

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA SILNIČNÍCH STAVEB



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vybrané empirické a funkční vlastnosti asfaltových tmelů a porovnání účinků
filerů různého původu

Selected empirical and functional characteristics of asphalt mortars and
comparison of fillers of different origin

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Jan Valentin, Ph.D.

Bc. Martin Hrdoušek

Praha, 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hrdoušek** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **486210**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra silničních staveb**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce a dopravní stavby**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vybrané empirické a funkční vlastnosti asfaltových tmelů a porovnání účinků filerů různého původu

Název diplomové práce anglicky:

Selected Empirical and Functional Characteristics of Asphalt Mortar and Comparison of the Effect of Fillers of Different Origin

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Valentin, Ph.D. katedra silničních staveb FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **29.09.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Jan Valentin, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ludvík Vébr, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou prací na téma „Vybrané empirické a funkční vlastnosti asfaltových tmelů a porovnání účinku filerů různého původu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Valentina, Ph.D. s využitím zdrojů uvedených v tomto dokumentu.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti použití tohoto díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne.....

.....

Bc. Martin Hrdoušek



Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Janu Valentinovi, Ph.D., za jeho odbornou pomoc, ochotu a vstřícný přístup při zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat Majdě Belhaj, MSc., za pomoc při zpracování výsledků jedné ze zkoušek v rámci praktické části této práce. Rovněž směřuji své poděkování Katedře silničních staveb, Fakulty stavební ČVUT v Praze, za umožnění přístupu do silniční laboratoře, jakož i za ochotu pracovníků této laboratoře být nápomocni při řešení jakéhokoliv problému.



Anotace

Diplomová práce se zabývá problematikou vlastností asfaltových tmelů. Z hlediska teorie je interakce fileru a asfaltového pojiva důležitým ukazatelem výsledných kvalitativních parametrů asfaltové směsi. Práce obsahuje teoretickou část, která charakterizuje předmětné materiály, popisuje jejich chování z hlediska reologie a uvádí některé poznatky plynoucí ze současných výzkumů. V rámci praktické části tato práce analyzuje vliv použitých filerů na chování asfaltového tmelu pomocí empirických a reologických zkoušek.

Klíčová slova

Asfalt, asfaltový tmel, filer, reologie, bod měknutí, silová duktilita, dynamický smykový reometr, MSCR, frequency sweep test (FST), amplitude sweep test (AST), nevratná smyková poddajnost, elastické zotavení, komplexní smykový modul, fázový úhel.

Abstract

This master thesis deals with the issue of the properties of asphalt mortars. From a theoretical standpoint, the interaction between filler and bituminous binder is an essential indicator of the resulting qualitative parameters of the asphalt mixture. The thesis contains a theoretical part that characterizes the concerned materials, describes their behavior in terms of rheology and presents some findings resulting from current research. Within the experimental part, this thesis analyzes the influence of used fillers on the behavior of asphalt mortar through empirical and rheological tests.

Key words

Bitumen, asphalt mortar, filler, rheology, softening point, force ductility, dynamic shear rheometer, MSCR, frequency sweep test (FST), amplitude sweep test (AST), non-recoverable creep compliance, elastic recovery, complex shear modulus, phase angle.



OBSAH

1	ÚVOD	1
2	TEORETICKÁ ČÁST	2
2.1	Asfaltové pojivo	2
2.1.1	Původ asfaltového pojiva	2
2.1.2	Chemické vlastnosti	3
2.1.3	Fyzikální vlastnosti	4
2.1.4	Značení asfaltů	5
2.1.5	Zkoušky asfaltového pojiva	5
2.2	Filery.....	6
2.2.1	Požadavky na filery.....	6
2.2.2	Geometrické vlastnosti.....	6
2.2.3	Fyzikální vlastnosti	7
2.2.4	Chemické vlastnosti	7
2.2.5	Jednotnost výrobních vlastností	7
2.3	Současné poznatky	7
2.3.1	Reologie asfaltových pojiv.....	7
2.3.1.1	Viskozita.....	8
2.3.1.2	Komplexní smykový modul, fázový úhel	9
2.3.1.3	Elastické zotavení, nevratná smyková poddajnost	12
2.3.2	Účinky filerů v asfaltovém tmelu.....	14
2.3.2.1	Úvod do problematiky.....	14
2.3.2.2	Asfaltový tmel	14
2.3.2.3	Teoretické principy spolupůsobení fileru a asfaltového pojiva..	15
2.3.2.4	Výzkumné studie	17
3	PRAKTICKÁ ČÁST	23



3.1	Charakteristiky použitých materiálů.....	23
3.1.1	Asfaltové pojivo	23
3.1.2	Filery	23
3.1.2.1	Destro Kladno.....	24
3.1.2.2	Velké Hydčice.....	24
3.1.2.3	Chlum	24
3.1.2.4	Chornice	24
3.1.2.5	Plešovice.....	24
3.1.2.6	Ocelářská struska.....	24
3.1.2.7	Vratný filer PKB.....	25
3.1.2.8	Měrné hmotnosti filerů	25
3.2	Příprava vzorků	25
3.3	Popis prováděných zkoušek	26
3.3.1	Stanovení bodu měknutí.....	26
3.3.1.1	Materiály a pomůcky	27
3.3.1.2	Příprava a průběh zkoušky	27
3.3.1.3	Výsledky zkoušky	27
3.3.2	Stanovení tažných vlastností metodou silové duktility.....	28
3.3.2.1	Materiály a pomůcky	28
3.3.2.2	Příprava a průběh zkoušky	28
3.3.2.3	Výsledky zkoušky	29
3.3.3	Zkouška MSCR.....	30
3.3.3.1	Materiály a pomůcky	30
3.3.3.2	Příprava a průběh zkoušky	30
3.3.3.3	Výsledky zkoušky	31
3.3.4	Zkouška „ <i>oscillatory frequency sweep test</i> “ (FST).....	33



3.3.4.1	Materiály a pomůcky	34
3.3.4.2	Příprava a průběh zkoušky	34
3.3.4.3	Výsledky zkoušky	34
3.3.5	Zkouška „ <i>oscillatory amplitude sweep test</i> “ (AST).....	35
3.3.5.1	Materiály a pomůcky	36
3.3.5.2	Příprava a průběh zkoušky	36
3.3.5.3	Výsledky zkoušky	36
3.4	Výsledky zkoušek.....	36
3.4.1	Stanovení bodu měknutí.....	36
3.4.2	Stanovení tažných vlastností metodou silové duktility.....	37
3.4.3	Zkouška MSCR.....	42
3.4.4	Zkouška „ <i>oscillatory frequency sweep test</i> “ (FST).....	48
3.4.5	Zkouška „ <i>oscillatory amplitude sweep test</i> “ (AST).....	55
3.5	Vyhodnocení zkoušek	62
4	ZÁVĚR	66
5	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	67
6	SEZNAM GRAFŮ	71
7	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	73
8	SEZNAM TABULEK.....	74
9	PŘÍLOHY	75



1 ÚVOD

V hutněných asfaltových směsích, které se skládají z kameniva, asfaltového pojiva a vzduchových mezer, hraje výraznou roli asfaltový tmel (jinak také asfaltový mastix), což je označení pro směs pojiva s nejdrobnějšími částicemi kameniva, tzv. filery, resp. zrnky kameniva do velikosti 1-2 mm.

Problematika v oblasti výzkumu vlivu filerů na asfaltový tmel tkví zejména v širokém spektru vlastností filerové komponenty a jejich relativně obtížně určitelnému vlivu na spolupůsobení s asfaltovým pojivem. Jednotlivé druhy nejjemnější frakce se totiž odlišují mineralogickým složením, tvarem a velikostí zrn a z toho plynoucími rozdílnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Kromě toho interakce fileru a asfaltového pojiva ovlivňuje přirozeně typ používaného asfaltu, ale také vnější podmínky jako jsou teplota nebo frekvence zatížení.

Diplomová práce v teoretické části obsahuje kromě základních informací o předmětných materiálech také část zabývající se reologií asfaltových pojiv, jejíž poznatky se v současné době aplikují při snaze o vystižení vlastností asfaltů. Rovněž je uveden náhled do teoretických principů spolupůsobení asfaltového pojiva a fileru. Závěr teoretické části se věnuje poznatkům některých zahraničních studií.

V rámci praktické části byly připraveny vzorky asfaltových tmelů se stejným druhem pojiva a různými druhy fileru. Následně došlo k provedení souboru zkoušek, mezi které patří stanovení bodu měknutí, silové duktility a reologických vlastností. Praktická část tedy obsahuje výsledky těchto experimentů včetně jejich interpretace.

Cílem diplomové práce je zhodnocení vlivu různých druhů využitelných filerů na výsledné vlastnosti asfaltového tmelu. Zejména se jedná o hledisko posouzení míry ztužujícího efektu a viskoelastického rozsahu použití asfaltového tmelu při různých okrajových podmínkách zvolených funkčních zkoušek. Vlastní filery byly vybrány na základě dohody s vedoucím diplomové práce a zahrnují tradiční jemně mletou vápencovou moučku, zástupce vratného fileru, jak je získáván na obalovně při výrobě asfaltových směsí, zástupce lomových odprašků i vedlejších produktů metalurgické výroby. Touto volbou jsou pokryty různé možné zdroje volby filerů při jejich použití v asfaltové směsi.



2 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část charakterizuje materiály, které se bezprostředně týkají tématu diplomové práce. Jmenovitě se jedná o asfaltové pojivo a filery. Dále se tato část věnuje reologii asfaltových pojiv a rovněž současným poznatkům na poli dané problematiky. S pomocí nejrůznějších odborných studií a jiných zdrojů je uveden náhled, který se stal motivací pro typy prováděných zkoušek a jejich interpretace uvedené v praktické části této práce.

2.1 Asfaltové pojivo

Asfaltové pojivo (dále i asfalt) představuje základní stavební materiál v silničním stavitelství. Využití nachází zejména v asfaltových směsích (směs kameniva a asfaltového pojiva), ale také v prolévaných podkladních vrstvách nebo asfaltových emulzích. (1)

2.1.1 Původ asfaltového pojiva

Asfaltové pojivo je možné rozdělit dle původu na přírodní a ropné. (1)

Historie přírodních asfaltů sahá až do starověké Mezopotámie, Číny a Egypta, kde asfalty našly užití především jako hydroizolační a tmelící prvek. Novodobé používání započalo s objevením asfaltového jezera roku 1595 v Trinidadu. Dnes zastupuje přírodní asfalt v celkovém množství spotřebovaného asfaltu velmi malý podíl a používá se zejména jako přísada do ropných asfaltů, která vlastnosti výsledného asfaltového pojiva vylepšuje. Kromě již zmíněného asfaltového jezera v Trinidadu je přírodní asfalt těžen například v lokalitě Selenica v Albánii. (1)

Historie ropných asfaltů je svázána s první provedenou frakční destilací ropy v roce 1873. O tři roky později došlo v USA k prvnímu asfaltování vozovky směsí, která vznikla touto technologií. Frakční destilace ropy spočívá ve fragmentaci jednotlivých složek obsažených v ropě, jako jsou benzíny a oleje, za vzniku destilačního zbytku ve formě mazutu, ze kterého jsou dále oddělovány jednotlivé složky. Asfalt vzniká na konci tohoto procesu. V současné době tvoří takto získaný asfalt většinový podíl v celkovém množství produkovaného asfaltového pojiva. (1)

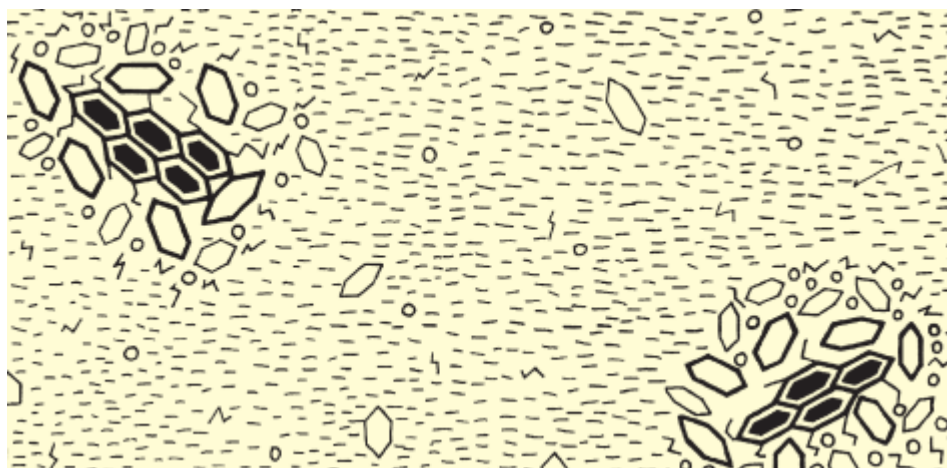


2.1.2 Chemické vlastnosti

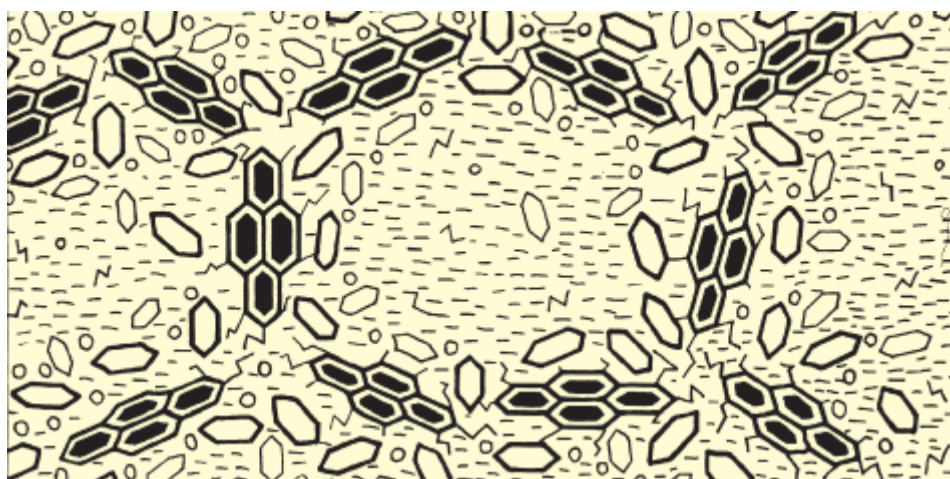
Dle Zajíčka a kol. (1) je asfalt z chemického hlediska „koloidní směs vysoce molekulárních uhlovodíků a heteroatomických látek, ve které je zastoupeno široké spektrum různých organických sloučenin.“ Asfalt přitom obsahuje dvě fáze; tekutou a pevnou. Tekutá složka je tvořena maltény, které obsahují saturáty, aromáty a pryskyřice. Jedná se veskrze o látky olejového charakteru, případně o polopevné látky. Pevnou složku pak tvoří asfaltény, což je označení pro makromolekulární heteroatomické látky. Asfaltény představují nejtěžší složku v asfaltovém pojivu a jejich podíl ovlivňuje viskozitu, tuhost a křehkost. S nárůstem podílu asfalténů v pojivu tak vzrůstá bod měknutí a klesají hodnoty penetrace a zároveň se vlivem křehkosti zhoršuje bod lámavosti. Zjednodušeně lze říct, že asfaltény zajišťují tvrdost a maltény se starají o plastické vlastnosti asfaltu a umožňují propojení obou složek. (1) (2) (3)

Jak již bylo zmíněno, vlastnosti asfaltového pojiva se mění v závislosti na zastoupení jednotlivých složek. Pokud se v asfaltu vyskytuje takové množství aromátů a pryskyřic, které dokáže plně obalit pevné částice (asfaltény), označuje se dané pojivo jako pojivo typu „SOL“ (obr. 1). Pevné částice jsou v tomto typu obklopeny takovým množstvím média, že se mohou volně pohybovat. Vzhledem k vyššímu obsahu malténů (tedy olejovité a pryskyřicové složky) se však vyznačují vysokou měkkostí a nízkou viskozitou. Oproti tomu pojivo, ve kterém se nenachází dostatek aromátů a pryskyřic k obalení pevných částic, se charakterizuje jako typ „GEL“ (obr. 2). Asfaltény se v tomto typu shlukují a vytvářejí nepravidelné řetězce, které jsou na sebe navázány. V praxi se většina silničních asfaltů nachází v přechodové oblasti mezi typem „SOL“ a „GEL“. Rovněž platí, že pojivo v průběhu své životnosti nesetrvává ve stejném stavu, co se vymezení na tyto dva typy týče, ale mění svou vnitřní strukturu v závislosti na teplotě a stáří. Se vzrůstající teplotou se pojivo vnitřní strukturou přibližuje více typu „SOL“ a vlivem vysoké měkkosti vznikají trvalé deformace. Při stárnutí je tento jev opačný, kdy se struktura blíží typu „GEL“, čímž se materiál stává křehčím a mohou se tvořit únavové trhliny. (3) (4)

Následující obrázky 1 a 2 zachycují výše popsané struktury asfaltového pojiva. Šestiúhelníky představují asfaltény, které jsou rozptýleny v malténové fázi.



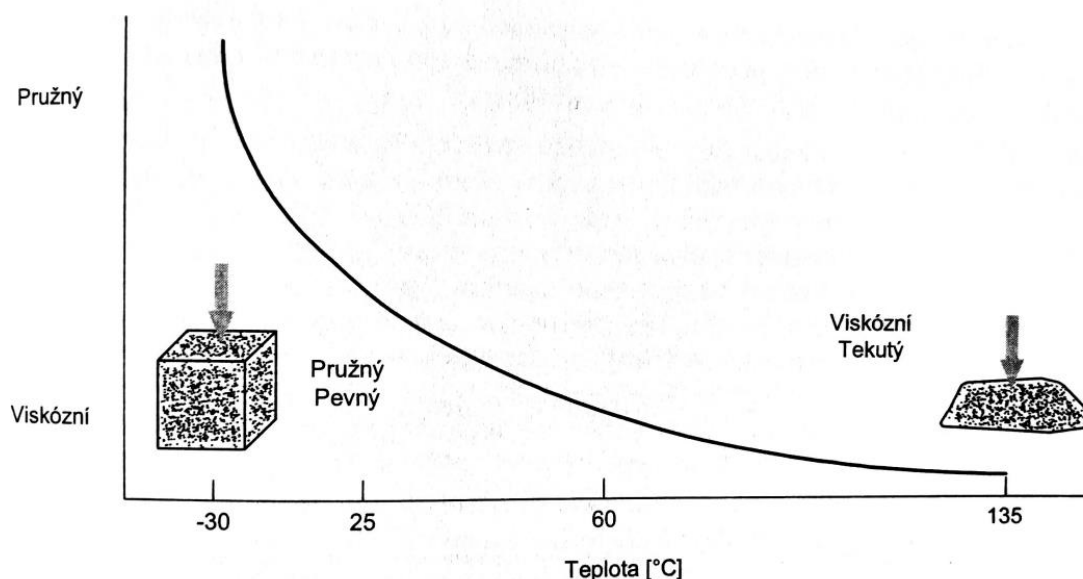
Obrázek 1: Struktura typu "SOL" (4)



Obrázek 2: Struktura typu "GEL" (4)

2.1.3 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti asfaltů jsou pro praktické využití v silničním stavitelství nejdůležitějším ukazatelem. Právě na fyzikální vlastnosti se zaměřují zkušební metody prováděné v této diplomové práci. Z fyzikálního hlediska je asfalt především viskoelastický materiál, který je velmi citlivý na změnu teploty a jeho vlastnosti se s touto změnou mění. Rozsah teplot, za kterých je asfalt pro potřeby silničního stavitelství užitečný, lze ohraničit, viděno tradičními přístupy, zespodu bodem lámavosti a shora bodem měknutí. Na asfalt lze v tomto teplotním rozmezí nahlížet jako na pružnou a pevnou látku. Za vysokých teplot se naopak chová jako kapalina, jejíž míra viskozity odpovídá dosažené teplotě. (1) Následující obrázek zachycuje právě tyto vlastnosti.



Obrázek 3: Viskoelastické chování asfaltu (1)

2.1.4 Značení asfaltů

Označování asfaltového pojiva je závislé na druhu asfaltu. V evropských zemích se označení řídí podle výsledků penetrační zkoušky, které se udávají v penetračních jednotkách, přičemž 1 p.j. = 0,1 mm. Tato zkouška spočívá ve stanovení hloubky proniknutí normové jehly, jež je zatížena hmotností 100 g, do předem vytemperovaného vzorku obvykle na teplotu 25 °C, po dobu 5 vteřin. (1)

Pomocí penetrační zkoušky lze zařadit dané pojivo do určité třídy (gradace), která je vyjádřena pomocí zlomku. Tento zlomek udává charakteristické rozmezí hodnot penetrace. V České republice mezi nejčastěji používaná pojiva patří silniční asfalty s gradací 50/70 nebo 70/100. Vyšší hodnota rozmezí tedy značí měkčí pojivo a naopak. (1)

2.1.5 Zkoušky asfaltového pojiva

Jak již bylo uvedeno, asfaltová pojiva představují z hlediska své vnitřní struktury nehomogenní směs a jejich vlastnosti není snadné jednoduše specifikovat. V zásadě lze odlišit dvě skupiny zkoušek; konvenční (empirické) a funkční. (1)

Empirické zkoušky se vyznačují tím, že vycházejí z dlouhodobých zkušeností. Jejich výsledkem je často pouze jedna hodnota, přičemž musí být splněny okrajové podmínky zkoušky (teplota, časový průběh zkoušky aj.). Procesně se jedná o zkoušky často jednoduché a časově nenáročné. Je však třeba zdůraznit, že empirické zkoušky,



resp. jejich výsledky, neumožňují zcela vystihnout chování pojiva v asfaltových vozovkách. Slouží tedy především k ověření základních informací, na základě kterých je možné zařazení daného pojiva dle norem. Mezi základní empirické zkoušky patří již zmíněná penetrační zkouška a dále např. stanovení teploty na bodu měknutí a bodu lámavosti. (1) (3)

Oproti tomu zkoušky funkční dokáží lépe vystihnout chování v reálných podmínkách, jimiž jsou silniční konstrukce vystaveny. Tím je míněna zejména možnost stanovení základních vlastností pojiva, jako jsou chování při nízkých teplotách a přetvárné vlastnosti, a to případně i s vlivem stárnutí. V rámci funkčních zkoušek jsou využívány průhybové reometry, dynamické smykové reometry, rotační viskozimetry aj. (1) (3)

Konkrétní popis jednotlivých empirických a funkčních zkoušek využívaných v rámci praktické části této diplomové práce obsahuje kapitola 3.3.

2.2 Filery

Filery jsou označení pro jemné částice kameniva, jednoho z dalších základních materiálů používaných ve stavebnictví. Pro použití v silničním stavitelství se lze setkat se dvěma druhy filerů; vratným a přídatným (lišící se svojí výrobou, resp. původem svého vzniku; viz kap. 2.3.2.2). Filer lze specifikovat jako frakci kameniva, jejíž většina částic není větší než 0,063 mm a propadne při zrnitostní zkoušce, prokazující zastoupení velikosti zrn v navážce kameniva, sítem právě této velikosti. O konkrétních specifikacích na zrnitost je pojednáno níže. (1) (5)

2.2.1 Požadavky na filery

Filery lze dle ČSN EN 13043 (5) použít jako stavební materiál, pokud je dosaženo jeho určitých vlastností. Ověření těchto vlastností závisí na účelu použití nebo původu kameniva, z nichž filerové částice vznikly. Obecně jsou specifikovány požadavky na geometrické, fyzikální a chemické vlastnosti a požadavky na jednotnost vlastností vyrobeného fileru. (5)

2.2.2 Geometrické vlastnosti

Geometrickými vlastnostmi fileru jsou především zrnitost a obsah nevhodných částic. U zrnitosti ČSN EN 13043 (5) stanovuje procentuální propad zrn na sítích při



zrnitostní zkoušce. Ve vzorcích se smí vyskytovat ve hmotnostním vyjádření nejvýše 15 % zrn, která se při rozboru zachytí na sítu velikosti 0,125 mm a nejvýše 30 % zrn, která nepropadnou sítím o velikosti 0,063 mm. Podíl nevhodných částic (jílovité částice aj.) se vyjadřuje pomocí maximálního přípustného obsahu methylenové modři v g/kg, přičemž norma specifikuje 5 kategorií koncentrace této látky. (5)

2.2.3 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti představují obsah vody, měrná hmotnost zrn a ztužující vlastnosti. Je stanoveno, že obsah vody nesmí překročit více než 1 % hmotnosti navážky. Mezi požadavky na ztužující vlastnosti patří mezerovitost fileru a výsledky zkoušky „delta kroužek a kulička“ fileru pro asfaltové směsi. (5)

2.2.4 Chemické vlastnosti

Požadavky na chemické vlastnosti jsou úzce spjaty s reakcí fileru na vodu a rozpustnost fileru v této kapalině. Dále se ověřuje obsah uhličitánů a hydroxidu vápenatého. (5)

2.2.5 Jednotnost výrobních vlastností

Požadavkům na splnění jednotnosti vlastností vyrobeného fileru lze vyhovět, pokud se ověří alespoň jedna z vlastností, které vymezuje norma ČSN EN 13043 (5). První takovou vlastností je tzv. asfaltové číslo. Toto číslo vyjadřuje potřebný objem vody, který spolu se 100 g fileru utvoří směs s předem stanovenou viskozitou. Dalším ověřením může být stanovení úbytku hmotnosti žiháním u filerů popílkového charakteru nebo například ověření měrného povrchu zkouškou podle Blaina. Všechny tyto zkoušky mají za úkol prokázání shody s hodnotou, kterou deklaruje výrobce. (5)

2.3 Současné poznatky

2.3.1 Reologie asfaltových pojiv

Jak již bylo výše uvedeno, značná problematika při popisování vlastností asfaltových pojiv tkví mimo jiné v tom, že se jedná o viskoelastický materiál, jehož vlastnosti se různí dle teploty a zatížení. Jelikož empirické zkoušky probíhají většinou za předem specifikovaných okrajových a neměnných podmínek (např. teplota),



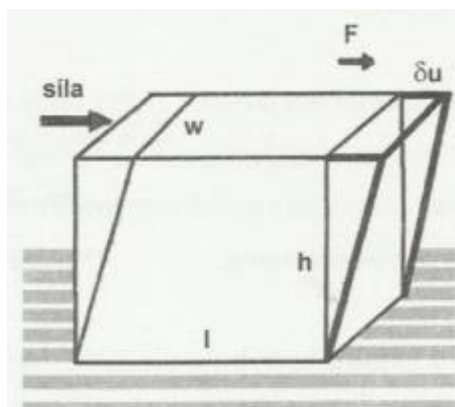
neumožňují vystihnout dynamické vlastnosti materiálu, resp. jejich vývoj v čase. Proto se stále častěji pro popis vlastností asfaltových pojiv uplatňuje reologický vědní obor, který úzce souvisí s již naznačenými funkčními zkouškami. Reologie se zabývá látkami, jejichž chování neodpovídá viskóznímu nebo pružnému, ale viskoelastickému či viskoplastickému chování. Reologické zkoušky mají tu výhodu, že dokáží aplikovat různé druhy zatížení, frekvence zatížení, přetvoření a teplotu, a zavádět je v průběhu zkoušky jako proměnnou veličinu. Tím lze vystihnout zmíněné dynamické vlastnosti související s praktickými parametry výsledné směsi, jako je například odolnost vůči tvorbě trvalých deformací, odolnost proti únavě nebo chování při stárnutí. (1) (7) (3) (8)

2.3.1.1 Viskozita

Prvním základním reologickým parametrem je viskozita. Míru viskozity určuje schopnost materiálu klást odpor vůči vnějšímu zatížení, jinak také vůči toku. Viskóznější materiály odolávají většímu zatížení a méně se přetvářejí, a naopak. (8)

Viskozitní chování úzce souvisí se smykovým napětím τ a smykovým přetvořením γ . Problematiku lze ilustrovat na příkladu tělesa, které leží pevně na podložce, a jež začneme zatěžovat boční silou v horní úrovni. Za předpokladu ideálního pevného tělesa nastane elastická deformace a těleso se vychýlí ve směru působící síly, přičemž průběh této deformace je lineární s nejvyšší hodnotou v horní části tělesa a nulovou hodnotou u spodní podstavě. Smykové napětí v úrovni podložky se stanoví jako poměr boční síly F a plochy podstavě A . Smykové přetvoření závisí na přírůstku bočního posunu δu a výšky tělesa h . (7)

$$\gamma = \frac{\delta u}{h} \quad (1)$$



Obrázek 4: Smykové přetvoření

Smykové napětí u ideálních kapalin způsobené dynamickou viskozitou je dané Newtonovou rovnicí, kde η představuje dynamickou viskozitu [Pa.s] a $\dot{\gamma}$ rychlost smykové deformace [1/s]. Rychlost smykové deformace znázorňuje přírůstek (změnu) přetvoření v čase $\frac{d\gamma}{dt}$. (9)

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2)$$

Dynamickou viskozitu pak lze vyjádřit z předešlé rovnice.

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

Viskozita kinematická je definována jako poměr dynamické viskozity a hustoty. Zatímco dynamická viskozita znázorňuje odpor vůči toku při působení vnějšího zatížení, kinematická viskozita vyjadřuje tento odpor při působení pouze gravitační síly. (10)

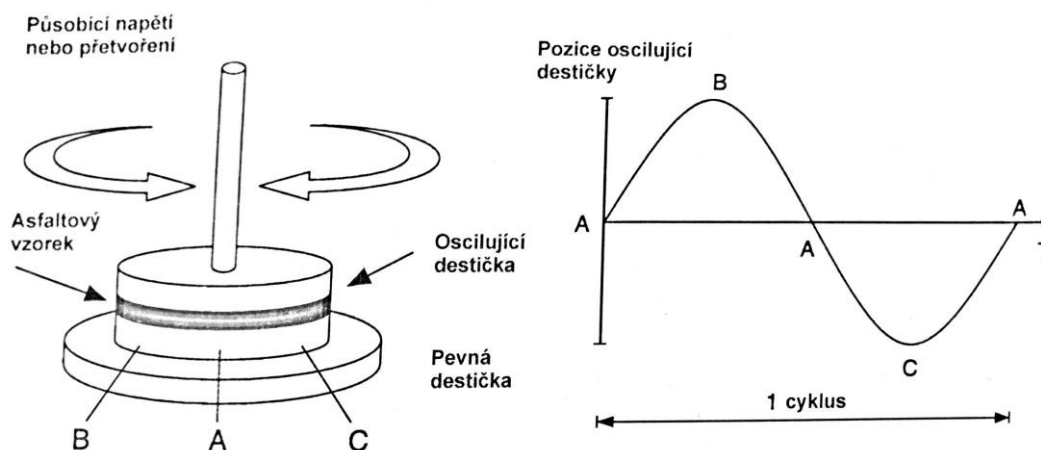
Pro měření viskozity se používají kapilární nebo rotační viskozimetry, ale také dynamický smykový reometr s využitím geometrie kužel-destička. Díky tomu, že asfalt řadíme mezi látky viskoelastické, změřená hodnota viskozity se liší dle teploty, které v okamžiku měření asfalt dosahuje. (7) (8)

2.3.1.2 Komplexní smykový modul, fázový úhel

Důležitými parametry při stanovení reálných vlastností asfaltu jsou přetvárné a únavové charakteristiky, úzce spjaté s modulovými charakteristikami. Tyto parametry se dají zkoušet na dynamickém smykovém reometru (DSR), ve kterém se nachází dvě kruhové destičky, mezi kterými je umístěn zkoušený vzorek. Z hlediska působícího



namáhání v tomto přístroji se jedná o rotaci pohyblivé destičky. Tato rotace má proměnlivý směr, probíhá v jednom cyklu po i proti směru hodinových ručiček. Vzniká tím oscilace, přičemž průběh zatěžování opisuje sinusovou funkcí. (7)



Obrázek 5: Oscilační pohyb destičky v DSR (7)

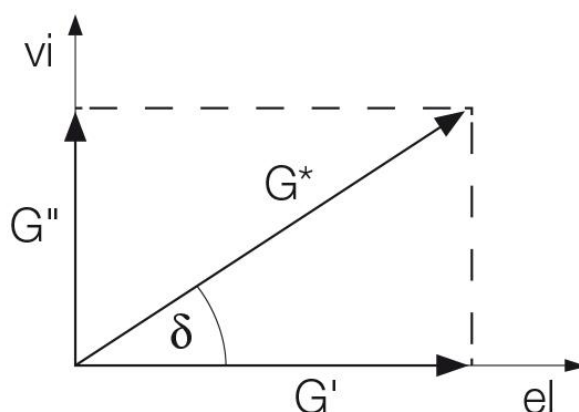
Dynamický smykový reometr měří přetvoření, sílu a fázový posun δ . Vyhodnocením průběhu těchto veličin lze získat komplexní smykový modul $|G^*|$, charakterizující poměr změřených maximálních a minimálních smykových napětí (τ_{max} a τ_{min}) a odpovídajícímu smykovému přetvoření (γ_{max} a γ_{min}). Tato veličina tedy vyjadřuje odolnost materiálu vůči působícímu přetvoření. (7)

$$|G^*| = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} \quad (4)$$

Komplexní smykový modul $|G^*|$ se skládá z elastické (reálné; G') a viskózní složky (ztrátový modul; G''). (7)

$$G' = G^* \cdot \cos \delta \quad (5)$$

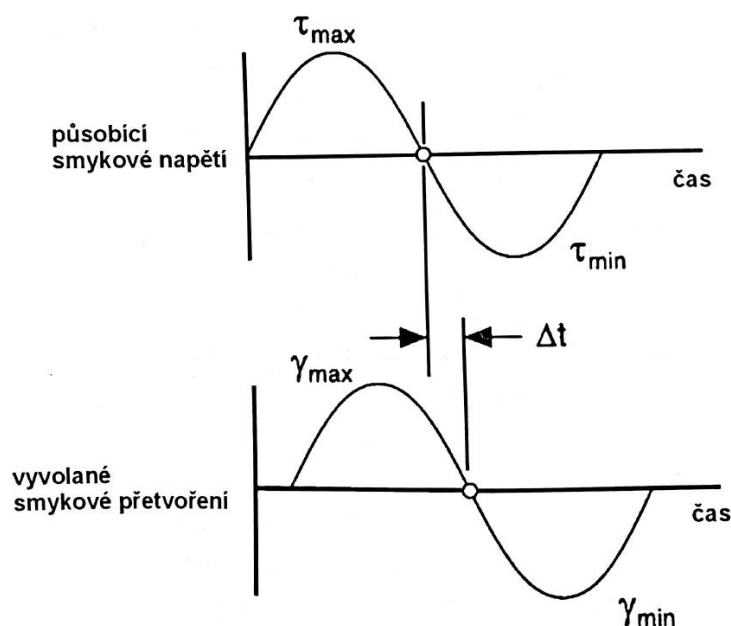
$$G'' = G^* \cdot \sin \delta \quad (6)$$



