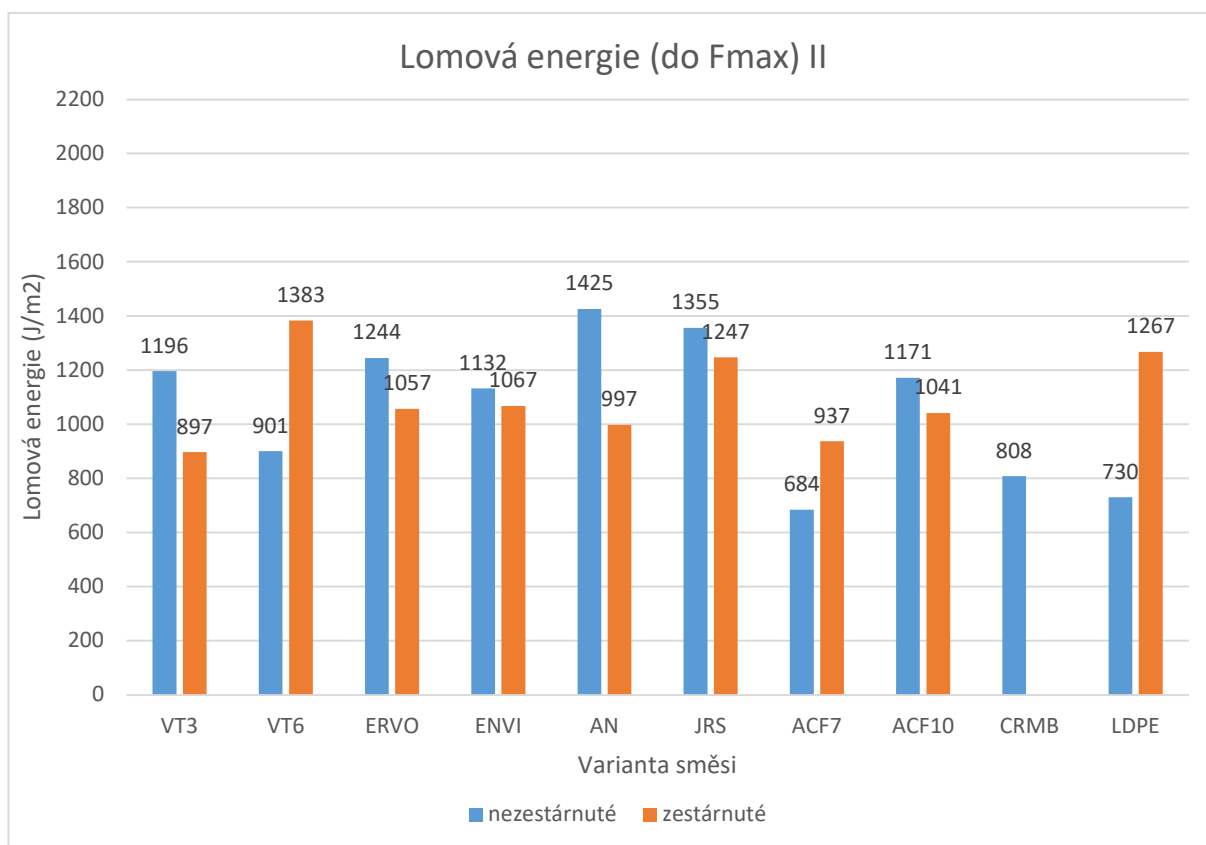
I v tomto případě se u rejuvenátorů Sylvaroad a ACF potvrdil trend, že vyšší množství oživovací přísady se projeví výrazným nárůstem energetických hodnot. U rejuvenátoru Sylvaroad došlo k nejvyššímu nárůstu u zestárnutých těles (až o 66 %). Naopak u přísady ACF byl největší nárůst (až o 83 %) u nezestárnutých těles a u zestárnutých těles činil pouze necelých 11 %. Navíc u přísady ACF v množství 10 % došlo u zestárnutých těles k poklesu hodnot. Z toho lze vyvodit, že rejuvenační účinek se pravděpodobně postupem času vytrácí. U přísady Viatop RC došlo k poklesu energetických hodnot pouze u varianty s nižším dávkováním (tj. 3 %). Naopak při vyšším dávkování (6 %) došlo po zestárnutí k nárůstu hodnot až o téměř 54 %. U této přísady tak nastává jistý paradox, protože vyšší dávkování pojiva se sice u nezestárnutých těles projeví nižší počáteční hodnotou lomové energie, ale po zestárnutí jsou hodnoty naopak výrazně vyšší než u varianty s nižším dávkováním.

Zajímavé je rovněž srovnání hodnot do dosažení maximální síly  $F_{max}$  a celkové hodnoty lomové energie. Pokud jsou totiž tyto dvě hodnoty přibližně stejné, indikuje to riziko okamžitého kolapsu po dosažení maximální síly. Pokud je naopak hodnota celkové lomové energie výrazně vyšší, ukazuje to, že i po vzniku trhliny může asfaltová vrstva stále ještě přenášet zatížení. Velmi dobře je to vidět u AV rejuvenátoru „B“ a rejuvenátoru Anova, kde je hodnota celkové lomové energie u nezestárnutých těles oproti hodnotě do dosažení  $F_{max}$  vyšší o 36 % resp. o 28 %. Naproti tomu u varianty s 6 % rejuvenátoru Sylvaroad nebo 3 % rejuvenátoru Viatop RC je nárůst výrazně nižší.

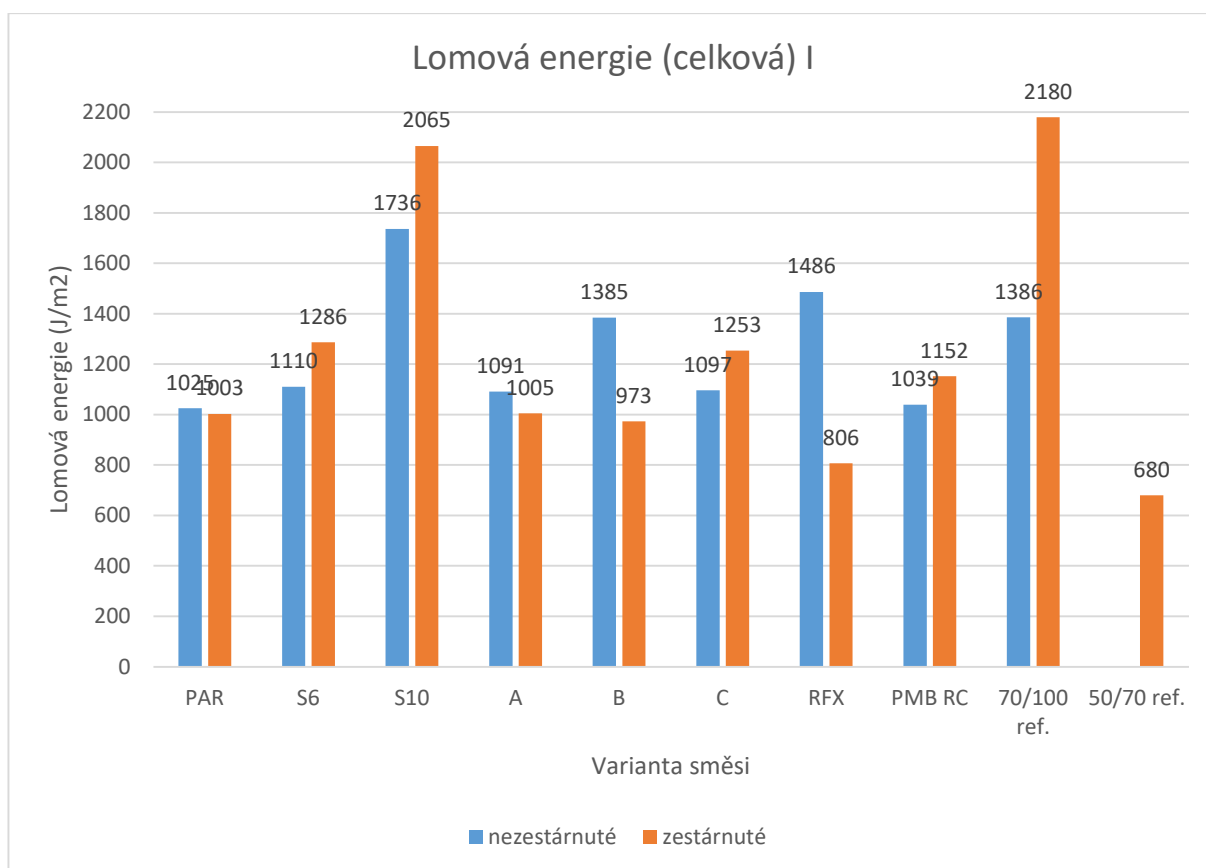




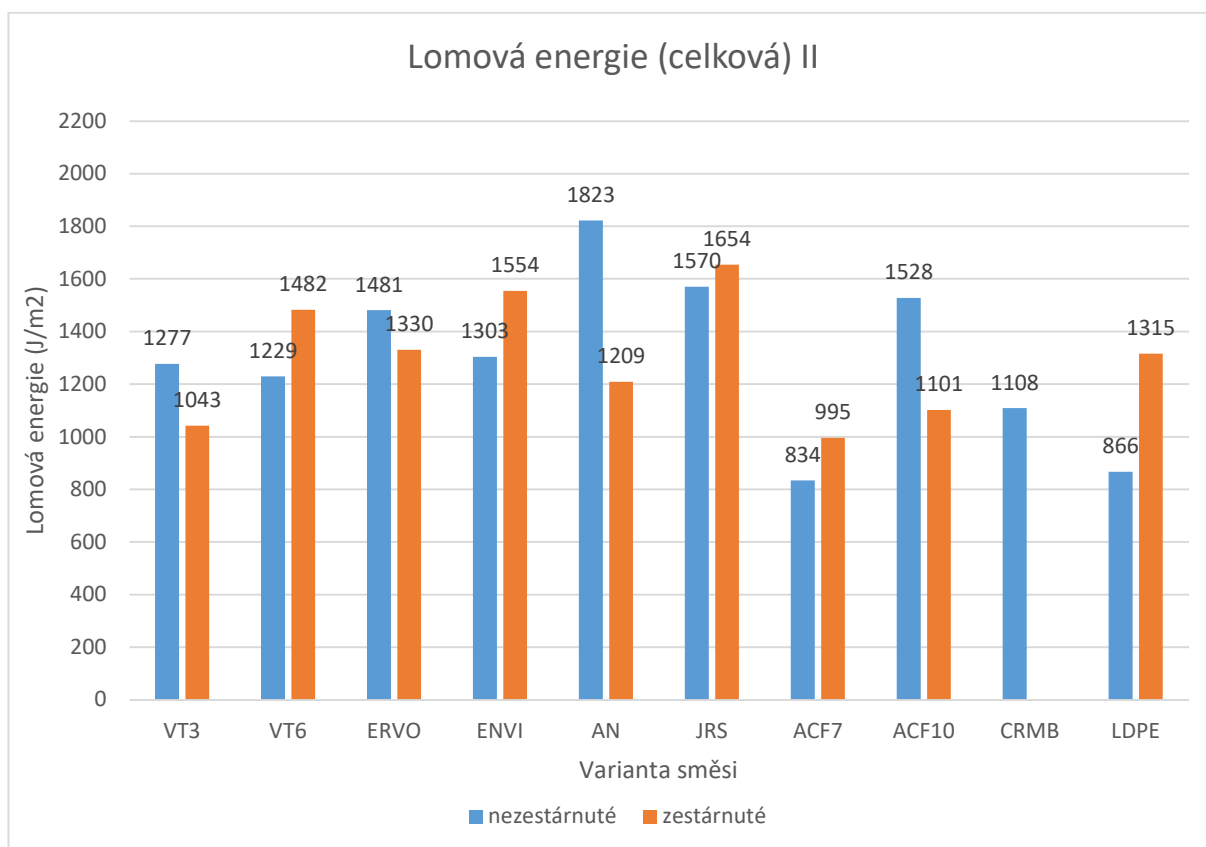
Graf 13a – Hodnoty lomové energie do dosažení hodnoty  $F_{max}$  (1. část)



Graf 13b – Hodnoty lomové energie do dosažení hodnoty  $F_{max}$  (2. část)



Graf 14a – Hodnoty celkové lomové energie (1. část)



Graf 14b – Hodnoty celkové lomové energie (2. část)

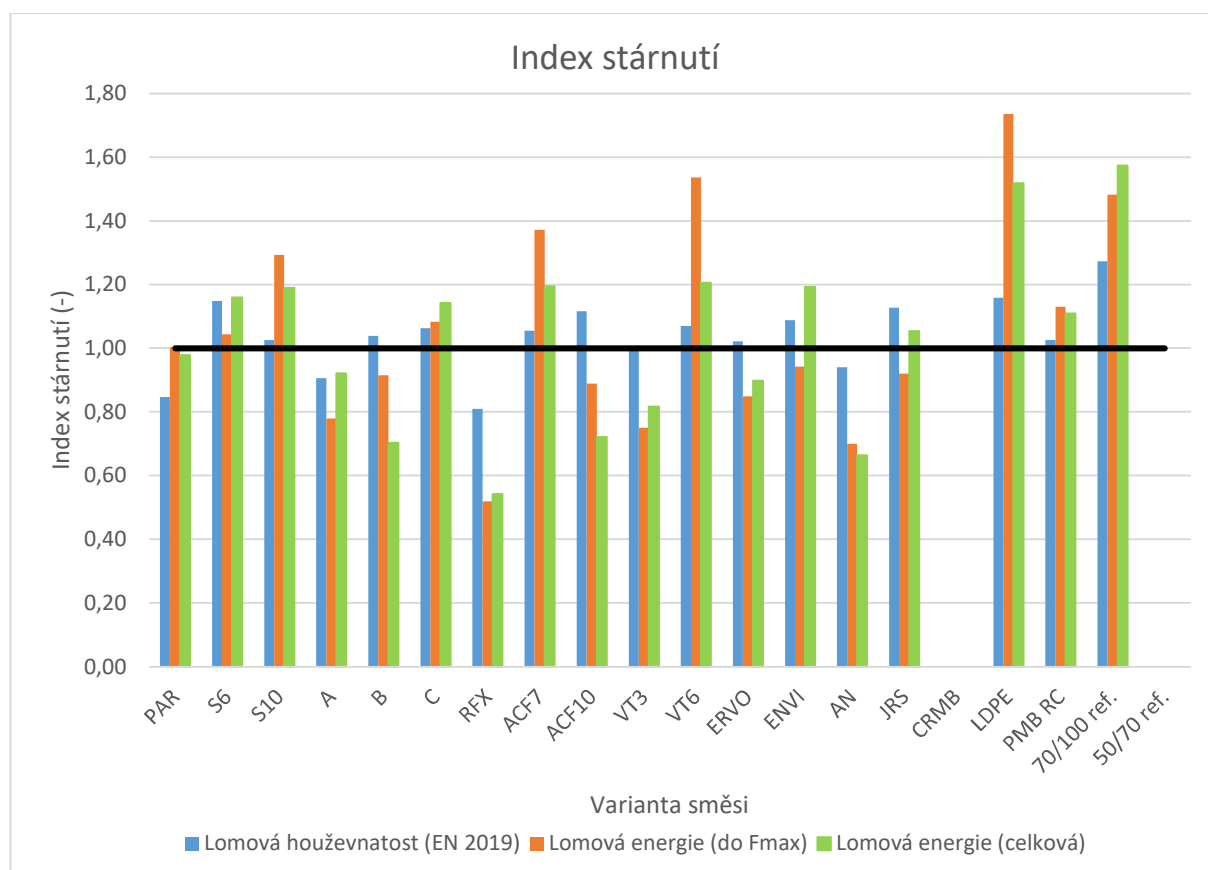


### 6.5.3 Index stárnutí

Dále je i v případě charakteristik v oboru nízkých teplot uveden graf, kde jsou porovnány jednotlivé hodnoty indexu stárnutí pro lomovou houževnatost a lomovou energii, a to u všech zkoumaných variant asfaltové směsi. Na rozdíl od hodnot modulu tuhosti, kde je zvýšení hodnot u zestárnutých těles nežádoucí, u lomové houževnatosti, a především lomové energie není takový nárůst na škodu. Naopak to značí zvýšenou odolnost posuzované varianty, protože to znamená, že k porušení tělesa je zapotřebí větší množství energie. Na základě toho lze předpokládat, že při použití v praxi by asfaltová vrstva s danou variantou asfaltové směsi přenesla větší dopravní zatížení, resp. měla by vykazat delší životnost.

U jednotlivých variant asfaltové směsi byl poměrně velký rozptyl hodnot. Prakticky beze změn se ukázaly varianta s rejuvenátorem Paramo REJU 182, s AV rejuvenátorem C, s rejuvenátorem ENVI a s rejuvenátorem Sylvaroad v množství 6 %, když se jejich výsledky blížily hodnotě 1,0. Naopak při použití rejuvenátoru RAPFix došlo k velmi významnému poklesu hodnot (u některých veličin téměř až o 50 %). Nejvýraznější nárůst byl zaznamenán u varianty s rejuvenátorem ACF (v množství 7 %), rejuvenátorem Sylvaroad (v množství 10 %) a rejuvenátorem Viatop RC (v množství 6 %). Ve všech případech se hodnota celkové lomové energie u zestárnutých těles zvýšila o cca 20 % a hodnota lomové energie do dosažení maximální síly  $F_{max}$  se zvýšila o 29-54 %. Hodnota lomové houževnatosti se u zmíněných variant naopak v čase příliš nezměnila.

U variant bez rejuvenátoru byl u pojiva s modifikační přísadou LDPE naměřen výrazný nárůst hodnoty lomové energie u zestárnutých těles (až o 74 %). To je poměrně překvapivé zjištění a naznačuje možnou vysokou odolnost dané varianty asfaltové směsi v průběhu celého životního cyklu, což je dle řady poznatků s používáním různých syntetických látek v minulosti překvapivé. V minulosti testované ataktické polypropyleny, polyetylen nebo plastomer EVA vykazovaly velmi dobré chování v případě tuhosti nebo odolnosti proti trvalé deformaci, ale měly nedostatky právě v oblasti odolnosti proti vzniku teplotně indukovaných trhlin. Naopak u varianty s polymerem modifikovaným pojivem PMB RC nedošlo po stárnutí k výrazným změnám hodnot. To je pozitivní přinejmenším v tom smyslu, že vlastnosti asfaltové směsi se v čase příliš nemění a při kvalitní pokládce je předpoklad, že přenesou projektované zatížení a bude mít dostatečnou životnost jen s pozvolným vlivem stárnutí asfaltového pojiva.



Graf 15 – Hodnoty indexu stárnutí u těles podrobených zkoušce odolnosti proti šíření trhliny

## 6.6 KOMPLEXNÍ DYNAMICKÝ MODUL TUHOSTI

Níže jsou uvedeny výsledky měření komplexního modulu tuhosti na zkušebních trámcích. Jsou uvedeny jednak grafy modulu tuhosti, tak dále i hodnoty úhlu fázového posunu v závislosti na zkušební frekvenci. Dále jsou uvedeny výsledky u zestárnutých trámků při zkušebních teplotách 10 °C a 20 °C.

U grafů zobrazujících závislost komplexního modulu na zkušební frekvenci je poměrně dobře vidět spojitý trend. Naopak u grafů s hodnotami úhlu fázového posunu jsou znatelné oblasti nespojitosti a grafy navíc nejsou příliš plynulé.

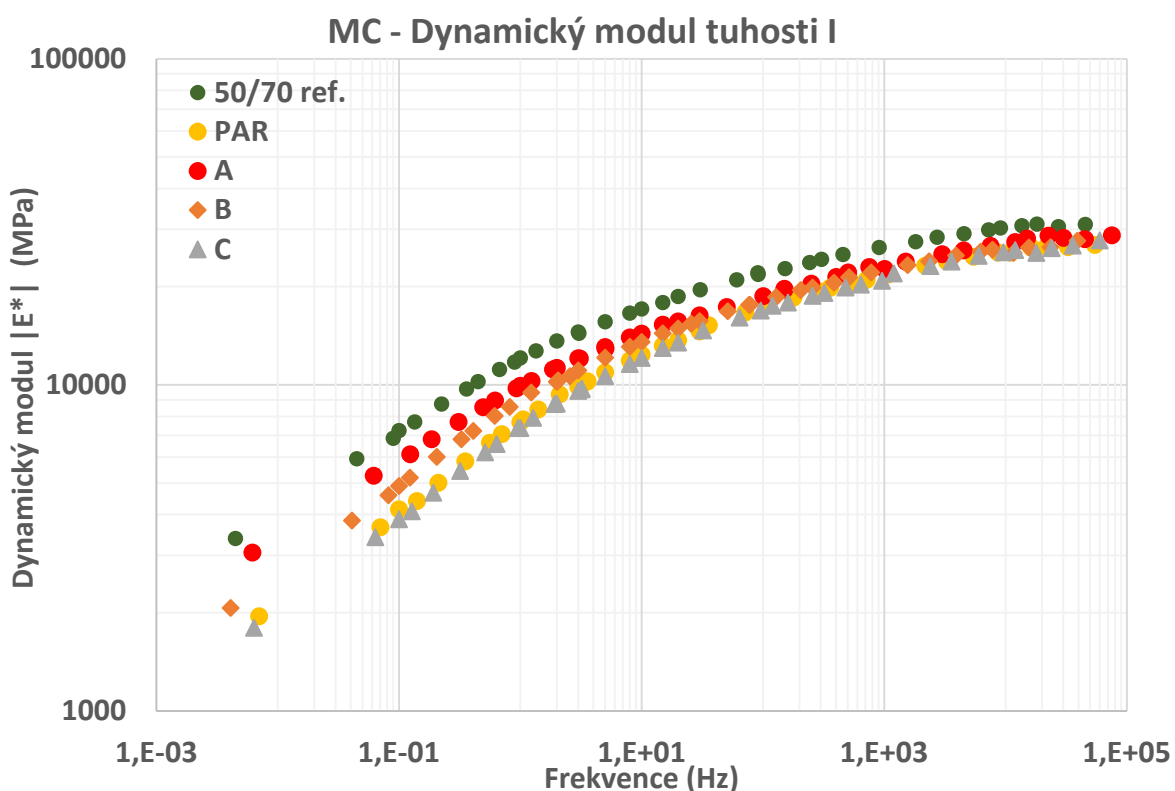
### 6.6.1 Master curve (řídící křivka) komplexního dynamického modulu tuhosti

Grafy níže zobrazují tzv. master curve (řídící křivky) pro závislost absolutní hodnoty dynamického modulu tuhosti na zkušební frekvenci. Hodnoty jsou uvedeny v logaritmickém měřítku. Zkušební trávky byly zkoušeny při zkušebních teplotách 0 °C, 10 °C, 20 °C a 30 °C. Výsledná křivka (master curve) je potom složená z hodnot stanovených při všech zkušebních teplotách, přičemž nízké frekvence odpovídají vyšším teplotám (naměřené hodnoty modulu tuhosti jsou nižší) a vysoké frekvence indikují zkoušku při nižší teplotě (vyšší hodnoty modulu tuhosti).