Obrázek 6: Složky komplexního modulu (11)

Obrázek 6 ilustruje vztah mezi jednotlivými složkami smykového modulu a fázovým úhlem δ . Vodorovná osa představuje elastické chování, svislá osa znázorňuje viskózní chování. (11)

Zbývá stanovit, čím je ovlivněn fázový úhel δ a co vlastně představuje. Jestliže vnášíme do zkoušeného vzorku určité napětí, projeví se to na něm v podobě přetvoření. Neděje se tak však okamžitě, nýbrž s určitým zpožděním. Toto zpoždění se úzce pojí právě s fázovým úhlem δ . V souvislosti s tím se uvádí tzv. ztrátový faktor $\tan\delta = G''/G'$, který ohraničuje dvě limitní hodnoty. První limitní hodnotou fázového úhlu je $\delta = 0^\circ$. V takovém případě se materiál chová ideálně elasticky a neobsahuje žádnou viskózní složku, tudíž $G'' = 0$ a z toho vyplývající ztrátový faktor $\tan\delta = 0$. Druhou limitní hodnotou je $\delta = 90^\circ$, kdy lze na materiál nahlížet naopak jako na ideálně viskózní s žádnou elastickou složkou. Tím pádem $G' = 0$ a ztrátový faktor $\tan\delta$ se limitně blíží nekonečné hodnotě. (11)



Obrázek 7: Časové zpoždění mezi vneseným smykovým napětím a vyvolaným smykovým přetvořením (7)

Jelikož zkouška v DSR probíhá za předem stanovené teploty a frekvenci oscilace, hodí se uvést očekávané výsledné hodnoty G^* a δ . Při vysokých teplotách a nižších frekvencích má asfalt blíže ke kapalině, a tedy se s využitím již výše uvedených informací bude jednat o látku, kde dominantní roli bude hrát viskózní složka. V takovém případě se G^* bude blížit k nule a δ k 90° . V rozsahu nízkých teplot a při vysokých frekvencích naopak asfalt nabírá více elasticity, tudíž G^* roste a δ se snižuje směrem k nulové hodnotě. (7)

Pro charakterizování přetvárného chování se užívá poměru $G^*/\sin\delta$. Čím vyšší hodnoty tento poměr dosahuje, tím vyšší odolnost má daná asfaltová směs. Proto je pro dosažení vysoké odolnosti asfaltu z hlediska přetvárnosti vhodné, aby hodnota komplexního smykového modulu G^* byla vysoká a fázový úhel δ nízký. (7)

2.3.1.3 Elastické zotavení, nevratná smyková poddajnost

Jednu z dalších možností charakterizování vlastností pojiva, kterou lze provádět na dynamickém smykovém reometru, je zkouška Multiple Stress Creep Recovery (MSCR). Tato zkouška, jejíž průběh podrobněji popisuje kapitola 3.3.3, spočívá v odezvě asfaltového pojiva na vícenásobný cyklus zatěžování a odtížení. Přičemž hlavními výsledky této zkoušky představují procentuální elastické zotavení (%R) a nevratná smyková poddajnost (J_{nr}). Tato zkouška si klade za cíl vystihnout chování



asfaltového pojiva z hlediska odolnosti vůči trvalým deformacím, které se na vozovce projevují v podobě vyjetých kolejí. (12) (13)

Hanqi Liu a kol. (13) se ve své práci zaměřují mimo jiné na porovnání této metody s oscilačními zkouškami, jejichž výsledky tvoří komplexní smykový modul G^* , δ a poměr $G^*/\sin\delta$, který značí odolnost vůči tvorbě trvalých deformací. Právě prokazatelnost tohoto široce uznávaného parametru autoři zpochybňují z hlediska průkaznosti při vyhodnocování chování pojiva při vysokých teplotách a tím pádem i odolnosti proti vyjíždění kolejí. Uvádějí pro to několik argumentů:

- Parametr $G^*/\sin\delta$ je stanovován na základě celkové deformační energie během zatěžování, přičemž ale část této energie vyplývá z viskoelastického chování. Autoři tím pravděpodobně miní to, že trvalé deformace ve formě vyjíždění kolejí plynou hlavně z viskózní složky pojiva, která převládá při vysokých teplotách.
- Smykový reometr zatěžuje vzorek takovým druhem namáhání, které nedokáže oddělit deformace plynoucí z viskózní složky od celkové deformace.
- Počet zatěžovacích cyklů nedosahuje takové hodnoty, aby mohl být dosažen ustálený stav.
- Metoda nedokáže dostatečně zohlednit vliv objemu a rychlosti dopravy na trvalou deformaci. (13)

Ačkoliv se lze pokusit tyto nedostatky překonat například zavedením parametru ZSV (nulová smyková viskozita), vypočítaná jako poměr komplexního smykového modulu a úhlové frekvenci zatěžování, Hanqi a kol. (13) věří, že test MSCR dokáže, díky řadě cyklů dotvarování a zotavení při různých úrovních smykového napětí, vyjíždění kolejí a tím tvorbu trvalých deformací lépe simulovat. Tuto domněnku dokládají tím, že viskoelastický charakter pojiva může být obnoven ve fázi zotavení po odstranění smykového napětí, čímž dojde k oddělení trvalého a celkového napětí. (7) (13)

Stanovení elastického zotavení (%R) a nevratné smykové poddajnosti (J_{nr}) vychází z hodnot deformací docílených v jednotlivých fázích dotvarování a zotavení. (12) Nevratnou smykovou poddajnost J_{nr} lze vnímat jako ukazatel odolnosti pojiva vůči tvorbě trvalých deformací; čím nižší dosahuje hodnoty, tím menší je možné očekávat



plastifikaci materiálu. Z hodnot elastického zotavení nebo nevratné smykové poddajnosti lze rovněž stanovit jejich procentuální rozdíl v různých úrovních napětí. Tento ukazatel může simulovat v reálných podmínkách působící mimořádné dopravní zatížení. (14) Postup stanovení %R a J_{nr} popisuje praktická část diplomové práce, konkrétně kapitola 3.3.3.

2.3.2 Účinky filerů v asfaltovém tmelu

2.3.2.1 Úvod do problematiky

Výslednou asfaltovou směs pokládanou na vozovku tvoří asfaltové pojivo a kamenivo, případně navíc různé přísady. Kamenivo lze dle zrnitostních parametrů rozdělit na hrubé kamenivo, drobné kamenivo a filer. Směs vzniká obalením pojiva s těmito frakcemi kameniva, přičemž nejjemnější (filerické) částice spolu s pojivem vytváří mastixovou maltu, jež má zásadní vliv mimo jiné na ztužení, pórovitost anebo hydrofobní vlastnosti. (15)

2.3.2.2 Asfaltový tmel

Pod pojmem asfaltový tmel (také asfaltový mastix, asfaltová malta nebo mastixová malta) si lze představit směs asfaltového pojiva s filerickými částicemi, definovanými svojí většinou zrnitostí do 0,063 mm. Pro použití do asfaltových směsí existují v podstatě dva druhy filerů. Prvním tímto druhem je vratný filer. Takový filer vzniká při procesu sušení a horkého třídění v sušícím bubnu na obalovně, při kterém se tyto jemné částice oddělují a zachytávají na filtrech separační jednotky. Jako přídatný filer se pak označují částice, které vznikly drcením a tříděním horniny (v České republice nejčastěji vápence). Rozdíl oproti vratnému fileru tkví z hlediska výroby v tom, že přídatný filer se vyrábí samostatně. (16)

Výsledný asfaltový mastix představuje tužší směs oproti samotnému asfaltovému pojivu a má vliv na fixaci kostry kameniva v asfaltové směsi tím způsobem, že vyplňuje jemné dutiny a snižuje tak mezerovitost. Navíc dochází k navýšení viskozity a snížení citlivosti na teplotu a přítomnost vody. (16)

Vzhledem k tomu, že výše popsané druhy filerů patří do skupiny neobnovitelných zdrojů, nabízí se je ve snaze o trvale udržitelný rozvoj nahradit alternativními příměsí bez ztráty kvality. Tím se myslí zejména různé druhy odpadních materiálů, jejichž



recyklace by této snaze vyhověla. Jde o materiály na bázi například drceného skla nebo betonového recyklátu. (16)

2.3.2.3 Teoretické principy spolupůsobení fileru a asfaltového pojiva

Při zkoumání interakce fileru a asfaltového pojiva došlo v minulosti k rozvoji, který spočívá zejména v nastolení určitých postulátů souvisejících s objemovou koncentrací fileru a jejího vlivu na ztužení celé směsi.

Koncept volného asfaltu

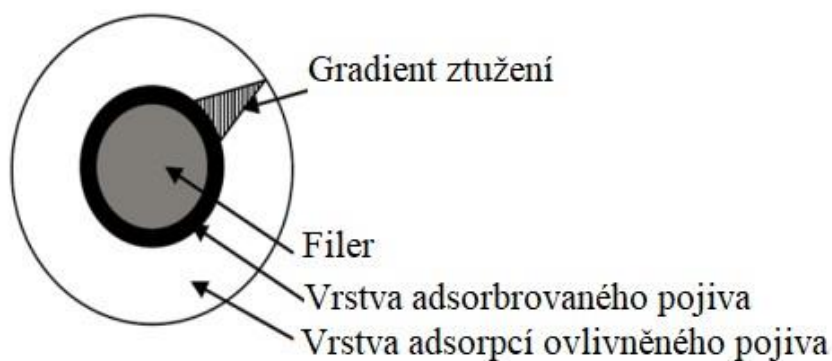
Za konceptem volného asfaltu (z anglického „free bitumen concept“) stojí postuláty zveřejněné P. J. Ridgenem v roce 1947 a později také W. Heukelomem. Tyto teorie počítají s maximálním zhutněním filerové komponenty, které závisí na jeho vnitřních parametrech, ke kterým řadíme například geometrický tvar zrn a spolupůsobení mezi nimi. Takto zhutněný materiál dosahuje mezní míry mezerovitosti, označované jako Ridgenova mezerovitost. V tomto stavu dosahuje filer nejvyšší možné objemové hmotnosti. Při smísení takového materiálu s asfaltovým pojivem vznikají v závislosti na množství pojiva dvě odlišitelné fáze: vázaný a volný asfalt. Vázaný asfalt představuje složku, která vyplňuje volné póry. Jako volný asfalt se pak označuje množství pojiva, jež je přidáváno nad rámec tohoto vyplnění. Asfaltový mastix, v jehož struktuře se nenachází volný asfalt a není tedy dosaženo vyplnění všech dutin a obalení zrn, vykazuje vysokou tuhost. Naopak se vzrůstajícím množstvím volného asfaltu tuhost klesá. V případě vyšší Ridgenovy mezerovitosti a při stejném objemovém podílu filerové frakce lze pak dosáhnout vyššího ztužení asfaltového tmelu. (15)

Gradient ztužení

S gradientem ztužení (z anglického „gradient of stiffening“) přišel D. G. Tunncliff v roce 1962. Tunncliff se zaměřil na míru spolupůsobení fileru s asfaltovým pojivem z hlediska vzájemné vzdálenosti těchto dvou složek a rozdělil tuto interakci na dvě části. Na povrchu filerové částice, kterou asfalt obaluje, se odehrává přímá interakce. Se vzrůstající vzdáleností od zrna se pak míra spolupůsobení snižuje, a to právě se zmíněným gradientem ztužení. Velikost gradientu se liší dle typu filerové částice, respektive v závislosti na jejím původu, mineralogickém a chemickém složení. Z toho také plyne praktický poznatek této teorie. Vysvětluje totiž, proč mají různé druhy filerů



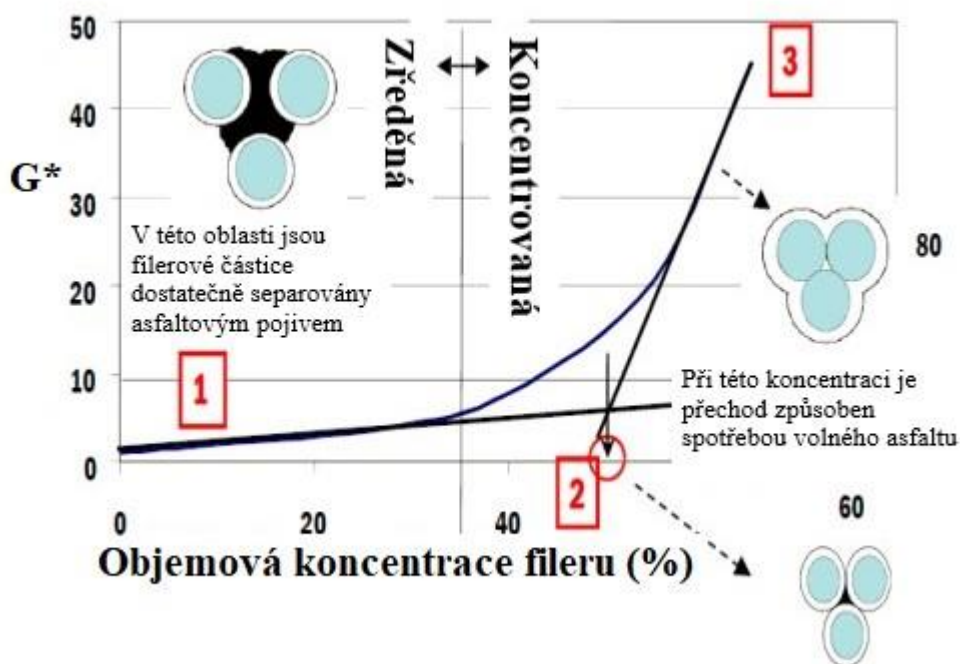
se stejnými granulometrickými vlastnostmi odlišný vliv na parametry výsledného asfaltového tmelu. (15)



Obrázek 8: Schéma interakce filerové částice a asfaltového pojiva; upraveno z (15)

Interagující objem asfaltu

S další teorií popisující chování asfaltového tmelu přišli A. Faheem a H. U. Bahia, kteří v mnoha ohledech navázali na předešlé dvě zmíněné teorie. Zaměřili se na vlastnosti mastixu z hlediska míry obsahu fileru v mastixu a definovali koncentrovanou a zředěnou zónu. Zředěnou zónou rozumíme nízký obsah fileru, což si lze představit jako volně rozptýlená separovaná zrna. Míru ztužení v tomto případě určují mimo jiné objemová koncentrace a velikost zrn fileru. U koncentrované zóny ztužení závisí na interagujícím objemu asfaltu, tedy na objemu pojiva, které spolupůsobí s jednotlivými zrny tak, jak bylo popsáno v teorii o gradientu ztužení. Přičemž platí, že poddajnost je dána objemem, který představuje volný asfalt, tzn. asfalt volně rozptýlený a neinteragující s filerickými částicemi. Se vzrůstající koncentrací fileru vzrůstá objemový podíl pojiva, který spolupůsobí se zrny a zvyšuje se tak i tuhost celé směsi. V momentě, kdy se všechno množství pojiva spotřebuje na obalení částic, nastává kritický bod, a směs přechází do zmíněné koncentrované zóny. Takový bod lze přibližně zjistit při provedení některé ze zkoušek ověřující reologické vlastnosti (například pomocí komplexního smykového modulu G^* na následujícím obrázku. (15)



Obrázek 9: Závislost reologického parametru na objemové frakci fileru; 1: Počáteční ztužující nárůst, 2: Kritická koncentrace fileru, 3: Konečný ztužující nárůst, upraveno z (15)

V praxi se ukázalo, že zjištění zlomu, ve kterém tmel přechází ze zředěné do koncentrované zóny, se pomocí viskozitního měření v dynamickém smykovém reometru určuje obtížně, zejména pak při nižších teplotách. Tvar křivky totiž vychází často velmi plochý a přechod tudíž není tak patrný. Z tohoto důvodu se často pro vystižení koncentračních řad přistupuje ke zkoušce MSCR. Tato zkouška, která spočívá v měření odezvy (dotvarování a zotavení) na vícenásobný zatěžovací cyklus, dokáže lépe rozhraní vystihnout. Výsledkem může být graf závislosti poměrné deformace a objemové koncentrace fileru. (17) (15)

2.3.2.4 Výzkumné studie

V rámci této práce byl proveden rozbor výzkumných studií, které se zaměřovaly na měření obdobných charakteristik asfaltových tmelů jako praktická část diplomové práce. Na následujících řádcích shrnuji některé z jejich poznatků.

Yongchun Cheng a kol. ve své práci (18) zkoumali vliv vlastností fileru na vysoko a středně teplotní parametry mastixu. Vstupními materiály pro jejich zkoušky byly asfalt s označením AH-90 s gradací 80/100 a filery z vápence, hydratovaného vápna, popílku a diatomitu (křemeliny). Asfaltový tmel podrobili zkouškám pro stanovení



bodů měknutí, duktility, viskozity a reologickým parametrům získaných z dynamického smykového reometru.

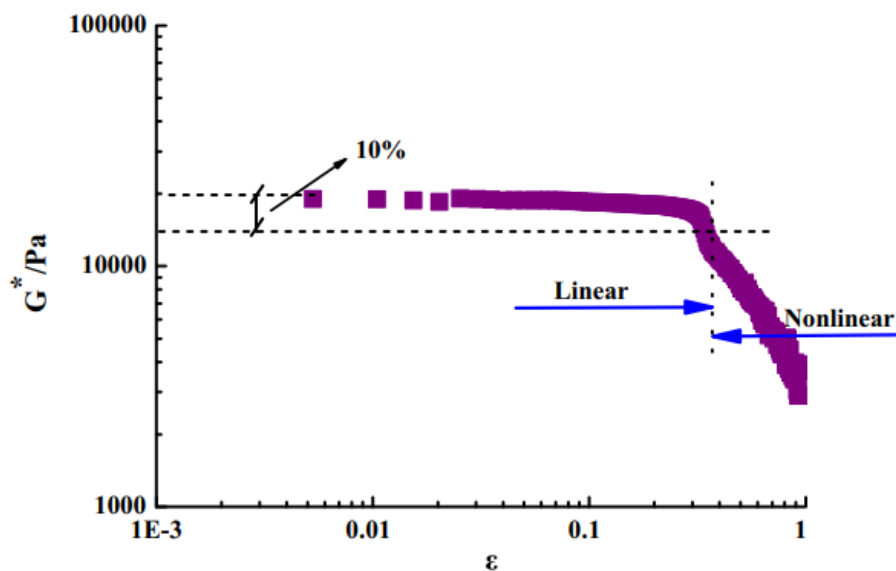
Použité filery vykazovaly přirozeně rozdílné hodnoty objemové hmotnosti, měrného povrchu, zrnitosti, hydrofilního koeficientu a chemického složení. Tyto parametry měly proměnný vliv na výsledky jednotlivých zkoušek. Přesto se prokázaly určité korelace. Nejvýrazněji je to vidět na vzorku tmelu s diatomitem, u kterého byla naměřena nejvyšší hodnota měrného povrchu a nejnižší hodnota objemové hmotnosti. Takový tmel pak oproti ostatním dosáhl nejvyššího bodu měknutí a viskozity, ale naopak při zkoušce na duktilometru došlo k přetržení vzorku při protažení menším než u ostatních mastixů. Na druhou stranu měřená maximální odporová síla vůči protažení dosahovala nejvyšší hodnoty. Takové skutečnosti tedy implikují vysokou tuhost daného mastixu, ale také ukazují na vysokou křehkost při dané teplotě. Rovněž z výsledků zkoušek na DSR plyne, že vzorek s diatomitem dosahoval nejvyšších hodnot komplexního smykového modulu G^* při daném frekvenčním rozsahu zatěžování, což ukazuje na větší odolnost vůči přetvoření.

Je však zapotřebí zdůraznit, že problematika ovlivnění mastixu jeho filerovou složkou je natolik komplexní, že nelze brát výše uvedené závěry jednoho vzorku za jednoznačně a vždy platné. Autoři proto ve své studii (18) provedli analýzu vztahů mezi vlastnostmi jednotlivých druhů filerů a jejich účinku na asfaltový tmel. V rámci této analýzy seřadili důležitost ovlivnění vlastnostmi fileru na bod měknutí, viskozitu a komplexní smykový modul G^* v následujícím pořadí: měrný povrch zrn > zrnitost ($50 \mu\text{m}$) > hydrofilní koeficient > objemová hmotnost. Míra vlivu na velikost potřebné deformační energie pak byla stanovena v pořadí: měrný povrch zrn > objemová hmotnost > zrnitost ($50 \mu\text{m}$) > hydrofilní koeficient. Hodnota měrného povrchu zrn fileru tedy sehrála nejvýznamnější roli na výsledcích jednotlivých testů. Autoři toto zdůvodňují tím, že jemné částice s vyšší hodnotou měrného povrchu na sebe naváží více pojiva a tím zajišťují větší stabilitu výsledné směsi. (18)

Další zajímavé poznatky uvádí Jiupeng Zhang a kol. (19) ve studii zaměřené na vliv teploty a frekvenčního rozsahu na interakci pojiva s filerem. Pro experimenty použili asfaltová pojiva s gradacemi 60/80 resp. 80/100 a filery ze žuly, doleritu a vápence.



Studie se mj. zabývá analýzou lineární viskoelastické oblasti, která je odlišná u asfaltového tmelu a samotného pojiva. Při dosažení určité deformace materiál tuto oblast opouští a dále se poměr komplexního smykového modulu a přetvoření řídí nelineární křivkou. Pojivo nebo mastix vykazují nižší hodnoty G^* a stávají se výrazně méně odolné vůči přetvoření.



Obrázek 10: Lineární a nelineární viskoelastická oblast (19)

Autoři v práci (19) analyzovali korelace výsledků ze smykového reometru s tzv. modelem K-B- G^* . Za tímto modelem stojí složitější teoretické poznatky, nicméně jeho praktický význam tkví v tom, že udává míru spolupůsobení mezi pojivem a filerem. Ve studii došli k mnoha závěrům ohledně trendu jednotlivých funkčních vlastností:

- Lineární viskoelastický rozsah asfaltového tmelu klesá se vzrůstajícím objemovým podílem fileru při stejné teplotě a frekvenci zatěžování.
- Interakce pojiva a plniva se zlepšuje se vzrůstající teplotou.
- Interakce pojiva a plniva se však zhoršuje při nárůstu frekvence zatěžování.
- Korelační analýza ukázala, že teplota ovlivňuje interakční schopnost více než zatěžovací frekvence. Pro vystižení míru tohoto spolupůsobení autoři doporučují teplotu 70 °C a frekvenci 1,59 Hz (odpovídá 10 rad/s).

Charakterizováním vlastností asfaltového tmelu pomocí frekvenčního smykového testu a zkoušky MSCR se ve své práci zabývali Cosme a kol. (20) Pro svoji studii využili pojivo PG 70-28 (návrhová teplota pro užití ve vozovce -28 až 70 °C) a filer z



okrasného kamene obsahujícího mj. vápencové a křemičité složky a filer z ocelářské strusky, ve které převažovaly vápenec, křemík a železo. Pro jednotlivé zkoušky byly vybrány různé poměry obsahu fileru a pojiva. Zahrnut byl rovněž vliv stárnutí.

Z hlediska chemického složení došli autoři k závěru, že vápencová složka přispívá k větší elasticitě a obsah železa k tuhosti výsledného tmelu. Naopak vysoký podíl křemíku vlastnosti mastixu může poškozovat. S tím korespondují i zjištěné hodnoty dynamického smykového modulu G^* , které se zvyšovaly v případě pojiva s ocelářskou struskou více než u tmelu s filerem z okrasného kamene, který obsahoval i křemičitá rezidua. Přítomnost železitých částic prokázala významnější vliv na ztužení směsi než zvyšování obsahu jemných částic u vzorku s okrasným kamenem. Po podrobení vzorku procesem stárnutí se z hodnot fázového úhlu δ ukázalo, že vzorky obsahující ocelářskou strusku dosahují menší elasticity než vzorky s okrasným kamenem. Závěry plynoucí ze zkoušky opakovaného zatěžování a odtěžování (MSCR) pak naznačují vyšší odolnost vůči trvalým deformacím u tmelu obsahujícího ocelářskou strusku. Tento fakt autoři zdůvodňují hrubší zrnitostí této filerové směsi.

Je patrné, že posuzování vlivu interakce fileru a asfaltového pojiva představuje komplexní obor, a to zejména z důvodu mnoha externalit, které toto spolupůsobení definují. Proto na závěr teoretické části uvádím s použitím práce Wua a kol. (21) přehled základních faktorů ovlivňujících tuto interakci.

1. Složení asfaltu

- Vyšší obsah asfalténů přispívá k přilnavosti pojiva a filerických částic.
- Lehčí složky pojiva zvyšují adsorpční plochu, těžší složky kladně ovlivňují samotnou přilnavost.
- Tyto vlastnosti se však mohou měnit vlivem stárnutí nebo úrovní modifikace pojiva.

2. Typ asfaltu

- Nemodifikované asfalty vykazují značnou rozdílnost ve schopnosti interakce s filerem.
- Modifikace asfaltů může k lepšímu spolupůsobení přispět, ale mechanismus účinku není plně známý.



3. Stárnutí asfaltu

- Interakce vlivem působení kyslíku, ultrafialového záření a teplotních změn klesá.
- Účinky stárnutí lze do jisté míry redukovat například použitím kvalitních modifikovaných asfaltů.

4. Chemické složení fileru

- Interakce je podmíněna mineralogickým složením fileru. Různé sloučeniny ovlivňují rozdílně fyzikální a chemické vlastnosti směsi.
- Základní sloučeniny vyskytující se v minerálech lze dle jejich sestupné míry interakce s asfaltem seřadit následovně: $\text{MgO} > \text{CaO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$. Vápenec (CaCO_3) se na této škále pohybuje mezi Al_2O_3 a SiO_2 .

5. Kyselost a zásaditost fileru

- Schopnost zásaditých filerů interagovat s pojivem dosahuje větší míry než u kyselých filerů.

6. Velikost částic fileru

- Čím jsou částice menší, tím dosahují větší hodnoty měrného povrchu a „spotřebovávají“ více asfaltu na svoje obalení. Jemnější filery dosahují větší míry interakce s pojivem než hrubší filery.
- Faktor velikosti částic ovlivňuje spolupůsobení více, než například obsah asfalténu a pryskyřic nebo objemová koncentrace fileru v asfaltu.

7. Tvar povrchu zrna fileru

- U hrubšího povrchu částic je dosahováno silnější interakce než u oblých částic.
- Zrna s hrubým povrchem vykazují větší měrný povrch a spolu s pojivem mají větší odolnost vůči působení smyku.

8. Teplota

- Se vzrůstající teplotou dochází ke zvýšení viskozity, což má vliv na lepší proudění asfaltu mezi filerovou složkou a lepší adsorpci pojiva na povrchu částic. Spolupůsobení těchto dvou složek je tedy při vyšších teplotách silnější.



9. Frekvence zatížení

- Frekvence zatížení interakci asfaltu a fileru ovlivňuje, nicméně míra tohoto vlivu se různí dle teploty.
- U nízkoteplotních zkoušek není vliv frekvence na míru spolupůsobení zatím objasněn.

10. Vlhkost

- Působením vody dochází ke snížení přilnavosti asfaltu a fileru.
- Pro zajištění lepší interakce by měl být filer suchý a čistý a (modifikovaný) asfalt vysoce odolný proti působení vlhkosti.



3 PRAKTICKÁ ČÁST

V rámci praktické části diplomové práce byly vzorky asfaltových tmelů podrobeny vybraným empirickým a funkčním zkouškám. V této části jsou uvedeny charakteristiky použitých materiálů, proces přípravy vzorků, průběh jednotlivých zkoušek a naměřené výsledky včetně jejich interpretací.

3.1 Charakteristiky použitých materiálů

3.1.1 Asfaltové pojivo

V rámci zkoušek byl použit silniční asfalt s označením PARAFALT ASF 50/70 od společnosti PARAMO a.s.

Požadavky na pojivo gradace 50/70 specifikuje norma ČSN 65 7204 Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční asfalty. (22) Tabulka 1 obsahuje požadavky normy a deklarované hodnoty výrobce dle protokolu o zkoušce. (23)

Vlastnosti	Zkušební metoda	Jednotka	Požadavek normy	Naměřená hodnota
Penetrace při 25 °C	ČSN EN 1426	0,1 mm	50 až 70	62
Bod měknutí	ČSN EN 1427	°C	46 až 54	49,6
Odolnost proti stárnutí při 163 °C - změna hmotnosti	ČSN EN 12607-1	%	≤ 0,5	0,15
Odolnost proti stárnutí při 163 °C - zbylá penetrace	ČSN EN 1426	%	≥ 50	66,1
Odolnost proti stárnutí při 163 °C - zvýšení bodu měknutí	ČSN EN 1427	°C	≤ 9	5,2
Bod vzplanutí	ČSN EN ISO 2592	°C	≥ 230	280
Rozpustnost	ČSN EN 12592	%	≥ 99,0	100
Bod lámavosti podle Fraasse	ČSN EN 12593	°C	≤ -8	-11

Tabulka 1: Vlastnosti silničního asfaltu 50/70, převzato z (22) a (23)

3.1.2 Filery

Jako aditivum k pojivu bylo vybráno celkem 7 vzorků vratných a přidavných filerů různých výrobců.



3.1.2.1 Destro Kladno

Přídavný filer s tímto označením pochází z vysokopecní vzduchem chlazené strusky, jež se vyrábí v Kladně v areálu betonárny a drtírny společnosti DestroKladno s.r.o. Jedná se tedy o umělé kamenivo s nižší objemovou hmotností oproti přírodnímu kamenivu, což je zapříčiněno vyšší pórovitostí. Kamenivo obsahuje složky melilitu, mullitu, pyroxenu, plagioklasu a skla. (24) (25)

3.1.2.2 Velké Hydčice

Jedná se o přídavný filer z vápencového lomu ve Velkých Hydčicích v Plzeňském kraji spravovaného společností HASIT Šumavské vápenice a omítkárny s.r.o. Hlavní složku vápence tvoří kalcit, v malém množství se vyskytuje též dolomit. (26)

3.1.2.3 Chlum

Přídavný filer Chlum pochází z kamenolomu nacházejícího se v katastru obce Chlum v Libereckém kraji. Lom provozuje společnost Eurovia Kamenolomy a.s. Ložisko obsahuje znělcovou horninu obsahující pyroxeny a živce. Jedná se o horninu světle šedé barvy. (27)

3.1.2.4 Chornice

Přídavný filer Chornice pochází z kamenolomu nacházejícího se na rozmezí Olomouckého a Pardubického kraje v katastru obcí Šubířov a Jaroměřice. Lom spravuje společnost Eurovia Kamenolomy a.s. Ložisko tohoto lomu tvoří sedimentární hornina nazývaná Moravská droba a obsahuje mimo jiné slídu, křemen a živce. Zbarvení horniny je šedomodré nebo hnědočervené. (28)

3.1.2.5 Plešovice

Přídavný filer pochází z kamenolomu Plešovice, jenž se nachází ve stejnojmenné obci v Jihočeském kraji. Lom provozuje společnost Kámen a písek s.r.o. Ložisko obsahuje granulit s výskytem granátu, křemene, živce, plagioklasu, výjimečně turmalínu a biotitu. Má bíložedou barvu. (29) (16)

3.1.2.6 Ocelářská struska

Filer z ocelářské strusky využitý pro zkoušky v této práci pochází z oceláren společnosti Voestalpine, která sídlí v rakouském městě Linz. Ocelářská struska vzniká



v procesu zpracování surového železa na surovou ocel. Výsledný produkt strusky tvoří zejména oxid železitý, vápenatý a křemičitý. (30)

3.1.2.7 Vratný filer PKB

Tento vratný filer pochází z obalovny asfaltových směsí společnosti Pozemní komunikace Bohemia a.s. Obalovna zpracovává drcené přírodní kamenivo i R-materiál. (31) Obalovna dle konzultace s vedoucím diplomové práce využívá kamenivo zejména z kamenolomu Zbraslav, ve kterém převažují horniny spilit, tufit a břidlice. (32) Pouze v případě frakce drobného drceného kameniva 0/4 mm je kamenivo ze Zbraslavi kombinováno s kamenivem z lokality Lašovice. Filer je získáván při procesu sušení a třídění v sušícím bubnu přímo na obalovně.

3.1.2.8 Měrné hmotnosti filerů

V tabulce 2 jsou uvedeny měrné hmotnosti filerů používaných pro zkoušky v této práci. Většina hodnot měrných hmotností byla převzata z disertační práce Valentové (16), hodnoty fileru Chlum a ocelářské strusky pochází z dříve uskutečněných zkoušek provedených Ing. Janem Valentinem, Ph.D. Měrná hmotnost fileru z lokality Velké Hydčice odpovídá rozmezí dle dokumentu (33).

FILER	Měrná hmotnost [Mg/m ³]
Destro Kladno	2,923
Velké Hydčice	2,770
Chlum	2,627
Chornice	2,657
Plešovice	2,732
Ocelářská struska	2,923
Vratný filer PKB	2,723

Tabulka 2: Měrné hmotnosti filerů

3.2 Příprava vzorků

Asfaltové pojivo gradace 50/70 a filer se nejprve nahřály v sušárně při 150 °C. Následně bylo do rovněž nahřáté míchací nádoby odlito 50 g pojiva. Hmotnost fileru určeného pro smísení s asfaltem bylo určeno na základě vzorce dle ČSN EN 13179-1 Zkoušení fileru pro asfaltové směsi – Část 1: Zkouška delta kroužek kulička. Výslednou směs tvoří z hlediska objemu 37,5 % filer a 62,5 % asfalt. (34)



$$m_f = 0,6 \cdot m_p \cdot \rho_f / \rho_p \quad (6)$$

kde:

m_f : hmotnost přidávaného fileru [g]

m_p : hmotnost asfaltového pojiva [g]

ρ_f : měrná hmotnost fileru [Mg/m^3]

ρ_p : hustota asfaltového pojiva při teplotě 25 °C [Mg/m^3]

Zde je zapotřebí podotknout, že hodnotu hustoty pojiva lze dle normy uvažovat bez dalšího stanovení 1,025 Mg/m^3 . Měrné hmotnosti jednotlivých druhů fileru se přirozeně z důvodu jejich různého původu liší. V této práci byl nicméně proveden výpočet pro jeden vzorek fileru (z lokality Velké Hydčice), u něhož výsledné potřebné množství činí cca. 81 g. Vzhledem k relativně malým rozdílům výsledné gramáže napříč ostatními filery bylo toto množství zvoleno i pro ně. Stejná hmotnost přidávaného fileru může mít své opodstatnění rovněž v porovnání účinků v asfaltovém tmelu v rámci výsledků provedených zkoušek.

Míchací nádoba s 50 g pojiva se umístila na topné těleso a zavedlo se do ní laboratorní míchadlo. Za nízkých otáček se postupně přidávalo určené množství fileru a následně se otáčky zvýšily na 250 ot./min. Takto se tmel míchal po dobu 6 minut a poté se přelil do jednotlivých tělísek, s nimiž se dále zacházelo dle typu prováděné zkoušky.

3.3 Popis prováděných zkoušek

V rámci praktické části diplomové práce byl proveden soubor empirických a funkčních zkoušek na připravených vzorcích referenčního asfaltového pojiva 50/70 a na vzorcích téhož pojiva obsahující filerovou složku. V této kapitole se uvádí popis jednotlivých provedených zkoušek.

3.3.1 Stanovení bodu měknutí

Stanovení bodu měknutí, představuje první provedenou empirickou zkoušku. Zkouška je popsána v normě ČSN EN 1427 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička. (35)



3.3.1.1 Materiály a pomůcky

K provedení zkoušky jsou zapotřebí dva mosazné kroužky, odlévací destička, ocelové kuličky, středící prstence pro kuličky, držák kroužků, skleněná kádinka s míchadlem a měřicí zařízení. Mosazné kroužky se vyplňují vzorkem asfaltového pojiva. Skleněná kádinka obsahuje destilovanou nebo deionizovanou vodu, případně glycerin. Glycerin se používá pro předpokládaný bod měknutí vyšší než 80 °C. (35)

3.3.1.2 Příprava a průběh zkoušky

Na připravené mosazné kroužky vyplněné asfaltovým pojivem seříznutým do roviny s hranou kroužku je na středící prstencem položena ocelová kulička. Takto připravené kroužky se umístí spolu s držákem do kádinky naplněné kapalinou, na jejímž dně se nachází magnetické míchadlo. Celá sestava se vloží do zkušebního zařízení vybaveného teploměrem a začne proces řízeného zahřívání rychlostí 5 °C/min, kde magnetické míchadlo zajišťuje rovnoměrnost ohřevu. Počáteční teplota kapalinové lázně činí (5 ± 1) °C u destilované nebo deionizované vody, resp. (30 ± 1) °C v případě použití glycerinu. Zkouška končí, když ocelová kulička protáhne vrstvu pojiva o 25 mm. (35)

3.3.1.3 Výsledky zkoušky

Výsledkem této zkoušky je teplota automaticky změřená přístrojem na konci zkoušky, tedy v momentě, kdy se vrstva pojiva s kuličkou protáhne o 25 mm. Jelikož se měří vždy 2 vzorky současně, stanoví se výsledná hodnota bodu měknutí jako aritmetický průměr teplot zaokrouhlený na nejbližší 0,2 °C u vzorků s kapalinovou lázní z destilované nebo deionizované vody, resp. na 0,5 °C v případě použití glycerinu. (35)

Rozdíl výsledků teplot nesmí být větší než 1 °C pro bod měknutí do 80 °C nebo větší než 2 °C pro bod měknutí nad 80 °C. Zároveň se nesmí stát, aby kulička vrstvu asfaltového pojiva porušila takovým způsobem, že vzorkem propadne neobalená. Pokud nejsou splněny tyto podmínky, přistoupí se k opakování zkoušky. (35)



Obrázek 11: Odlité vzorky v kroužku (vlevo), přístroj na měření bodu měknutí (vpravo)

3.3.2 Stanovení tažných vlastností metodou silové duktility

Tato zkouška představuje druhou provedenou empirickou zkoušku. Zkouška je popsána v normě ČSN EN 13589 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení tažných vlastností modifikovaných asfaltů metodou silové duktility. (36)

3.3.2.1 Materiály a pomůcky

Na zkoušku je zapotřebí kovová forma se dvěma bočnicemi a dvěma upínacími čelistmi na přípravu zkušebního tělíska a duktilometr, který se skládá z vodní lázně a protahovacího zařízení. Duktilometr je napojen na záznamové zařízení. (36)

3.3.2.2 Příprava a průběh zkoušky

Příprava vzorku spočívá v odlití asfaltového pojiva do výše popsané formy. Podkladová destička formy a bočnice se předem potřou separačním činidlem, které zajistí jejich pozdější odnímatelnost, zkompletují se s upínacími čelistmi a zajistí aretačním šroubem. Takový vzorek se po zchlazení seřízne do roviny s horní hranou formy a nechá se temperovat ve vodní lázni na zkušební teplotu (v případě této diplomové práce 25 °C) po dobu (90 ± 10) minut. Následně jsou odstraněny podkladová destička a bočnice a vzorek je umístěn do duktilometru. Na ovládacím



zařízení se nastaví řízené protahování rychlostí $(50 \pm 2,5)$ mm/min při kontrolované konstantní výše zvolené hodnotě teploty. Zkouška končí v momentě protažení vzorku na 400 mm (odpovídajícímu poměrnému protažení 1333 %) anebo v okamžiku přetržení zkušební vzorku. (36)

3.3.2.3 Výsledky zkoušky

Záznamové zařízení zapisuje v časovém průběhu zkoušky protažení a sílu. Na základě těchto veličin se stanoví celková deformační energie pomocí určitého integrálu:

$$\int_{L_1}^{L_2} f(x) dx = \Delta L \cdot \left(\frac{F_0}{2} + \frac{F_n}{2} + \sum_1^{n-1} F_i \right) \quad (7)$$

kde:

L_1 : délka při protažení 200 mm

L_2 : délka při protažení 400 mm, alternativně délka při přetržení vzorku

ΔL : přírůstek délky mezi odečty síly

F_0 : síla při protažení 200 mm

F_i : síla při protažení $(L_1 + i \cdot \Delta L)$

F_n : síla při protažení na 400 mm; alternativně síla při přetržení vzorku

n : celkový počet měřených kroků. (36)

V rámci vyhodnocení výsledků byl vzorec zjednodušen na výpočet deformační energie pro každý krok zaznamenané dvojice síla-protahování:

$$E = \Delta L \cdot \left(\frac{\Delta F}{2} + F_{n-1} \right) = (L_n - L_{n-1}) \cdot \left(\frac{F_n - F_{n-1}}{2} + F_{n-1} \right) \quad (8)$$

kde:

ΔL : přírůstek délky mezi jednotlivými kroky

ΔF : přírůstek síly (odporu) mezi jednotlivými kroky

n : označení kroku



Celkovou deformační energii pak tvoří suma stanovených energií po krocích. Deformační energie se v praxi přepočítává na kohezní energii, která vznikne podílem deformační energie a vstupního příčného průřezu vzorku, který činí 1 cm^2 . (36)



Obrázek 12: Odlitý vzorek ve formě (vlevo), duktilometr (vpravo)

3.3.3 Zkouška MSCR

Zkouška MSCR představuje první funkční zkoušku popisovanou v této práci. Zkouška je specifikována v normě ČSN EN 16659 Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test). (12)

3.3.3.1 Materiály a pomůcky

Zkouška MSCR se provádí v dynamickém smykovém reometru (DSR). Kromě tohoto přístroje je na zkoušku a její přípravu potřeba odlévací formy nebo podložky, špachtle a počítač se softwarem, skrze který se DSR ovládá. Dynamický smykový reometr je vybaven systémem regulace teploty. Manipulační prostor, kam se vkládá vzorek pojiva, obsahuje dvě paralelní kruhové destičky. Pro MSCR test byly zvoleny destičky s průměrem 25 mm. (12)

3.3.3.2 Příprava a průběh zkoušky

Příprava vzorku spočívá v odlití asfaltového pojiva do odlévací formy. Smykový reometr musí být řádně zkalibrován a před samotným vložením zkušební vzorku



musí být nastavena nulová mezera mezi destičkami. Po vychladnutí se pojivo vloží na spodní destičku smykového reometru, jejíž teplota je předem nastavena v případě této práce na 90 °C (teplota nanášení vzorku). Následně se spustí za pomoci softwaru horní destička na mezeru 1,05 mm a přebytečné pojivo se špachtlí odstraní. V dalším kroku se zavrou víka obklopující destičky a nastaví se požadovaná zkušební teplota, přičemž mezera mezi kruhovými destičkami se sníží na 1,0 mm. Před samotným měřením přístroj musí dosáhnout nejen požadované teploty, ale její rovnováhy tak, aby se v průběhu zkoušky neměnila. Samotné měření probíhá v cyklech trvajících 10 vteřin, kdy je vzorek vždy po dobu 1 vteřiny zatížen smykovým napětím 0,1 kPa a následně odtížen na 9 vteřin. Takových cyklů se provede celkem deset. Následně se přistoupí k nastavení smykového napětí 3,2 kPa a celý proces se ve stejném provedení opakuje. (12)

3.3.3.3 Výsledky zkoušky

Přístroj zaznamenává hodnoty přetvoření pro každý z celkem dvaceti cyklů. Přičemž první fáze trvajících 1 sekundu se označuje jako fáze dotvarování a druhá fáze trvajících 9 sekund je charakterizována jako fáze zotavení. Lze vytyčit následující hodnoty přetvoření:

- ε_0 : absolutní hodnota přetvoření na počátku cyklu, tzn. na počátku fáze dotvarování (v čase 0 s daného cyklu)
- ε_c : absolutní hodnota přetvoření na konci fáze dotvarování (v čase 1 s daného cyklu)
- ε_1 : upravená hodnota přetvoření na konci fáze dotvarování (v čase 1 s daného cyklu), stanovená z rozdílu ε_c a ε_0 , charakterizující hodnotu bez vlivu předchozího cyklu; tato hodnota představuje **celkovou poměrnou deformaci v cyklu**
- ε_r : absolutní hodnota přetvoření na konci fáze zotavení (v čase 10 s daného cyklu)
- ε_{10} : upravená hodnota přetvoření na konci fáze zotavení (v čase 10 s daného cyklu), stanovená z rozdílu ε_r a ε_0 , charakterizující hodnotu bez vlivu předchozího cyklu; tato hodnota představuje **nevratnou poměrnou deformaci v cyklu** (12)

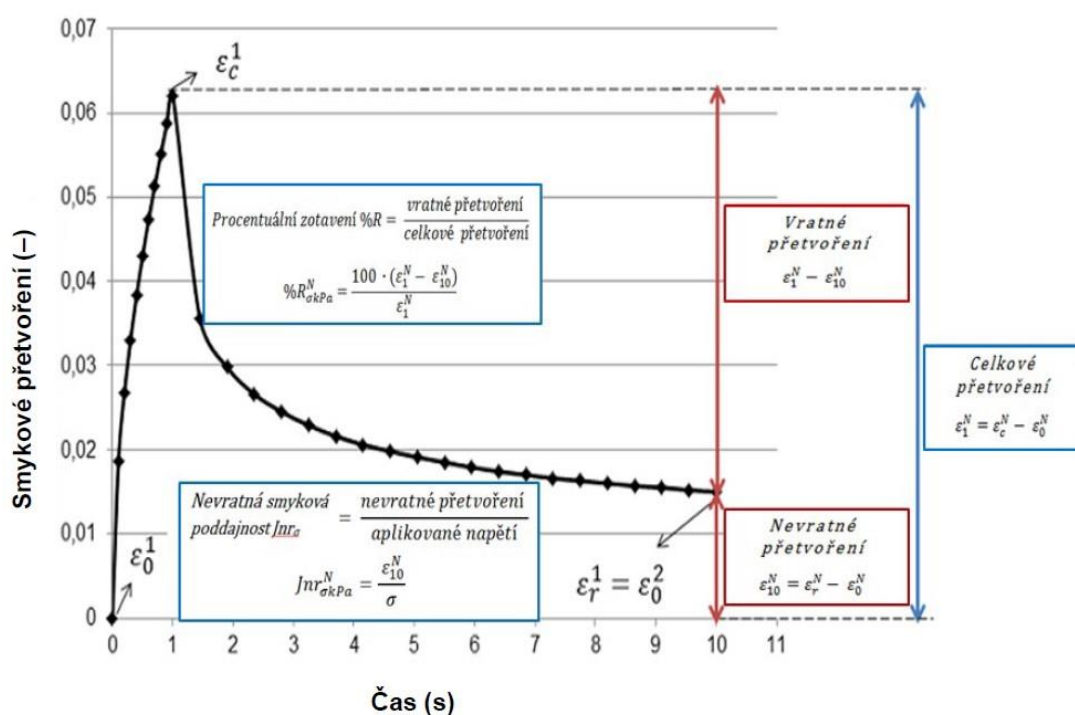
Z těchto hodnot přetvoření lze stanovit procentuální zotavení (%R), tzn. elastickou deformaci v cyklu, a nevratnou smykovou poddajnost (J_{nr}) odpovídající smykovým napětím 0,1 resp. 3,2 kPa. Následují odpovídající vztahy pro tento výpočet:



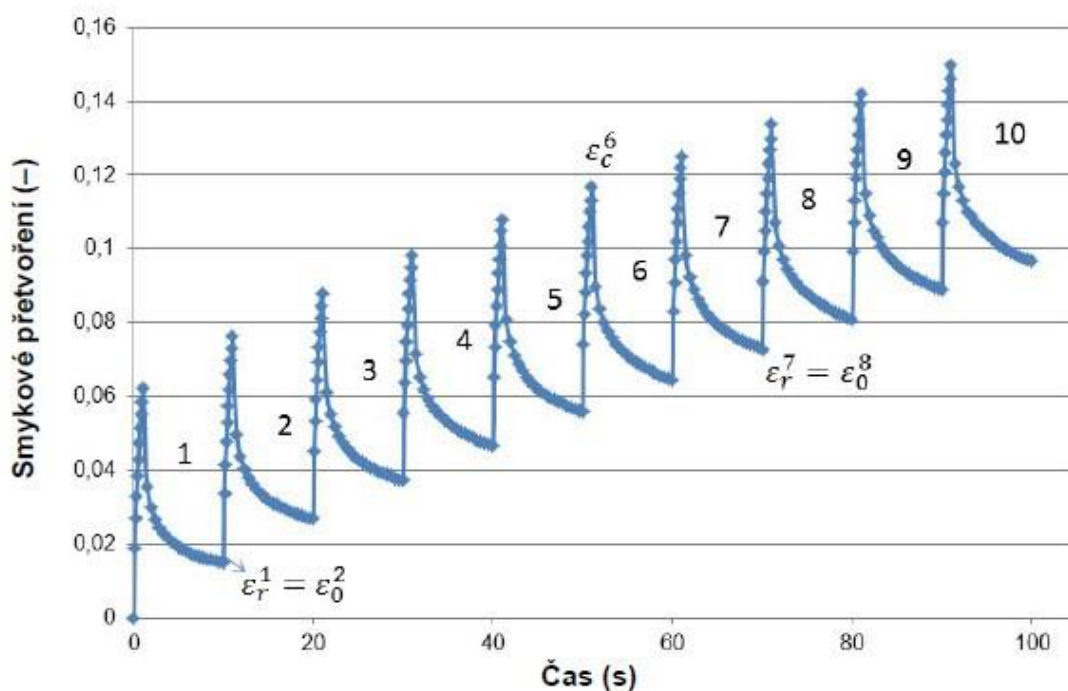
$$\%R = 100 \cdot \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_{10})}{\varepsilon_1} [\%] \quad (9)$$

$$J_{nr} = \frac{\varepsilon_{10}}{0,1} \text{ resp. } J_{nr} = \frac{\varepsilon_{10}}{3,2} [kPa^{-1}] \quad (10)$$

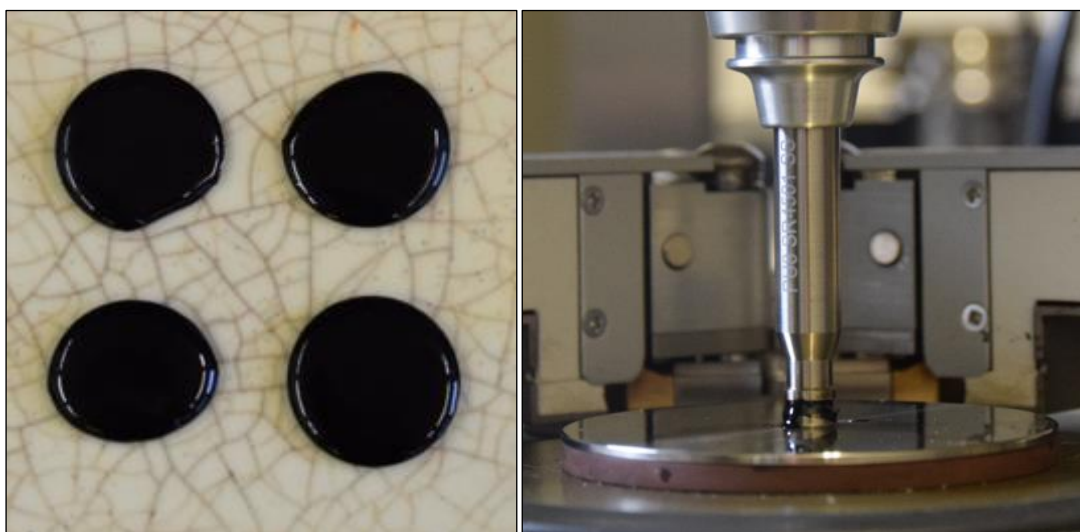
Následně se stanoví průměrné hodnoty procentuálního zotavení a nevratné smykové poddajnosti na hladinách 0,1 kPa a 3,2 kPa a jejich vzájemný procentuální rozdíl. (12) Záznamové zařízení dynamického smykového reometru používané při zpracování této práce vyhodnotilo již průměrné hodnoty %R a J_{nr} .



Obrázek 13: Průběh jednoho cyklu dotvarování a zotavení (12)



Obrázek 14: Typický průběh 10 zatěžovacích cyklů (12)



Obrázek 15: Odlité vzorky pro umístění do DSR (vlevo), vzorek v DSR (zde pro průměr kruhových destiček 8 mm; vpravo)

3.3.4 Zkouška „oscillatory frequency sweep test“ (FST)

Jedná se o druhou funkční zkoušku popsanou v normě ČSN EN 14770 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR). (37) Zkratka FST vychází z anglického „frequency sweep test“, jde o oscilační zkoušku s proměnnou frekvencí a konstantním smykovým přetvořením.



3.3.4.1 Materiály a pomůcky

Jelikož se tato zkouška provádí pomocí dynamického smykového reometru, jsou všechny potřebné materiály a pomůcky stejné jako u testu MSCR, výše popsaného v kap. 3.3.3.1.

3.3.4.2 Příprava a průběh zkoušky

Pro popis přípravy zkoušky lze vycházet z již zmíněné zkoušky MSCR (viz kap. 3.3.3.2). Kromě nastavení zkušební teploty je však nutné předepsat požadovaný rozsah frekvence a cílené přetvoření. (37) V případě této práce byl zvolen frekvenční rozsah 0,1 až 50 Hz a smykové přetvoření odpovídající 10 %. Samotná zkouška spočívá v měření souboru modulových a jiných charakteristik postupně od nejnižší k nejvyšší zadané frekvenci. (37)

3.3.4.3 Výsledky zkoušky

Záznamové zařízení smykového reometru měří při zadaném rozsahu frekvence především komplexní smykový modul G^* (kPa) a úhel fázového posunu δ (°). Komplexní smykový modul znázorňuje poměr nejvyššího dosaženého smykového napětí k nejvyšší dosažené deformaci při dané frekvenci zatěžování. Tento modul obsahuje dvě složky. Reálná složka G' (kPa) představuje elastickou (vratnou) část modulu a imaginární složka G'' (kPa) udává viskózní (nevratnou) část modulu. Úhel fázového posunu vyjadřuje fázový rozdíl mezi napětím a deformací při dané frekvenci. (37) Přístroj rovněž zaznamenává další parametry, např. hodnotu smykového napětí (kPa).

V rámci porovnání výsledků zkoušky FST byly zpracovány řídicí křivky (master curves), pomocí nichž lze vystihnout vztah mezi komplexním smykovým modulem (nebo fázovým úhlem) a frekvencí zatěžování pro celou teplotní škálu v jednom grafu. Z práce (38) vyplývá, že průběh závislosti komplexního smykového modulu na frekvenci zatížení při dané zkušební teplotě lze vztáhnout k určité referenční teplotě T_f při využití koeficientu posunu $a(T)$. Tento koeficient se u asfaltových pojiv stanovuje z rovnic Arrhenia a William-Landel-Ferryho, které lze najít v též práci (38). Hodnoty frekvencí, které vzniknou při využití koeficientu posunu, se získají využitím jednoduché rovnice:



$$f_r = a(T) \cdot f \quad (11)$$

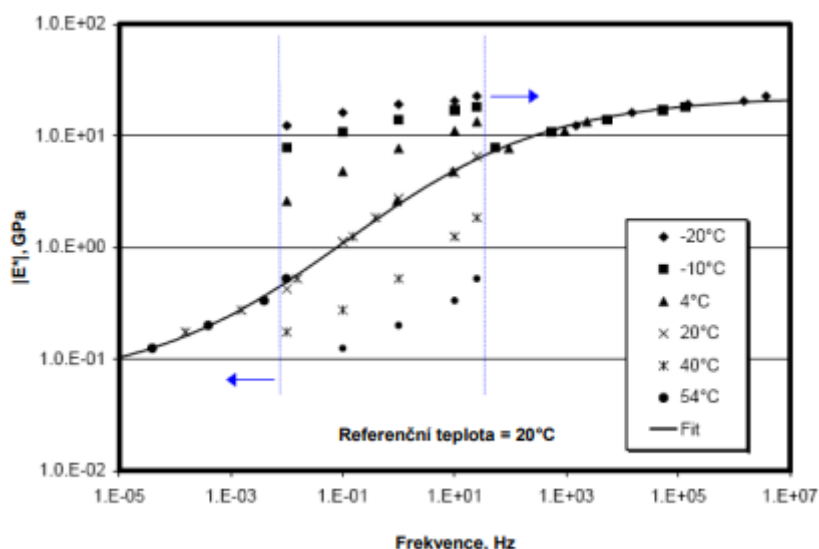
kde:

f_r : upravená hodnota frekvence vztažená k referenční teplotě

$a(T)$: koeficient posunu

f : původní frekvence

Zároveň platí, že pro zvolenou referenční teplotu, ke které se ostatní křivky mají vztahovat, se zvolí koeficient posunu $a(T)=1$. (38) Obrázek 16 vyobrazuje ilustraci transformace, kdy pro daný soubor teplot byla zvolena referenční teplota 20 °C.



Obrázek 16: Příklad sestavené Master křivky pro komplexní modul (38)

Při zpracování řídicích křivek v této práci se postupovalo následujícím způsobem. Ze souboru zkušebních teplot (20, 25, 30, 40, 50, 60 °C) byla vybrána referenční teplota 40 °C, které byl přiřazen koeficient posunu $a(T)=1$. Koeficienty pro ostatní teploty se stanovily iteračním způsobem v programu MS Excel tak, aby se dosáhlo hladkého průběhu výsledné křivky, která zachycuje závislost komplexního smykového modulu (a fázového úhlu) na frekvenci zatížení pro celou teplotní škálu.

3.3.5 Zkouška „oscillatory amplitude sweep test“ (AST)

AST (amplitude sweep test) představuje obdobu zkoušky FST (kap. 3.3.4) s jinými vstupními parametry. Při stanovení postupu zkoušky lze vycházet z normy ČSN EN 14770 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR). (37)



3.3.5.1 Materiály a pomůcky

Všechny potřebné materiály a pomůcky jsou v případě této zkoušky obdobné jako u zkoušky MSCR a FST (viz kap. 3.3.3.1).

3.3.5.2 Příprava a průběh zkoušky

Za účelem stanovení přípravy zkoušky lze vycházet z již výše popsané zkoušky MSCR (kap. 3.3.3.2). (37) Kromě zadávané teploty, při které zkouška probíhá, je potřeba stanovit podobně jako u zkoušky FST frekvenci oscilujícího napětí a cílené smykové přetvoření. Na rozdíl od FST zůstává při této zkoušce frekvence neměnná po celou dobu (zvolená frekvence činila v případě této práce 10 rad/s, což odpovídá přibližně 1,59 Hz). Hodnota dosaženého smykového přetvoření se však v průběhu zkoušky mění. Jeho rozsah byl stanoven na 0,01 až 50 %. Zkouška probíhá v měření modulových a jiných charakteristik postupně od nejnižšího k nejvyššímu zadanému přetvoření.

3.3.5.3 Výsledky zkoušky

Jelikož se stejně jako v případě FST jedná o oscilační zkoušku, výsledné parametry se shodují. Měřeny jsou tedy mj. komplexní smykový modul G^* včetně složek G' a G'' , úhel fázového posunu δ a smykové napětí.

3.4 Výsledky zkoušek

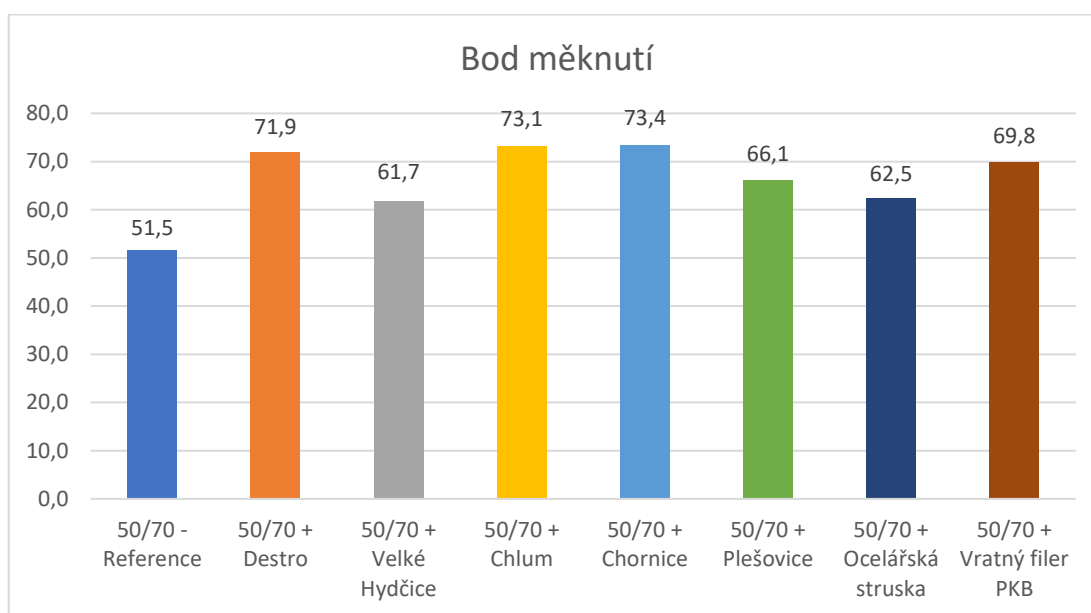
3.4.1 Stanovení bodu měknutí

Jako kapalinová lázeň nemusel být použit glycerin, neboť všechny výsledky zkoušky „kroužek a kulička“ vyšly pod kritickou hodnotu 80 °C. Všechny naměřené hodnoty uvádí tabulka 3, která obsahuje rovněž stanovený bod měknutí jako průměr naměřených hodnot a u vzorků s přidaným filerem odchylku oproti referenčnímu pojivu ΔKK .



VZOREK	1. HODNOTA [°C]	2. HODNOTA [°C]	PRŮMĚR [°C]	ΔKK [°C]
50/70 - Reference	51,5	51,5	51,5	-
50/70 + Destro	71,6	72,1	71,9	20,4
50/70 + Velké Hydčice	62,2	61,2	61,7	10,2
50/70 + Chlum	72,6	73,6	73,1	21,6
50/70 + Chornice	73,3	73,5	73,4	21,9
50/70 + Plešovice	65,7	66,4	66,1	14,6
50/70 + Ocelářská struska	62,7	62,2	62,5	11,0
50/70 + Vratný filer PKB	69,8	69,7	69,8	18,3

Tabulka 3: Výsledky ze zkoušky stanovení bodu měknutí



Graf 1: Srovnání výsledků bodu měknutí

Z výsledků je patrné, že přidáním filerů do asfaltového pojiva se docílí zvýšení bodu měknutí a tím ztužení dané směsi. Míru dodatečného ztužení ilustruje pravý sloupec. Největšího nárůstu bodu měknutí dosahují vzorky 50/70 + Chornice (+21,9 °C) a 50/70 + Chlum (+21,6 °C). Naopak nejmenší vliv měl vzorek 50/70 + Velké Hydčice (+10,2 °C).

3.4.2 Stanovení tažných vlastností metodou silové duktility

Pro každý vzorek byly provedeny dvě zkoušky. Kromě výše popsané celkové deformační energie (do míry protažení 400 mm anebo porušení vzorku) se stanovily také smluvní hodnoty energií charakterizující tuto veličinu ve významných bodech. Jedná se o energii v momentě nejvyšší dosažené síly a energii odpovídající protažení



200 a 400 mm a rozdíl mezi nimi. Hodnoty kohezni energie vyjádřené v J/cm^2 shrnují následující tabulky. Vynechaná pole (-) znázorňují nulovou hodnotu.

50/70 - Reference			50/70 + Destro		
Deformační energie [J/cm^2]	První vzorek	Druhý vzorek	Deformační energie [J/cm^2]	První vzorek	Druhý vzorek
$E_{\text{max.síla}}$	0,0021	0,0020	$E_{\text{max.síla}}$	0,0202	0,0200
E_{200}	0,0017	0,0017	E_{200}	-	-
E_{400}	-	-	E_{400}	-	-
$E_{\text{celková}}$	0,1629	0,1665	$E_{\text{porušení}}$	0,6287	0,5756
$E_{200-400}$	0,0017	0,0017	$E_{200-400}$	-	-

50/70 + Velké Hydčice			50/70 + Chlum		
Deformační energie [J/cm^2]	První vzorek	Druhý vzorek	Deformační energie [J/cm^2]	První vzorek	Druhý vzorek
$E_{\text{max.síla}}$	0,0135	0,0128	$E_{\text{max.síla}}$	0,0202	0,0198
E_{200}	0,0065	0,0058	E_{200}	-	-
E_{400}	-	0,0001	E_{400}	-	-
$E_{\text{porušení/celk.}}$	0,8167	0,7948	$E_{\text{porušení}}$	0,7897	0,6833
$E_{200-400}$	0,0065	0,0058	$E_{200-400}$	-	-

50/70 + Chornice			50/70 + Plešovice		
Deformační energie [J/cm^2]	První vzorek	Druhý vzorek	Deformační energie [J/cm^2]	První vzorek	Druhý vzorek
$E_{\text{max.síla}}$	0,0235	0,0218	$E_{\text{max.síla}}$	0,0163	0,0176
E_{200}	-	-	E_{200}	-	-
E_{400}	-	-	E_{400}	-	-
$E_{\text{porušení}}$	0,8176	0,8681	$E_{\text{porušení}}$	0,6614	0,7364
$E_{200-400}$	-	-	$E_{200-400}$	-	-



50/70 + Ocelářská struska			50/70 + Vratný filer PKB		
Deformační energie [J/cm ²]	První vzorek	Druhý vzorek	Deformační energie [J/cm ²]	První vzorek	Druhý vzorek
E_{max.síla}	0,0133	0,0140	E_{max.síla}	0,0169	0,0182
E₂₀₀	0,0013	-	E₂₀₀	-	-
E₄₀₀	-	-	E₄₀₀	-	-
E_{porušení}	0,6975	0,6927	E_{porušení}	0,7705	0,7029
E₂₀₀₋₄₀₀	0,0013	-	E₂₀₀₋₄₀₀	-	-

Tabulka 4: Výsledky zkoušky silové ductility

V průběhu zkoušky došlo u většiny zkoumaných vzorků k předčasnému porušení, pro asfaltové pojivo tedy nebylo dosaženo protažení 400 mm. Výjimku tvoří samozřejmě referenční pojivo, do kterého nebyl přimíchán filer, a jeden vzorek s filerem z lokality Velké Hydčice. Navíc je patrné, že drtivá většina tmelů nevydržela ani protažení na smluvní úroveň 200 mm. Tuto mez překročilo opět pouze referenční pojivo, vzorky s filerem Velké Hydčice a jeden vzorek tmelu s ocelářskou struskou. U této směsi se jeden ze vzorků porušil nedlouho po dosažení této hranice. Oproti čistému pojivu tedy tmel dosahuje daleko tužší struktury, což potvrdily i zvýšené hodnoty bodu měknutí v předcházející kapitole. Takový tmel sice vykazuje větší ztužení, spolu s tím se však dle výsledků silové ductility materiál stává více křehkým.