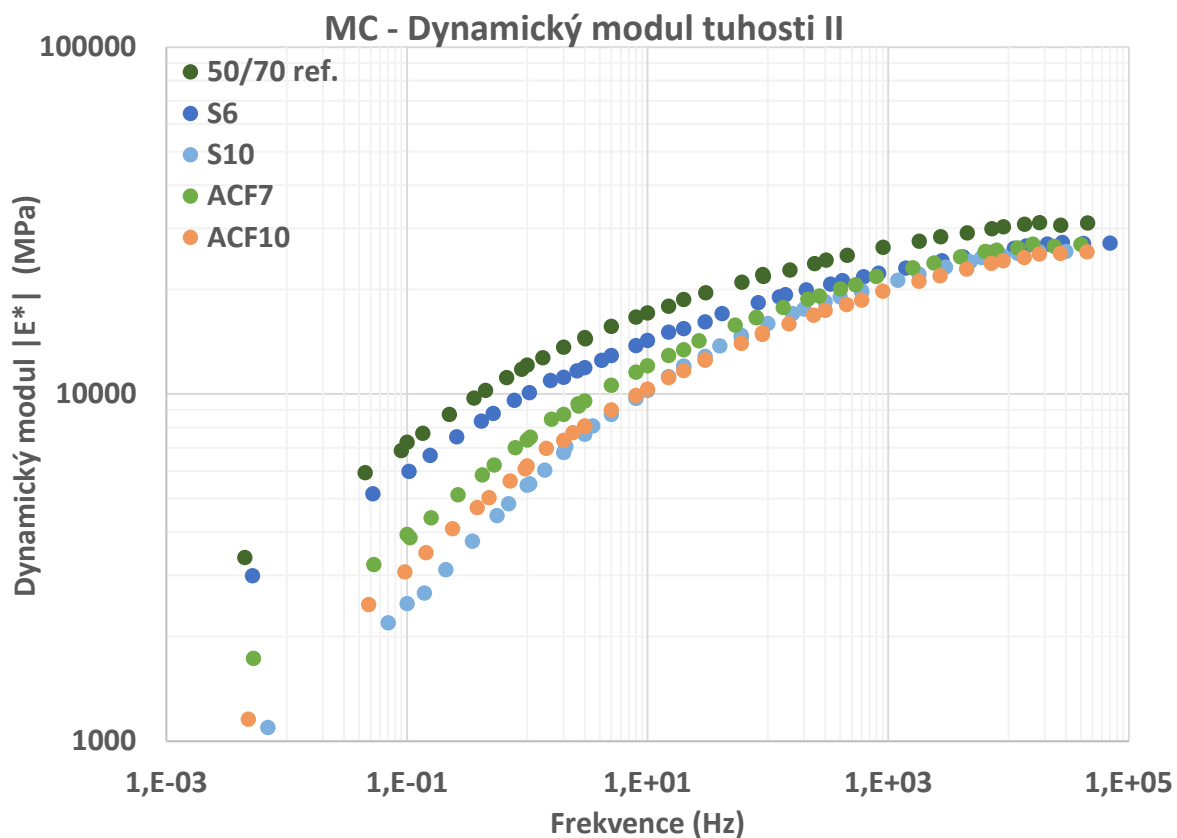
Na hodnotách v grafech 16b a 16d je opět dobře vidět pozitivní účinek vyššího dávkování rejuvenátoru na pokles tuhosti asfaltové směsi, pokud se varianty s rejuvenátory porovnají například s referenční variantou bez rejuvenátoru nebo měkčího silničního asfaltu. Výrazně se to projevilo u varianty s rejuvenátorem REJU 182 i ACF a v menší míře také u varianty s rejuvenátorem Viatop RC.

V grafu 16b je rovněž vidět rozdíl v působení většího množství rejuvenátoru. U přísad Sylvaroad i ACF sice došlo při vyšším množství dávkování ke snížení tuhosti, nicméně u varianty s rejuvenátorem ACF je patrný menší sklon směrnice řídicí křivky. To může znamenat, že tato varianta je méně náchylná na změny teploty. Podobné srovnání nabízí i graf 16e. Zde je mj. patrný mírný rozdíl mezi variantou CRMB a PMB RC. Obě varianty dosahují při vyšších zkušebních frekvencích podobných hodnot, ale při nižších frekvencích je u varianty s pojivem modifikovaným mletou pryží patrná jednak méně strmá směrnice a také mírně vyšší hodnoty tuhosti. Z toho lze opět s opatrností usuzovat, že tato varianta je teoreticky méně náchylná ke změnám teplot. Podobně lze ohodnotit i variantu s měkčím silničním asfaltem 70/100, kdy poměrně strmá směrnice indikuje možnou výraznou možnost ovlivnění vlastností změnou teploty. V grafu je 16d je rovněž patrný výrazný sklon směrnice u varianty s rejuvenátorem Anova, což může opět naznačovat vyšší citlivost vůči změnám teploty. V grafu 16e je dále vidět velmi pozitivní chování varianty CRMB, u které byly zachovány vysoké hodnoty tuhosti při vyšších teplotách a v oboru nízkých teplot nedošlo k výraznému zvýšení tuhosti. Varianta s polymerem modifikovaným pojivem vykazovala naopak mírně horší vlastnosti, neboť v oboru vyšších teplot došlo k poklesu tuhosti.

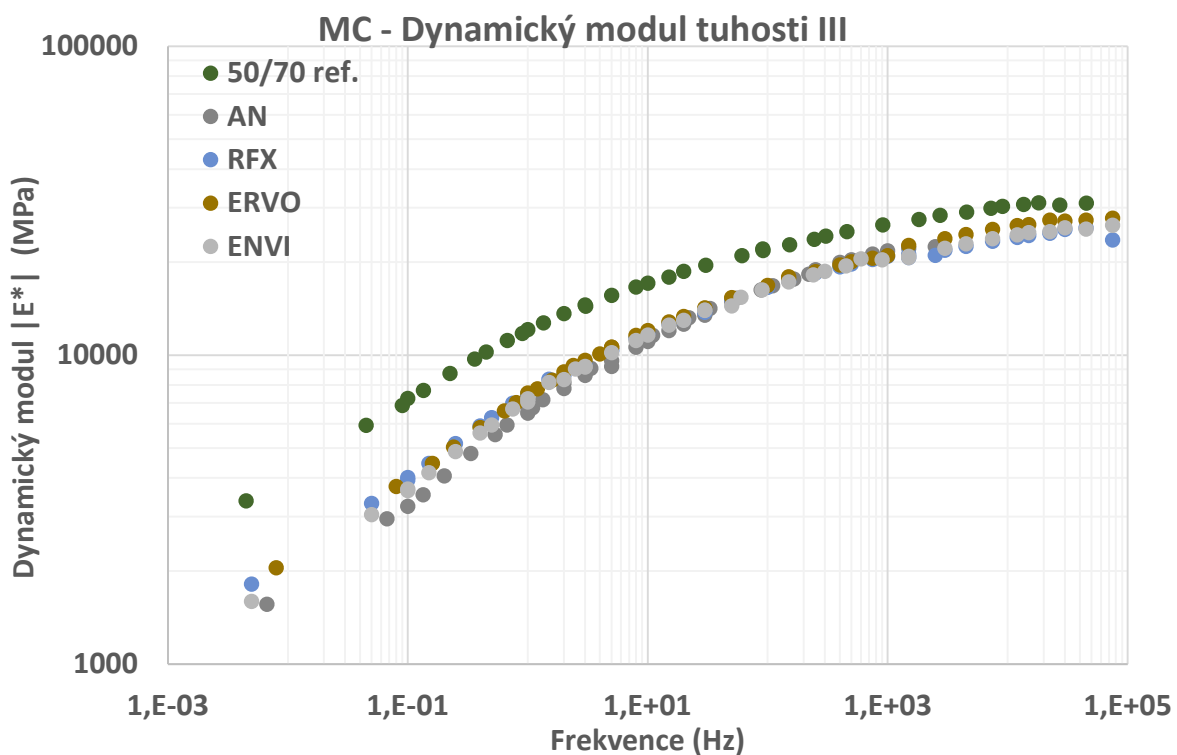
Obecně lze říci, že použití rejuvenátorů vedlo ke snížení hodnoty modulu tuhosti oproti referenční variantě se silničním asfaltem 50/70. Nejvýrazněji se to projevilo u přísad ACF a Sylvaroad při dávkování 10 %. U variant bez rejuvenátorů byl rovněž naměřen pokles hodnot ve srovnání s referenční variantou. Toto snížení se projevilo především v oblasti nižších zkušebních frekvencí (tzn. vyšších zkušebních teplot). Nejvíce patrné to bylo u varianty s měkčím silničním asfaltem 70/100 a s pojivem modifikovaným nízko hustotním polyethylenem (LDPE).



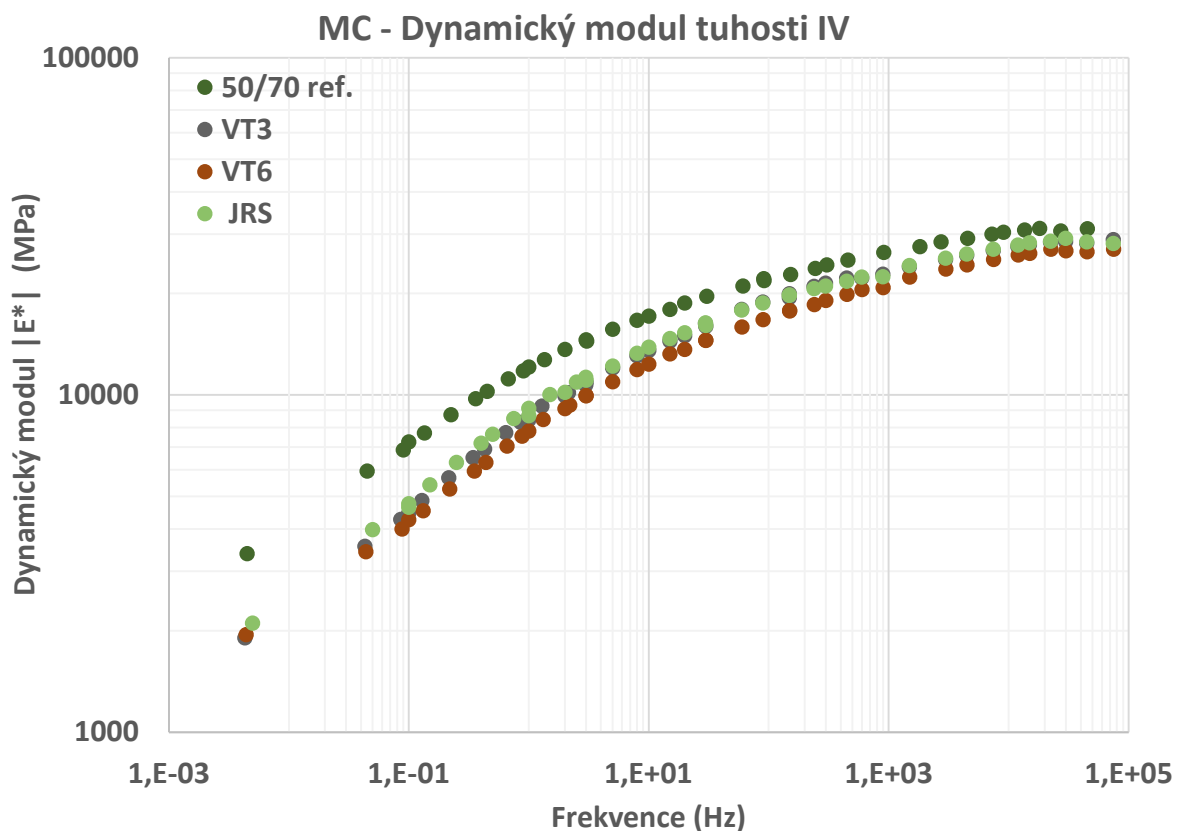
Graf 16a – Průběh tzv. master curve pro závislost hodnoty dynamického modulu tuhosti na zkušební frekvenci (1. část)



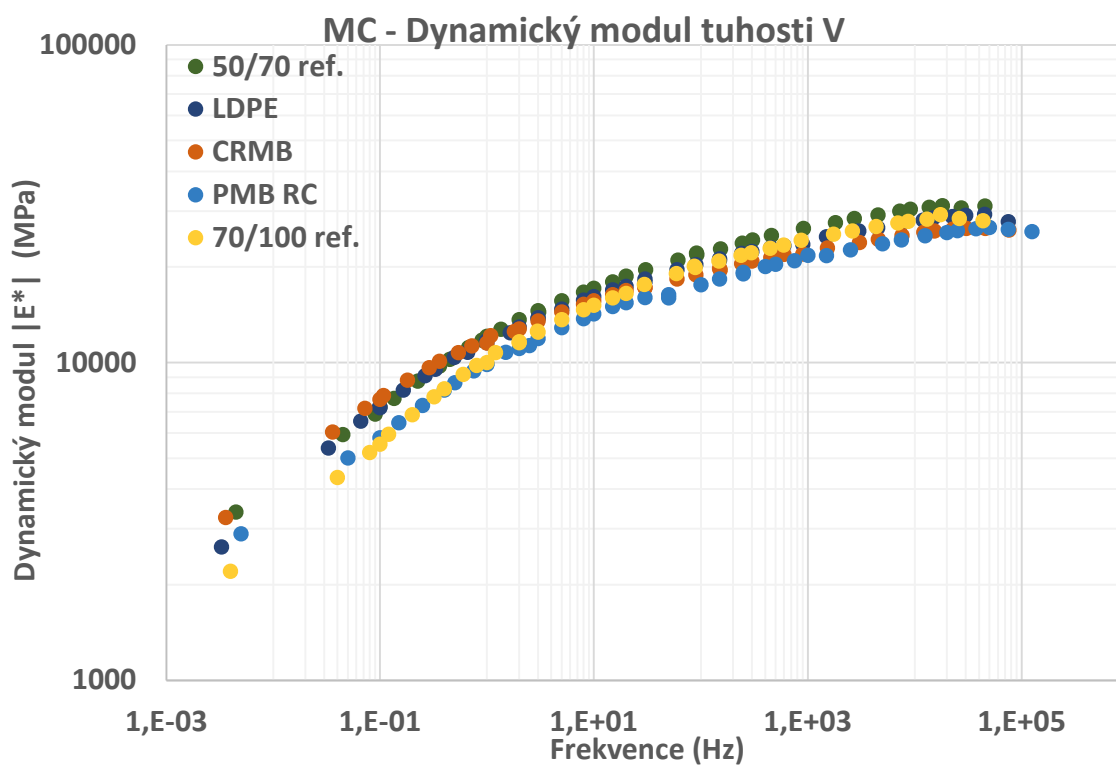
Graf 16b – Průběh tzv. master curve pro závislost hodnoty dynamického modulu tuhosti na zkušební frekvenci (2. část)



Graf 16c – Průběh tzv. master curve pro závislost hodnoty dynamického modulu tuhosti na zkušební frekvenci (3. část)



Graf 16d – Průběh tzv. master curve pro závislost hodnoty dynamického modulu tuhosti na zkušební frekvenci (4. část)



Graf 16e – Průběh tzv. master curve pro závislost hodnoty dynamického modulu tuhosti na zkušební frekvenci (5. část)

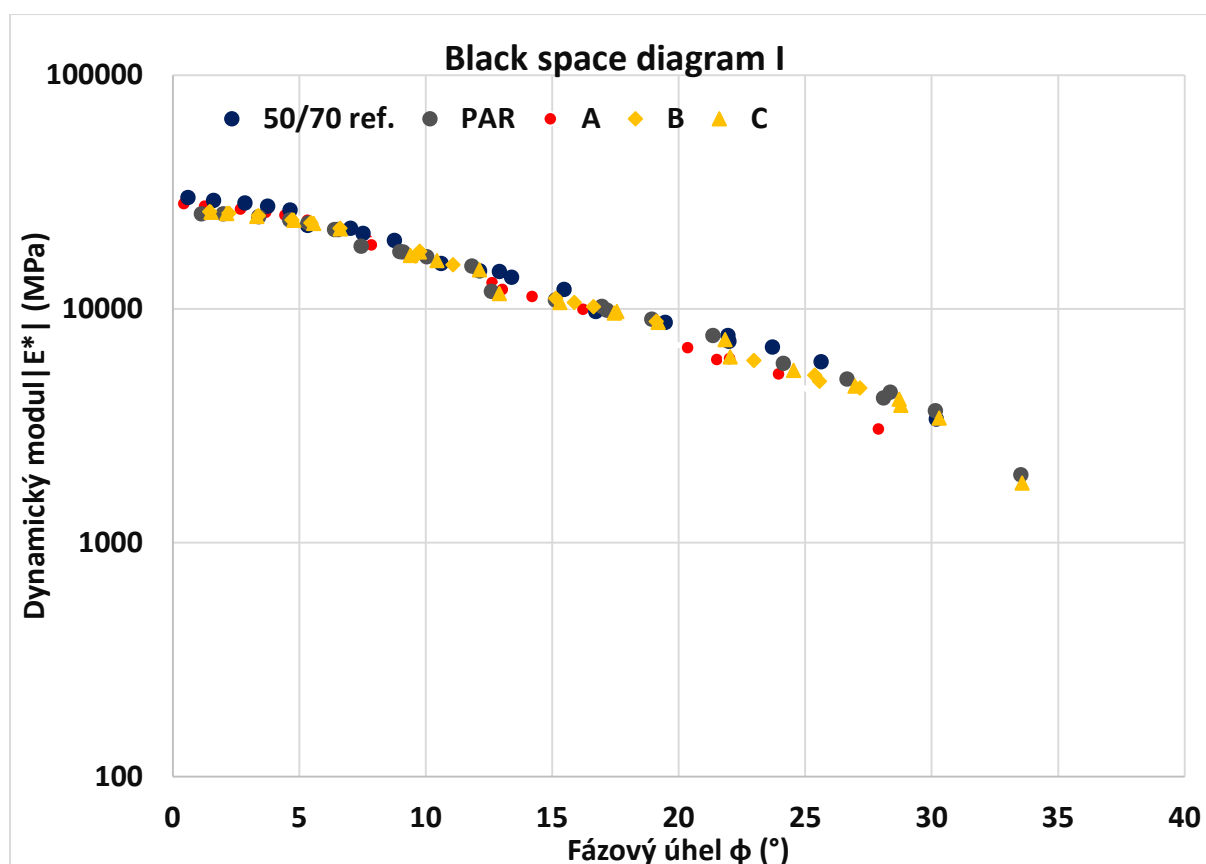
### 6.6.2 Black space diagram

Tzv. Black space diagram vyjadřuje závislost absolutní hodnoty dynamického modulu tuhosti na hodnotě fázového úhlu  $\phi$ . Hodnoty jsou zobrazeny v semilogaritmickém měřítku.

U těchto grafů nejsou zřetelně viditelné určité specifické trendy, a navíc jsou u jednotlivých variant oblasti nespojitosti, kde není dostatečná hustota relevantních naměřených hodnot.