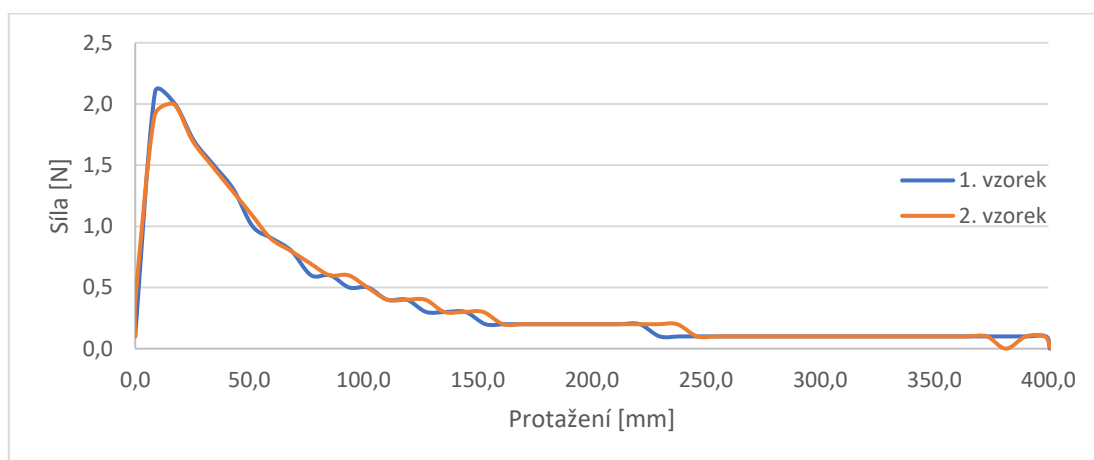
Oproti tomu lze však z výsledků vyčíst, že ve všech zkoumaných vzorcích s přidaným filerem se násobně zvýšilo množství celkové kohezní energie, kterou bylo potřeba vyvinout v průběhu zkoušky k porušení nebo protažení na 400 mm. Zatímco referenční pojivo vykázalo tuto energii na hodnotách 0,16 až 0,17 J/cm², asfaltové tmely s filerovou složkou zaznamenaly čtyř až pětinašobnou hodnotu. Největšího zlepšení bylo v tomto ohledu dosaženo u vzorku s filerem z lokality Chornice s celkovou hodnotou kohezní energie 0,82 resp. 0,87 J/cm². Stejně jako v případě výsledků bodů měknutí lze prohlásit, že i výsledky silové ductility ukazují na značný ztužující efekt fileru na asfaltové pojivo.

Tabulka 5 uvádí pro porovnání průměrné hodnoty dosaženého protažení ΔL , maximální odporovou sílu vůči protažení F_{\max} a celkovou deformační energii do okamžiku porušení vzorku nebo ukončení zkoušky při protažení 400 mm.

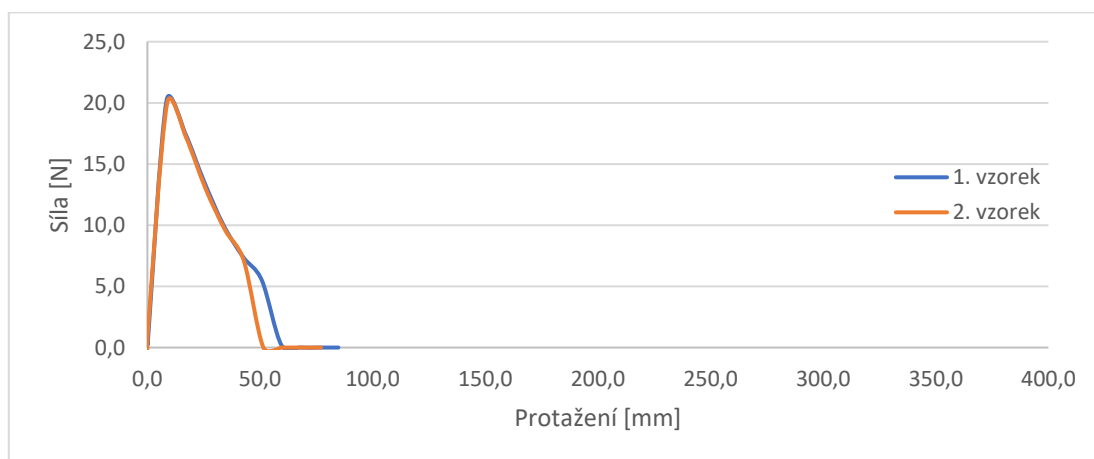


Vzorek	ΔL [mm]	F_{max} [N]	$E_{celková}$ [J/cm ²]
50/70 - Reference	400,0	2,1	0,1647
50/70 + Destro	59,7	20,1	0,6022
50/70 + Velké Hydčice	390,4	13,2	0,8057
50/70 + Chlum	85,1	20,0	0,7365
50/70 + Chornice	97,8	22,7	0,8428
50/70 + Plešovice	102,3	17,0	0,6989
50/70 + Ocelářská struska	191,5	13,7	0,6951
50/70 + Vratný filer PKB	110,1	17,6	0,7367

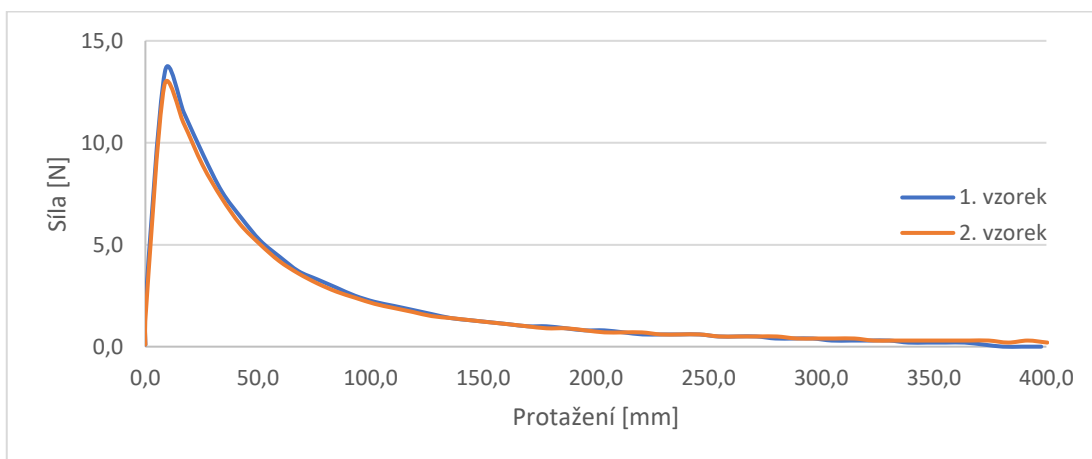
Tabulka 5: Porovnání výsledků zkoušky silové ductility



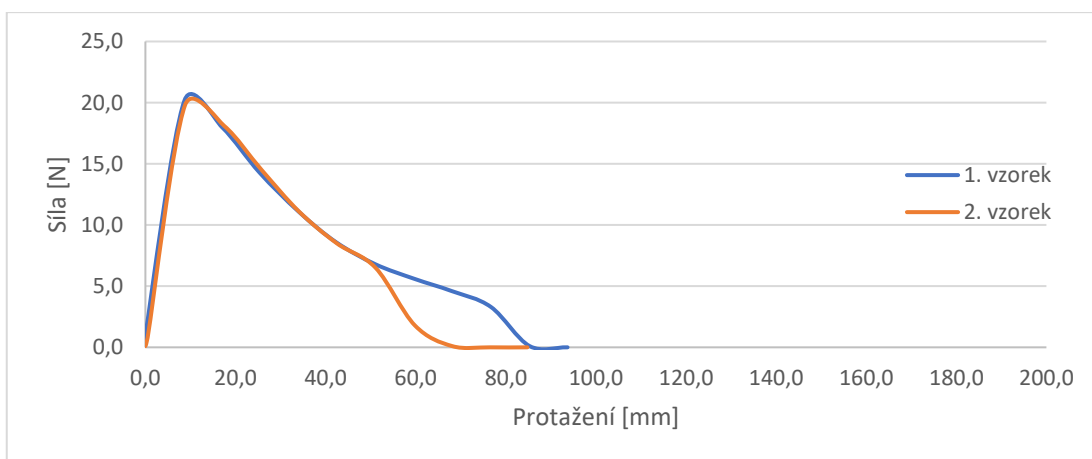
Graf 2: Průběh zkoušky silové ductility, referenční pojivo 50/70



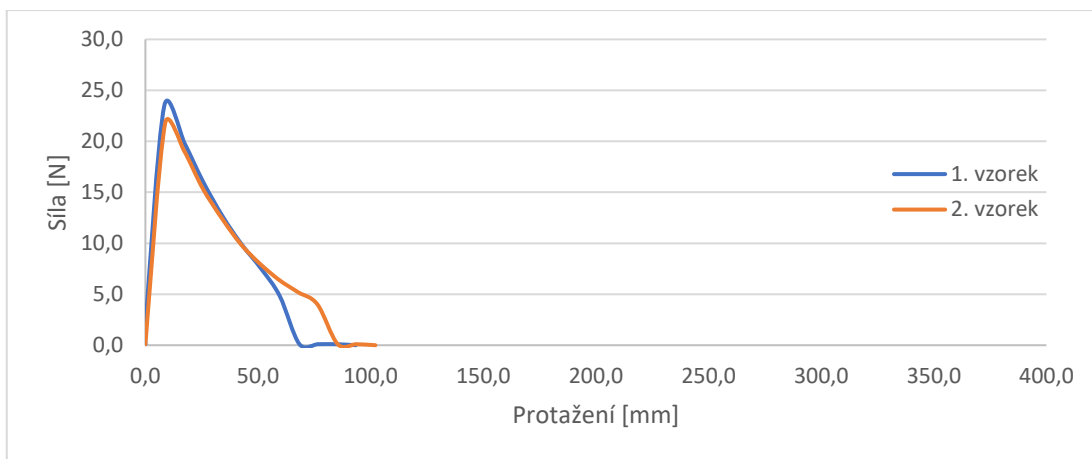
Graf 3: Průběh zkoušky silové ductility, 50/70 + Destro



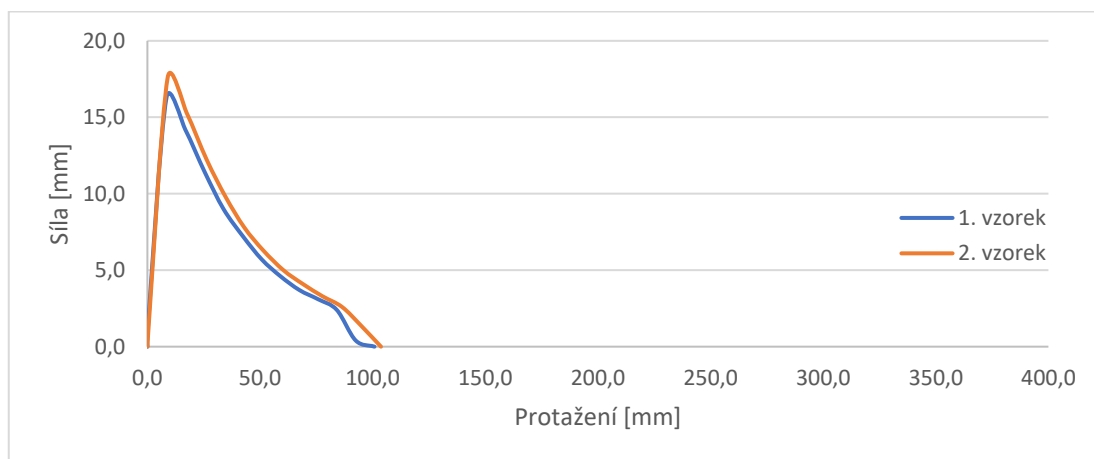
Graf 4: Průběh zkoušky silové ductility, 50/70 + Velké Hydčice



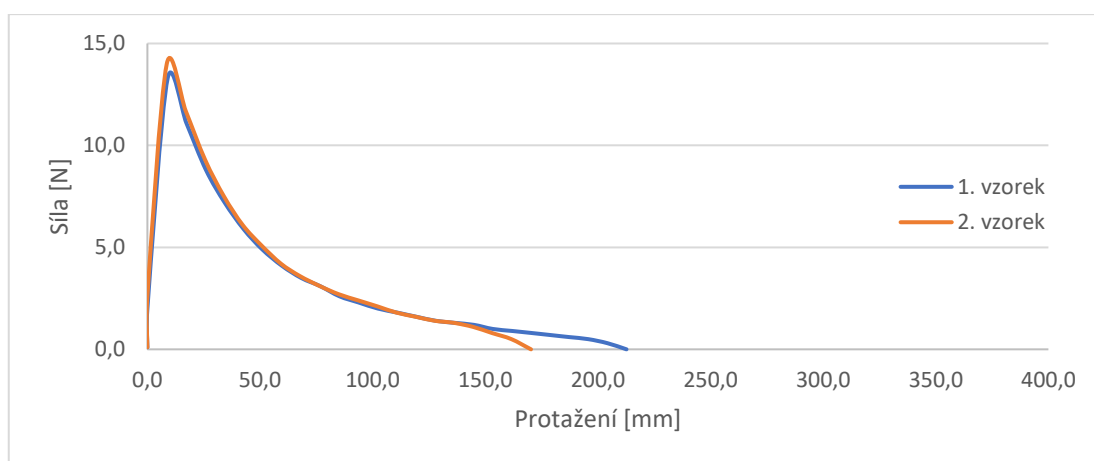
Graf 5: Průběh zkoušky silové ductility, 50/70 + Chlum



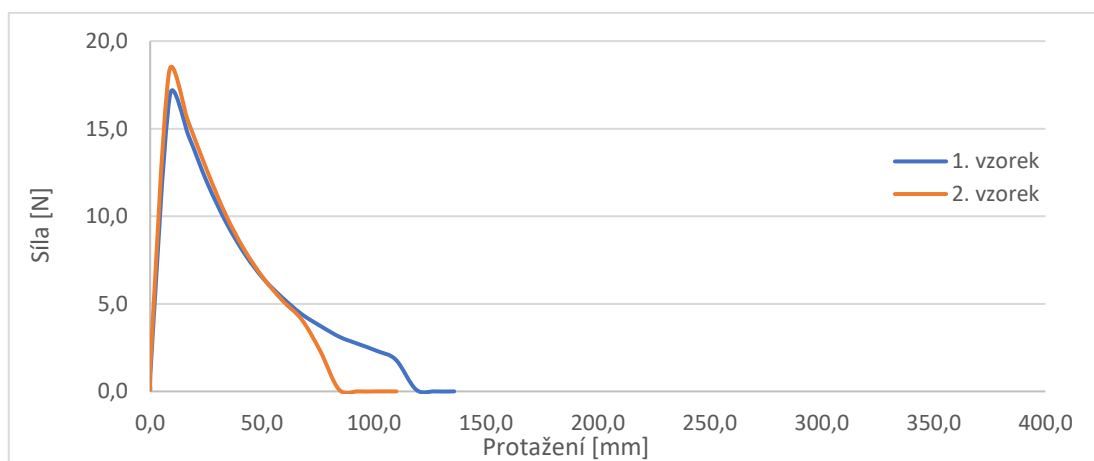
Graf 6: Průběh zkoušky silové ductility, 50/70 + Chornice



Graf 7: Průběh zkoušky silové duktility, 50/70 + Plešovice



Graf 8: Průběh zkoušky silové duktility, 50/70 + Ocel. struska



Graf 9: Průběh zkoušky silové duktility, 50/70 + Vratný filer PKB

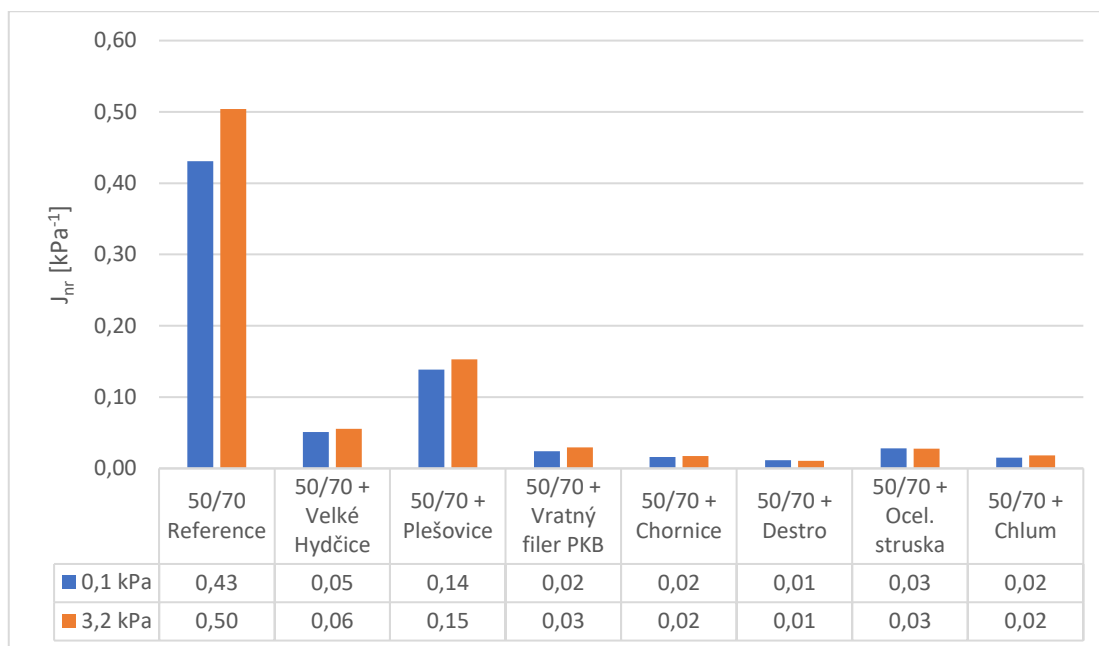
3.4.3 Zkouška MSCR

Pro zkoušku MSCR byly zvoleny teploty 60 a 50 °C a hladiny napětí 0,1 a 3,2 kPa.

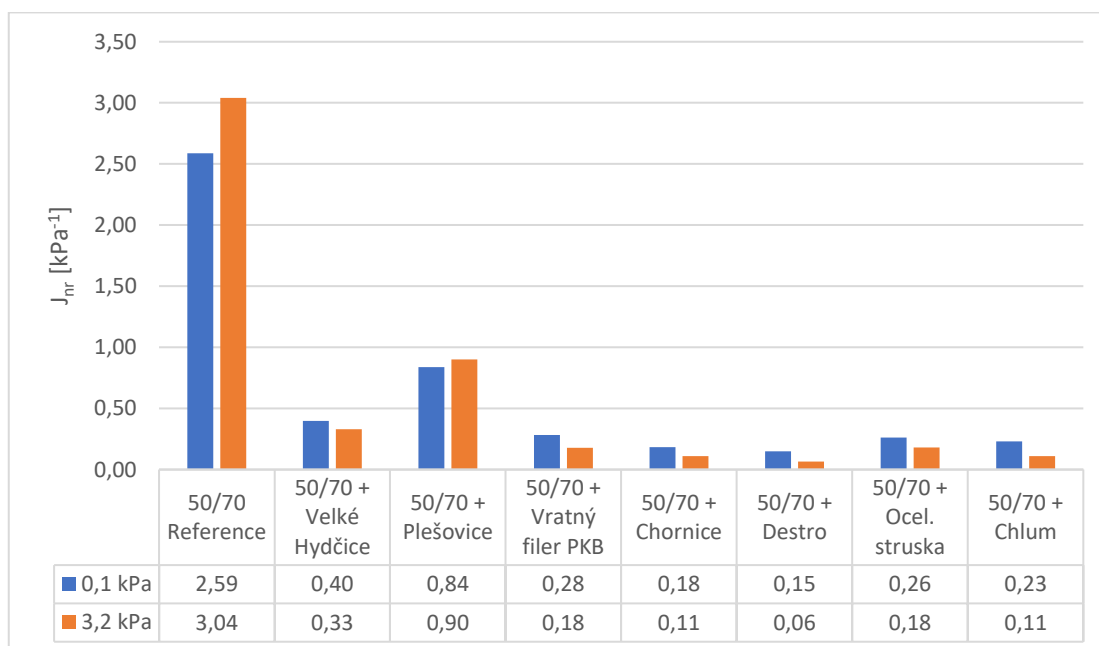
Nevratná smyková poddajnost J_{nr} zachycuje odolnost materiálu vůči tvorbě trvalých deformací. Nižší hodnoty smykové poddajnosti značí vyšší schopnost směsi odolávat



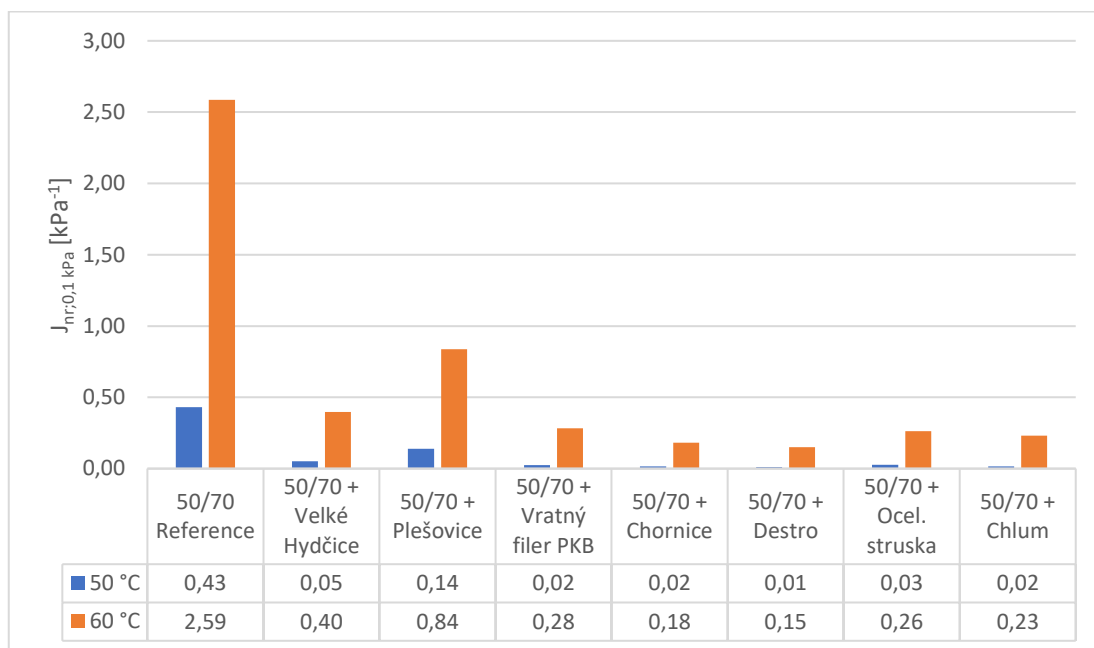
napětí a plastifikaci. Grafy 10 až 13 znázorňují porovnání průměrných hodnot J_{nr} vzhledem k teplotě a úrovni vneseného napětí.



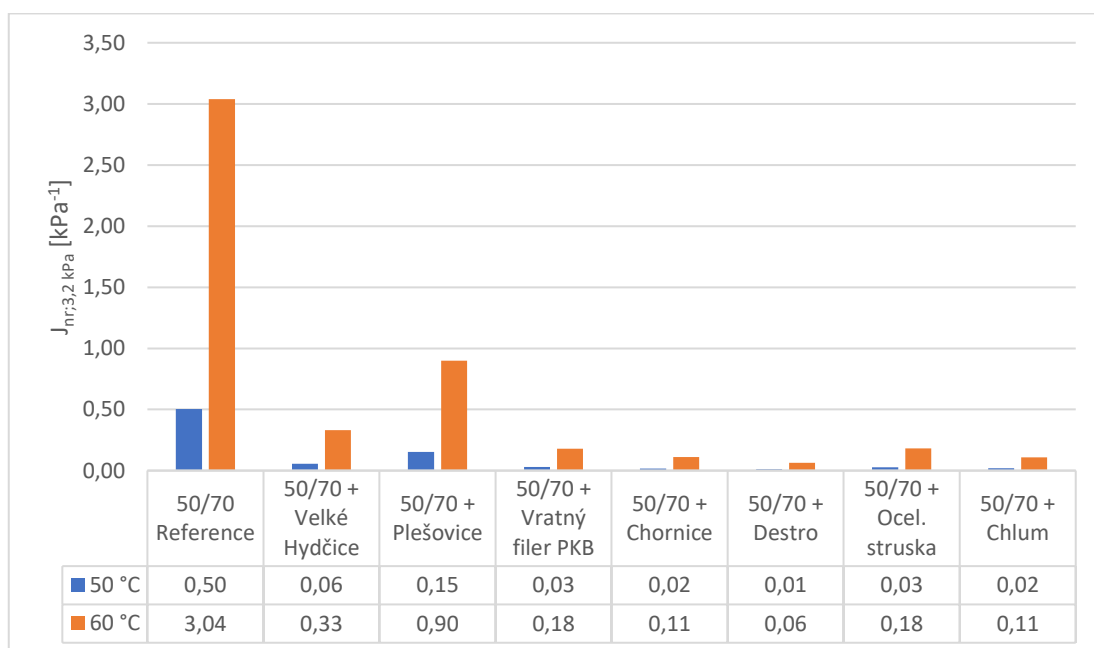
Graf 10: MSCR; smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 50 °C



Graf 11: MSCR; smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 60 °C



Graf 12: MSCR; porovnání smykové poddajnosti $J_{nr}=0,1$ kPa při teplotách 50 °C a 60 °C

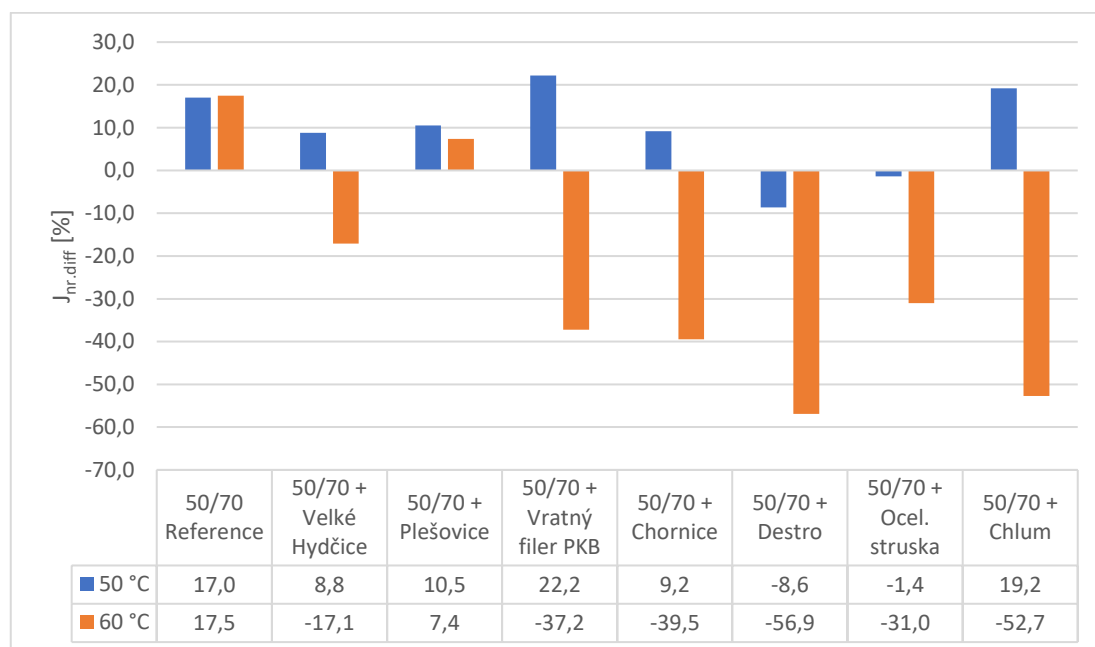


Graf 13: MSCR; porovnání smykové poddajnosti $J_{nr}=3,2$ kPa při teplotách 50 °C a 60 °C

Při pohledu na grafy lze zřetelně rozpoznat účinek fileru v asfaltovém pojivu. Referenční pojivo 50/70 vykazuje několikanásobné hodnoty smykové poddajnosti v porovnání s pojivy obsahující filer. Nejnížší hodnoty vykazuje tmel obsahující filer Destro, Chornice a Chlum. Nejvyšší poddajnosti naopak dosahuje vzorek 50/70 + Plešovice.

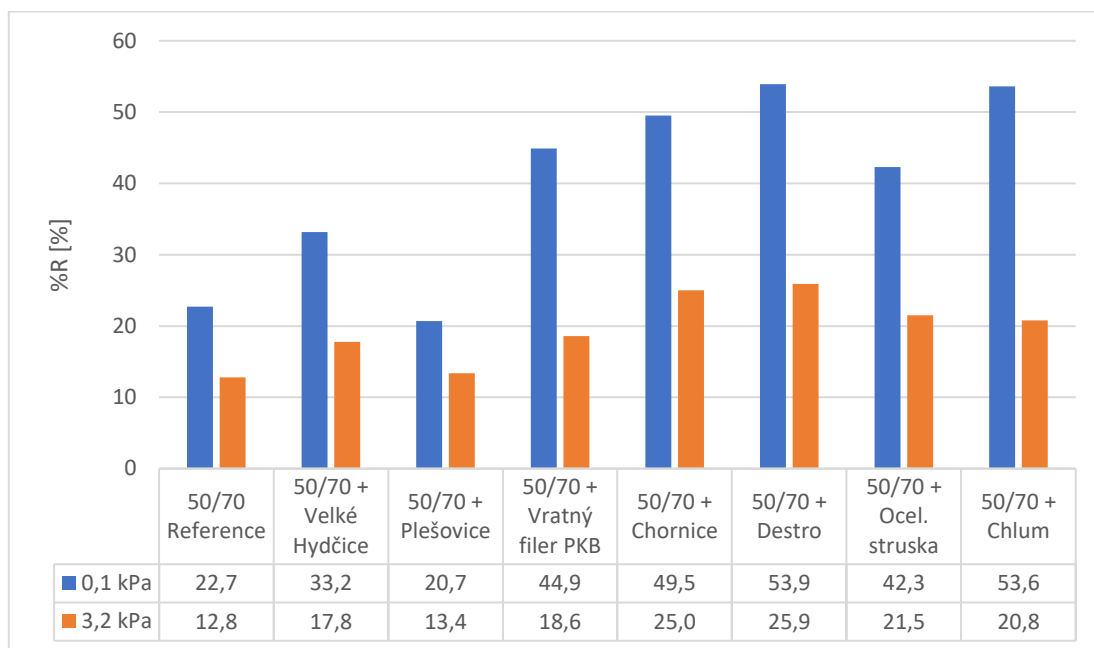


Graf 14 zachycuje procentuální změnu smykové poddajnosti $J_{nr,diff}$ na hladině napětí 3,2 kPa vzhledem k úrovni napětí 0,1 kPa. Změna znázorňuje citlivost materiálu na změnu napětí, kterou v reálném provozu může vyvolat například nepředvídané dopravní zatížení. Z grafu vyplývá, že co se teplotního nastavení týče, změna J_{nr} je výrazně patrnější při 60 °C než při 50 °C. A zatímco při teplotě 50 °C se hodnota J_{nr} na hladině 3,2 kPa vůči 0,1 kPa ve většině případů zvýšila, při 60 °C tomu bylo naopak. Z asfaltových mastixů při 50 °C dosáhl nejvyšší změny vzorek 50/70 + Vratný filer PKB (+22,2 %) a nejnižší ocelářská struska (-1,4 %), při 60 °C činí nejvyšší změna u tmelu s filerem Destro (-56,9 %) a nejnižší u Plešovic (+7,4 %).