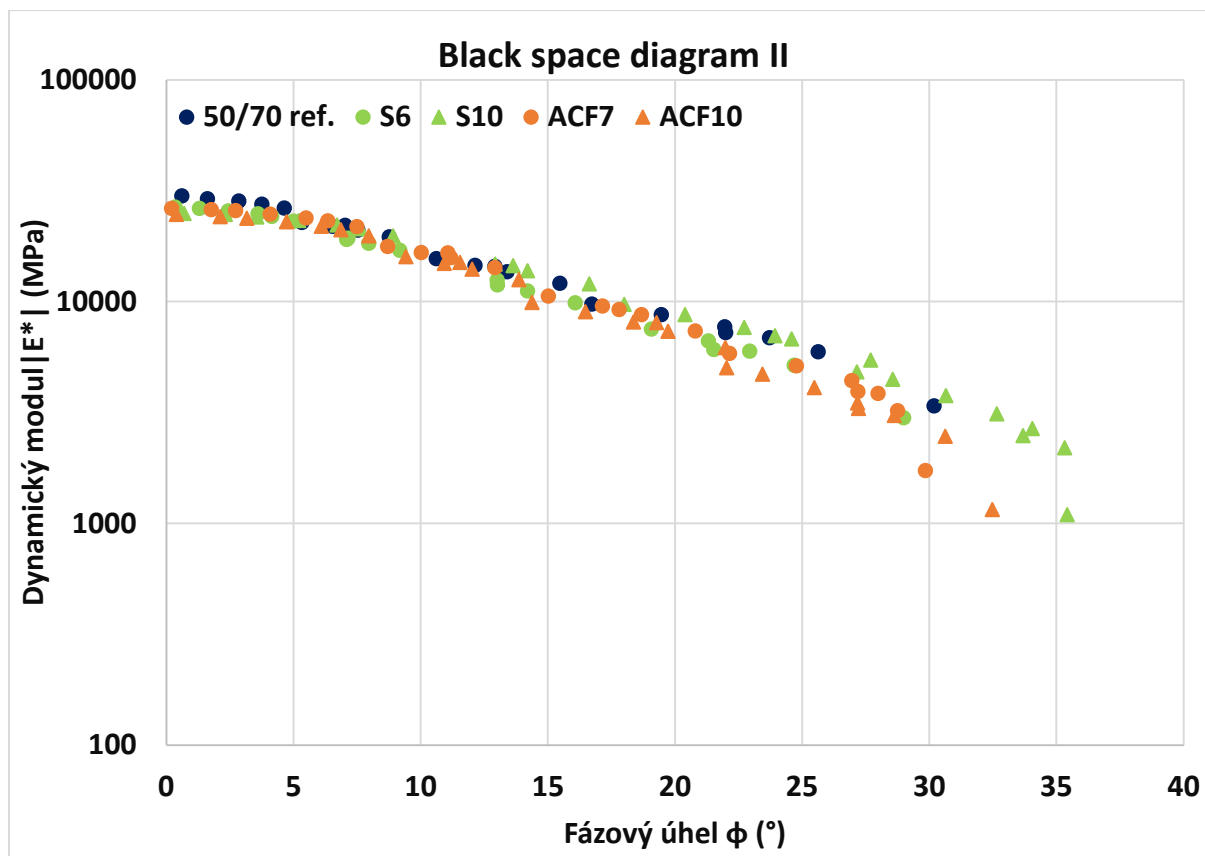
Odchytky od referenční varianty se silničním asfaltem 50/70 v tomto případě nejsou většinou tak markantní. Největší rozdíl byl opět pozorován při vyšším dávkování rejuvenátoru. To je celkem dobře vidět v grafu 17b u rejuvenátoru typu Sylvaroad a ACF a částečně také v grafu 17d u rejuvenátoru Viatop RC.

U variant bez rejuvenátoru (graf 17e) byl největší pokles oproti referenční variantě naměřen u varianty s polymerem modifikovaným asfaltem (PMB RC). Naopak přidání měkčího silničního asfaltu 70/100 se v tomto případě na vlastnostech směsi příliš neprojevovalo.

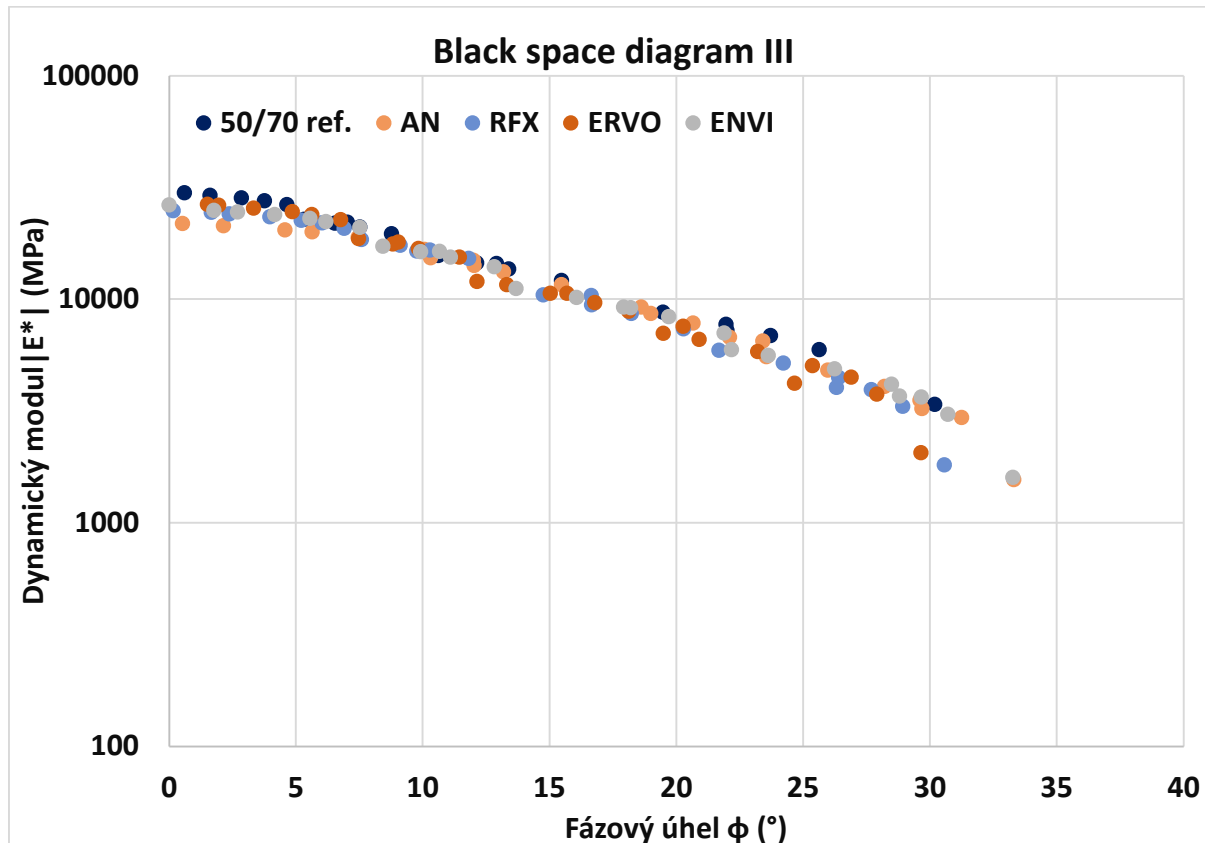


Graf 17a – Black space diagram u jednotlivých variant asfaltové směsi (1. část)

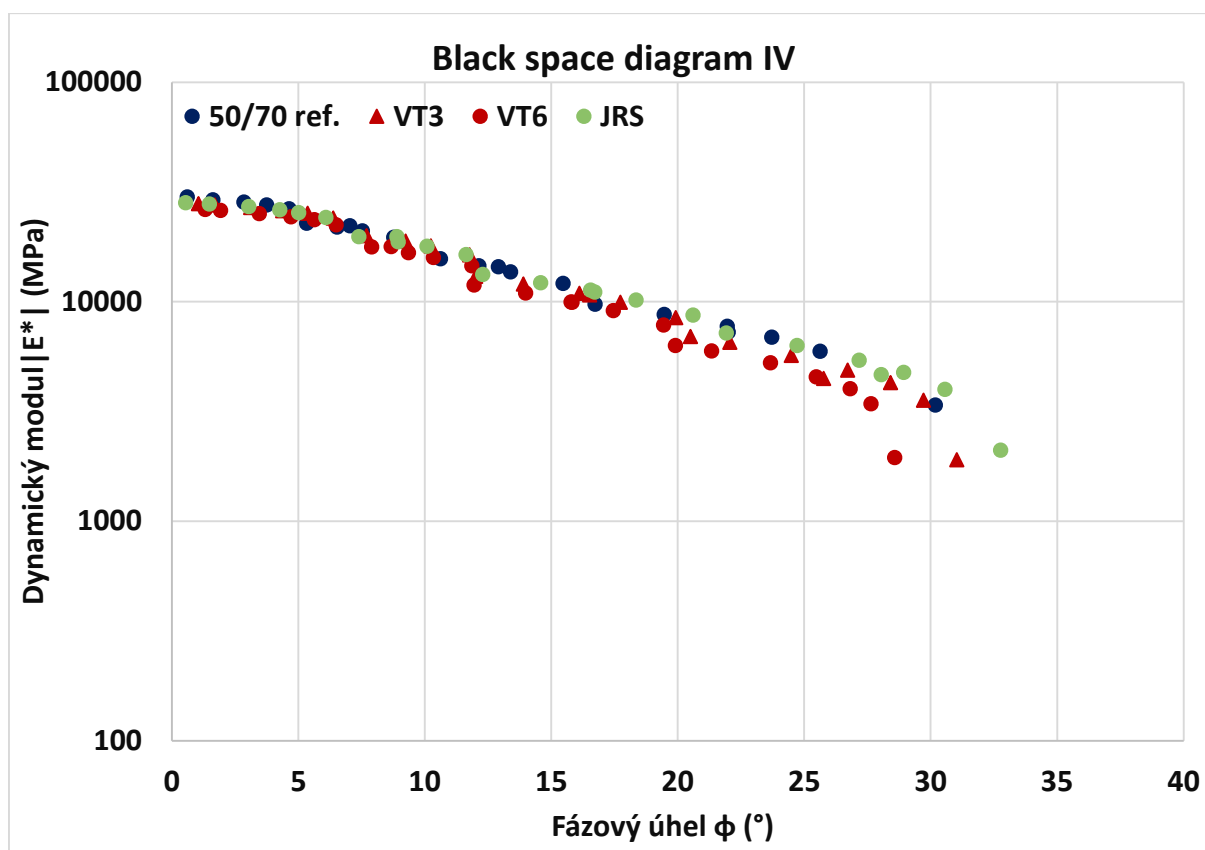




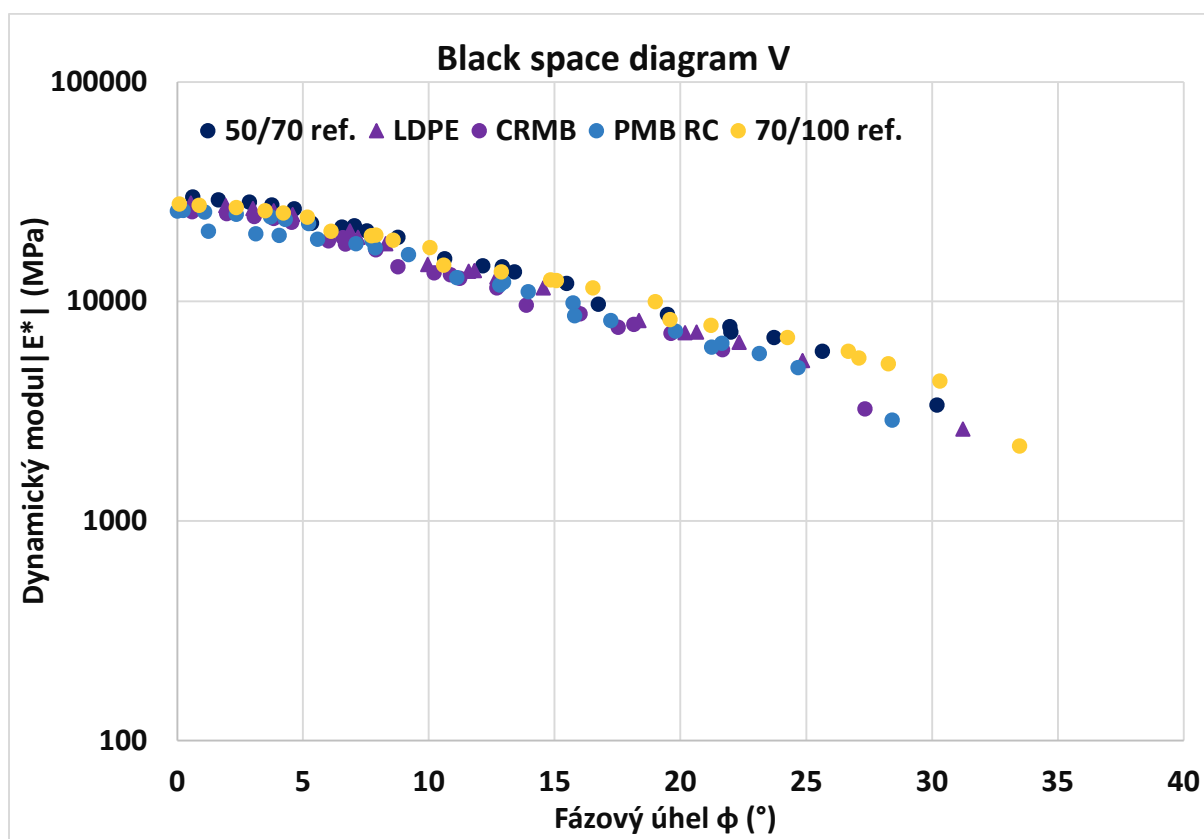
Graf 17b – Black space diagram u jednotlivých variant asfaltové směsi (2. část)



Graf 17c – Black space diagram u jednotlivých variant asfaltové směsi (3. část)



Graf 17d – Black space diagram u jednotlivých variant asfaltové směsi (4. část)



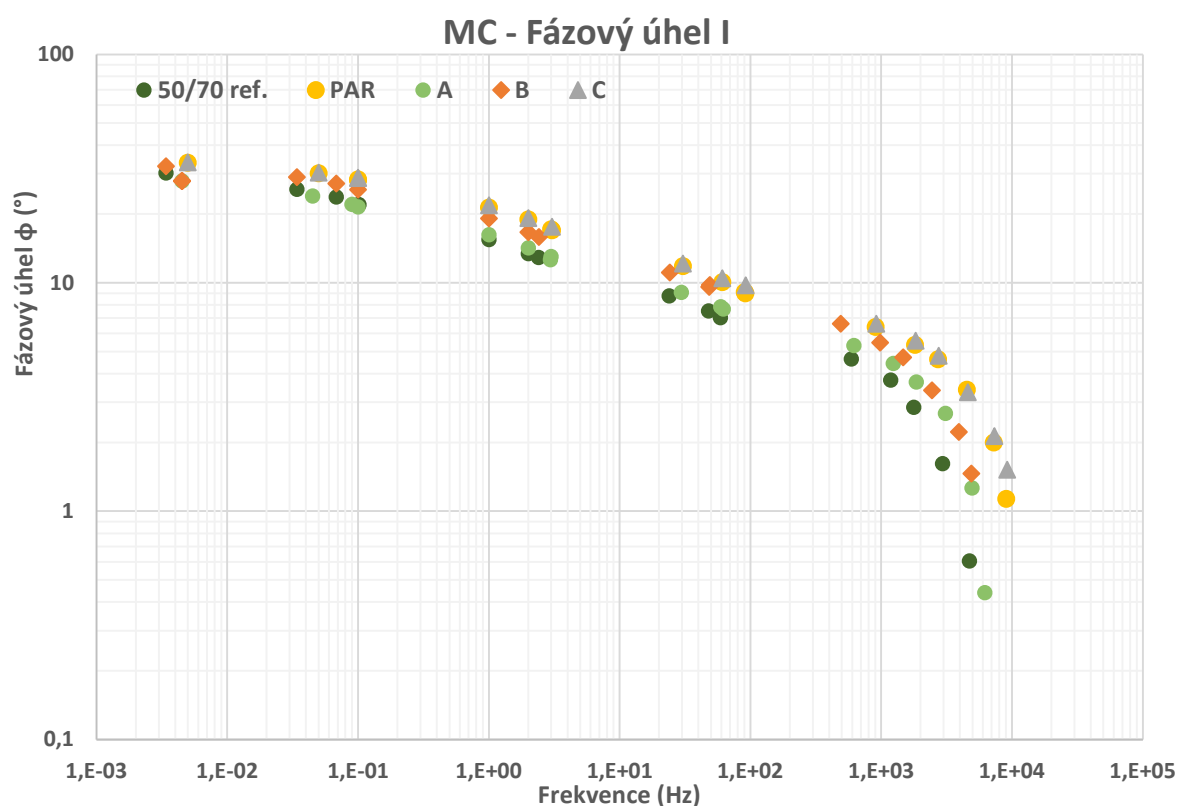
Graf 17e – Black space diagram u jednotlivých variant asfaltové směsi (5. část)

### 6.6.3 Master curve (řídící křivka) fázového úhlu

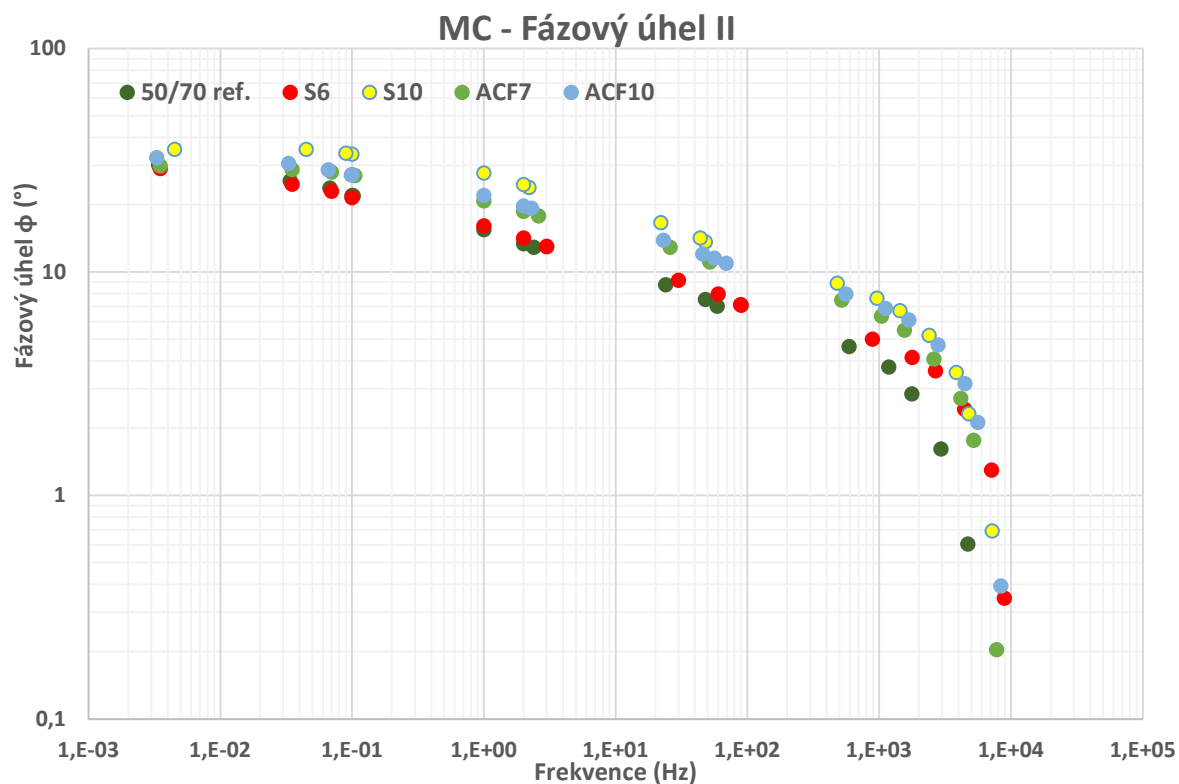
Níže uvedené grafy zobrazují průběh tzv. master curve (řídící křivky) pro závislost fázového úhlu na zkušební frekvenci.

I u těchto grafů jsou patrné oblasti nespojitosti, a ne zcela zřetelné trendy. V grafech 18b a 18d je vidět, že zvýšení množství rejuvenátoru v asfaltové směsi vede ke zvýšení fázového úhlu, tzn., že asfaltová směs se stává viskóznější. To se projevilo jak u rejuvenátoru Sylvaroad, tak i u přísady ACF a Viatop RC. U ostatních variant se projevil trend, že přidání rejuvenátoru zvýší fázový úhel asfaltové směsi. Velmi dobře je to vidět u AV rejuvenátoru „C“ (graf 18a) nebo přísady z depolymerizačního oleje ERVO (graf 18c). Jediný rejuvenátor, který se tomuto trendu částečně vymyká je rejuvenátor Anova (graf 18c). U něj byl zaznamenán při vyšších zkušebních frekvencích oproti referenční variantě (s asfaltem 50/70) pokles fázového úhlu.

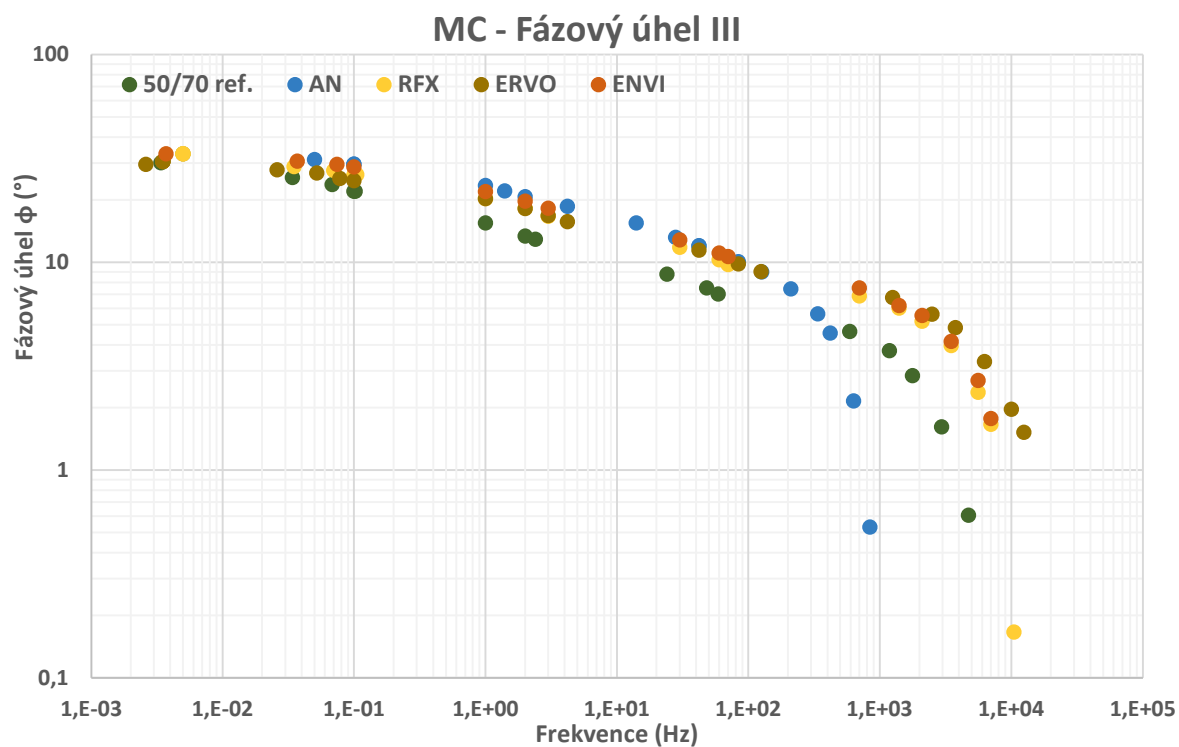
U variant asfaltové směsi bez rejuvenátoru (graf 18e) se výsledky všech variant víceméně shodovaly s referenční variantou se silničním asfaltem 50/70. U varianty s měkčím silničním asfaltem 70/100 došlo k mírnému zvýšení hodnot, a naopak u varianty s pojivem modifikovaným jemně namletou pryží (CRMB) byl zaznamenán mírný pokles. To značí, že pojivo je elastičtější (jeho chování se více blíží pevné látce). Částečně je podobné chování pozorovatelné také u varianty s polymerem modifikovaným pojivem (PMB RC). Naopak varianty s rejuvenátory a rovněž varianta s měkčím silničním asfaltem 70/100 dosáhly v porovnání s referenční variantou s asfaltem 50/70 mnohdy výrazně vyšších hodnot. To znamená, že pojivo je více viskózní a svým chováním se blíží kapalině (v reologii je používán termín tzv. Newtonovská kapalina). Tento fakt ovšem přináší riziko v podobě možné plastické deformace.



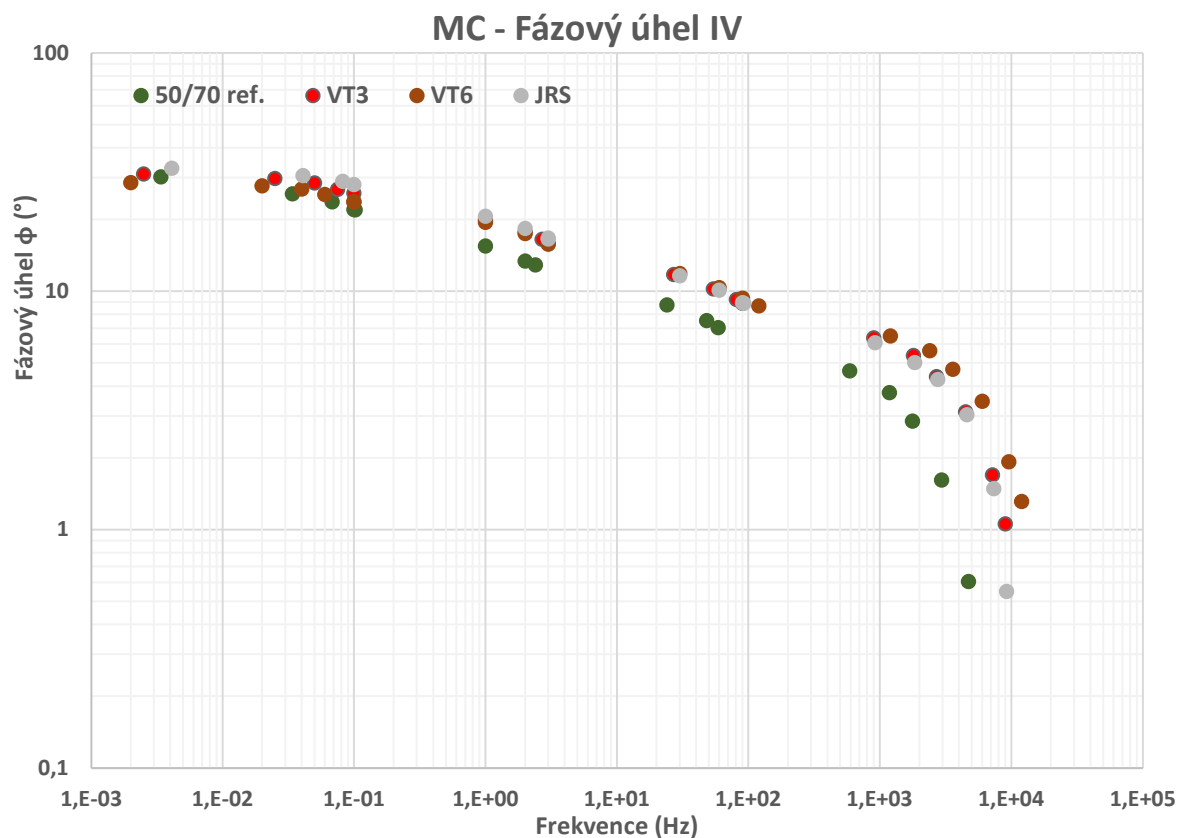
Graf 18a – Průběh tzv. master curve pro závislost hodnoty fázového úhlu na zkušební frekvenci (1. část)



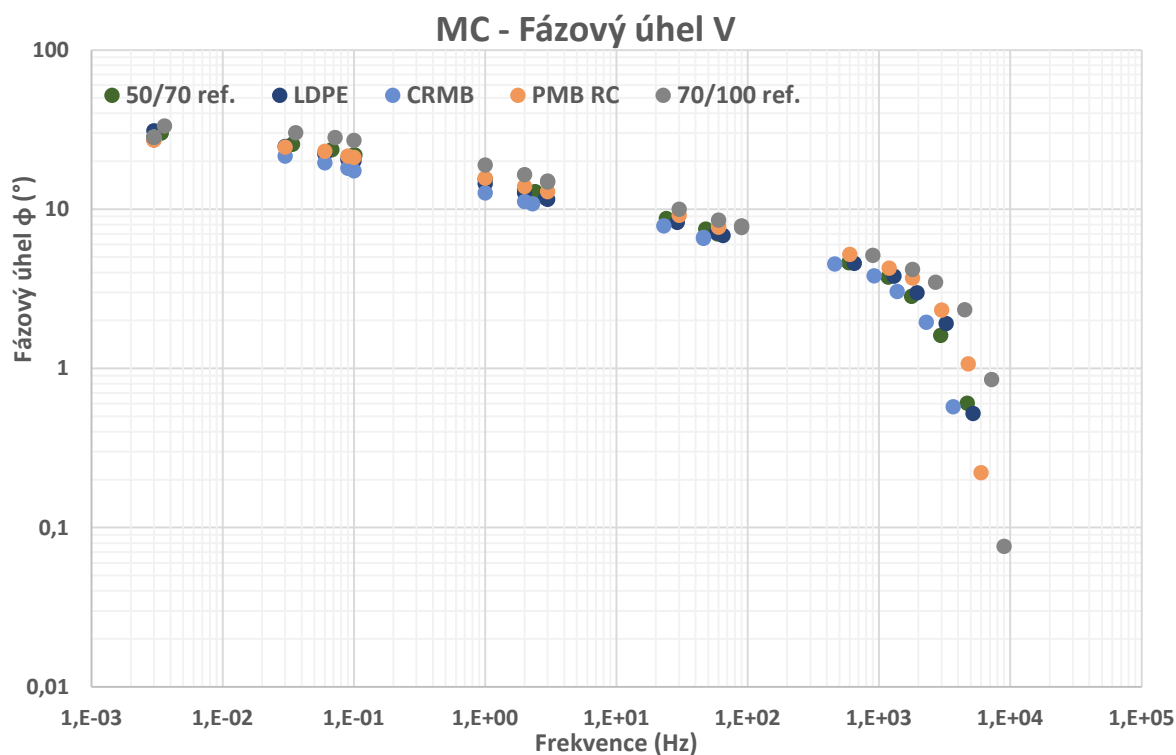
Graf 18b – Průběh tzv. master curve pro závislost hodnoty fázového úhlu na zkušební frekvenci (2. část)



Graf 18c – Průběh tzv. master curve pro závislost hodnoty fázového úhlu na zkušební frekvenci (3. část)



Graf 18d – Průběh tzv. master curve pro závislost hodnoty fázového úhlu na zkušební frekvenci (4. část)



Graf 18e – Průběh tzv. master curve pro závislost hodnoty fázového úhlu na zkušební frekvenci (5. část)

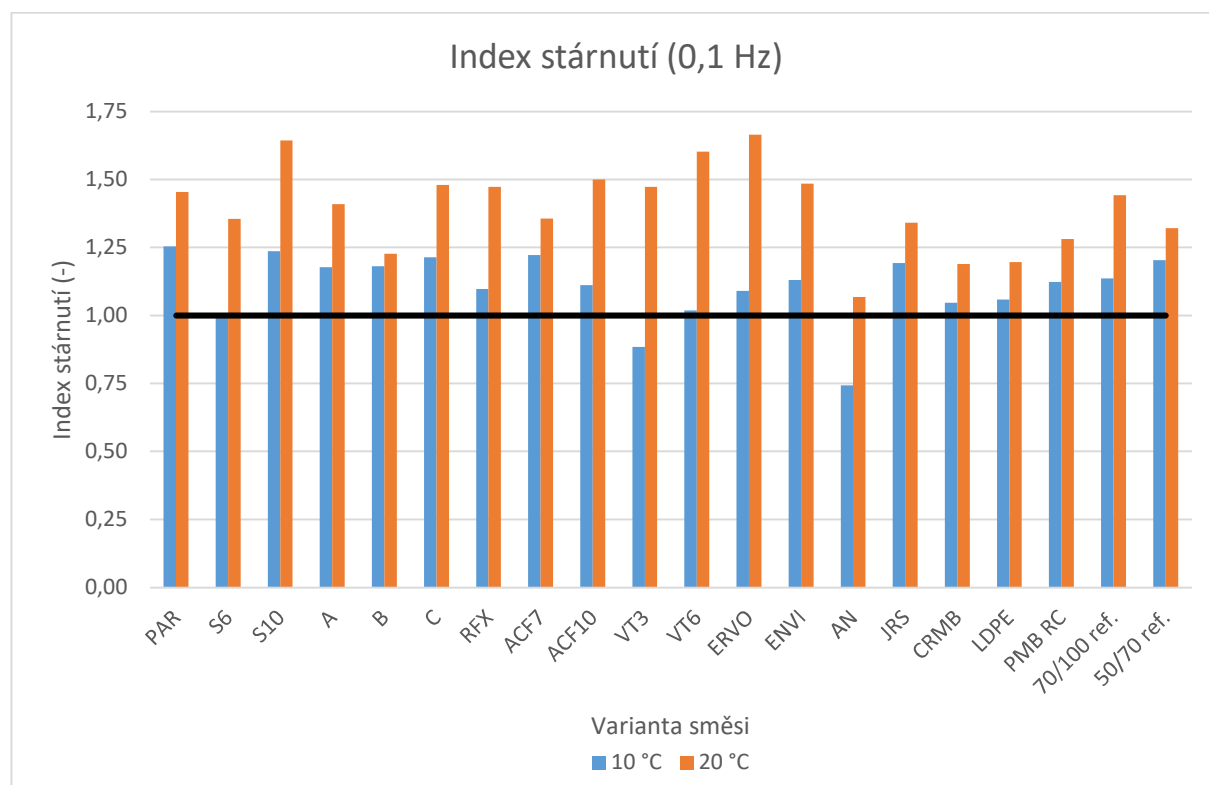
#### 6.6.4 Index stárnutí

V následujícím grafu jsou shrnuty hodnoty indexu stárnutí jednotlivých variant asfaltové směsi. Zatímco nezestárnutá tělesa byla zkoušena při 4 zkušebních teplotách, zestárnuté trámký byly následně zkoušeny pouze při teplotách 10 °C a 20 °C. V grafu jsou tak zobrazeny výsledky pouze pro tyto dvě teploty. Vybrané hodnoty indexu stárnutí byly stanoveny při zkušebních frekvencích 0,1 Hz, 1,0 Hz a 10 Hz.

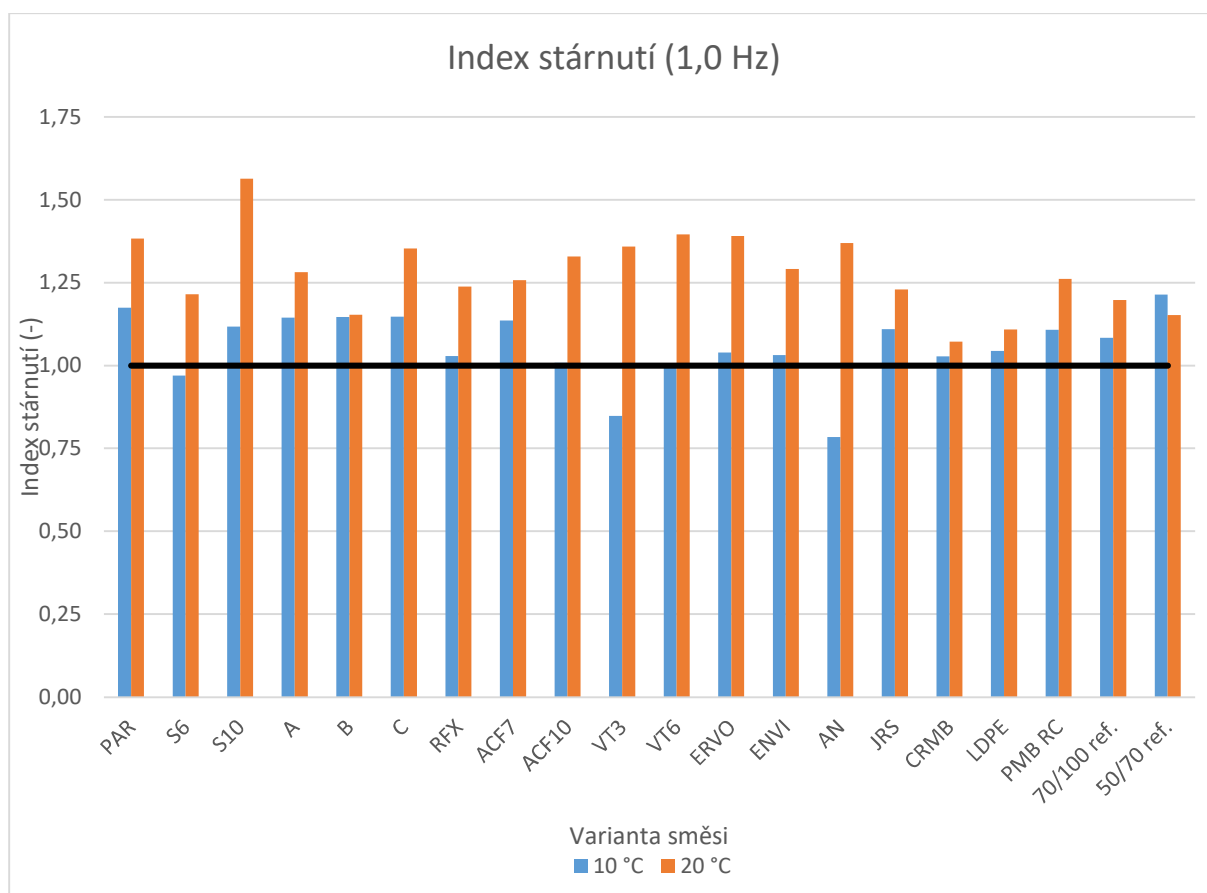
Z grafů je patrné, že většina zkoumaných variant je náchylnější ke změnám v důsledku stárnutí při vyšších teplotách. Zajímavý je současně výsledek získaný pro variantu pojiva typu CRMB nebo u varianty asfaltové směsi s použitím LDPE. Zde se při obou posuzovaných teplotách index stárnutí pohyboval jen mírně nad hodnotou 1,0 a současně se výsledek pro obě teploty vzájemně jen velmi málo lišil. U variant s rejuvenátory bylo podobné chování zaznamenáno u AV rejuvenátoru „B“ a částečně také u rejuvenátoru JRS a rejuvenátoru ACF v množství 7 %.

Dále je rovněž patrné, že větší rozptyl hodnot nastal při nízké zkušební frekvenci, kdy se index stárnutí pohyboval v rozmezí 0,74 – 1,66.

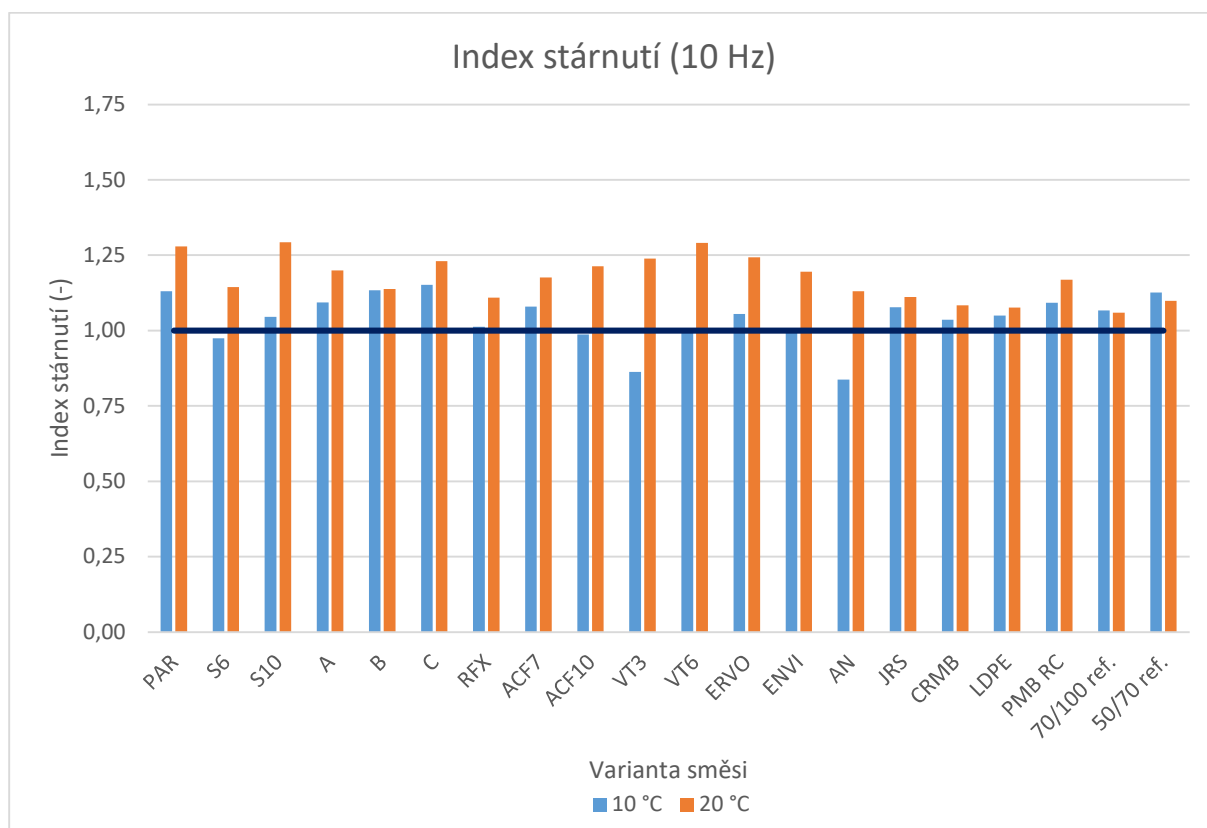
Srovnání všech získaných hodnot závislosti tuhosti na zkušební frekvenci při všech 6 laboratorních podmínkách pro jednotlivé varianty je uvedeno v kapitole 10 Přílohy.



Graf 19 – Index stárnutí u vybraných variant asfaltové směsi při zkušební frekvenci 0,1 Hz



Graf 20 – Index stárnutí u vybraných variant asfaltové směsi při zkušební frekvenci 1,0 Hz



Graf 21 – Index stárnutí u vybraných variant asfaltové směsi při zkušební frekvenci 10 Hz

## 7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Použití rejuvenátorů s sebou přináší řadu výhod. Jedním z hlavních zjištění (které bylo i předpokládáno a požadováno), bylo snížení tuhosti nebo naopak zlepšení dalších charakteristik při zachování tuhosti zjištěné u referenční asfaltové směsi.

Z hlediska mezerovitosti asfaltové směsi docházelo k nejmenším změnám při použití rejuvenátoru Anova a oživovací přísady ERVO.