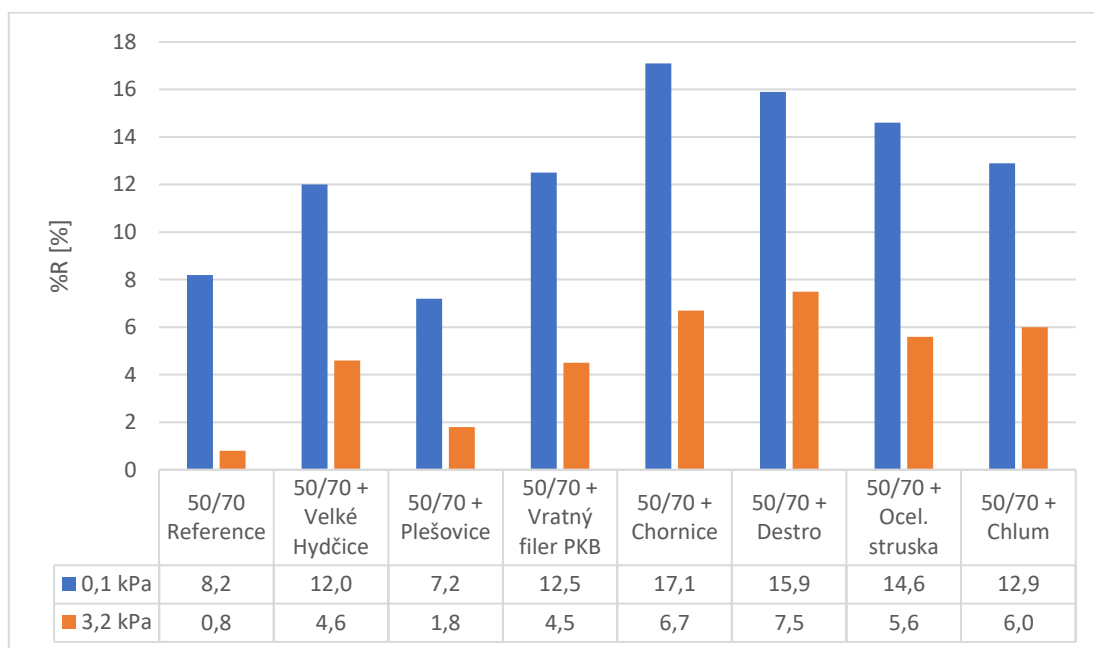


Graf 14: MSCR; rozdíl smykové poddajnosti $J_{nr,diff}$ mezi 3,2 kPa a 0,1 kPa při teplotách 50 °C a 60 °C

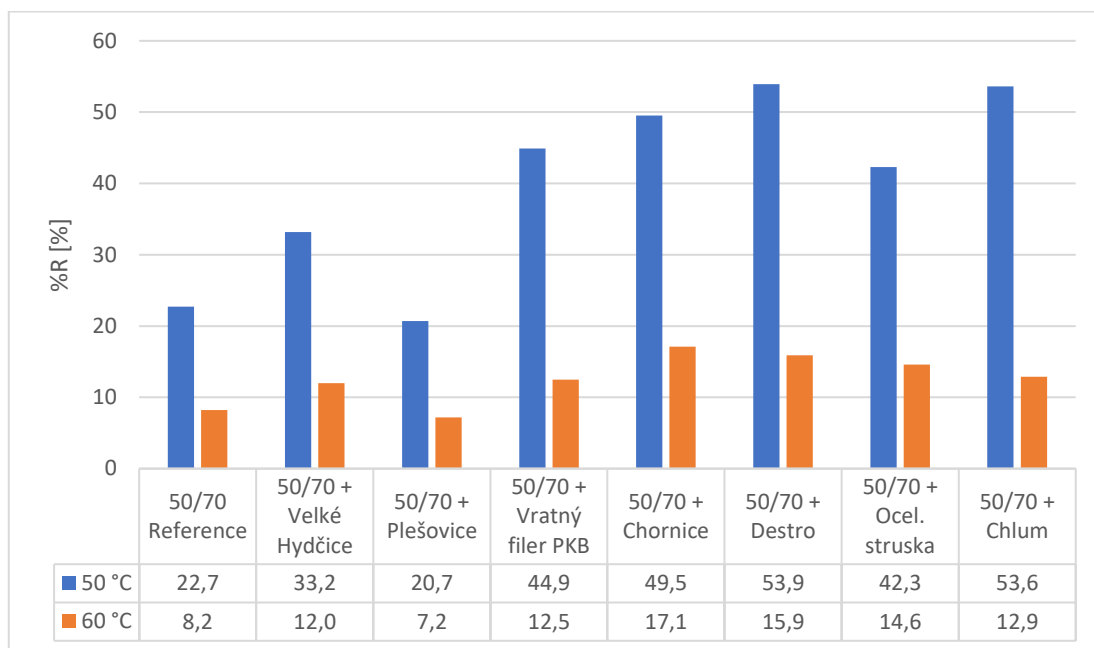
Další veličinou získanou z testu MSCR je průměrné zotavení %R, které znázorňuje schopnost materiálu navracet se do původního stavu po vnesení napětí, tzn. míru elasticity materiálu. Oproti trendu hodnot J_{nr} je zřejmé, že čím vyšší dosahuje %R hodnotu, tím vyšší se předpokládá odolnost směsi vůči trvalým deformacím. Grafy 15, 16, 17 a 18 znázorňují porovnání průměrných hodnot %R vzhledem k teplotě a úrovni vneseného napětí.



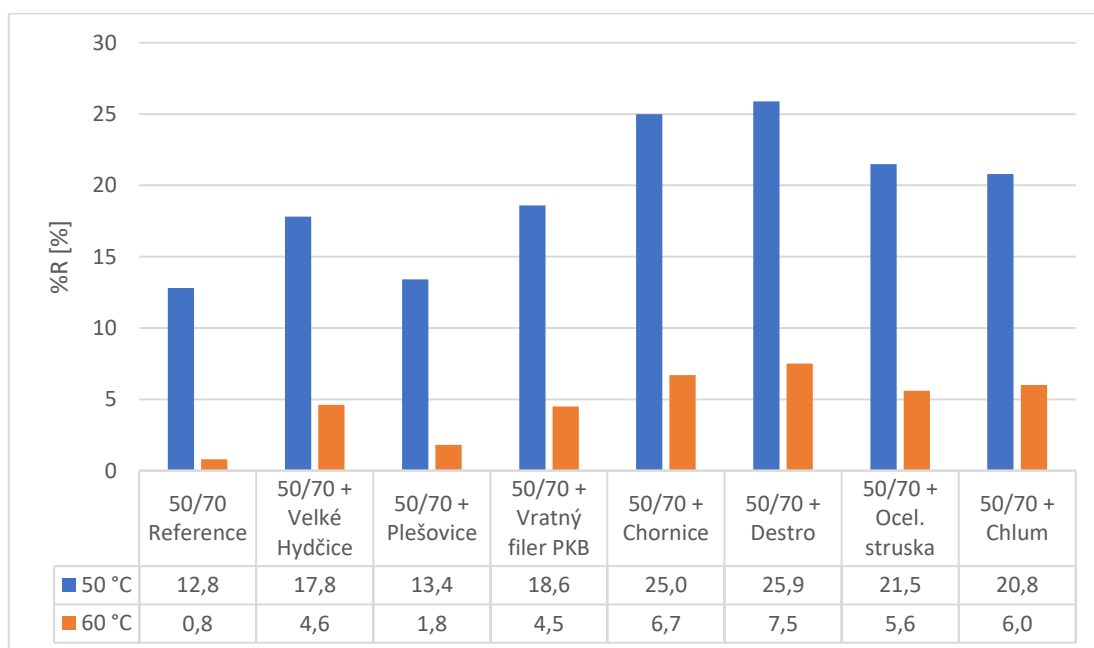
Graf 15: MSCR; elastické zotavení %R při teplotě 50 °C



Graf 16: MSCR; elastické zotavení %R při teplotě 60 °C



Graf 17: MSCR; porovnání elastického zotavení %R pro teploty 50 °C a 60 °C při $J_{nr}=0,1$ kPa

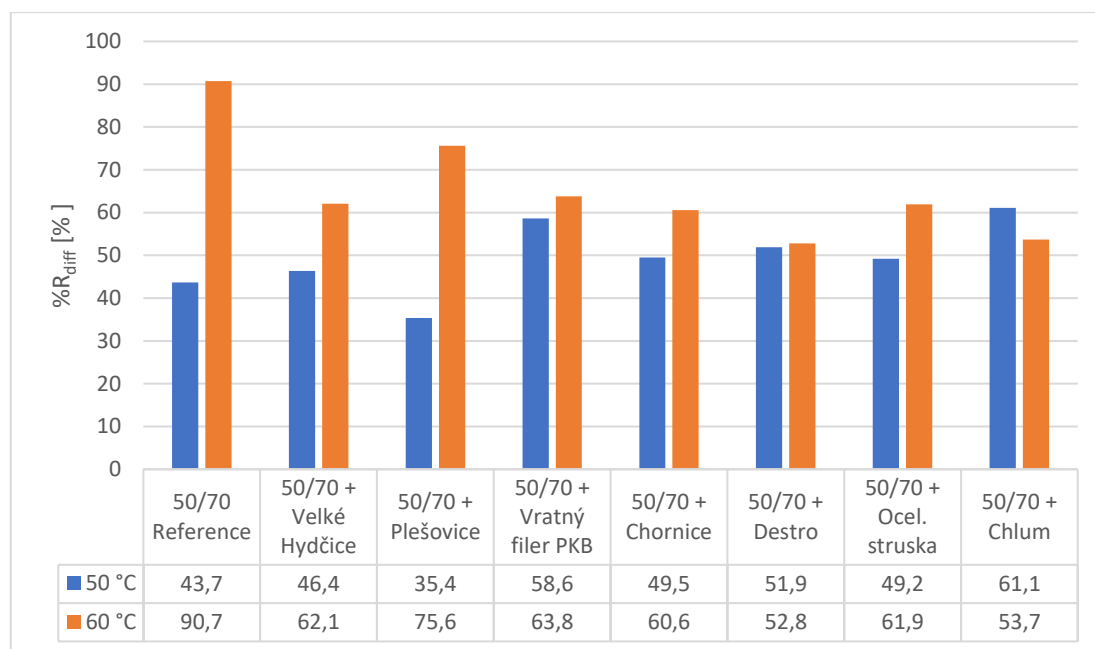


Graf 18: MSCR; porovnání elastického zotavení %R pro teploty 50 °C a 60 °C při $J_{nr}=3,2$ kPa

V porovnání s referenčním pojivem došlo vlivem přítomnosti fileru a jeho ztužujícím efektem u některých vzorků k více jak dvojnásobnému nárůstu hodnot %R. Nejvyšší hodnoty elastického zotavení byly naměřeny u vzorků obsahujících filer Destro, Chornice a Chlum. Naopak nejnižšího elastického zotavení dosáhl tmel 50/70 + Plešovice.



Graf 19 zachycuje absolutní procentuální změnu %R na hladině napětí 3,2 kPa vzhledem k úrovni napětí 0,1 kPa. Ve všech případech se %R při zvýšení napětí na 3,2 kPa přirozeně snížilo, přičemž vyšší změny bylo dosaženo při teplotě 60 °C. Pokud pomínu referenční pojivo, při 50 °C dosáhl nejvyšší změny vzorek s filerem z lomu Chlum (61,1 %) a nejnižší u Plešovic (35,4 %). Při 60 °C zaznamenal největší změnu tmel s filerem Plešovice (75,6 %) a nejmenší mastix s filerem Destro (52,8 %).



Graf 19: MSCR; rozdíl elastického zotavení $%R_{diff}$ mezi 3,2 kPa a 0,1 kPa při teplotách 50 °C a 60 °C

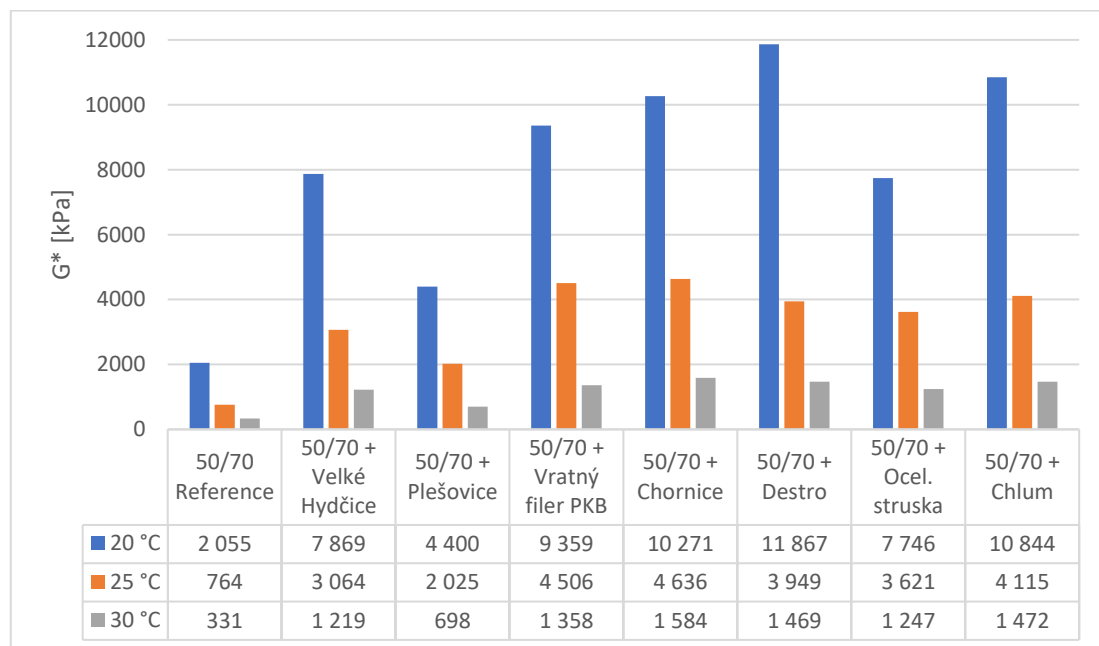
3.4.4 Zkouška „oscillatory frequency sweep test“ (FST)

Zkouška FST se provedla při teplotách 20, 25, 30, 40, 50 a 60 °C. Pro porovnání základních měřených charakteristik byla zvolena frekvence 1,8 Hz. Jedná se o netradiční frekvenci, neboť nejčastěji se komplexní smykový modul vyjadřuje při frekvenci 1,59 Hz, která odpovídá 10 rad/s. V rámci nastavení vlastní zkoušky reometr umožnil pro zvolený interval frekvencí nastavit počet měření, která se v tomto intervalu rovnoměrně rozdělila. Bohužel i vlastní zkoušky nebylo v tomto případě možné pevně zadat konkrétní frekvence. Tato skutečnost vedla k tomu, že nejbližší frekvence, která by odpovídala tradiční hodnotě 1,59 Hz, byla právě frekvence 1,8 Hz. Na grafech 20, 21, 22, 23 jsou vyobrazeny dosažené hodnoty komplexního smykového modulu G^* , úhlu fázového posunu δ .

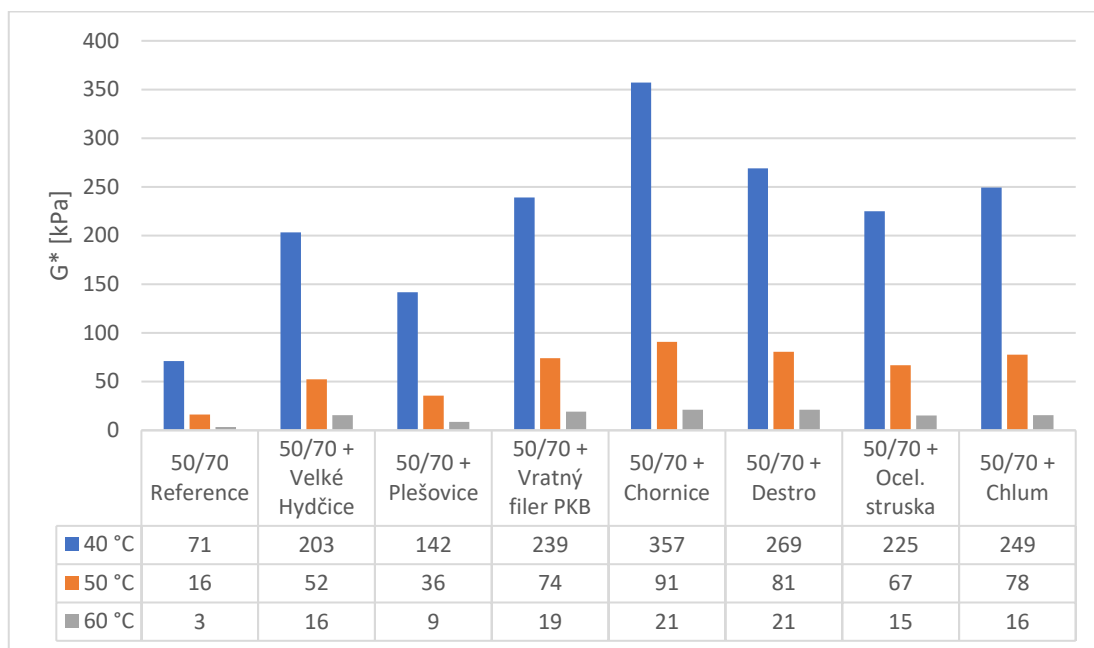


U asfaltových tmelů se z hlediska komplexního smykového modulu, který udává míru tuhosti a odolnosti vůči přetvoření, očekávala jeho zvýšená hodnota oproti referenčnímu pojivu, což se také potvrdilo. Na grafech je zřejmé, že hodnota dosaženého modulu postupně klesá se zvyšující se teplotou. Hodnota fázového úhlu se naopak s nárůstem teploty zvyšuje. Tyto trendy způsobuje fakt, že s nárůstem teploty se pojivo stává více viskózní (schopnost navracet se do původního stavu klesá) a jeho charakter se blíží kapalině.

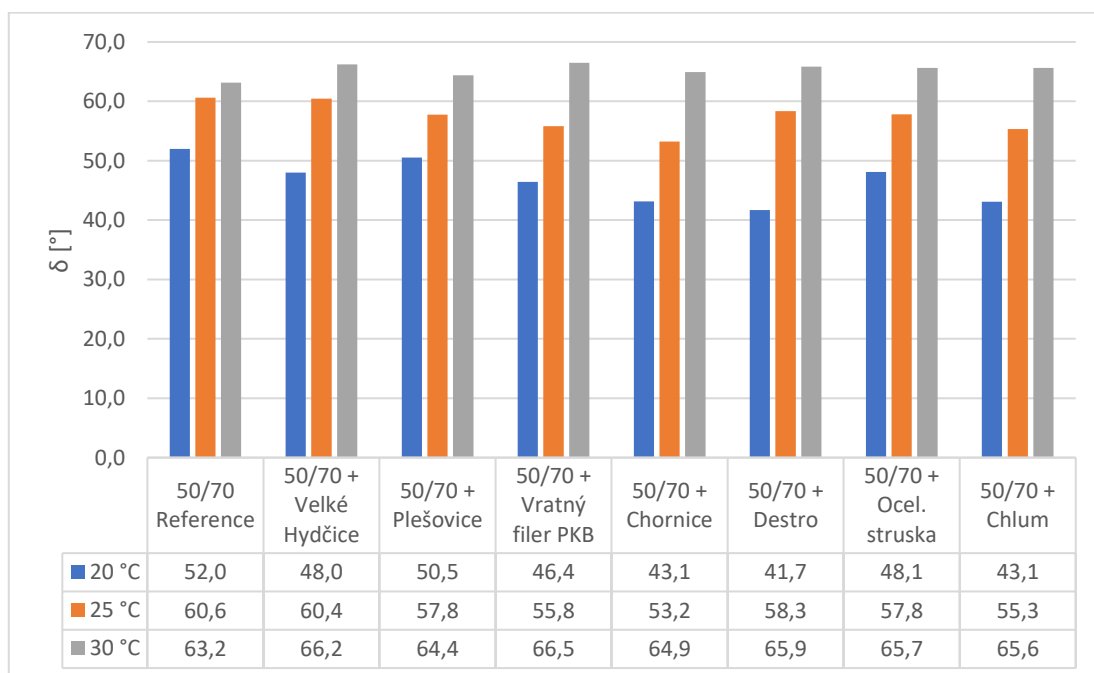
Zatímco u naměřených hodnot fázového úhlu nedosáhl rozptyl napříč jednotlivými vzorky významné míry, komplexní smykový modul výraznější rozdíly vykazuje. Nejnižších hodnot G^* u tmelů dosáhl napříč teplotami vzorek obsahující filer z lomu Plešovice. Naopak z hlediska nejvyšších hodnot G^* se výsledky dle teploty různí.



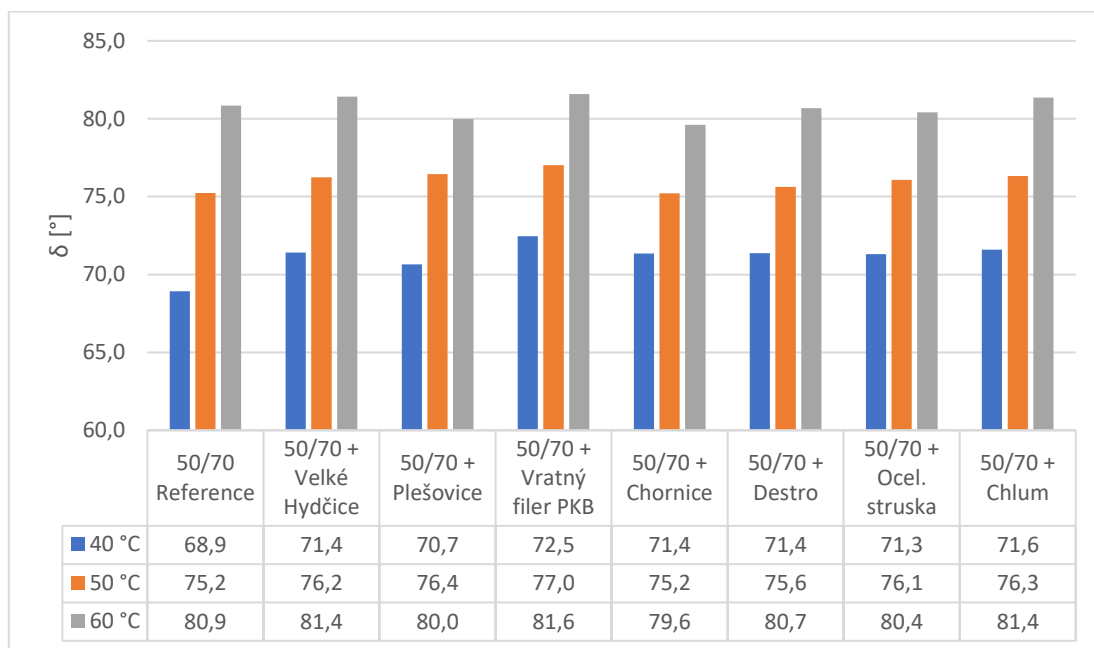
Graf 20: FST; komplexní smykový modul G^* při 1,8 Hz pro teploty 20, 25 a 30 °C



Graf 21: FST; komplexní smykový modul G^* při 1,8 Hz pro teploty 40, 50 a 60 °C

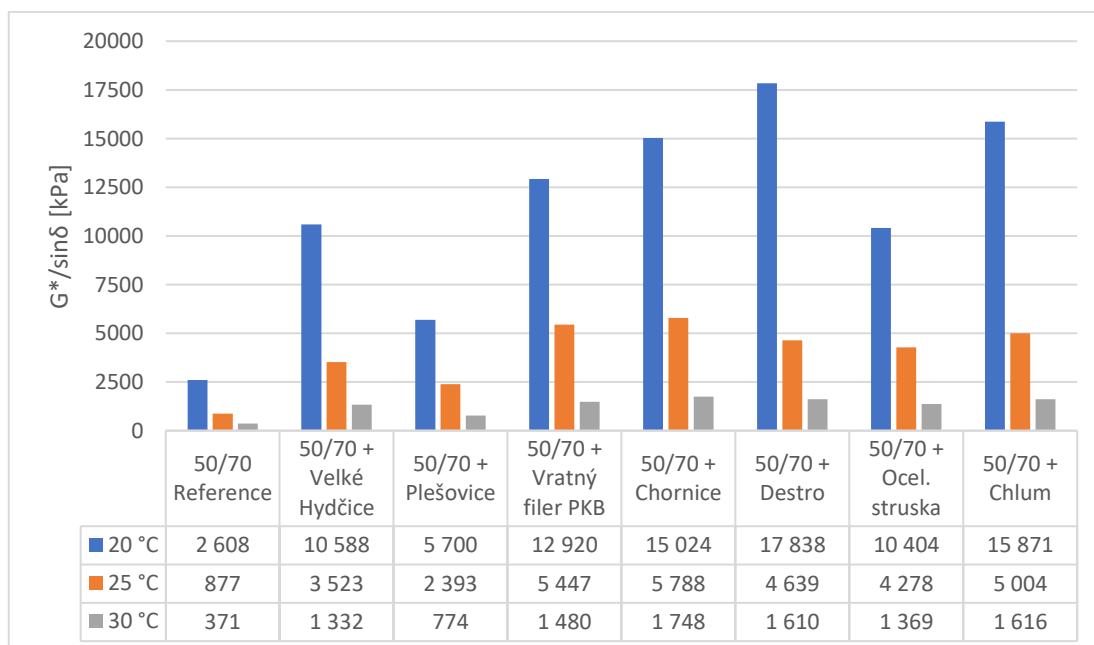


Graf 22: FST; fázový úhel δ při 1,8 Hz pro teploty 20, 25 a 30 °C

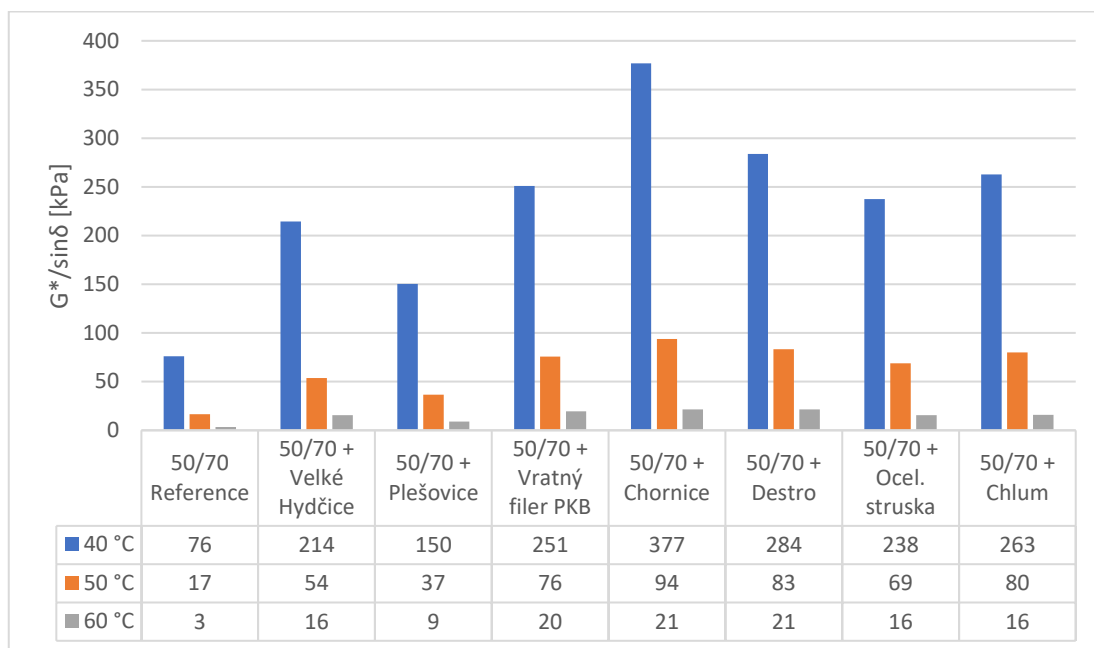


Graf 23: FST; fázový úhel δ při 1,8 Hz pro teploty 40, 50 a 60 °C

Grafy 24 a 25 vyobrazují poměr $G^*/\sin\delta$. Tento poměr je vnímán jako ukazatel odolnosti materiálu vůči trvalým deformacím. U těchto výsledků byla prokázána rovněž značná variabilita, přičemž nejnižších hodnot z mastixů zde dosáhl opět vzorek s filerem z lomu Plešovice.

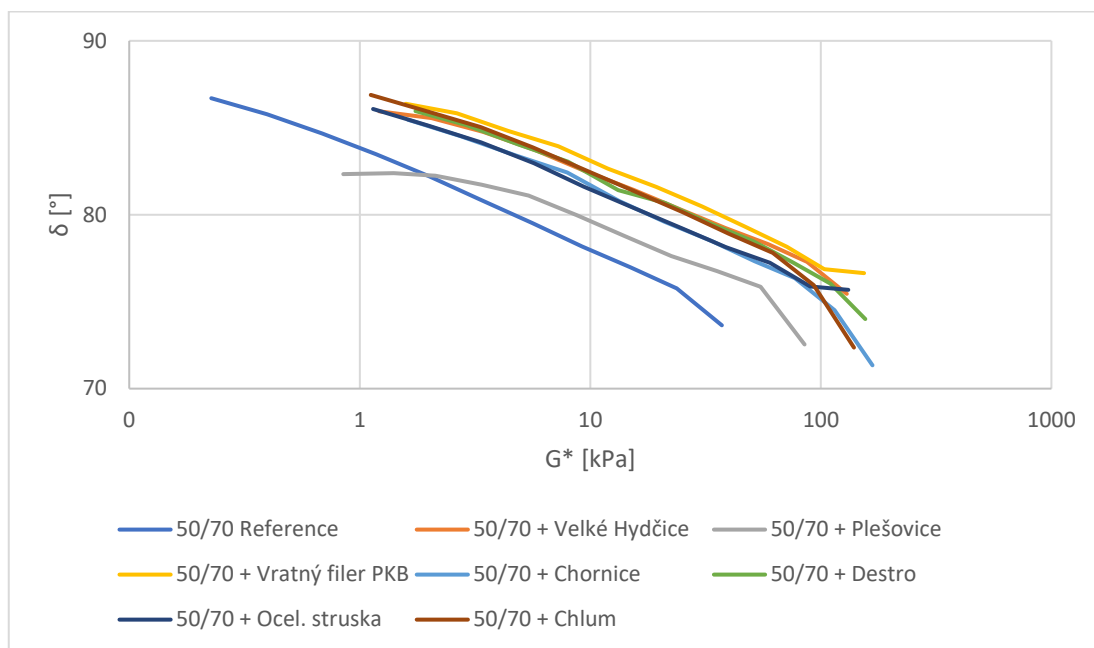


Graf 24: FST; poměr $G^*/\sin \delta$ při 1,8 Hz pro teploty 20, 25 a 30 °C



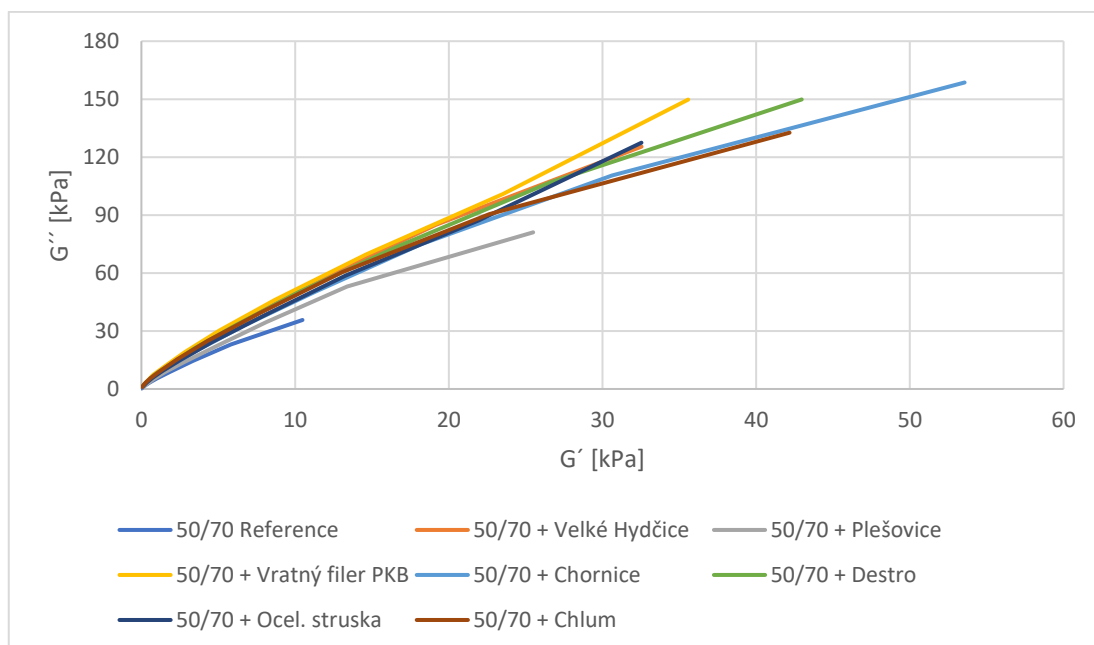
Graf 25: FST; poměr $G^*/\sin\delta$ při 1,8 Hz pro teploty 40, 50 a 60 °C

Blackův diagram (graf 26) zachycuje závislost dynamického smykového modulu a fázového úhlu při konstantní teplotě 60 °C v průběhu zkoušky. Z grafu byly vyjmuty z důvodu nekonzistence trendu hodnoty charakteristik pro poslední, nejvyšší hodnotu frekvence. Se zvyšující se frekvencí zatížení se fázový úhel snižuje a komplexní smykový modul zvyšuje. Lze vidět, že oproti referenčnímu pojivu dosáhly všechny tmely přirozeně vyšší tuhosti (vyjádřeno vyšší hodnotou G^*) a současně je možné pozorovat, že hodnoty úhlu fázového posunutí, resp. jejich rozsah, se oproti čistému pojivu a rovněž napříč jednotlivými vzorky tmelu příliš neliší. Vzorky tmelů tedy dosahují vyšších tuhostí, ale jejich viskoelasticita zůstává obdobná.



Graf 26: FST; Blackův diagram pro teplotu zkoušky 60 °C

Graf 27 (Cole-Cole diagram) ukazuje závislost viskózní a elastické složky komplexního smykového modulu při 60 °C v průběhu zkoušky. Z grafu byly i zde vyjmuty z důvodu nekonzistence trendu hodnoty charakteristik pro poslední, nejvyšší hodnotu frekvence.

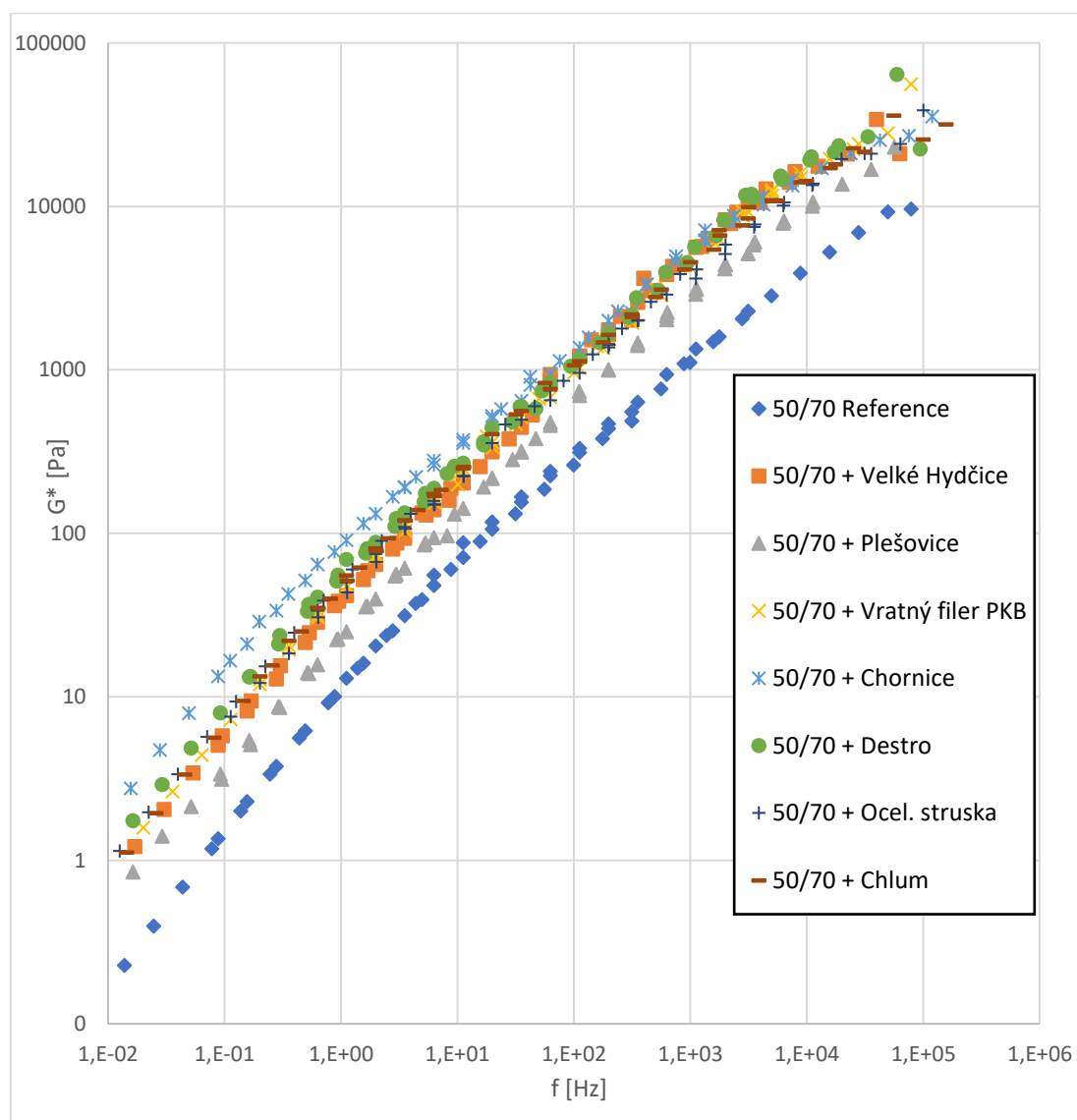


Graf 27: FST; Cole-Cole diagram pro teplotu zkoušky 60 °C

Pro porovnání závislosti komplexního smykového modulu a fázového úhlu na frekvenci zatížení v celé teplotní škále byly pro jednotlivé vzorky sestrojeny řídicí



křivky. Referenční teplota, ke které se výsledky vztahují, činí 40 °C. Graf 28 vyobrazuje souhrnné výsledky závislosti komplexního smykového modulu na frekvenci. Z grafu vyplývá, že oproti referenčnímu pojivu asfaltové tmely dosahují při zvyšující se frekvenci zatížení různých úrovní ztužení. Z mastixů dosahuje nejmenšího nárůstu G^* vzorek s filerem z lomu Plešovice. Nejvyššího ztužení dosáhl v oblasti nízkých frekvencí (a vysokých teplot) vzorek s filerem Chornice. V rozsahu vysokých frekvencí (a nízkých teplot) se trendy u většiny tmelů vyrovnávají.

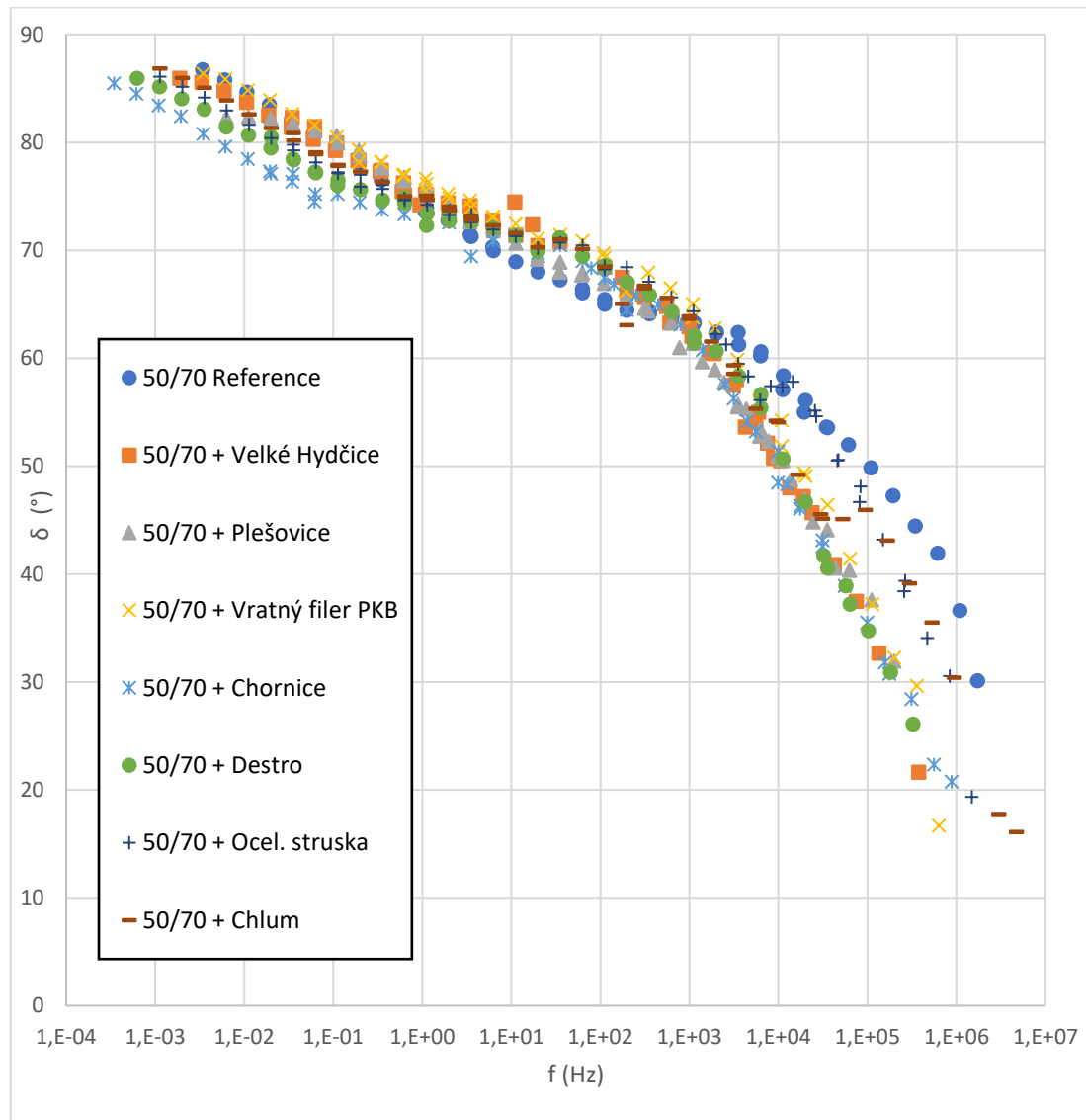


Graf 28: FST; Řídící křivky závislosti komplexního smykového modulu a frekvence zatížení

Graf 29 znázorňuje řídicí křivky závislosti fázového úhlu a frekvence zatížení pro celou teplotní škálu. Z grafu vyplývá, že jednotlivé vzorky zprvu v oblasti nízkých frekvencí (a vysokých teplot) kopírují obdobný trend. V rozsahu vysokých frekvencí



(a nízkých teplot) se křivky od sebe mírně odchyľují. Nižší dosažené hodnoty fázového úhlu u asfaltových tmelů zde značí vyšší schopnost materiálu navracet se do původního stavu.



Graf 29: FST; Řídící křivky závislosti fázového úhlu a frekvence zatížení

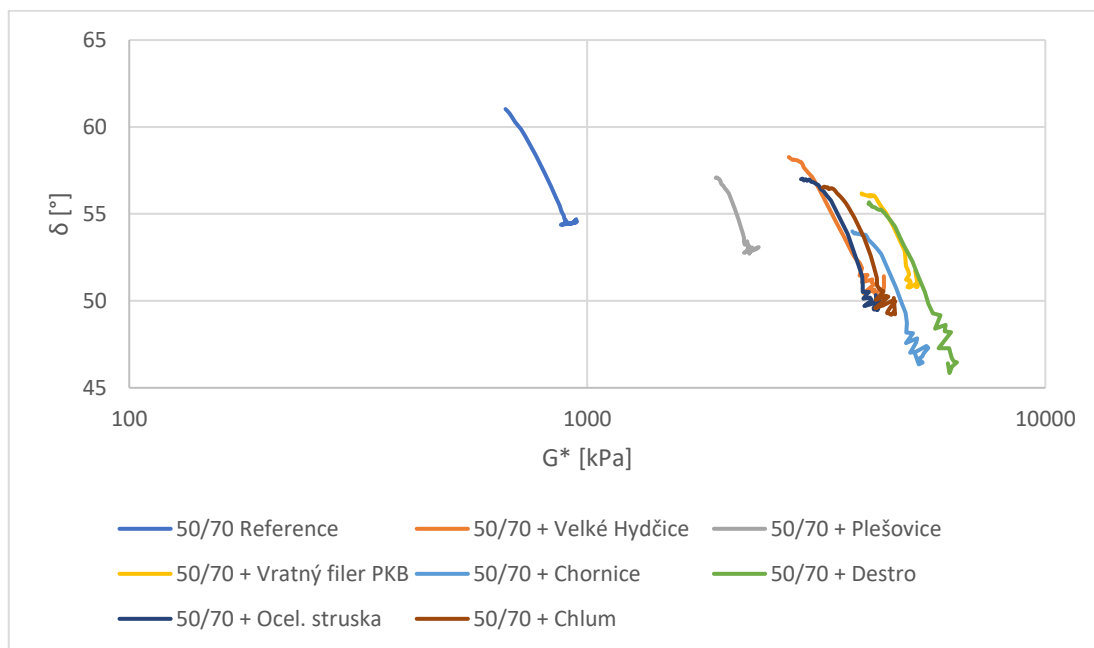
3.4.5 Zkouška „oscillatory amplitude sweep test“ (AST)

Zkouška AST se provedla při teplotách 25 a 60 °C s následným doplněním teploty 40 °C, u které byla použita měřící geometrie dvou destiček o průměru 8 mm (PP8) s mezerou 2 mm.

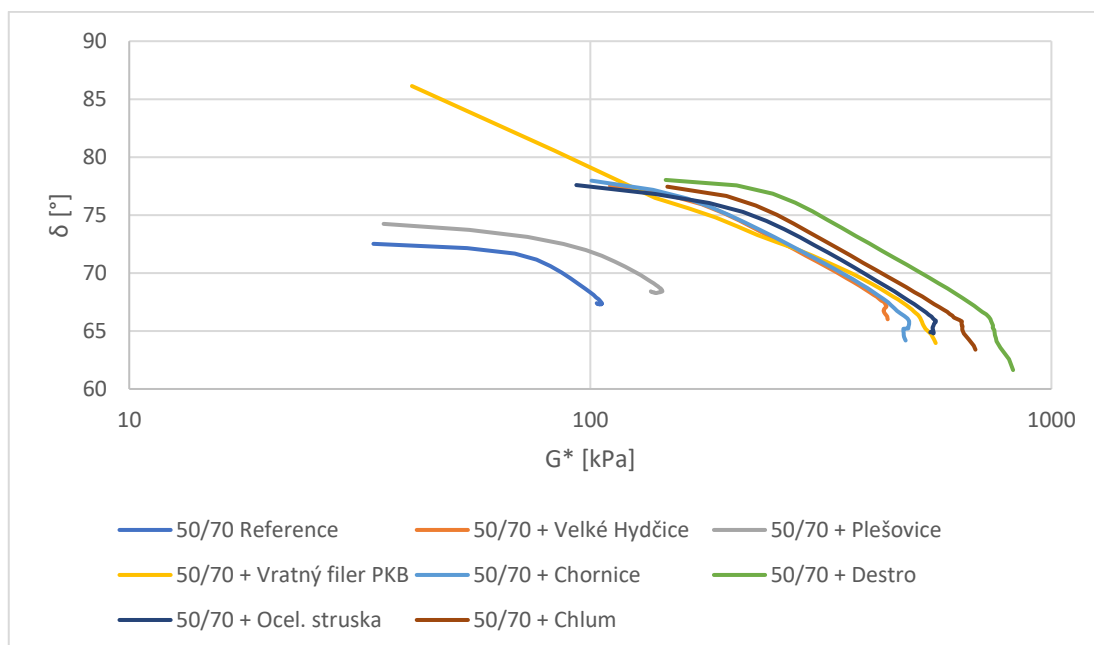
Grafy 30 až 32 znázorňují Blackovy diagramy pro teploty 25, 40 a 60 °C. Stejně jako u zkoušky FST lze i zde pozorovat zřetelný nárůst tuhosti dané hodnotou



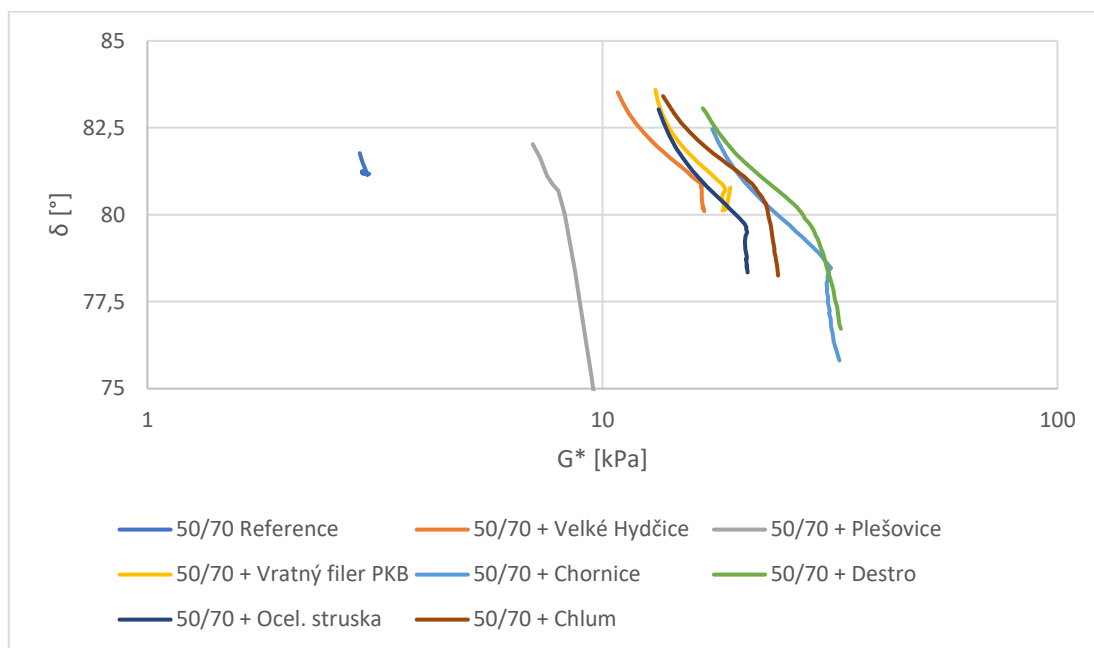
komplexního smykového modulu. Oproti zkoušce FST, kde cílené přetvoření byla konstantní hodnota, je možné u AST pozorovat vyšší rozsah fázového úhlu u tmelů oproti referenčnímu pojivu. Při konstantní frekvenci zatížení a zvyšujícím se přetvoření tedy vzorky mastixů reagují elastičtěji.



Graf 30: AST, Blackův diagram pro teplotu 25 °C

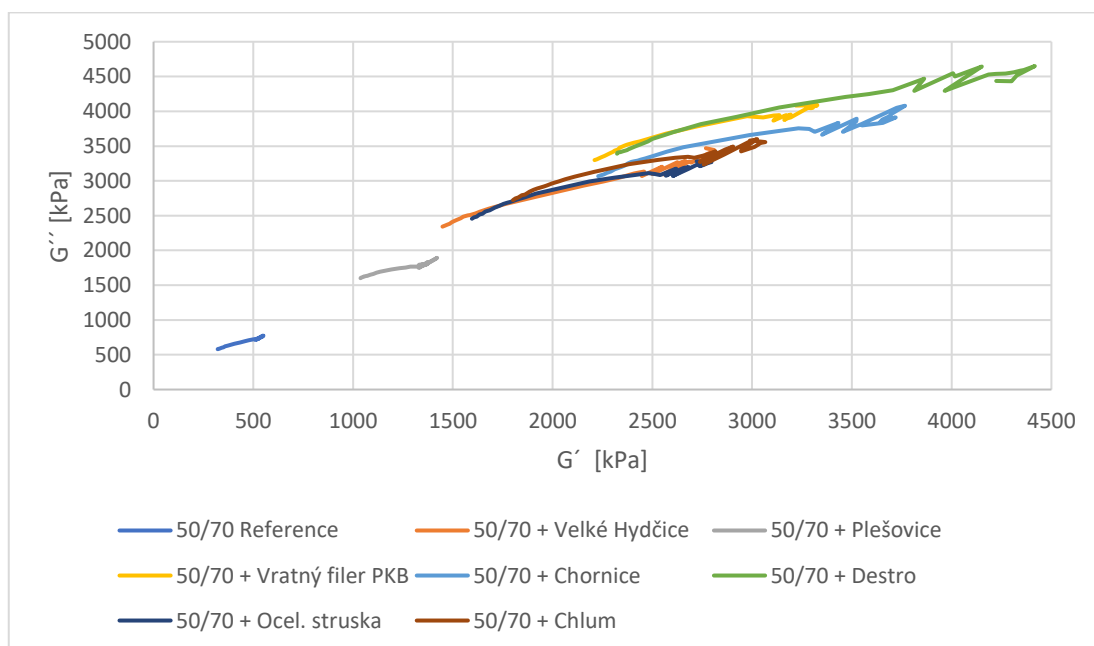


Graf 31: AST; Blackův diagram pro teplotu 40 °C

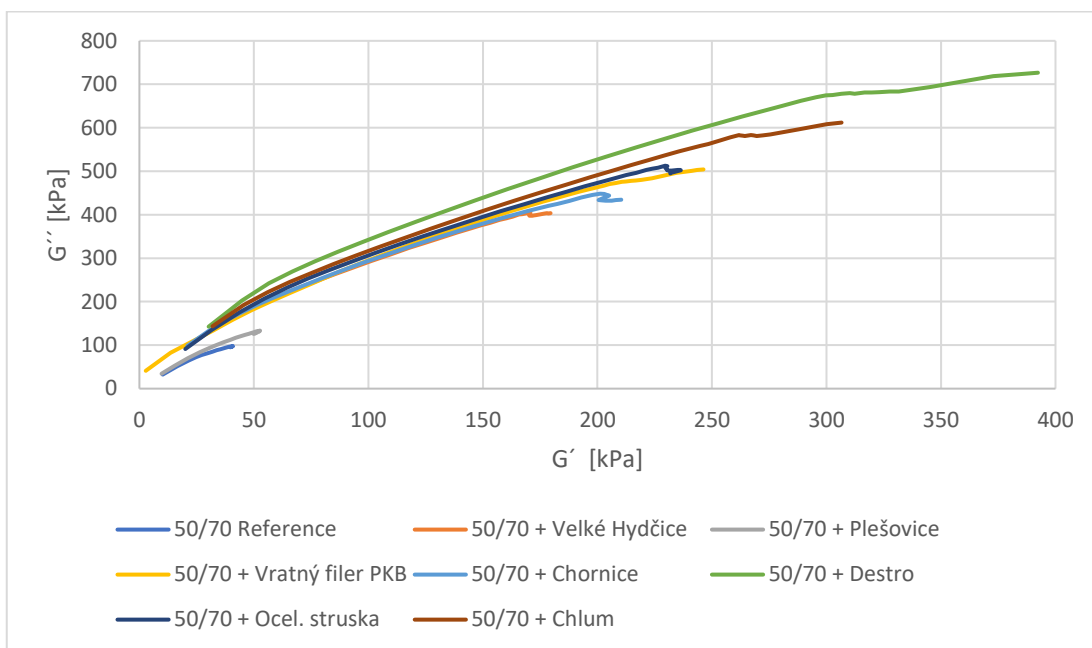


Graf 32: AST; Blackův diagram pro teplotu 60 °C

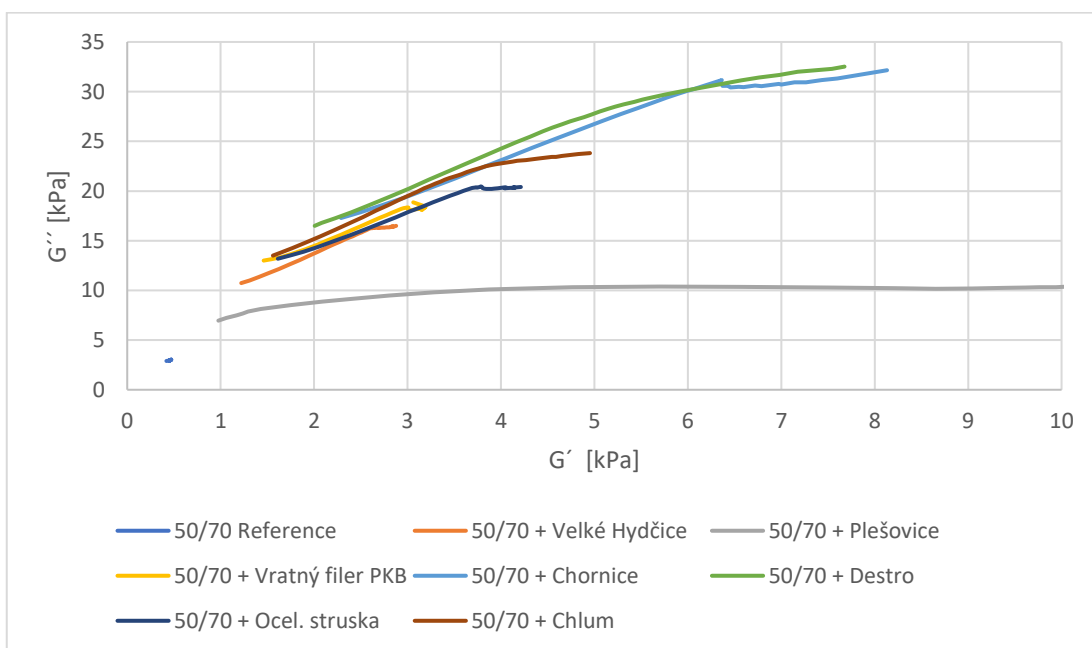
Cole-Cole diagramy (grafy 33 až 35) znázorňují rozdělení viskózní a elastické složky pro jednotlivé vzorky.



Graf 33: AST; Cole-Cole diagram pro teplotu 25 °C

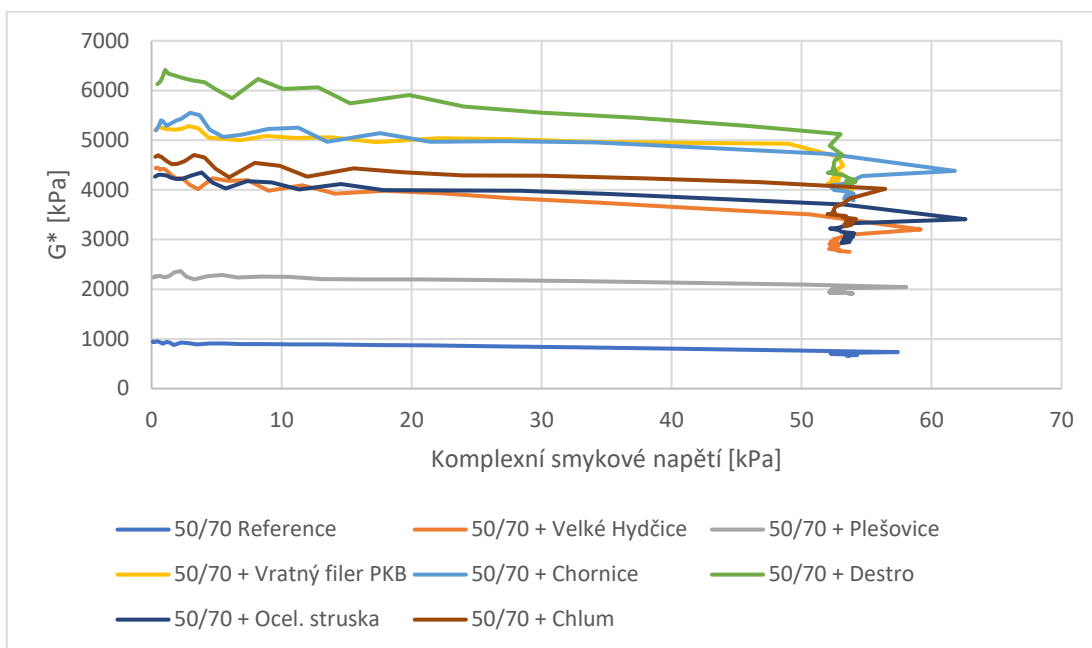


Graf 34: AST; Cole-Cole diagram pro teplotu 40 °C

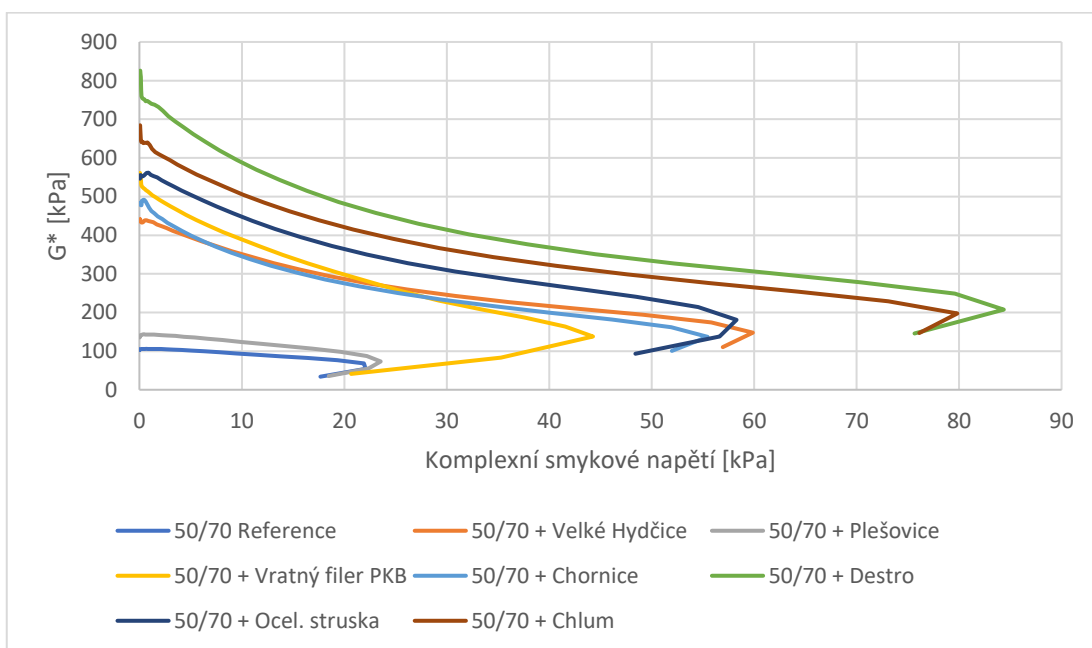


Graf 35: AST; Cole-Cole diagram pro teplotu 60 °C

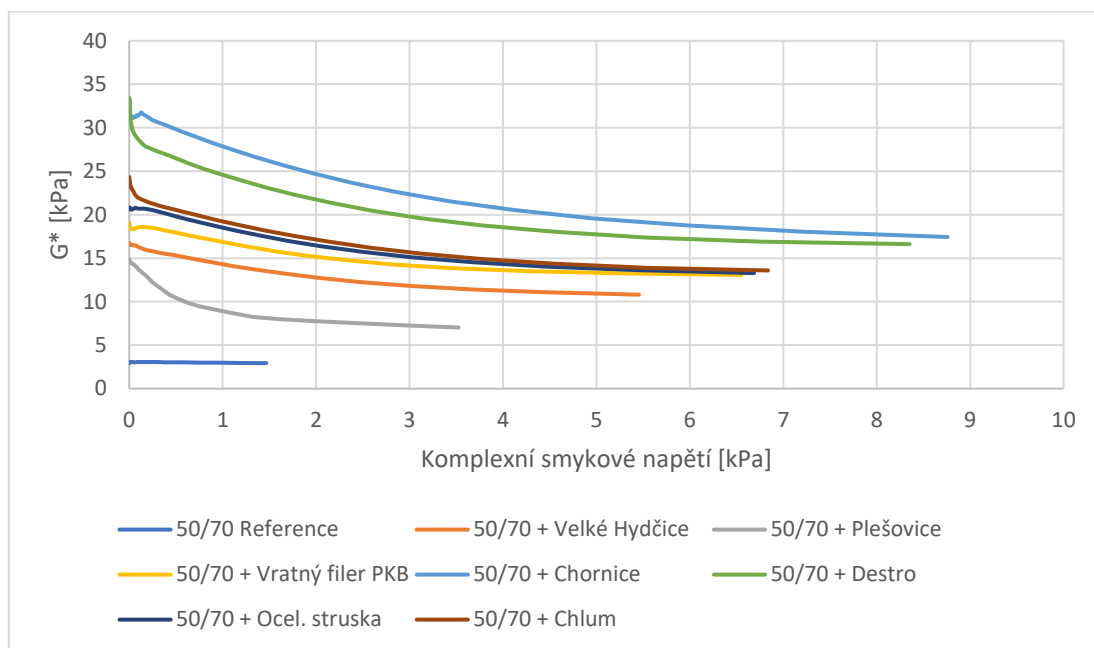
Grafy 36 až 38 vyobrazují závislosti komplexního modulu a smykového napětí.



Graf 36: AST; Závislost G^* a komplexního smykového napětí pro teplotu 25 °C

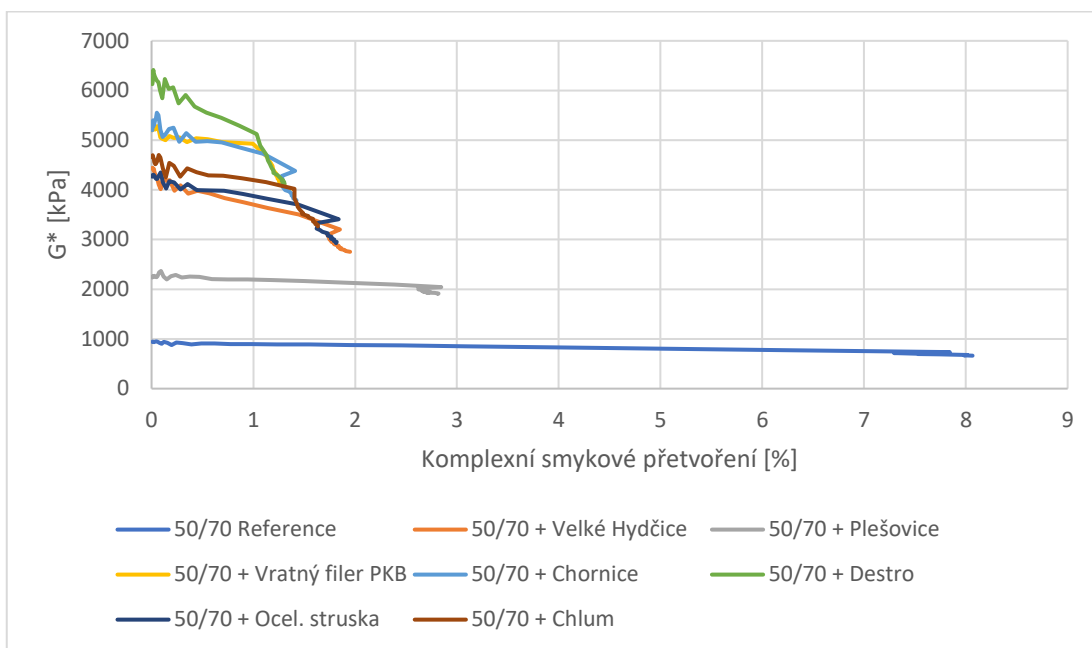


Graf 37: AST; Závislost G^* a komplexního smykového napětí pro teplotu 40 °C

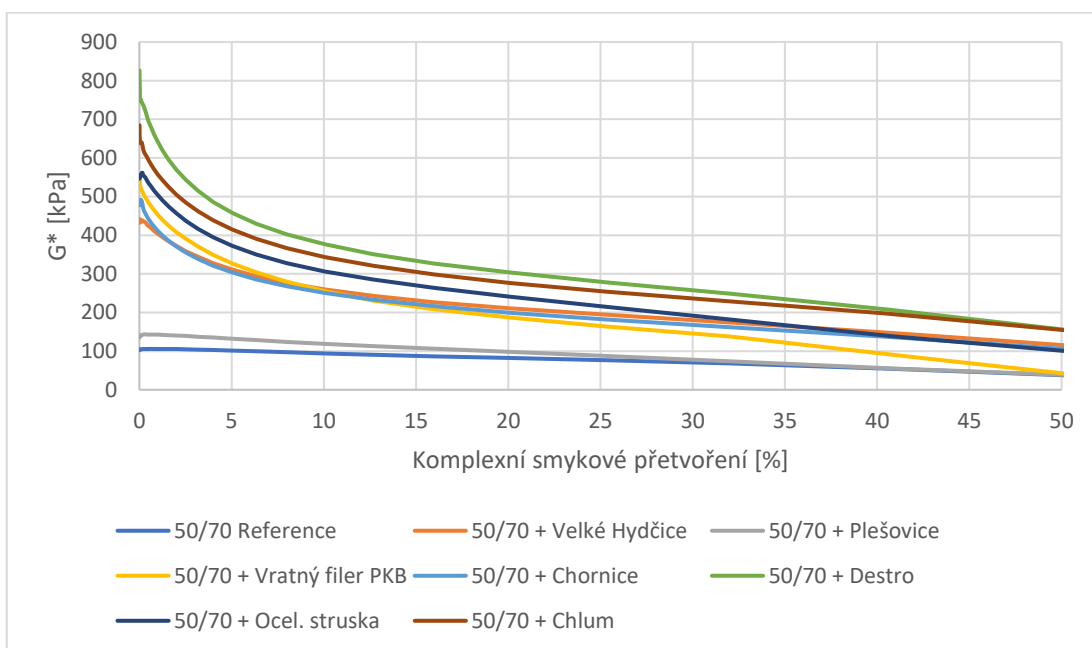


Graf 38: AST; Závislost G^* a komplexního smykového napětí pro teplotu 60 °C

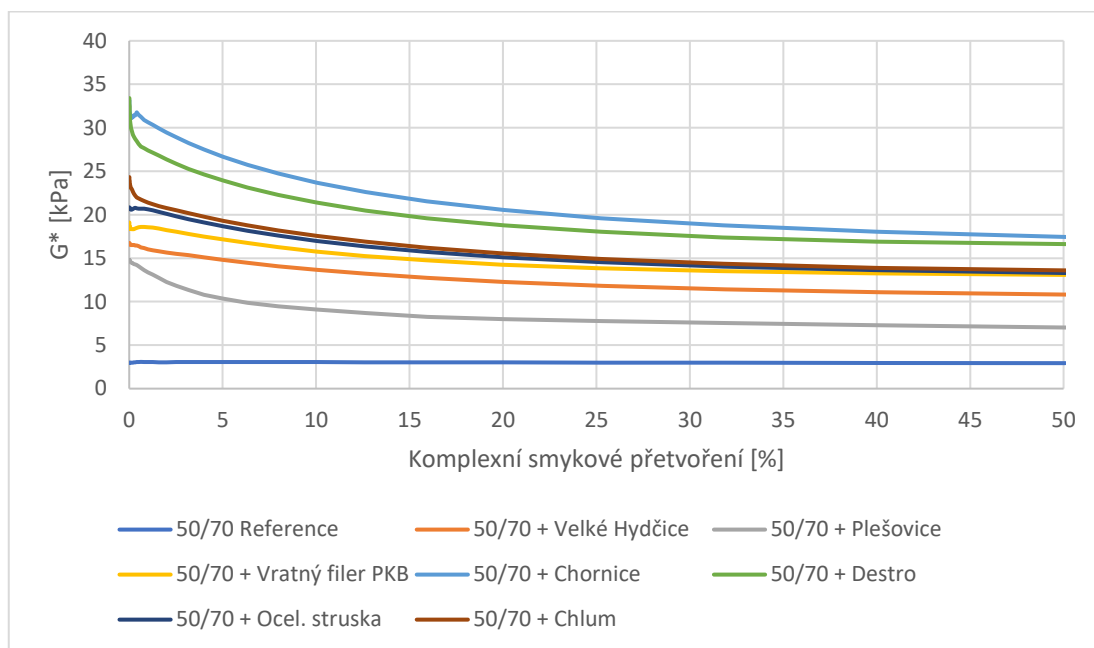
Grafy 39 až 41 vyobrazují závislosti komplexního modulu a smykového přetvoření. Citlivost komplexního smykového modulu na vnesené přetvoření ilustruje míru lokace materiálu v lineárně viskoelastické oblasti. Materiál splňující podmínky lineární viskoelastivity a tím i stabilní vysokou odolnost vůči přetvoření vykazuje v grafech konstantní průběh. Prudké nelineární změny značí opuštění této oblasti a mohou znamenat degradaci nebo dokonce porušení vzorku (graf 39) nebo souvisí s prvotním dotvarováním při vnesení přetvoření a následným relativním ustálením (grafy 40 a 41). Průběh těchto charakteristik u grafu 39 při zkušební teplotě 25 °C však byl bezesporu ovlivněn použitím geometrie destička-destička o průměru 25 mm (PP25), které nedokázaly vzorek přetvořit na zadaných 50 % a pro teplotu 25 °C je třeba pracovat s menší geometrií PP8.