Při vyhodnocení zkoušky odolnosti vůči působení mrazu a vody bylo dosaženo nejlepších výsledků u varianty asfaltové směsi s rejuvenátory Sylvaroad a ACF (při nižší koncentraci) a u oživovací přísady ENVI. Některé další varianty sice v dílčích měřeních vykazovaly lepší výsledky (např. vyšší pevnost v příčném tahu u těles zkoušených v suchém stavu), ale celkově byla jejich odolnost horší.

U měření modulu tuhosti byl sledován jednak pokles modulu tuhosti oproti referenční směsi bez rejuvenátoru, dále teplotní citlivost a také index stárnutí jednotlivých variant. Teplotní citlivost byla nejmenší u varianty se 3 % rejuvenátoru Viatop RC a poměrně dobré hodnoty bylo také dosaženo u varianty se 7 % rejuvenátoru ACF. Pokles tuhosti byl nejmarkantnější při použití vyšší koncentrace rejuvenátorů ACF a Sylvaroad a dále u oživovací přísady ENVI. Z hodnocení indexu stárnutí vycházely pak nejlépe varianty s rejuvenátory Sylvaroad (v 6 % koncentraci), REJU 182 a s oživovací přísadou ERVO.

Měření odolnosti vůči šíření trhliny přineslo nejslibnější výsledky u varianty s rejuvenátorem Sylvaroad při dávkování 10 % (z množství pojiva v RA). Tato přísada vykazovala velice solidní výsledky jak z hlediska lomové houževnatosti, tak i lomové energie (celkové i do dosažení  $F_{max}$ ). Uvedené výsledky, zejména při porovnání s variantou, kde bylo použito pouze 6 % přísady Sylvaroad, také dokládají význam vhodně zvoleného množství dávkování rejuvenační přísady. Z hlediska lomové houževnatosti vykazoval dobré výsledky také rejuvenátor ACF při dávkování 10 % a rejuvenátor JRS. Rejuvenátor JRS vykazoval rovněž poměrně dobré výsledky při měření celkové hodnoty lomové energie, kdy se přiblížil výsledkům varianty s rejuvenátorem Sylvaroad v množství 10 %.

Měření komplexního modulu tuhosti přineslo řadu výsledků. Především se jasně prokázal vliv zvýšeného dávkování rejuvenátoru do asfaltové směsi. Tento postup s sebou přinesl snížení tuhosti a také snížení hodnoty fázového úhlu (tzn. směs je méně viskózní). U některých variant (např. Anova nebo Sylvaroad v množství 6 %) naznačuje mírnější sklon směrnice křivky možnou menší náchylnost ke změnám vlivem teploty.

Pro lepší a komplexnější srovnání všech variant bylo navrženo a provedeno multikriteriální vyhodnocení. Pro něj bylo vybráno několik měřených veličin (mezerovitost, pevnost v příčném tahu, modul tuhosti, lomové charakteristiky a různé indexy stárnutí) a těmto kritériím byla následně přiřazena různá váha. Posuzované varianty asfaltové směsi byly následně v rámci každého kritéria bodově ohodnoceny. Následně byl proveden součin váhy daného kritéria a bodového ohodnocení. Součet všech takto získaných hodnot představoval celkové hodnocení varianty asfaltové směsi. Jako nejvýhodnější pro budoucí použití je považována směs s nejnižším bodovým ziskem.

V tabulce níže jsou uvedeny výsledky multikriteriálního hodnocení posuzovaných variant asfaltové směsi. Ve vysvětlivkách pod tabulkou jsou uvedeny všechny hodnocené veličiny včetně jejich váhového ohodnocení. Bohužel v důsledku ztráty některých hodnot u směsi s jemně namletou pryží (CRMB) a u referenční směsi 50/70 není pro tyto 2 varianty hodnocení kompletní.





Varianta směsi	I.	II.		III.		IV.	V.	VI.	VII.					VIII.
		a	b	a	b				a	b	c	d	e	
PAR	3	7	6	7	7	4	12	12	1	8	9	7	5	<b>6,88</b>
S6	14	2	1	4	11	8	8	10	1	3	8	4	2	<b>5,41</b>
S10	15	4	4	1	18	1	2	2	4	5	5	4	6	<b>4,71</b>
A	16	3	2	4	8	5	9	11	4	7	13	8	4	<b>6,88</b>
B	2	6	3	2	13	8	8	6	3	5	10	12	3	<b>6,07</b>
C	5	5	3	5	9	9	11	11	3	4	7	5	5	<b>6,24</b>
RFX	13	3	4	5	10	2	4	5	5	8	16	13	3	<b>6,69</b>
ACF7	11	3	1	9	6	9	14	14	4	5	4	4	3	<b>6,63</b>
ACF10	9	5	4	1	17	2	6	4	5	3	11	11	3	<b>5,72</b>
VT3	1	7	7	10	3	5	6	8	4	6	14	10	4	<b>6,88</b>
VT6	1	8	5	7	8	7	10	9	3	4	2	3	4	<b>5,55</b>
ERVO	3	5	5	7	6	6	5	5	1	5	12	9	4	<b>5,71</b>
ENVI	10	1	1	2	14	5	7	7	3	4	10	4	3	<b>5,00</b>
AN	5	5	5	4	12	3	1	1	3	7	15	12	3	<b>5,65</b>
JRS	12	2	1	3	15	3	2	3	5	3	10	6	3	<b>4,69</b>
CRMB	8	6	6	10	1	8	12	10	2				1	<b>5,05</b>
LDPE	4	7	6	8	5	6	13	13	5	2	1	2	1	<b>5,73</b>
PMB RC	11	2	1	9	2	6	10	12	4	5	6	5	3	<b>5,87</b>
70/100 ref.	5	9	6	6	16	7	3	6	5	1	3	1	3	<b>5,17</b>
50/70 ref.	7	5	5	9	4				4				3	<b>2,81</b>

Tab. 6 – Multikriteriální hodnocení posuzovaných variant asfaltové směsi

Vysvětlivky k Tab. 6:

- I. Mezerovitost (5 %)
- II.a ITSr EN (8 %)
- II.b ITSr AASHTO (8 %)
- III.a Modul tuhosti – tuhost při 15 °C (10 %)
- III.b Modul tuhosti – teplotní citlivost (5 %)
- IV. Lomová houževnatost (8 %)
- V. Lomová energie – do  $F_{max}$  (8 %)
- VI. Lomová energie – celková (8 %)
- VII.a Index stárnutí – modul tuhosti (8 %)
- VII.b Index stárnutí – lomová houževnatost (8 %)
- VII.c Index stárnutí – lomová energie (do  $F_{max}$ ) (8 %)
- VII.d Index stárnutí – lomová energie (celková) (8 %)
- VII.e Index stárnutí – komplexní modul tuhosti (8 %)
- VIII. Celkové hodnocení (100 %)



Z výše uvedené tabulky vychází jako potenciálně nejslibnější rejuvenátor Sylvaroad (ideálně ve vyšším množství, např. 10 %), dále rejuvenátor JRS a také rejuvenační přísada ENVI. Naopak u experimentálních rejuvenátorů z vyjetého motorového oleje nebo použitého kuchyňského oleje nebyl zaznamenán zvláštní přínos z hlediska zlepšení vlastností asfaltové směsi s vysokým podílem R-materiálu. U variant bez rejuvenátoru se jako nejslibnější jeví použití měkčího silničního asfaltu.

Nezanedbatelným aspektem, který je nutno při vyhodnocení zohlednit, je také cena výsledné směsi. V současné době činí průměrná cena asfaltové směsi ACL 16+ s 0 % R-materiálu cca 1500-1800 Kč/t (nižší cena je v případě většího objemu výroby, např. pro stavbu dálnice nebo delších silničních úseků). Při použití 50 % RA dochází ke snížení ceny až o 250 Kč/t. Naproti tomu použití rejuvenátoru s sebou přináší pouze mírné zvýšení ceny v rozmezí cca 20-50 Kč/t. Výsledná úspora se tak může pohybovat okolo souhrnné hodnoty 200 Kč/t. Další skutečností, kterou tato práce neuvádí, resp. podrobněji neanalyzuje, jsou ostatní celospolečenské přínosy. Dochází totiž ke snížení spotřeby nových neobnovitelných přírodních zdrojů (kamenivo a ropa) a zároveň dojde s velkou pravděpodobností k redukci uhlíkové stopy výroby asfaltové směsi. R-materiál vzniká totiž zpracováním vedlejšího produktu či odpadu, který tak už nemusí končit na skládce. Pro přeměnu znovuzískané asfaltové směsi na vhodný R-materiál je také potřeba mnohem méně energie než při těžbě nového kameniva.



## 8 ZÁVĚR

Obecně lze konstatovat, že použití rejuvenátorů u zestárlého asfaltového pojiva nemá negativní dopady na vlastnosti nově vyrobené asfaltové směsi. Lze naopak tvrdit, že používání rejuvenátorů je v silničním stavitelství krokem kupředu. Přidávání R-materiálu má prokazatelně environmentální a ekonomické výhody, které jsou ovšem podmíněny zvládnutím systému hospodaření se stavebními materiály, tj. správné skládkování, homogenizace, třídění aj. Při správném návrhu a zacházení s materiály se kvalita směsi s R-materiálem vyrovná konvenčním směsím bez R-materiálu.

Pro další rozvoj používání rejuvenátorů je tedy nutný další aplikovaný výzkum, a především praktický vývoj zaměřující se na optimalizaci dávkování a také sledování asfaltových směsí s rejuvenátory v dlouhodobém časovém horizontu. V rámci ČR by bylo žádoucí nejen rozšíření používání takových směsí na více úsecích, ale i jejich častější použití na silně dopravně zatížených komunikacích. Kromě významných finančních a environmentálních pozitiv je zde také přidaná hodnota ve vědeckém významu tohoto postupu. Data ze silně zatížených úseků dálnic a silnic I. tříd mohou být velmi nápomocná při dalším vývoji rejuvenátorů.

V neposlední řadě může tento postup vést ke snížení ekologické zátěže, kterou výroba asfaltových směsí představuje (např. prodloužením trvanlivosti obrusné vrstvy). Dalším benefitem je fakt, že použitím R-materiálu při výrobě nových asfaltových směsí se snižuje množství vznikajících a potenciálně nevyužitých odpadních materiálů, které je nutno odvážet a ukládat, což ve svém důsledku snižuje nároky kladené na kapacity skládek. Skládky tak mj. nemusejí zvětšovat svůj zábor. To vše může ve svém důsledku napomoci ke zvýšení popularity celého odvětví silničního stavitelství mezi širokou veřejností.

Důležitým aspektem je také cena výsledné asfaltové směsi. Je vidět, že i přes mírné zvýšení ceny v důsledku použití rejuvenátoru je zde stále markantní finanční úspora díky použití R-materiálu.

Dalším významným faktorem je také dopad na životní prostředí. Ten je zde významně snížen hned v několika rovinách. Jednak použití R-materiálu přináší úsporu kameniva při těžbě v lomech a ropy při výrobě asfaltového pojiva. Významným přínosem je také omezení dopravy (snížení produkce emisí a uhlíkové stopy, které generují nákladní vozidla, odhlédneme-li i od skutečnosti, že zvýšená přeprava dodatečně zatěžuje stávající silniční infrastrukturu), protože R-materiál je většinou skladován přímo v areálu obalovny a odpadá tak nutnost separátní dopravy kameniva a asfaltového pojiva.

Vše výše zmíněné tak představuje celkem přesvědčivé důvody nejen pro používání, ale i pro další výzkum a vývoj rejuvenátorů.



## 9 PŘEHLED ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY

1. webová stránka <http://web.rejuvenator.eu/>
2. Kolektiv autorů. *A rejuvenator derived from pine trees and natural asphalt*. článek serveru [www.worldhighways.com](http://www.worldhighways.com), listopad 2015  
<https://www.worldhighways.com/wh6/feature/rejuvenator-derived-pine-trees-and-natural-asphalt>
3. Turner P., Taylor A., Nam T. *Laboratory evaluation of Sylvaroad™ RP 1000 rejuvenator*. NCAT report 15-03, Auburn (Alabama), USA, červen 2015
4. Kolektiv autorů. *What is rejuvenation?* článek na serveru [www.rejuvaseal.com](http://www.rejuvaseal.com)  
<http://www.rejuvaseal.com/rejuvaseal/what-is-rejuvenation>
5. Mazzoni G., Bocci E., Canestrari F. *Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (english edition), 2018, s. 157-168
6. ČSN EN 12697-5. *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, únor 2020
7. ČSN EN 12697-6. *Asfaltové směsi – Zkušební – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, březen 2021
8. ČSN EN 12697-12. *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, říjen 2020
9. ČSN EN 12697-26. *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 26: Tuhost*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, květen 2019
10. ČSN EN 12697-44. *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, prosinec 2019
11. Valentin Jan., *Asfaltové směsi 2017* FSv ČVUT v Praze přednášky k předmětu Silniční stavby 2
12. Fiedler J., Koudelka T. *Vliv stárnutí na vlastnosti asfaltových pojiv při zkouškách v DSR a metody jeho hodnocení*. konference Asfaltové vozovky 2019
13. podklady k předmětu Bautechnik von Verkehrsanlagen II, RWTH Aachen
14. Airey G. D. *State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials*. International Journal of Pavement Engineering, září 2003
15. Vacková P., Valentin J., Belhadj M. *Zkušební úsek s uplatněním asfaltových směsí se zvýšeným podílem R-materiálu a prodlouženou dojezdovou vzdáleností – výsledky zkoušek*. konference Asfaltové vozovky 2019, České Budějovice, listopad 2019
16. Kolektiv autorů. *PREN 12697-52 Bituminous mixtures – Test methods – Part 52: Conditioning to address oxidative ageing*. červen 2015
17. Ing. Jíša P., Ing. Černý R. *Laboratorní analýza vhodnosti různých typů rejuvenátorů použitých na zestárlých typech pojiv. Provedení empirických a funkčních zkoušek (dílčí zpráva C)*. Litvínov: Výzkumný ústav anorganické chemie a. s., leden 2015
18. Ing. Jíša P., Ing. Černý R. *Vývoj funkčních asfaltových pojiv pro teplé asfaltové směsi se zvýšeným podílem asfaltového R-materiálu (dílčí zpráva A)*. Výzkumný ústav anorganické chemie a.s., 2015
19. Kolektiv autorů. *Saturate, aromatic, resin and asphaltene*. článek na serveru [en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org), říjen 2021  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Saturate,\\_aromatic,\\_resin\\_and\\_asphaltene](https://en.wikipedia.org/wiki/Saturate,_aromatic,_resin_and_asphaltene)
20. Hlávka F. *Analýza složení asfaltového R-materiálu a jeho využití v asfaltové směsi*. Praha: ČVUT FSv, 2019. bakalářská práce
21. Silva H., Oliviera J., Jesus C. *Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?* Resources, Conservation and Recycling, vědecký článek, 2011



22. webová stránka [www.pavementinteractive.org](http://www.pavementinteractive.org)
23. Heydorn A. *Test Results Show Rejuvenator Enables Higher RAP Content*. Článek časopisu Equipment Today, březen 2020  
<https://www.forconstructionpros.com/equipment/article/21121598/rejuvenator-tests-allow-for-higher-rap-content>
24. Bartholomäus A., Cetinkaya R., Denck C. *Einsatz von Verjüngungsmitteln bei hohen Zugabeanteilen von Asphaltgranulat auf einer Erprobungsstrecke – Teil 2*. časopis Straßen und Autobahn, vydání 01/2016
25. Kolektiv autorů. *Trendy a inovace v dopravním stavitelství*. Sborník studentské vědecké konference, Praha: ČVUT FSv, červen 2016
26. Haibin Li et al. *Study on waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt and application in reclaimed asphalt mixture*. Construction and building materials, vědecký článek, 2020
27. Kolektiv autorů. *Příspěvky na nové technologie*. konference SFDI, 2015
28. Zaumanis M. et al. *Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder at 100 % recycled asphalt mixtures*. Construction of Building Materials, vědecký článek, 2014
29. Varaus M., Koudelka T. *Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu – dosavadní zkušenosti*. článek časopisu Silnice + mosty, číslo 2/2018  
<https://www.silnice-mosty.cz/615-asfaltove-smesi-s-vysokym-obsahem-r-materialu-dosavadni-zkusenosti/>
30. Jiantao W. et al. *Investigation of lignin as an alternative extender of bitumen for asphalt pavements*. Journal of Cleaner Production, vědecký článek, 2020
31. Koudelka T., Varaus M., Valentin J. *Recyklace asfaltových směsí na obalovně s vysokým podílem R-materiálu – zkušební úsek Potštát-Olšovec*. projekt TE01020168 TA ČR s finanční podporou Centra kompetence TA ČR, 2016
32. Valentin J., Mondschein P., Bureš P. a další. *Monitoring vybraných zkušebních úseků nových nebo vylepšených řešení pro asfaltové vozovky*. projekt TE01020168 TA ČR s finanční podporou Centra kompetence TA ČR, 2019
33. Vacková P., Valentin J., *Poznatky s uplatněním vyššího podílu asfaltového R-materiálu v asfaltové směsi pro ložní a obrusné vrstvy na silnici I. třídy – první aplikace v ČR*. projekt TE01020168 TA ČR za podpory výzkumného centra CESTI, 2019
34. Valentin J., Vacková P., Belhadj M. *Realizace pokusného úseku „II/272 Kounice – Bříství, ověření nové technologie“ – asfaltová směs ACL 16+ 40 % R-materiálu a variantním oživením pojiva*. Praha: ČVUT FSv, listopad 2019
35. Gogolin D., Buttgerit A. *Effectivity and Performance of Rejuvenators*. Informační bulletin společnosti J. Rettenmaier und Söhne GmbH, 2018
36. Brownridge J. *The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation*. Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation, Chapter 5: Paper 47, 2010
37. ČSN 73 6141 *Požadavky na použití R-materiálu do asfaltových směsí*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, prosinec 2020
38. Kolektiv autorů. *TKP 7 Hutněné asfaltové vrstvy*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, duben 2008
39. Kolektiv autorů. *Dodatek TP 170 - Navrhování vozovek pozemních komunikací*. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, srpen 2010
40. ČSN EN 73 6121 *Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, únor 2019

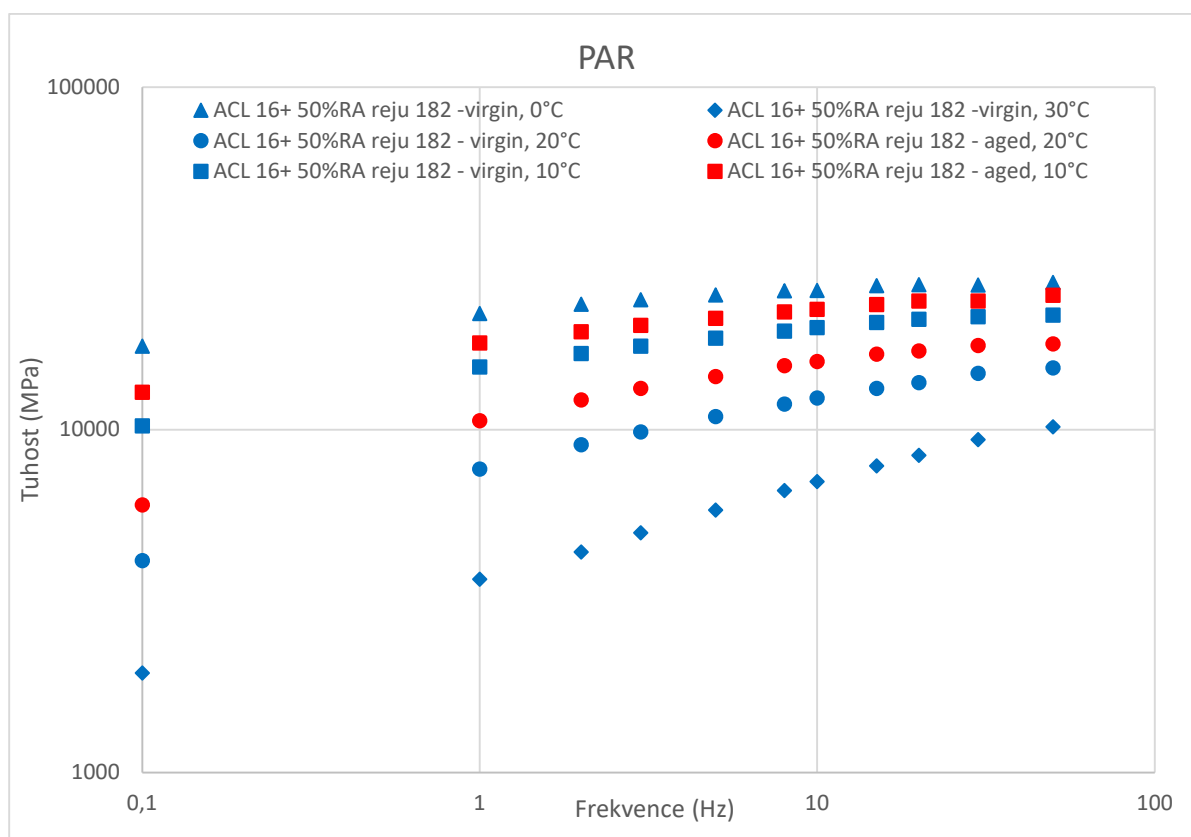


41. ČSN EN 12697-33 *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, únor 2020
42. Miozhang Yu et al. *Antiageing Performance Evaluation of Recycled Engine Oil Bottom Used in Asphalt Rejuvenation*. Hindawi, *Advance in Materials Science and Engineering*, vědecký článek, 2019
43. Jindra J. *Nízkoudržbové asfaltové kryty*. Praha: ČVUT FSv, 2018. bakalářská práce
44. Vacková P. *Výzkum a zhodnocení vybraných vlastností ovlivňujících životnost asfaltových vozovek*. Praha: ČVUT FSv, 2020. disertační práce
45. Mastný J. *Vliv syntetických vosků a rejuvenátorů na vlastnosti asfaltové směsi s R-materiálem*. Praha: ČVUT FSv, 2017. diplomová práce
46. Mensching D. J., Sias J. E., Rowe G. *Exploring Low Temperature Performance in Black Space*. Článek v *Road Materials and Pavement Design*, září 2015
47. Wistuba M. P., Büchner J., Isailović I. *Zur Ermittlung der optimalen Zugabemenge eines Verjüngungsmittel im Rahmen des Asphaltrecyclings*. časopis *Straßen und Autobahn*, vydání 11/2019