Graf 39: AST; Závislost G^* a komplexního smykového přetvoření pro teplotu 25 °C



Graf 40: AST; Závislost G^* a komplexního smykového přetvoření pro teplotu 40 °C



Graf 41: AST; Závislost G^* a komplexního smykového přetvoření pro teplotu 60 °C

3.5 Vyhodnocení zkoušek

V rámci empirických a funkčních zkoušek byl zkoumán vliv různých druhů filerů na výsledné vlastnosti asfaltového tmelu z hlediska ztužujícího efektu, viskoelasticity a dalších charakteristik.

Empirické zkoušky (stanovení bodu měknutí a silové duktility) hledaly vztah ztužení a míry elasticity. U vzorků tmelů došlo k nárůstu bodu měknutí v různé míře oproti referenčnímu pojivu. U duktility lze pozorovat nižší hodnoty dosaženého protažení, ale vyšší schopnosti klást vůči tomuto protažení odpor. Z celkového souboru výsledků vybočuje tmel s filerem z lokality Velké Hydčice obsahující vápenec, který sice dosáhl nejnižšího bodu měknutí, ale při zkoušce duktility v průměru téměř odolal cílenému protažení při pětinasobku potřebné deformační energie oproti čistému pojivu. Nabízí se porovnání s tmelem s ocelářskou struskou, která vykázala jen nepatrně vyšší bod měknutí, ale protažení jen zhruba poloviční. Ostatní mastixy, jejichž bod měknutí vyšel kolem hodnoty 70 °C odolávají obecně nižšímu protažení a dosahují čtyř až pětinasobku deformační energie.

Komplexnější výsledky přinesly funkční zkoušky, na jejichž získané hodnoty je možné nahlížet z mnoha kritérií:



- Teplota
Se zvyšující se teplotou klesá tuhost a vzrůstá viskozita. Vzorky obecně vykazují nižší schopnost navracet se do původního stavu a rovněž se snižuje odolnost vůči trvalým deformacím v porovnání s nižšími teplotami.
- Frekvence zatížení
Při zvyšující se frekvenci zatížení (analogicky při plynulému provozu) stoupá tuhost. Při vysokých teplotách a nízké frekvenci se tmel stává viskózním a tuhost klesá. Při nízkých teplotách a vysoké frekvenci materiál reaguje elastičtěji a tuhost se zvyšuje. Odpor vůči tvorbě trvalých deformací je tedy vyšší při vysoké frekvenci zatížení a nízké teplotě.
- Smykové přetvoření
Při zvyšujícím se vneseném smykovém přetvoření a stejné frekvenci zatížení klesá tuhost a zvyšuje se podíl viskózní složky.
- Smykové napětí
Při skokovém zvýšení smykového napětí v rámci cyklického zatěžování a odtěžování (MSCR) dochází ke změně smykové poddajnosti. Trend je většinou vzestupný v případě nižší teploty a sestupný v případě vyšší teploty.

Odezva vlastností asfaltového tmelu z hlediska použitého druhu fileru je vzhledem k výše uvedenému velmi komplexní záležitost. Z výsledků vybočuje zejména vzorek s filerem Plešovice, který dosáhl nejmenšího ztužení a projevuje se u něj nejnižší schopnost odolávat trvalým deformacím. U ostatních vzorků došlo k výraznějšímu zlepšení těchto parametrů, ale výsledky se často různí dle hodnotícího kritéria a okrajových podmínek.

Z tohoto důvodu je porovnání výsledků jednotlivých tmelů relativně obtížné. V rámci této práce byla po konzultaci s vedoucím diplomové práce provedena zjednodušená multikriteriální analýza, která kombinuje objektivní (reálné hodnoty vzešlé z jednotlivých zkoušek a měření) a subjektivní (přiřazení důležitosti jednotlivých výsledků) pohled. Tato analýza spočívá ve stanovení hodnotících charakteristik, kterými byly v případě této práce zvoleny bod měknutí, kohezní celková (deformační) energie, nevratná smyková poddajnost J_{nr} , elastické zotavení %R pro zkušební teplotu 60 °C a napětí 3,2 kPa, komplexní smykový modul G^* , fázový úhel δ a poměr $G^*/\sin\delta$ pro zkušební teplotu 60 °C a frekvenci oscilačních zkoušek



1,8 Hz). Tyto charakteristiky byly následně napříč vzorky indexovány hodnotami 1 až 7, kde index 1 znamená nejlepší výsledek a index 7 nejhorší výsledek dané charakteristiky. Nakonec byly těmto charakteristikám přiřazeny váhy, znázorňující subjektivní důležitost daného parametru. Za pomoci těchto vah byl stanoven vážený průměr hodnotících indexů pro všechny vzorky asfaltových tmelů. Tabulka 6 znázorňuje přehled přiřazených vah pro jednotlivé charakteristiky a tabulka 7 shrnuje hodnotící indexy pro jednotlivé vzorky asfaltových tmelů včetně výsledného indexu (vážený průměr).

Charakteristika	Váha
Bod měknutí	0,20
Kohezní celková/deformační energie	0,15
Nevratná smyková poddajnost J_{nr} (T=60 °C a $\tau=3,2$ kPa)	0,15
Elastické zotavení %R (T=60 °C a $\tau=3,2$ kPa)	0,15
Komplexní smykový modul G^* (T=60 °C a f=1,8 Hz)	0,10
Fázový úhel δ (T=60 °C a f=1,8 Hz)	0,05
Poměr $G^*/\sin\delta$ (T=60 °C a f=1,8 Hz)	0,20
KONTROLNÍ SUMA	1,00

Tabulka 6: Přiřazení vah pro jednotlivé charakteristiky

Vzorek	50/70 + Destro	50/70 + Velké Hydčice	50/70 + Chlum	50/70 + Chornice	50/70 + Plešovice	50/70 + Ocel. struska	50/70 + Vratný filer PKB
Bod měknutí	3	7	2	1	5	6	4
Kohezní celk./def. energie	7	2	4	1	5	6	3
J_{nr} (T=60 °C, $\tau=3,2$ kPa)	1	7	2	3	6	5	4
%R (T=60 °C, $\tau=3,2$ kPa)	1	5	3	2	7	4	6
G^* (T=60 °C, f=1,8 Hz)	1	5	4	2	7	6	3
δ (T=60 °C, f=1,8 Hz)	4	6	5	1	2	3	7
$G^*/\sin\delta$ (T=60 °C, f=1,8 Hz)	1	5	4	2	7	6	3
Výsledný index	2,45	5,30	3,20	1,75	5,90	5,40	4,00

Tabulka 7: Hodnotící indexy pro jednotlivé vzorky

Z výsledných indexů je patrné, že napříč vybranými charakteristikami dosahuje nejlepších parametrů vzorek s filerem z lokality Chornice, následuje vzorek 50/70 +



Destro. Dle očekávání nejhůře dopadl vzorek s filerem z Plešovic, který i v zde neuvažovaných kritériích signifikantně prokázal nejhorší vlastnosti.

Je však potřeba zopakovat, že přiřazení zde uvedených vah pro jednotlivé charakteristiky je subjektivní a výpočet výsledného indexu se při změně těchto vah může výrazněji měnit. Konkrétní hodnoty vah byly konzultovány s vedoucím této diplomové práce.



4 ZÁVĚR

Z diplomové práce vyplývá, že variabilita vlastností vstupních filerů má významný vliv na parametry asfaltového tmelu, zejména z hlediska dosaženého ztužení a viskoelastických vlastností, což v praxi ovlivňuje například míru odolnosti tmelu vůči trvalým deformacím.

Vliv použitých druhů filerů na vlastnosti asfaltového tmelu je velmi komplexní z hlediska množství okrajových podmínek a hodnotících kritérií. V rámci výsledků experimentů se prokázala různá míra ztužení a viskoelastický rozsah asfaltového tmelu. Nejhorších výsledků dosáhl tmel s filerem z lokality Plešovice, který napříč zkouškami vykázal nejnižší odolnost vůči trvalým deformacím. U ostatních vzorků záleží na interpretaci jednotlivých zkoušek, ale veskrze prokázaly kvalitativně výrazně lepší výsledky.

V rámci provedené multikriteriální analýzy bylo zjištěno, že nejlepších výsledků napříč sledovanými výsledky zkoušek dosáhl vzorek asfaltového tmelu s filerem z lokality Chornice, následovaný tmelem s označením 50/70 + Destro. V analýze se potvrdilo, že nejméně vhodný vzorek představuje tmel obsahující plešovický filer.

V budoucím výzkumu doporučuji na základě své práce zaměřit se na podrobný rozbor filerů před prováděním jednotlivých zkoušek. Pro lepší interpretaci vlivu interakce mezi plnivem a konkrétním asfaltovým pojivem je zejména třeba znát podrobné mineralogické složení fileru, měrnou hmotnost, měrný povrch, zrnitost, tvar a ostrost zrn, zásaditost a další charakteristiky.



5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Zajíček, Jan, a kol. *Technologie stavby vozovek*. Praha : Informační centrum ČKAIT, 2015. ISBN 978-80-87438-59-6.
2. Monitoring s.r.o. Laboratoř Monitoring. *Z čeho je asfalt a jak se vyrábí?* [Online] [Citace: 7. Listopad 2023.] <https://www.moni.cz/aktuality/z-ceho-je-asfalt>.
3. Benešová, Lucie. Disertační práce. *Analýza vybraných reologických charakteristik asfaltových pojiv*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2019.
4. Read, John a Whiteoak, David. *The Shell Bitumen Handbook*. London : Thomas Telford Publishing, 2003. ISBN 0 7277 3220 X.
5. ČSN EN 13043 [72 1501]. *Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004.
6. ČSN EN 13179-2 [72 1197]. *Zkoušení fileru pro asfaltové směsi - Část 2: Asfaltové číslo*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
7. Valentin, Jan. *Užitné vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí - charakteristiky, nové zkušební metody, vývojové trendy*. Praha : INPRESS a.s., 2003.
8. Pěničik, Michal. Diplomová práce. *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2015.
9. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. *Reologie*. [Online] 2014. [Citace: 18. 11 2023.] https://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf.
10. Gatenby, Art. CSC Scientific Company, Inc. *What is the Difference Between Dynamic and Kinematic Viscosity?* [Online] 19. 10. 2020. [Citace: 27. 12. 2023.] <https://www.cscscientific.com/csc-scientific-blog/whats-the-difference-between-dynamic-and-kinematic-viscosity>.
11. Anton Paar. *Basics of rheology*. [Online] [Citace: 18. 11 2023.] <https://wiki.anton-paar.com/en/basics-of-rheology/>.



12. ČSN EN 16659 [65 7096]. *Asfalty a asfaltová pojiva - Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test)*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
13. Liu, Hanqi, Zeiada, Waleed, Al-Khateeb, Ghazi G., Shanableh, Abdallah, Samarai, Mufid. *Use of the multiple stress creep recovery (MSCR) test to characterize the rutting potential of asphalt binders: A literature review*. 2021. ISSN 0950-0618.
14. Benešová, Lucie a Valentin, Jan. *Silnice + mosty. Vliv vybraných vstupních parametrů na naměřené hodnoty zkoušky MSCR*. [Online] [Citace: 7. 12 2023.] <https://www.silnice-mosty.cz/464-vliv-vybranych-vstupnich-parametru-na-namerene-hodnoty-zkousky-mscr/>.
15. Stoklásek, Svatopluk, Dašek, Ondřej, Hegr, Zdeněk, Kašpárek, Miloš, Varaus, Michal, Hýzl, Petr. *Metodika pro stanovení míry interakce minerálního fileru s asfaltovým pojivem a jeho ztužujících vlastností*. Brno : Ministerstvo dopravy ČR, 2019.
16. Valentová, Tereza. *Disertační práce. Analýza trvanlivosti stability asfaltových směsí*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2021.
17. Stoklásek, Svatopluk, Dašek, Ondřej, Varaus, Michal, Hýzl, Petr. *Reologické vlastnosti mastixu ve vztahu k aktivitě filerové komponenty - nový klasifikační systém*. Brno : autor neznámý.
18. Cheng, Yongchun, Tao, Jinglin, Jiao, Yubo, Tan, Guojin, Guo, Qinglin, Wang, Shurong, Ni, Ping. *Construction and Building Materials. Influence of the properties of filler on high and medium temperature performances of asphalt mastic*. 2016. ISSN 0950-0618.
19. Zhang, Jiupeng, Liu, Guoqiang, Hu, Zhuang, Zhu, Cunzhen, Pei, Jianzhong, Jin, Long. *Construction and Building Materials. Effects of temperature and loading frequency on asphalt and filler interaction ability*. 2016. ISSN 0950-0618.
20. Cosme, Renée Lauret, Teixeira, Jamilla Emi Sudo Lutif a Calmon, João Luiz. *Construction and Building Materials. Use of frequency sweep and MSCR tests to characterize asphalt mastics containing ornamental stone residues and LD steel slag*. 2016. ISSN 0950-0618.



21. Wu, Wangjie, Jiang, Wei, Yuan, Dongdong, Lu, Rong, Shan, Jinhuan, Xiao, Jingjing, Ogbon, Aboudou Wassiou. *Construction and Building Materials. A review of asphalt-filler interaction: Mechanisms, evaluation methods, and influencing factors.* 2021. ISSN 0950-0618.
22. ČSN 65 7204. *Asfalty a asfaltová pojiva - Silniční asfalty.* Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
23. Plitz, Jiří. Paramo a.s. *Protokol o zkoušce č. 70401.* [Online] 2. 4. 2007. [Citace: 29. 12. 2023.] https://eshop.paramo.cz/data/VyrobkovaDokumentace/zkouska_asf50.PDF.
24. Destro Kamenivo. *Umělé hutné kamenivo UHK.* [Online] [Citace: 29. 11 2023.] <https://www.destrokamenivo.cz/produkty/umele-hutne-kamenivo-uhk/>.
25. Lejskeová, Lucie. Diplomová práce. *Přilnavost a odolnost proti účinkům vody u asfaltových směsí - vliv filerů a přilnavostních přísad.* Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2020.
26. Dekorační kameny, vápence a vybrané písky ČR. *Velké Hydčice.* [Online] [Citace: 20. 11 2023.] <http://kamenolomy.fzp.ujep.cz/index.php?page=record&id=231&tab=lom>.
27. Eurovia. *Lom Chlum.* [Online] [Citace: 20. 11 2023.] <http://www.euroviakamenolomy.cz/vyroby/dokumentace/Detail/DET20225.htm>.
28. BETONserver. *EUROVIA Kamenolomy, a. s. - kamenolom Chornice.* [Online] [Citace: 20. 11 2023.] <https://www.betonserver.cz/eurovia-chornice>.
29. Kámen a písek s.r.o. *Kamenolom Plešovice.* [Online] [Citace: 20. 11 2023.] <https://www.kamen-ck.cz/lomy/plesovice>.
30. voestalpine AG, Corporate Communications. Voestalpine. *LD-Schlacke, Daten und Fakten.* [Online] Leden 2014. [Citace: 15. 12 2023.] <https://www.voestalpine.com/group/static/sites/group/.downloads/de/konzern/2013-weissbuch-ld-schlacke.pdf>.
31. PKB. *Obalovna asfaltových směsí Kladno.* [Online] [Citace: 29. 11 2023.] <http://www.pkb.cz/obalovna>.



32. Kámen Zbraslav. *Lom Zbraslav*. [Online] [Citace: 29. 12. 2023.] <https://kamenzbraslav.cz/provozovny/kamenolomy/kamenolom-zbraslav/#>.
33. HASIT. Kamenivo; lomové produkty. *Bezpečnostní list*. [Online] 23. 4. 2023. [Citace: 15. 12 2023.] https://media.fixit-holding.com/CIP/mediadelivery/rendition/100_270822/BL-Kamenivo-Lomov%C3%A9-produkty-cs.
34. ČSN EN 17197-1 [72 1197]. *Zkoušení fileru pro asfaltové směsi - Část 1: Zkouška delta kroužek a kulička*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
35. ČSN EN 1427 [65 7060]. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
36. ČSN EN 13589 [65 7107]. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení tažných vlastností modifikovaných asfaltů metodou silové duktility*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
37. ČSN EN 14770 [65 7091]. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
38. Valentin, Jan, Suda, Jan a Žák, Josef. *Report on Durability od cold-recycled mixes: Complex dynamic modulus and master curves of cold recycling mixes*. [Online] 2014. [Citace: 16. 12 2023.] http://silnice.fsv.cvut.cz/corepasol-data/D2.1_cplx_mod.



6 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Srovnání výsledků bodu měknutí	37
Graf 2: Průběh zkoušky silové duktility, referenční pojivo 50/70	40
Graf 3: Průběh zkoušky silové duktility, 50/70 + Destro	40
Graf 4: Průběh zkoušky silové duktility, 50/70 + Velké Hydčice.....	41
Graf 5: Průběh zkoušky silové duktility, 50/70 + Chlum	41
Graf 6: Průběh zkoušky silové duktility, 50/70 + Chornice	41
Graf 7: Průběh zkoušky silové duktility, 50/70 + Plešovice.....	42
Graf 8: Průběh zkoušky silové duktility, 50/70 + Ocel. struska	42
Graf 9: Průběh zkoušky silové duktility, 50/70 + Vratný filer PKB.....	42
Graf 10: MSCR; smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 50 °C	43
Graf 11: MSCR; smyková poddajnost J_{nr} při teplotě 60 °C.....	43
Graf 12: MSCR; porovnání smykové poddajnosti $J_{nr}=0,1$ kPa při teplotách 50 °C a 60 °C	44
Graf 13: MSCR; porovnání smykové poddajnosti $J_{nr}=3,2$ kPa při teplotách 50 °C a 60 °C	44
Graf 14: MSCR; rozdíl smykové poddajnosti $J_{nr,diff}$ mezi 3,2 kPa a 0,1 kPa při teplotách 50 °C a 60 °C	45
Graf 15: MSCR; elastické zotavení %R při teplotě 50 °C.....	46
Graf 16: MSCR; elastické zotavení %R při teplotě 60 °C.....	46
Graf 17: MSCR; porovnání elastického zotavení %R pro teploty 50 °C a 60 °C při $J_{nr}=0,1$ kPa	47
Graf 18: MSCR;porovnání elastického zotavení %R pro teploty 50 °C a 60 °C při $J_{nr}=3,2$ kPa	47
Graf 19: MSCR; rozdíl elastického zotavení % R_{diff} mezi 3,2 kPa a 0,1 kPa při teplotách 50 °C a 60 °C	48
Graf 20: FST; komplexní smykový modul G^* při 1,8 Hz pro teploty 20, 25 a 30 °C	49
Graf 21: FST; komplexní smykový modul G^* při 1,8 Hz pro teploty 40, 50 a 60 °C	50
Graf 22: FST; fázový úhel δ při 1,8 Hz pro teploty 20, 25 a 30 °C	50
Graf 23: FST; fázový úhel δ při 1,8 Hz pro teploty 40, 50 a 60 °C	51
Graf 24: FST; poměr $G^*/\sin \delta$ při 1,8 Hz pro teploty 20, 25 a 30 °C.....	51
Graf 25: FST; poměr $G^*/\sin \delta$ při 1,8 Hz pro teploty 40, 50 a 60 °C.....	52



Graf 26: FST; Blackův diagram pro teplotu zkoušky 60 °C.....	53
Graf 27: FST; Cole-Cole diagram pro teplotu zkoušky 60 °C.....	53
Graf 28: FST; Řídící křivky závislosti komplexního smykového modulu a frekvence zatížení	54
Graf 29: FST; Řídící křivky závislosti fázového úhlu a frekvence zatížení	55
Graf 30: AST, Blackův diagram pro teplotu 25 °C	56
Graf 31: AST; Blackův diagram pro teplotu 40 °C.....	56
Graf 32: AST; Blackův diagram pro teplotu 60 °C.....	57
Graf 33: AST; Cole-Cole diagram pro teplotu 25 °C	57
Graf 34: AST; Cole-Cole diagram pro teplotu 40 °C	58
Graf 35: AST; Cole-Cole diagram pro teplotu 60 °C	58
Graf 36: AST; Závislost G^* a komplexního smykového napětí pro teplotu 25 °C ...	59
Graf 37: AST; Závislost G^* a komplexního smykového napětí pro teplotu 40 °C ...	59
Graf 38: AST; Závislost G^* a komplexního smykového napětí pro teplotu 60 °C ...	60
Graf 39: AST; Závislost G^* a komplexního smykového přetvoření pro teplotu 25 °C	61
Graf 40: AST; Závislost G^* a komplexního smykového přetvoření pro teplotu 40 °C	61
Graf 41: AST; Závislost G^* a komplexního smykového přetvoření pro teplotu 60 °C	62



7 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Struktura typu "SOL" (4)	4
Obrázek 2: Struktura typu "GEL" (4)	4
Obrázek 3: Viskoelastické chování asfaltu (1).....	5
Obrázek 4: Smykové přetvoření	9
Obrázek 5: Oscilační pohyb destičky v DSR (7).....	10
Obrázek 6: Složky komplexního modulu (11).....	11
Obrázek 7: Časové zpoždění mezi vneseným smykovým napětím a vyvolaným smykovým přetvořením (7)	12
Obrázek 8: Schéma interakce filerové částice a asfaltového pojiva; upraveno z (15)16	
Obrázek 9: Závislost reologického parametru na objemové frakci fileru; 1: Počáteční ztužující nárůst, 2: Kritická koncentrace fileru, 3: Konečný ztužující nárůst, upraveno z (15).....	17
Obrázek 10: Lineární a nelineární viskoelastická oblast (19).....	19
Obrázek 11: Odlité vzorky v kroužku (vlevo), přístroj na měření bodu měknutí (vpravo).....	28
Obrázek 12: Odlitý vzorek ve formě (vlevo), duktilometr (vpravo)	30
Obrázek 13: Průběh jednoho cyklu dotvarování a zotavení (12).....	32
Obrázek 14: Typický průběh 10 zatěžovacích cyklů (12)	33
Obrázek 15: Odlité vzorky pro umístění do DSR (vlevo), vzorek v DSR (zde pro průměr kruhových destiček 8 mm; vpravo).....	33
Obrázek 16: Příklad sestrojené Master křivky pro komplexní modul (38)	35



8 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vlastnosti silničního asfaltu 50/70, převzato z (22) a (23)	23
Tabulka 2: Měrné hmotnosti filerů	25
Tabulka 3: Výsledky ze zkoušky stanovení bodu měknutí	37
Tabulka 4: Výsledky zkoušky silové duktility	39
Tabulka 5: Porovnání výsledků zkoušky silové duktility	40
Tabulka 6: Přiřazení vah pro jednotlivé charakteristiky	64
Tabulka 7: Hodnotící indexy pro jednotlivé vzorky	64



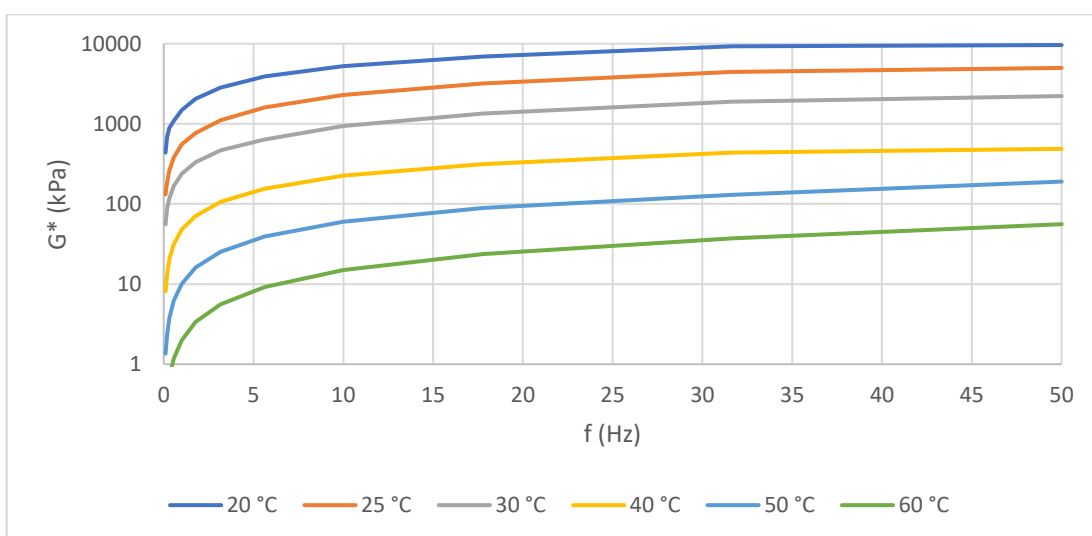
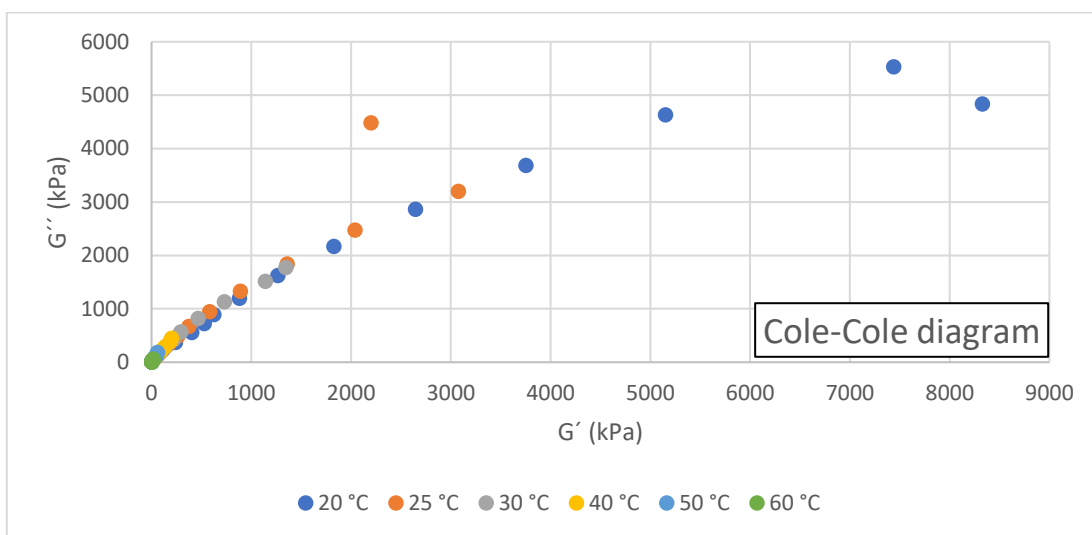
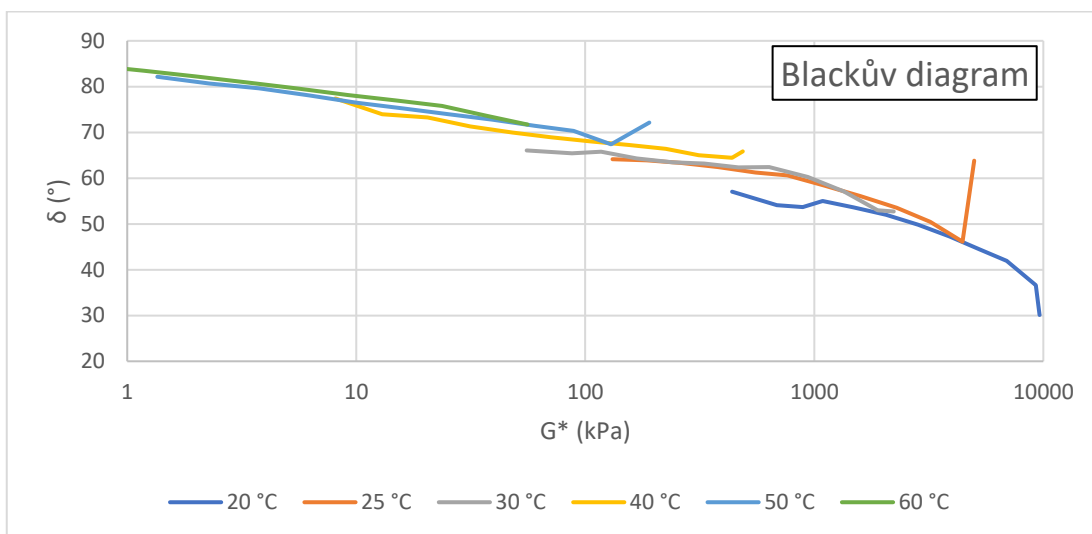
9 PŘÍLOHY

Přílohy obsahují grafické výsledky zkoušek FST a AST odděleně pro každý ze zkoumaných vzorků: Blackovy a Cole-Cole digramy a závislost komplexního smykového modulu na frekvenci zatížení (FST), případně smykovém přetvoření (AST).