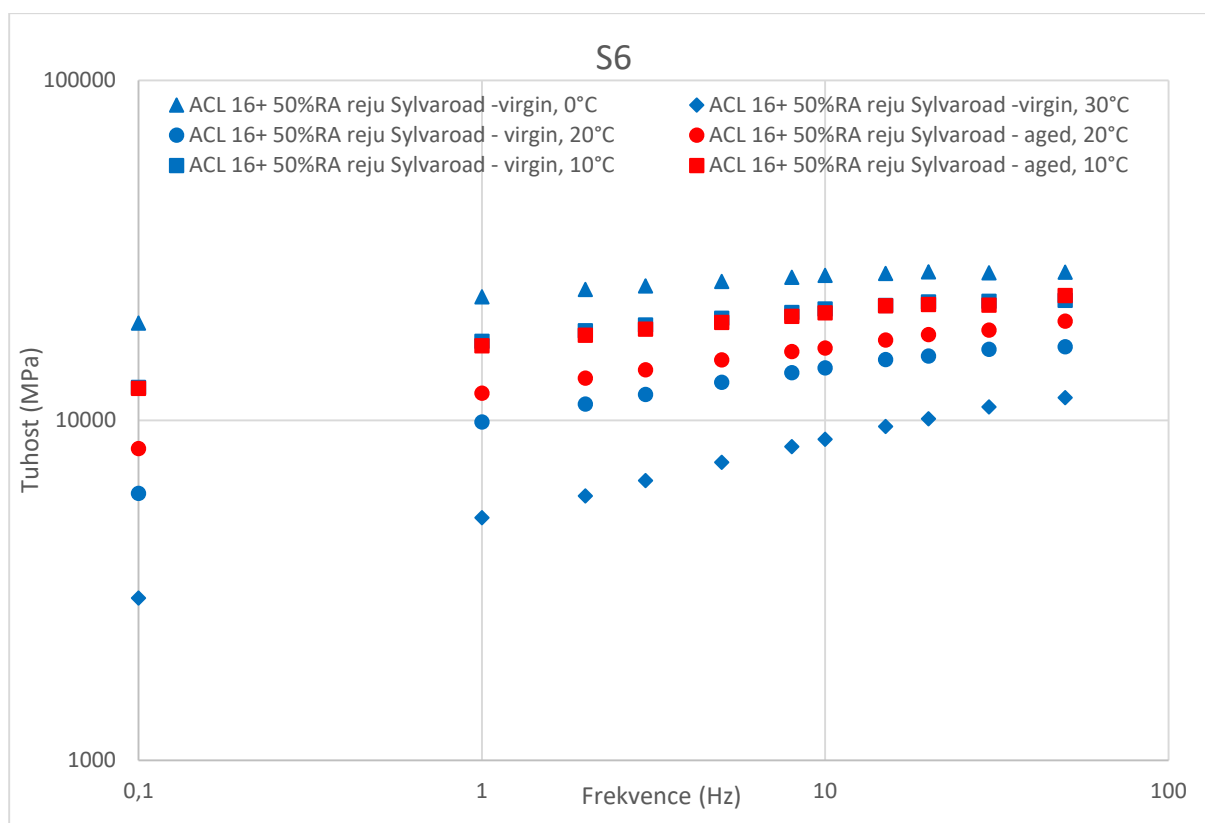
## 10 PŘÍLOHY

### 10.1 VÝSLEDKY MĚŘENÍ KOMPLEXNÍHO DYNAMICKÉHO MODULU TUHOSTI

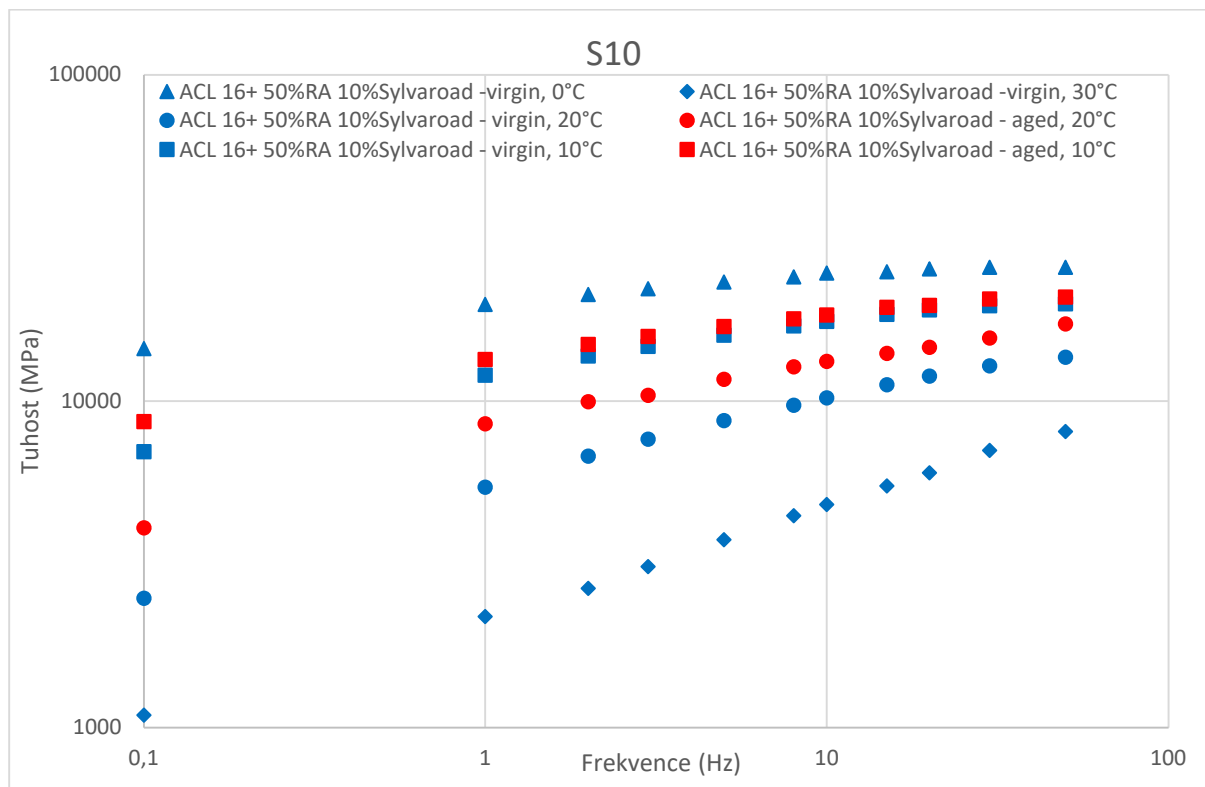
Níže jsou uvedeny průběhy hodnot závislosti tuhosti na zkušební frekvenci. Hodnoty jsou zobrazeny v logaritmickém měřítku. V grafech jsou hodnoty pro nezestárnutá tělesa při zkušebních teplotách 0 °C, 10 °C, 20 °C a 30 °C a dále pro zestárnutá tělesa při zkušebních teplotách 10 °C a 20 °C.



Graf 22 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s rejuvenátorem Paramo REJU 182

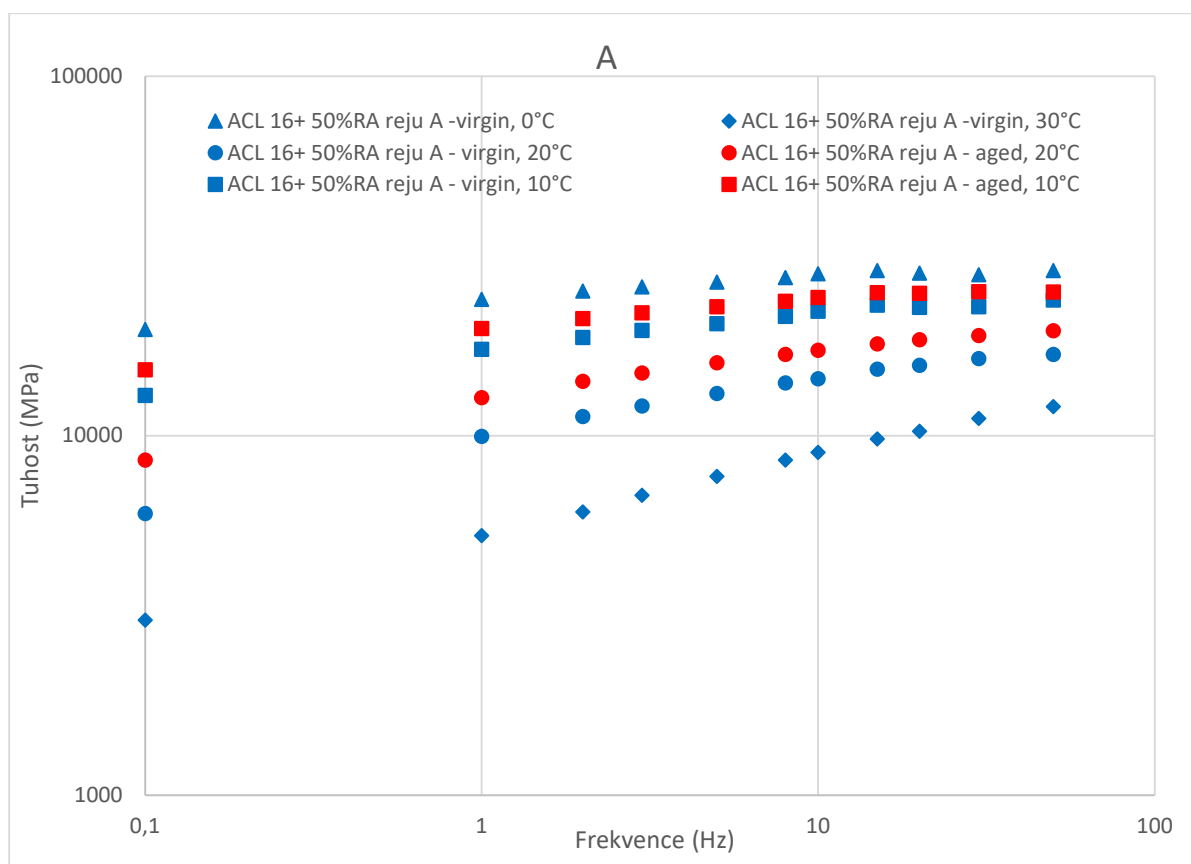


Graf 23 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s rejuvenátorem Sylvaroad RP 1000 v množství 6 %

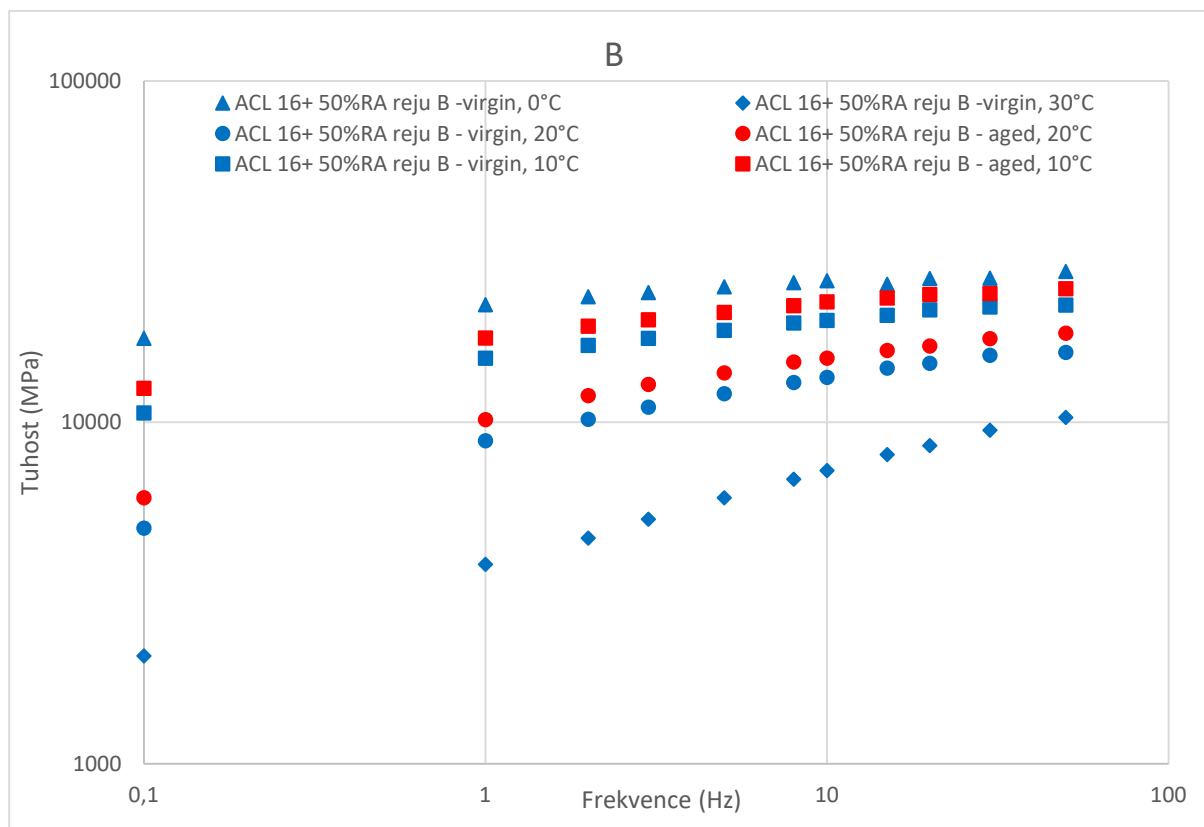


Graf 24 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s rejuvenátorem Sylvaroad RP 1000 v množství 10 %

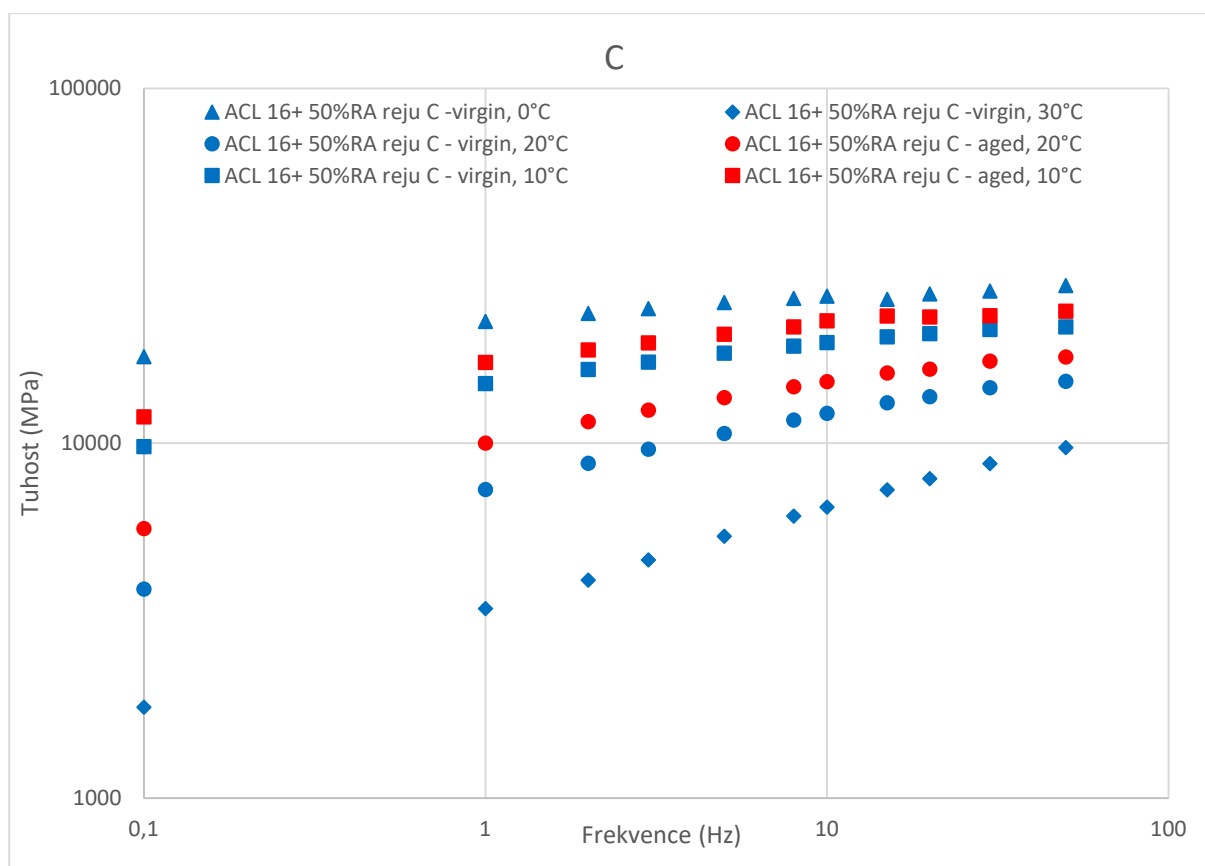




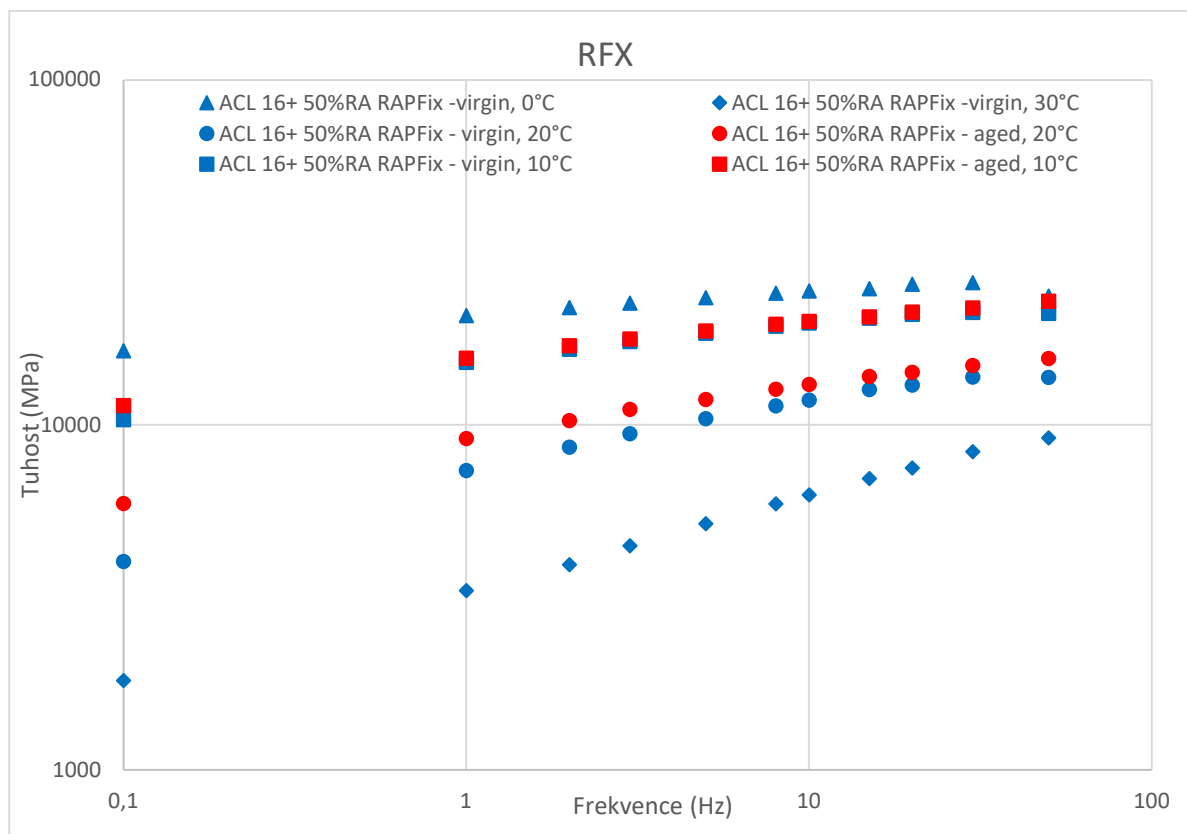
Graf 25 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s AV rejuvenátorem „A“



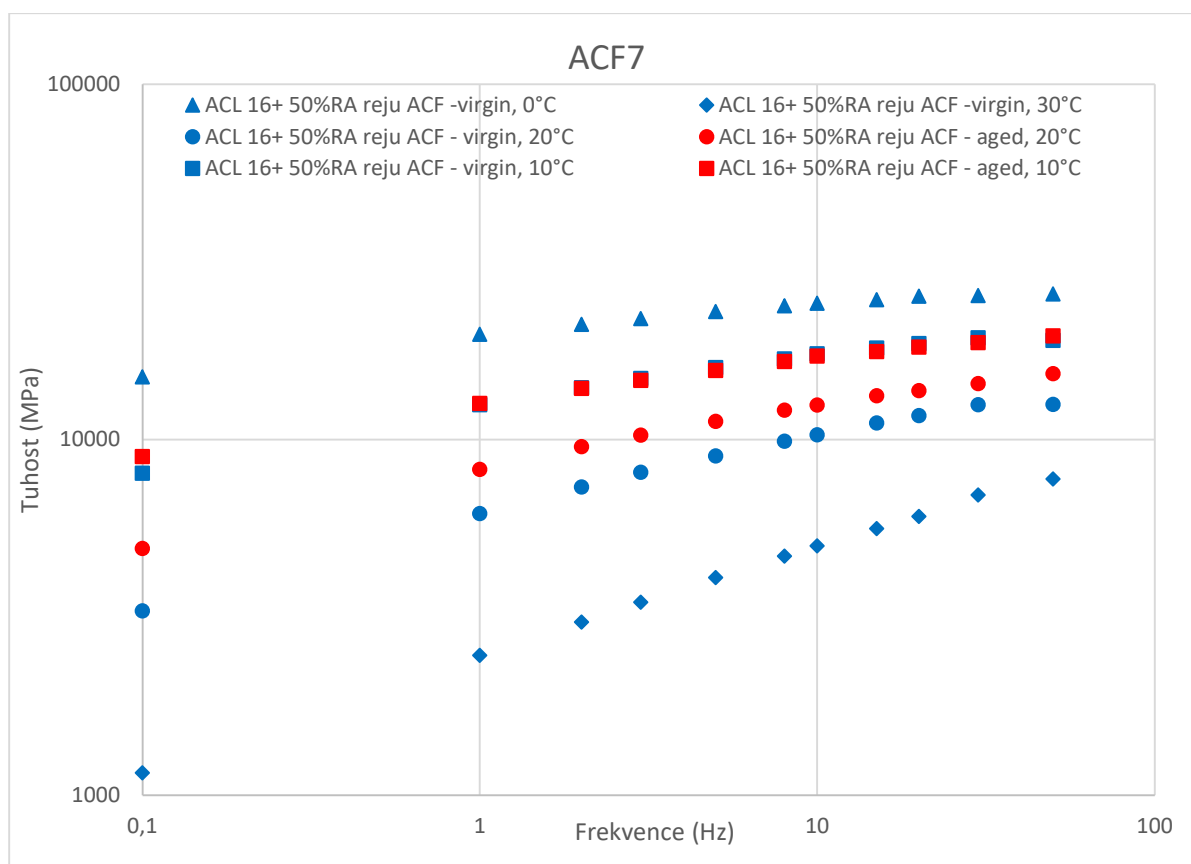
Graf 26 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s AV rejuvenátorem „B“



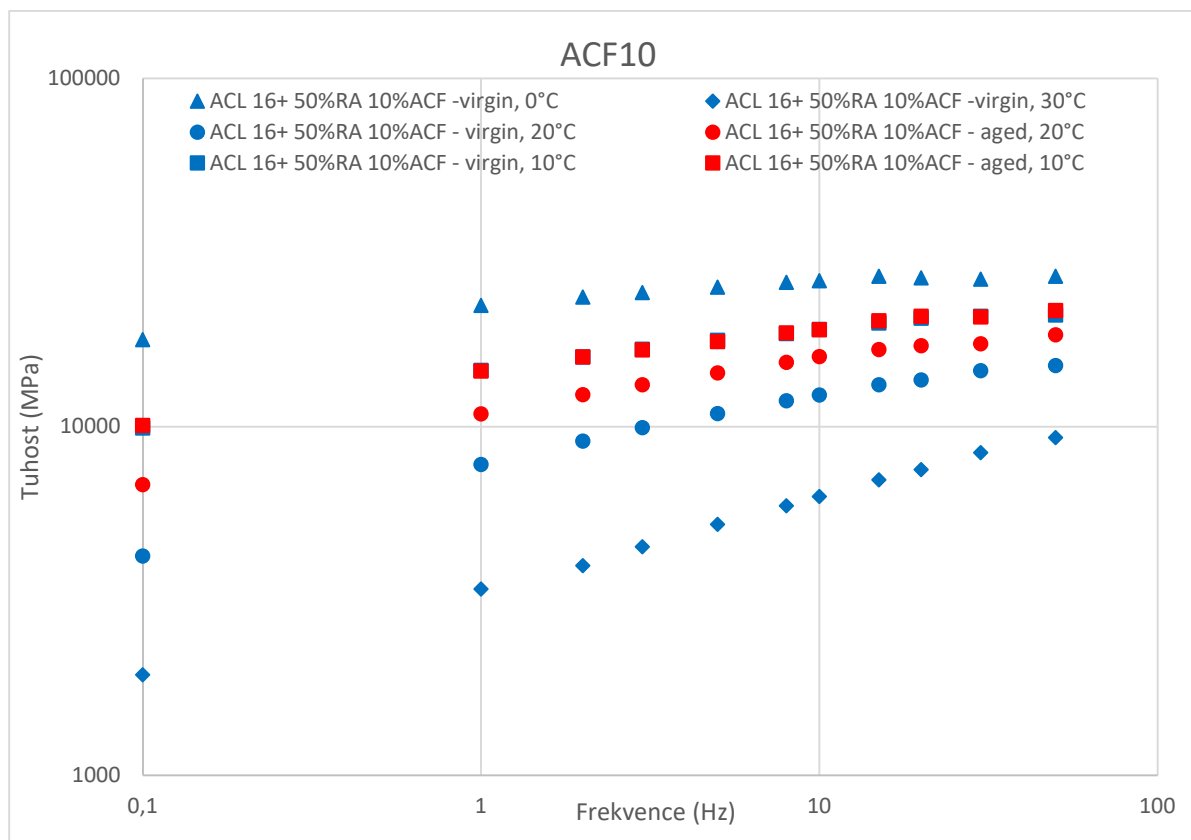
Graf 27 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s AV rejuvenátorem „C“



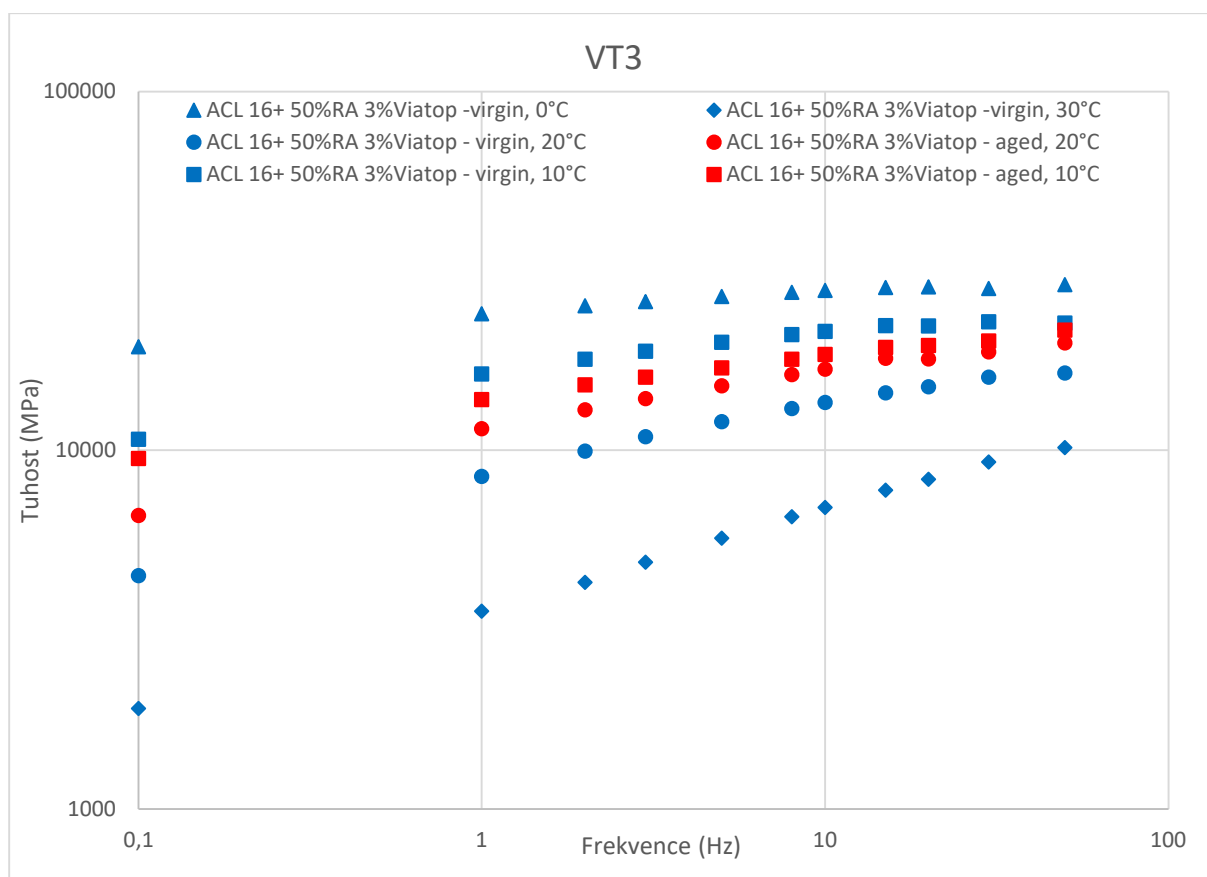
Graf 28 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s rejuvenátorem RAPFix



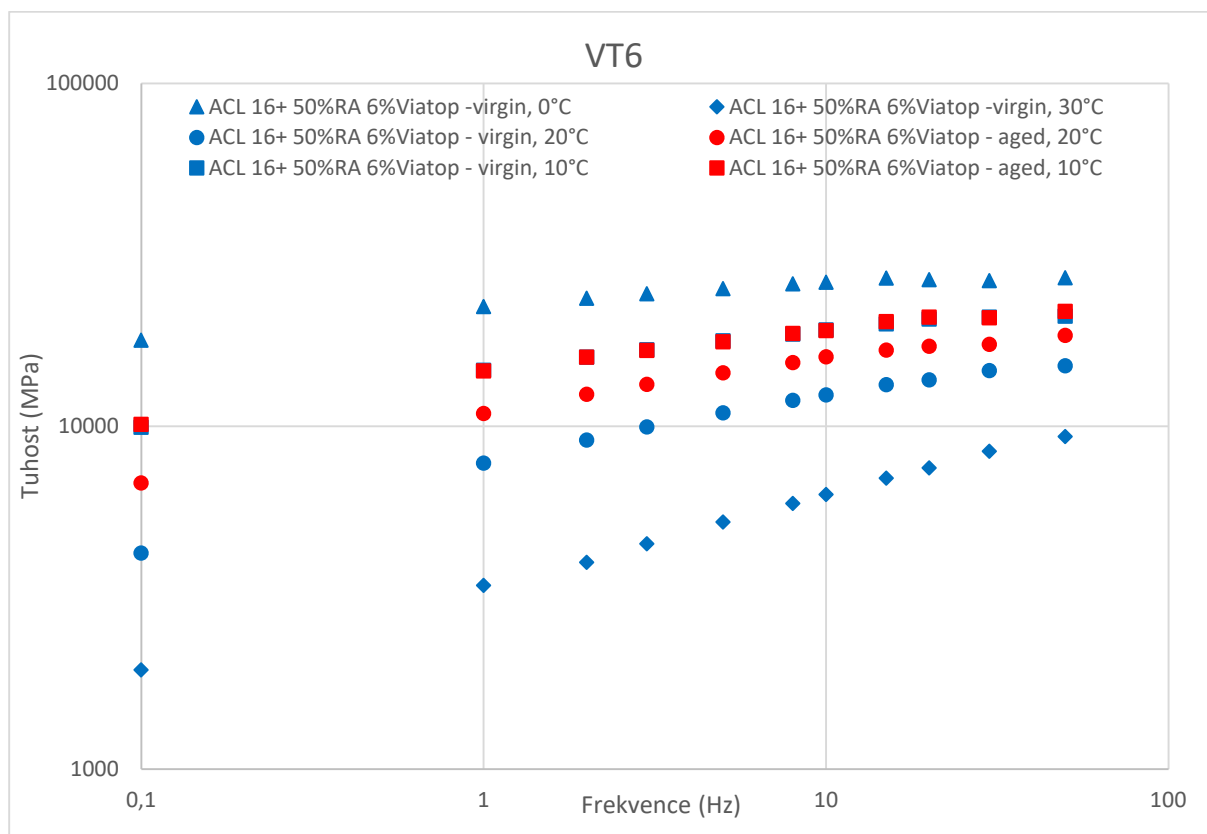
Graf 29 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s rejuvenátorem ACF v množství 7 %



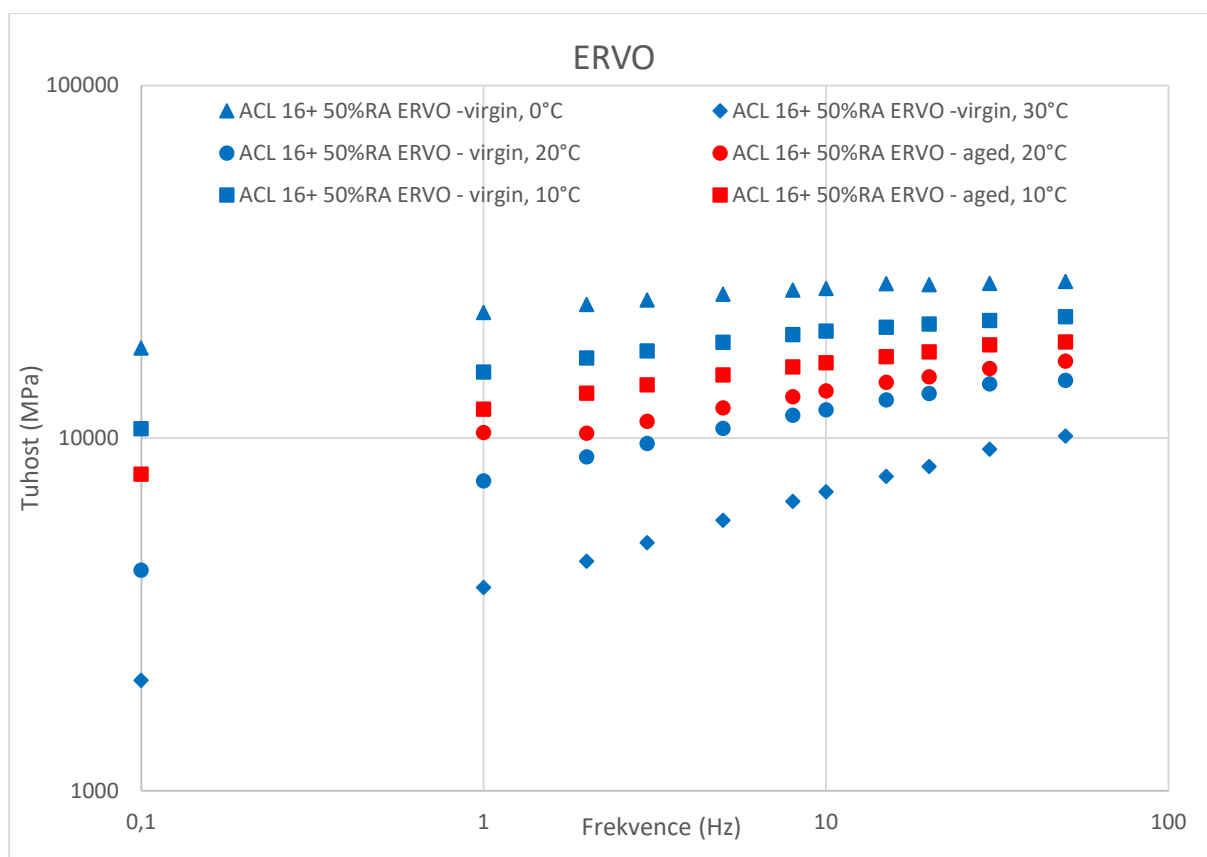
Graf 30 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s rejuvenátorem ACF v množství 10 %



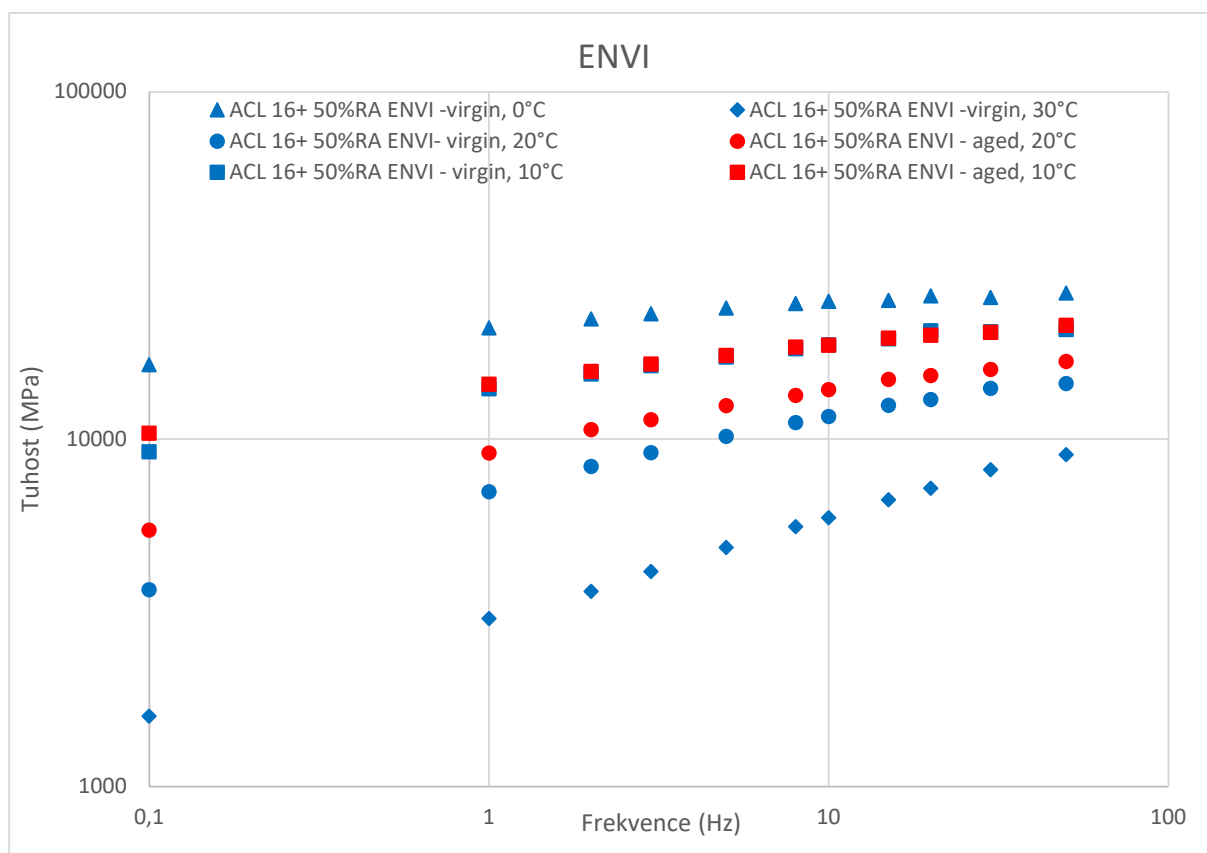
Graf 31 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s rejuvenátorem Viatop RC v množství 3 %



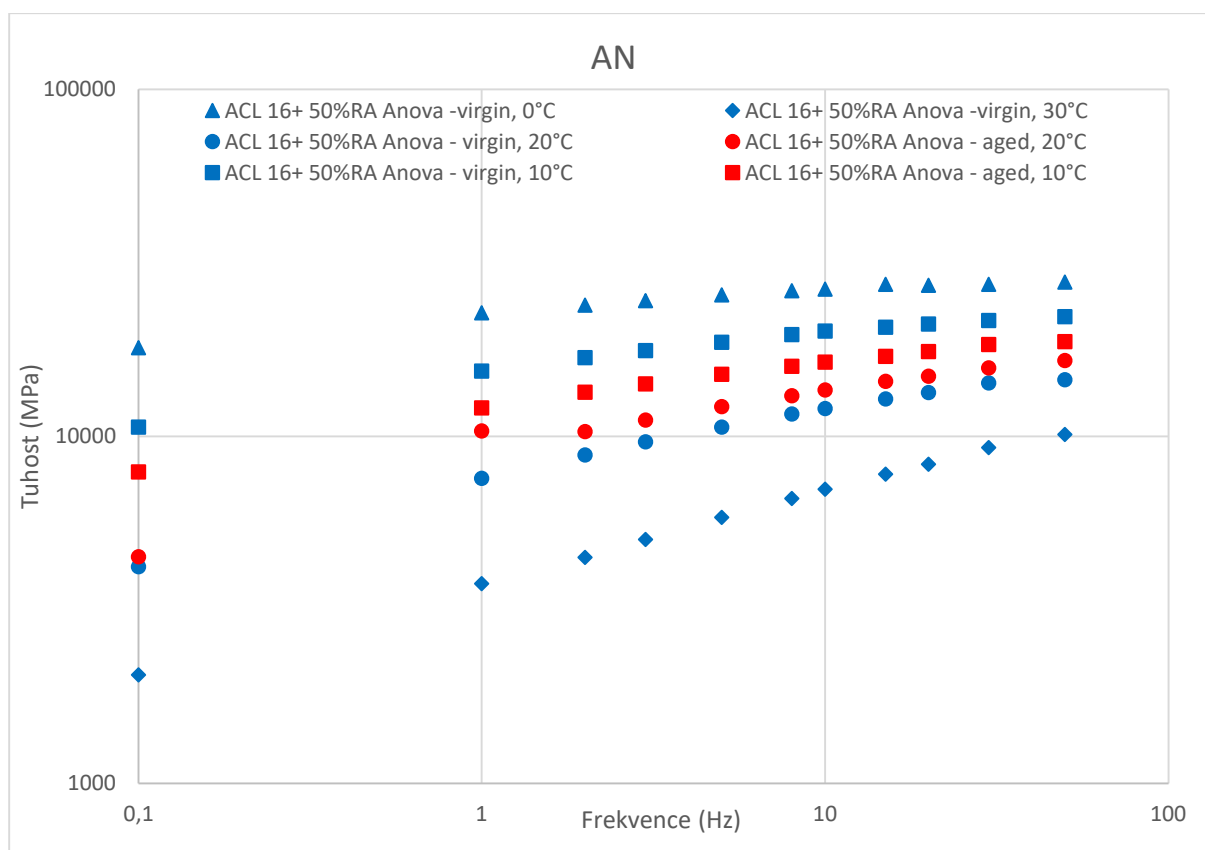
Graf 32 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s rejuvenátorem Viatop RC v množství 6 %



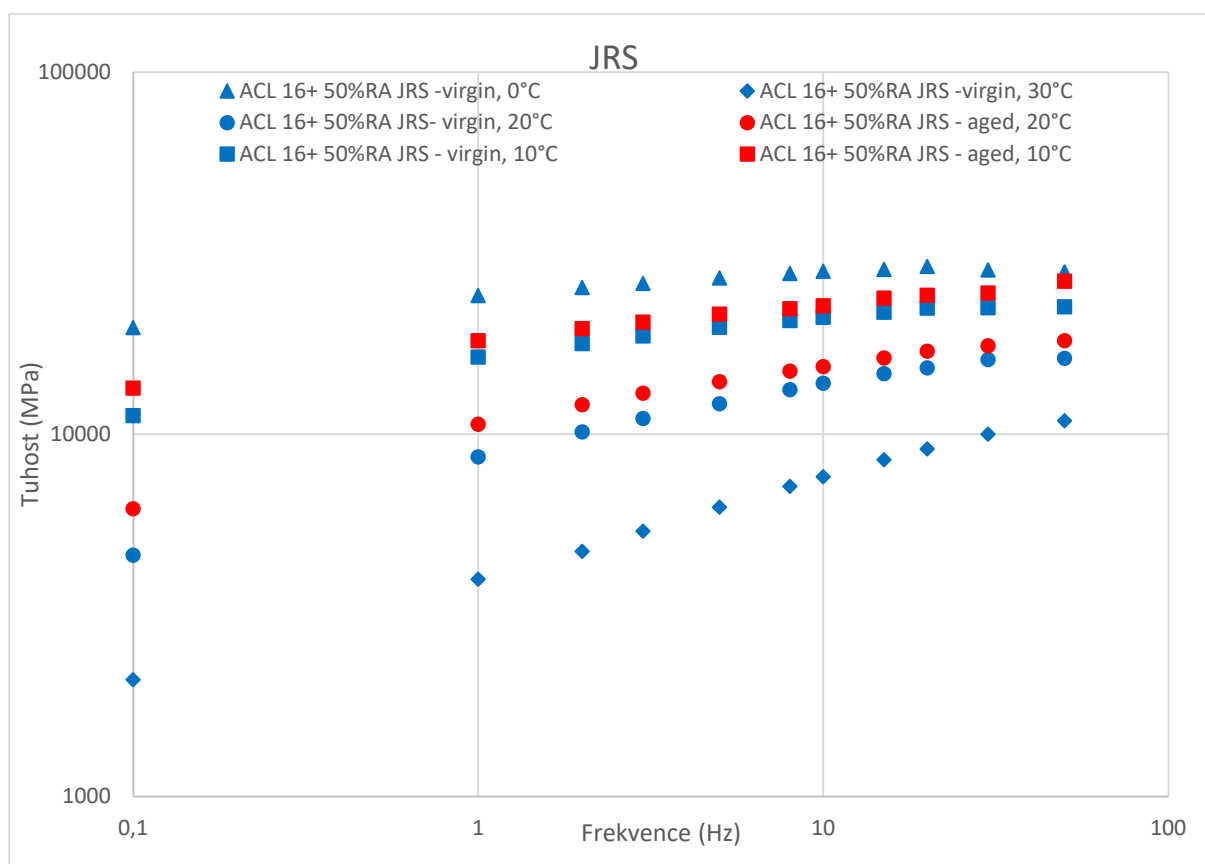
Graf 33 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s rejuvenátorem ERVO



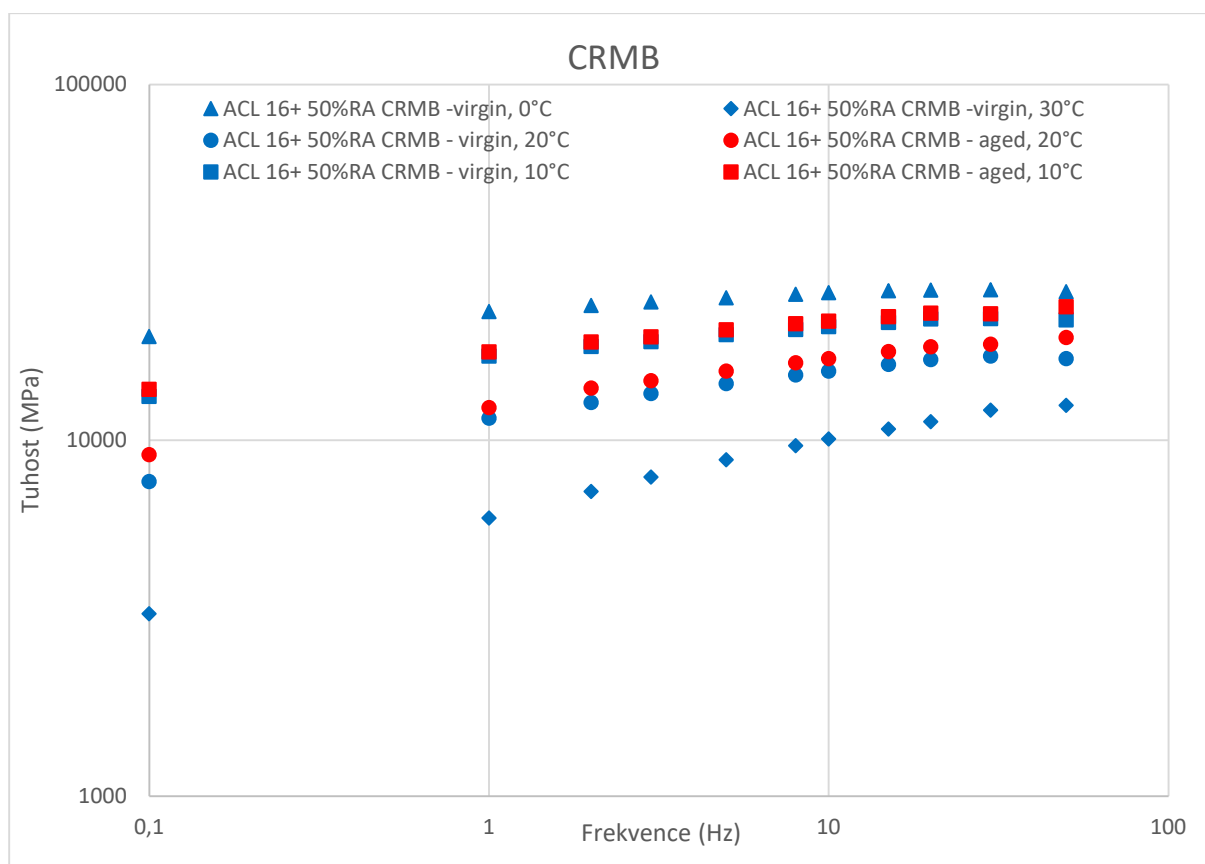
Graf 34 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s oživovací přísadou ENVI



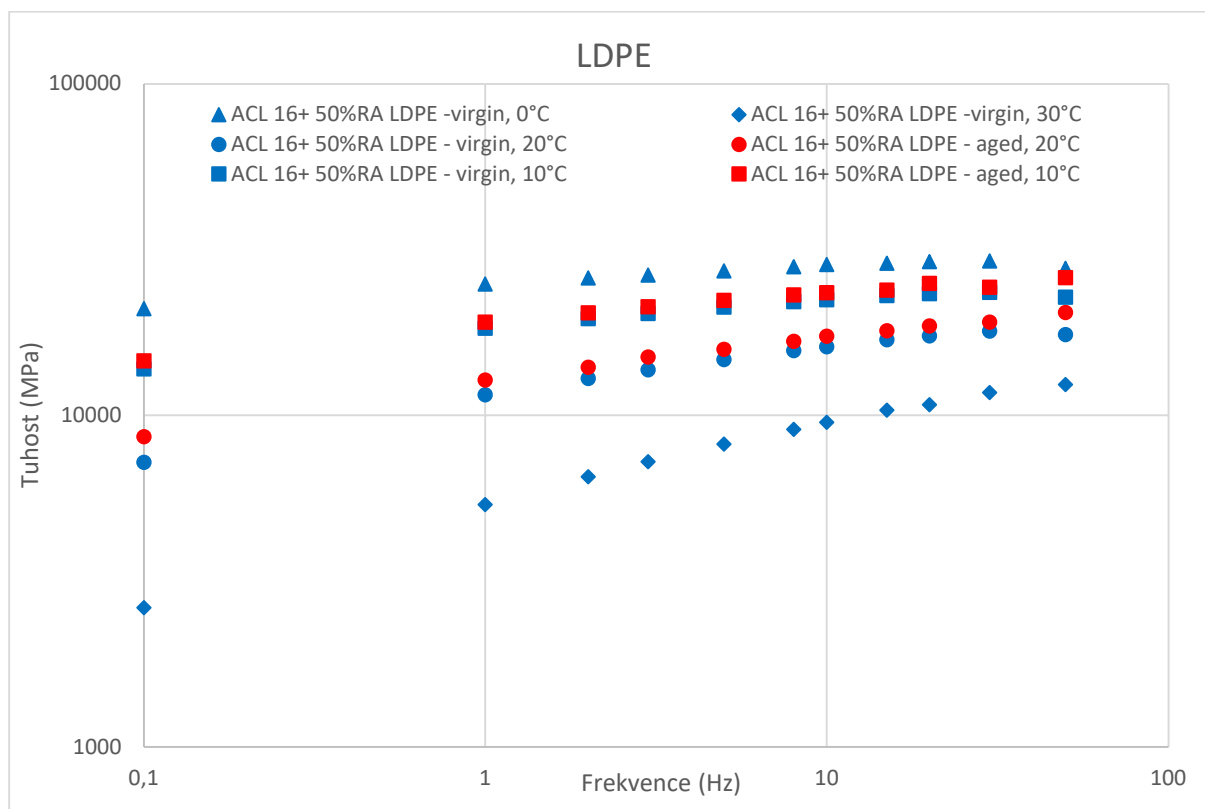
Graf 35 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s rejuvenátorem Anova™ 1817



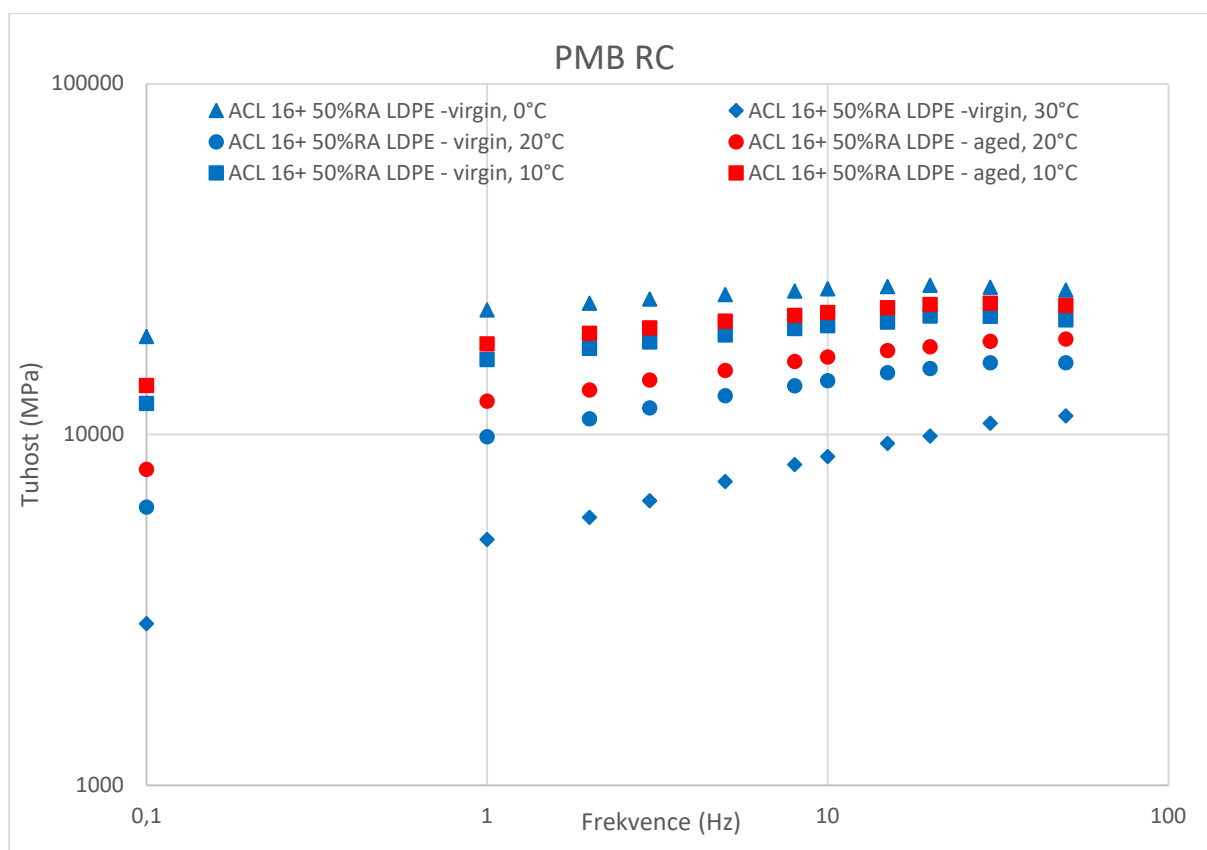
Graf 36 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s rejuvenátorem JRS



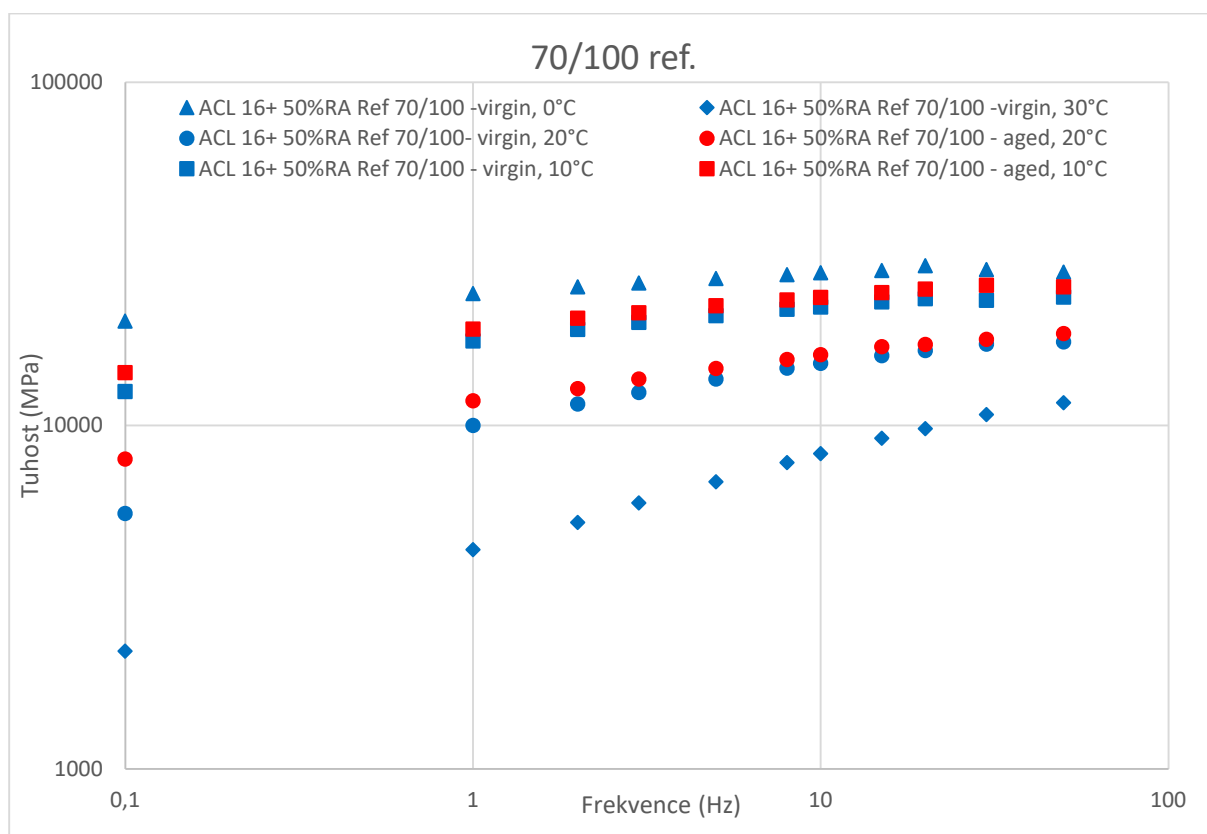
Graf 37 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s asfaltovým pojivem modifikovaným namletou pryží (CRMB)



Graf 38 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s nízkohustotním polyetylenem (LDPE)

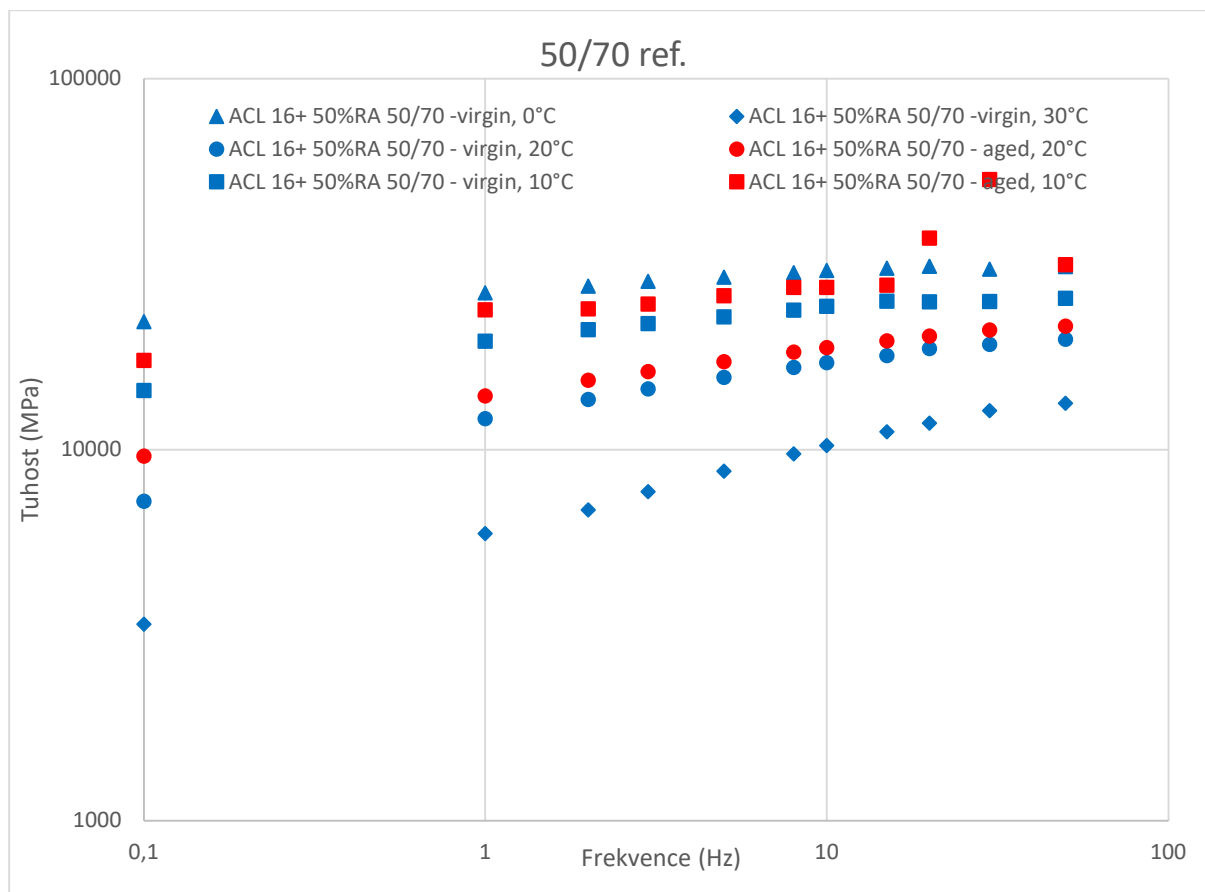


Graf 39 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s polymerem modifikovaným asfaltovým pojivem (PMB RC)



Graf 40 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u varianty s měkčím silničním asfaltem 70/100





Graf 41 – Závislost tuhosti na zkušební frekvenci u referenční varianty se silničním asfaltem 50/70