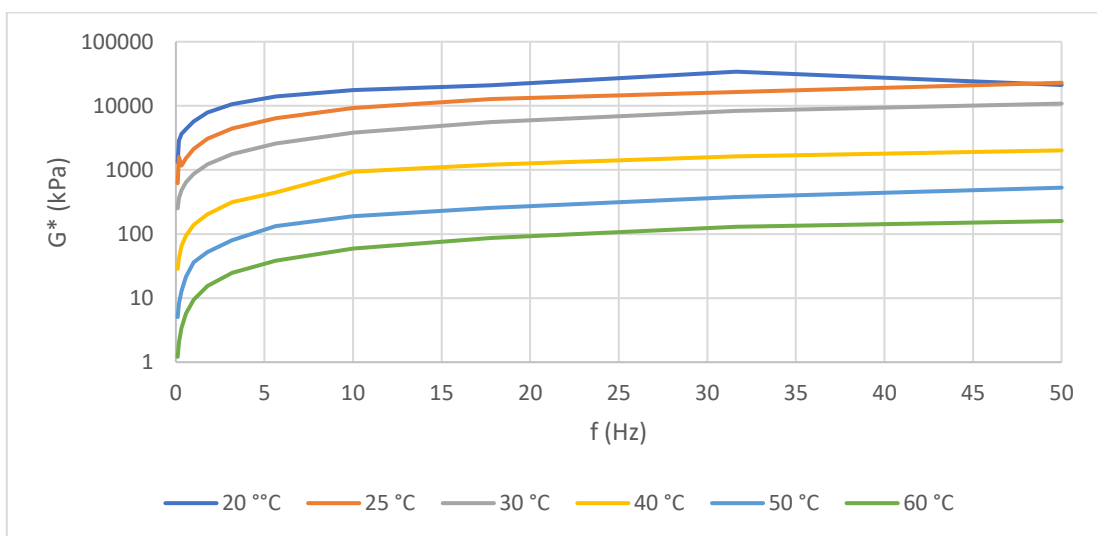
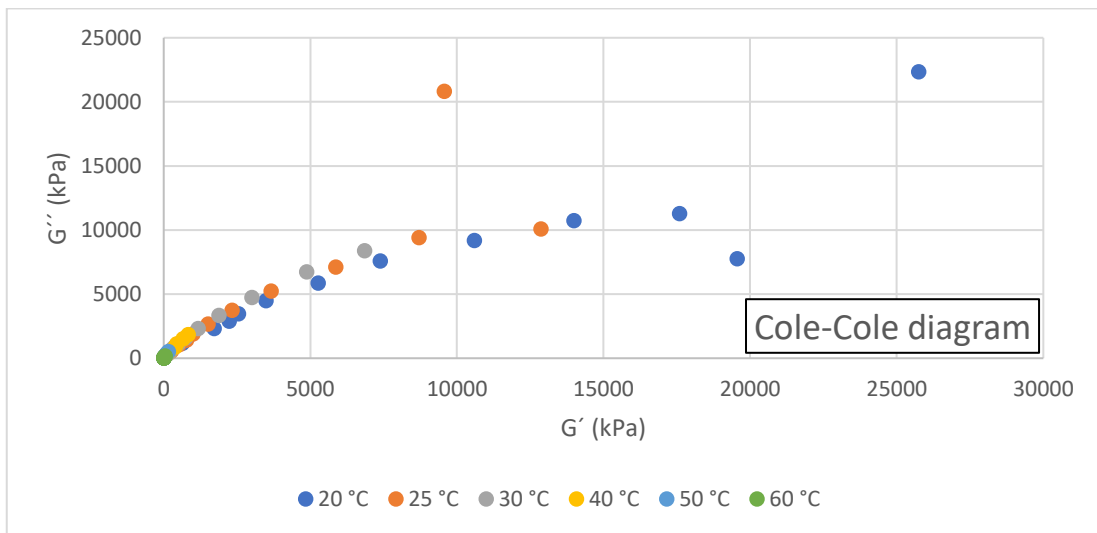
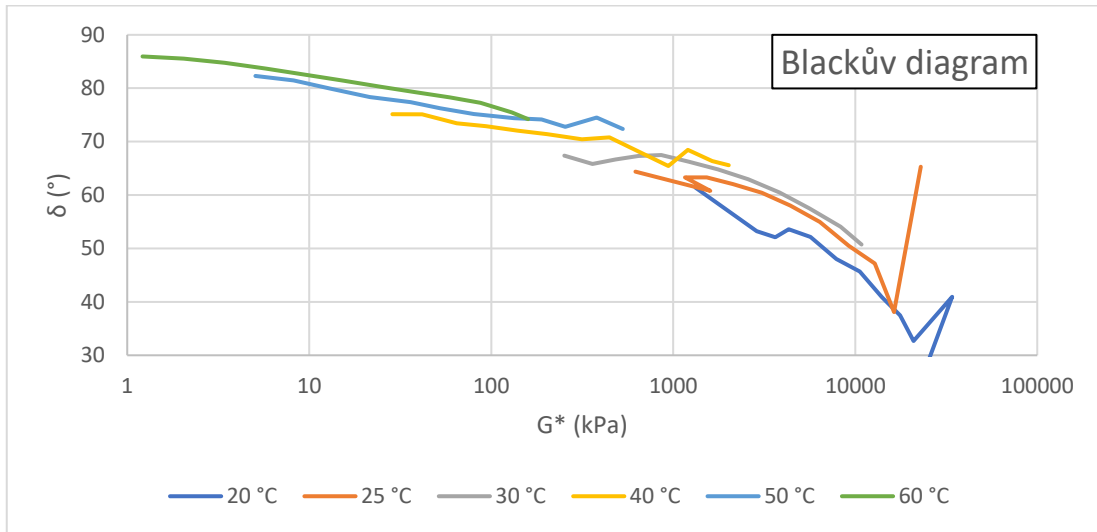
Je třeba zdůraznit, že nekonzistence trendu, projevující se zlomy v grafech, se udály zejména při vysokých frekvencích zatížení (FST), a jsou výraznější u nižších teplot. U zkoušky AST pak nebylo dosaženo zadaného smykového přetvoření 50 % u teploty 25 °C. Tyto odchylky mohou být způsobeny použitím geometrie PP25 i pro nízké teploty, pro dosažení konzistentnějších výsledků proto doporučuji užít pro nízké teploty geometrii PP8. Dalším vysvětlením může být skutečnost, že pojivo (tmel) opustil v průběhu zkoušky lineárně viskoelastickou oblast anebo došlo k porušení vzorku.

SEZNAM PŘÍLOH

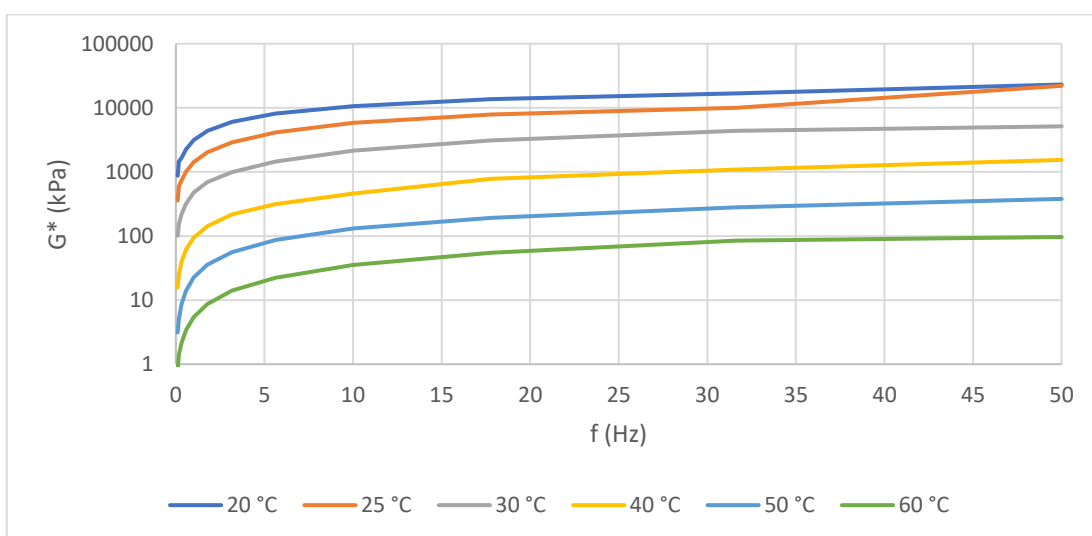
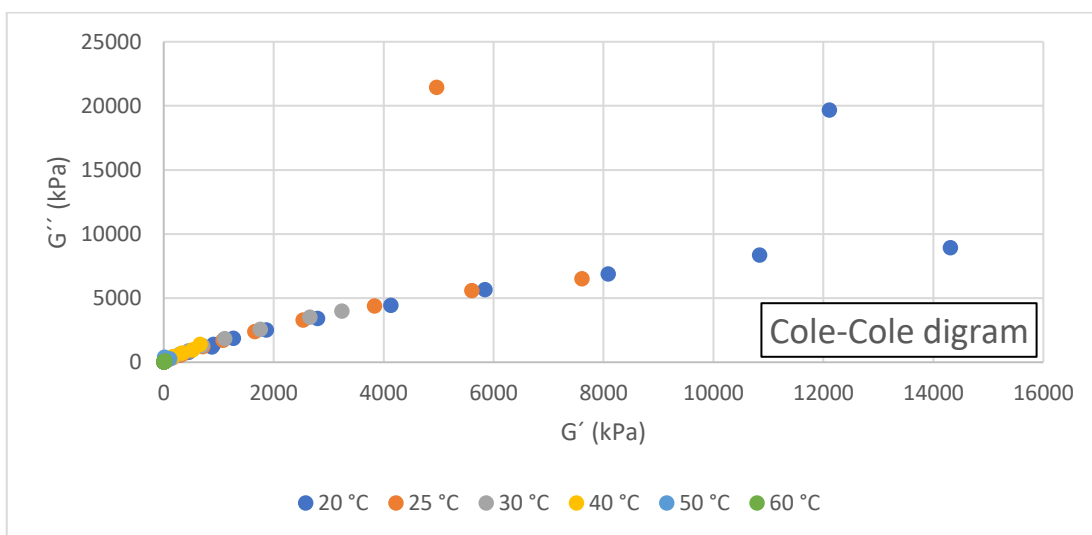
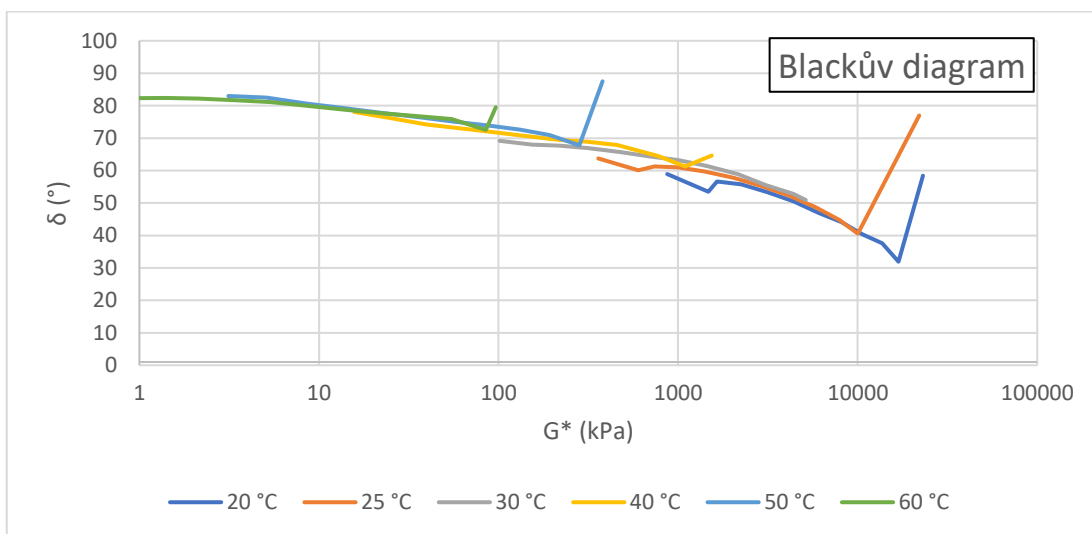
Příloha 1: FST, 50/70 Reference	76
Příloha 2: FST; 50/70 + Velké Hydčice	77
Příloha 3: FST; 50/70 + Plešovice	78
Příloha 4: FST; 50/70 + Vratný filer PKB	79
Příloha 5: FST; 50/70 + Chornice	80
Příloha 6: FST; 50/70 + Destro	81
Příloha 7: FST; 50/70 + Ocel. struska	82
Příloha 8: FST; 50/70 + Chlum	83
Příloha 9: AST; 50/70 Reference	84
Příloha 10: AST; 50/70 + Velké Hydčice	85
Příloha 11: AST; 50/70 + Plešovice	86
Příloha 12: AST; 50/70 + Vratný filer PKB	87
Příloha 13: AST; 50/70 + Chornice	88
Příloha 14: AST; 50/70 + Destro	89
Příloha 15: AST; 50/70 + Ocel. struska	90
Příloha 16: AST; 50/70 + Chlum	91



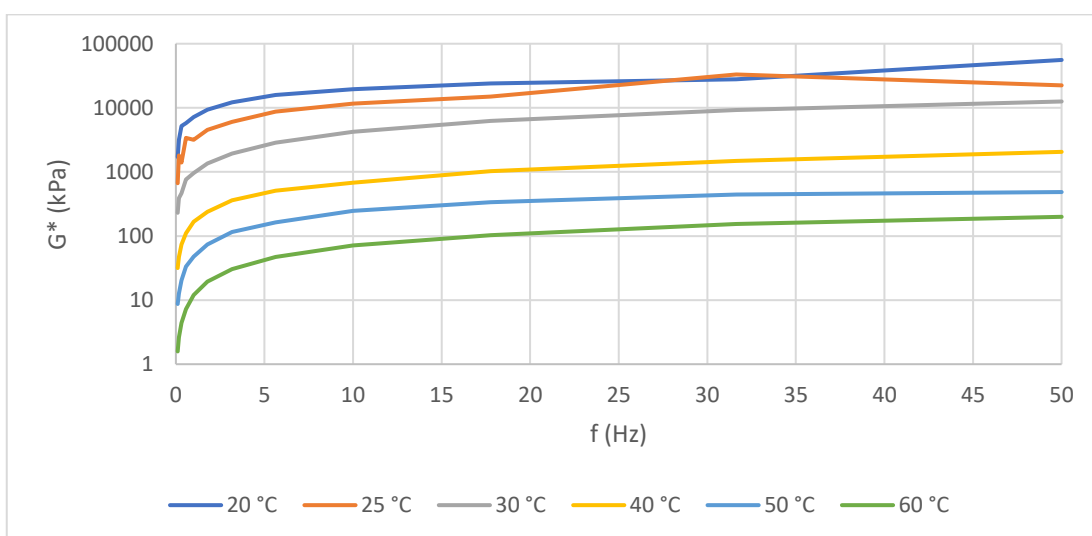
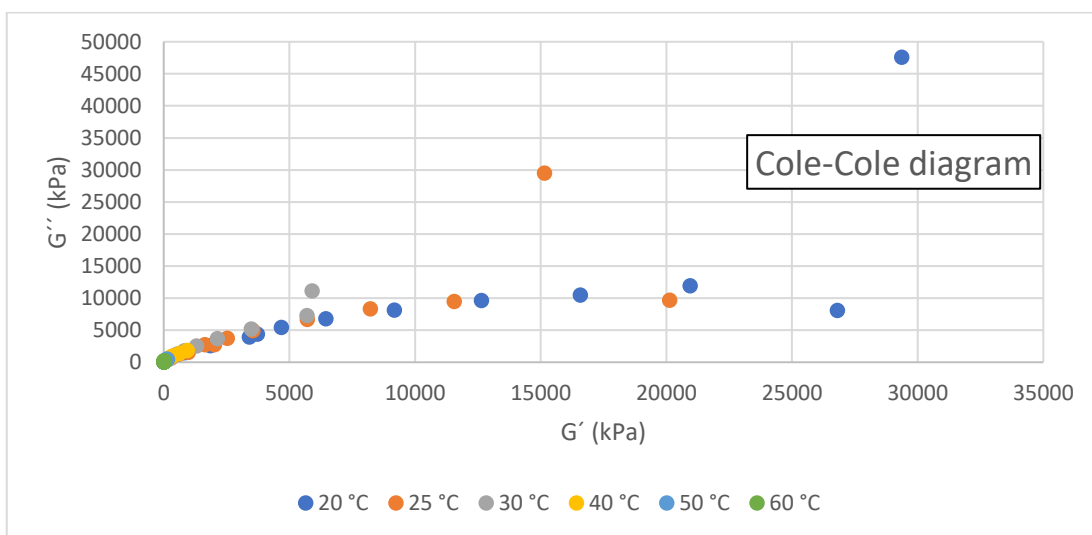
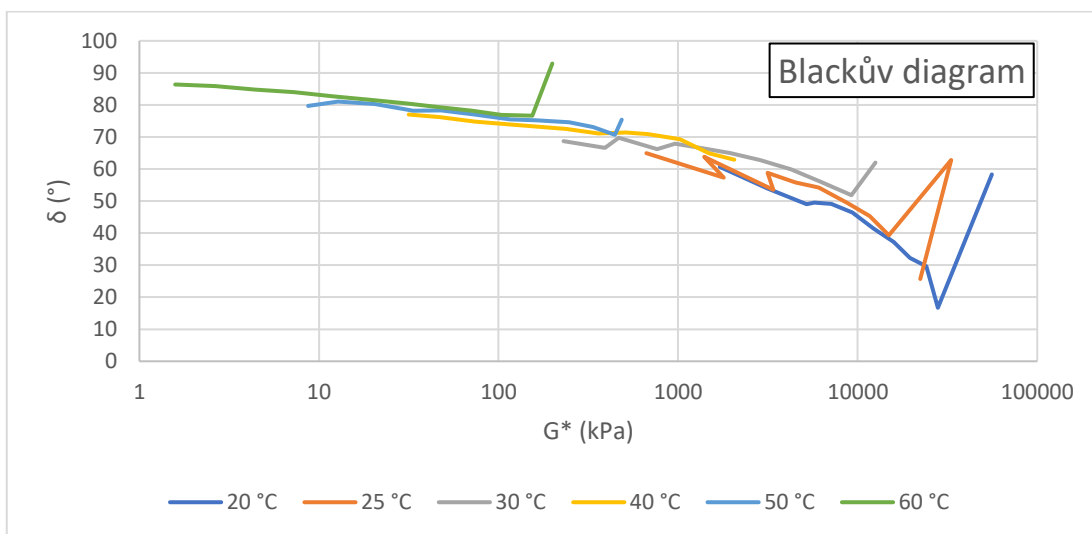
Příloha 1: FST, 50/70 Reference



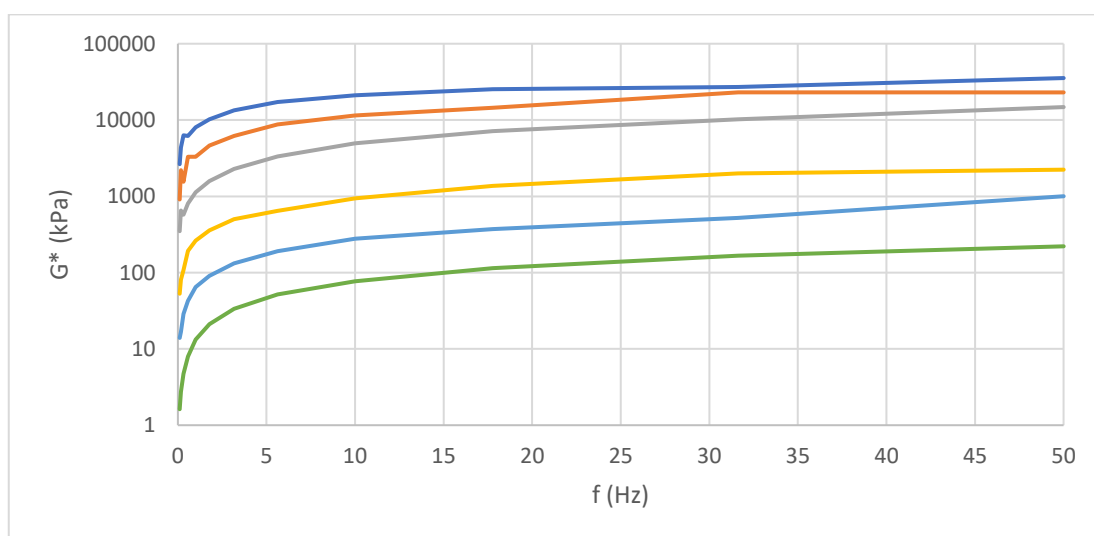
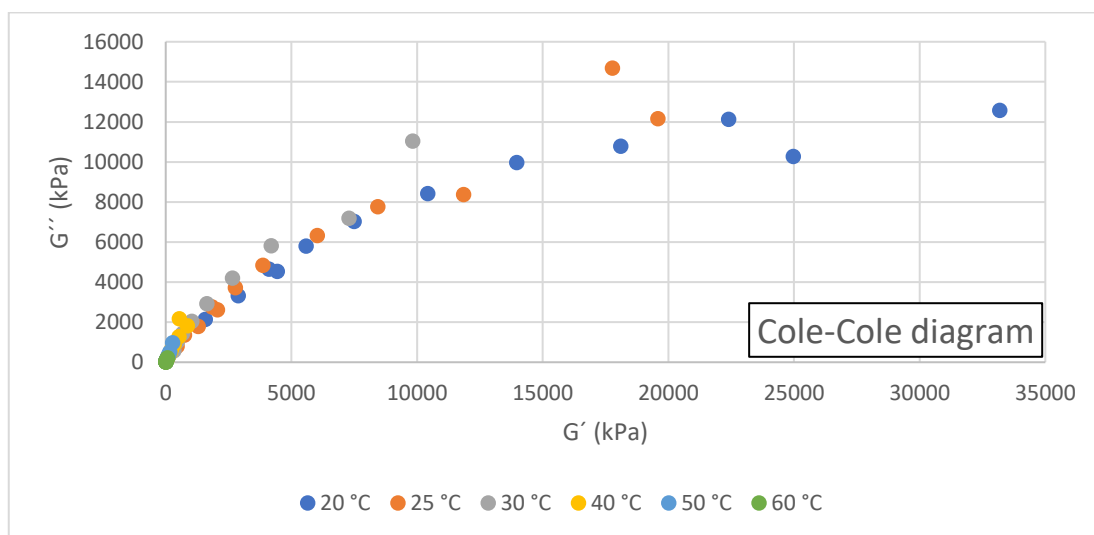
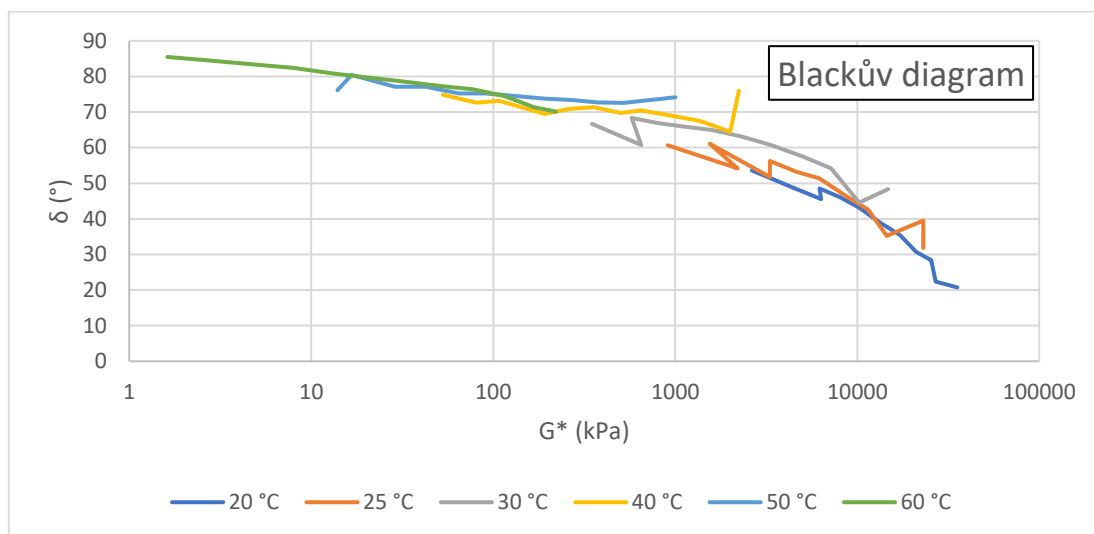
Příloha 2: FST; 50/70 + Velké Hydčice



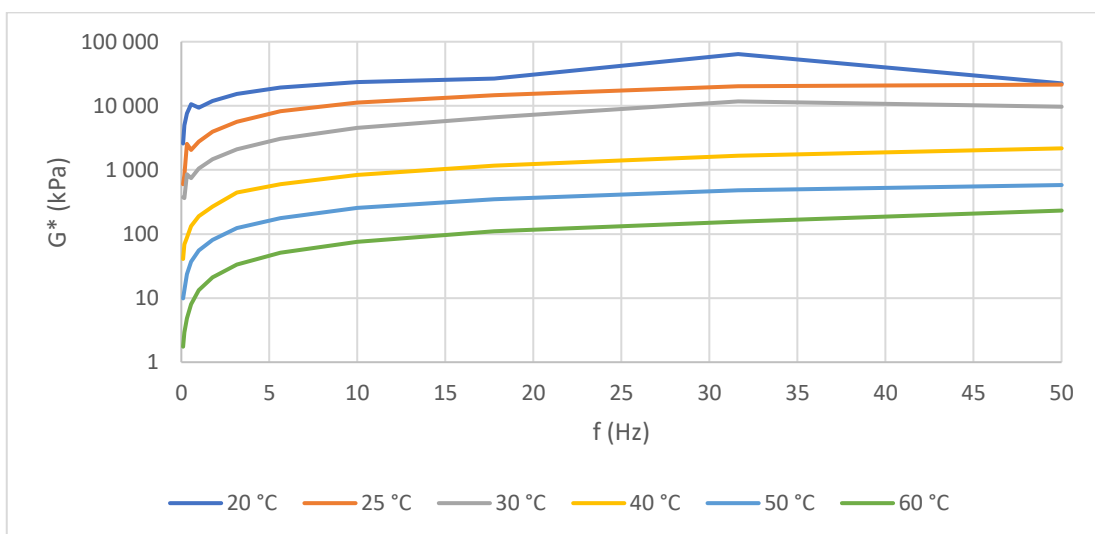
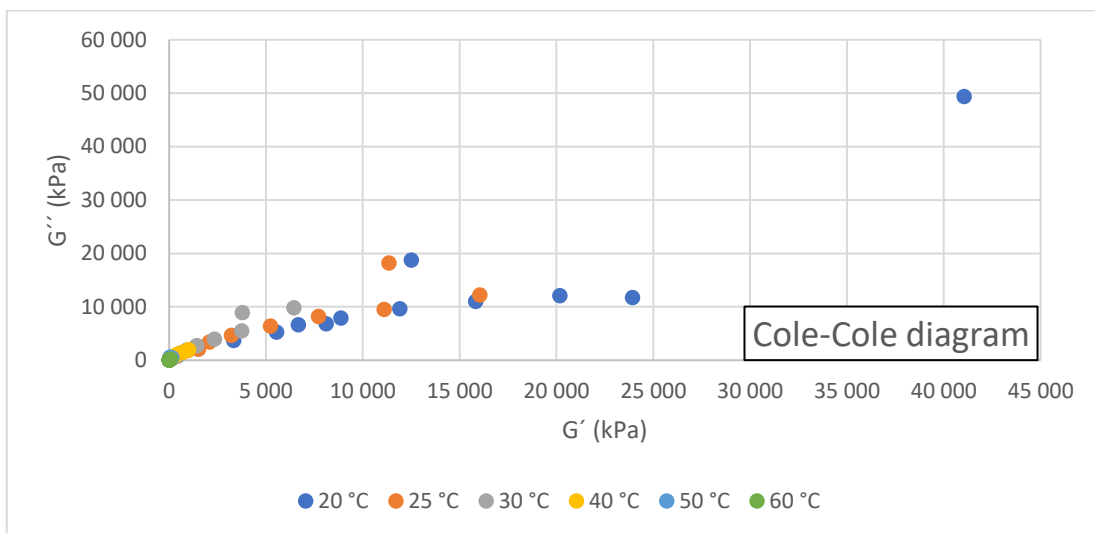
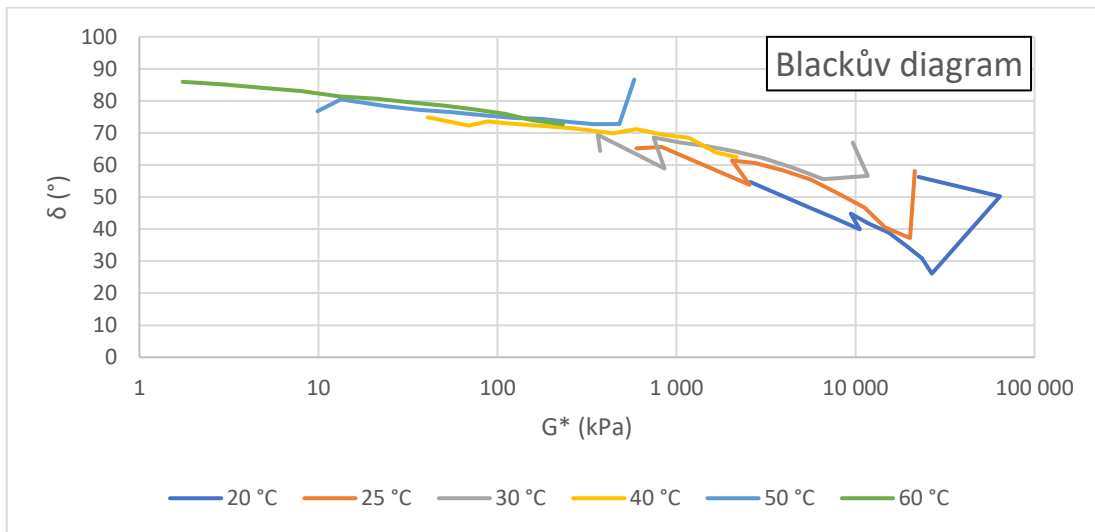
Příloha 3: FST; 50/70 + Plešovice



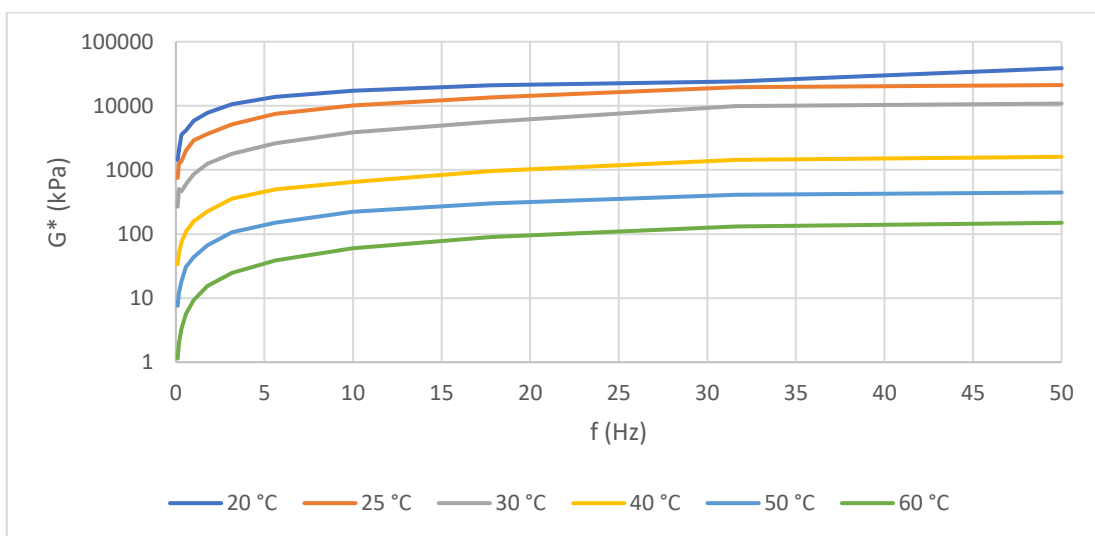
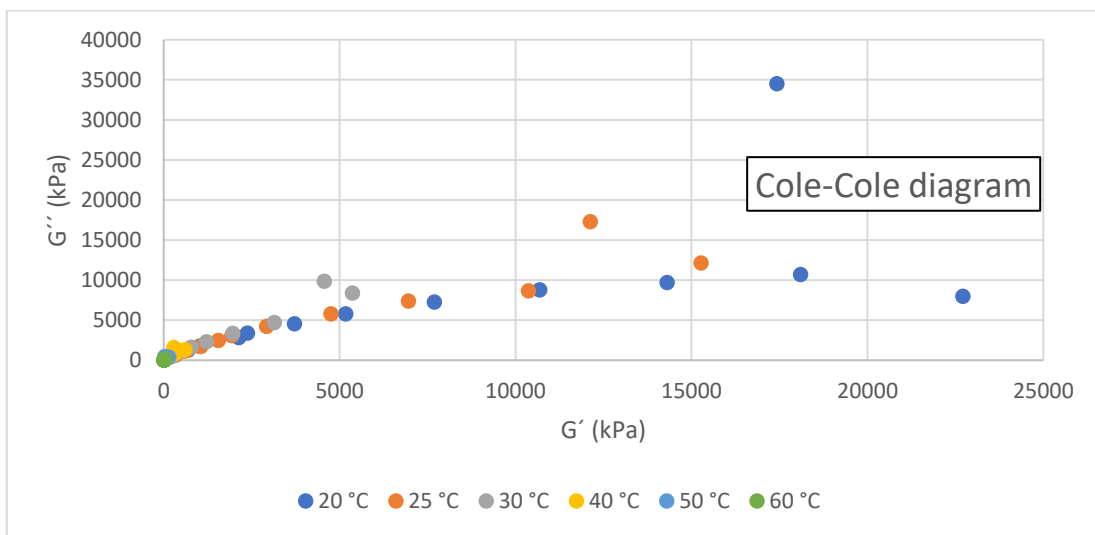
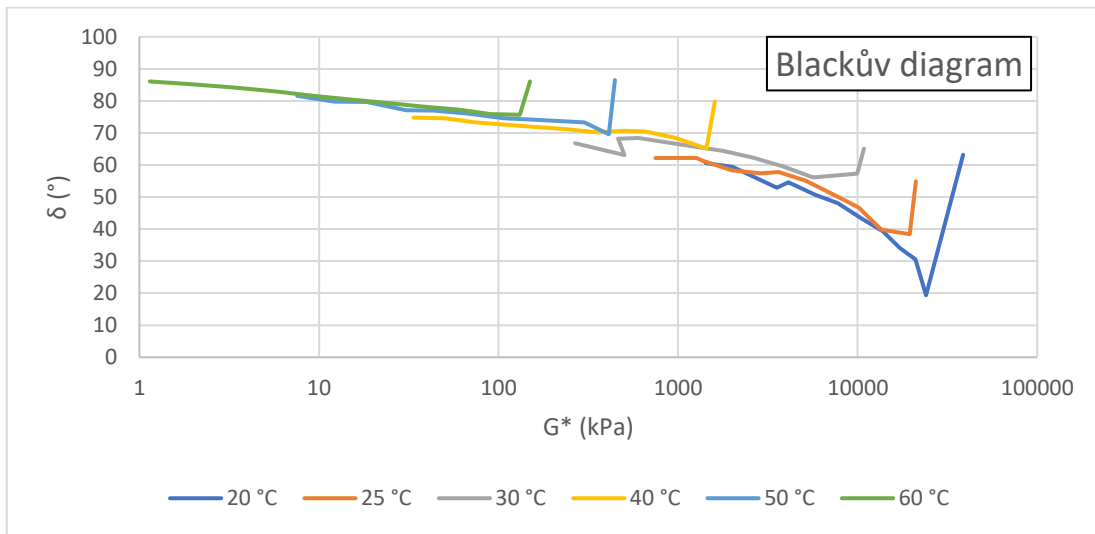
Příloha 4: FST; 50/70 + Vratný filer PKB



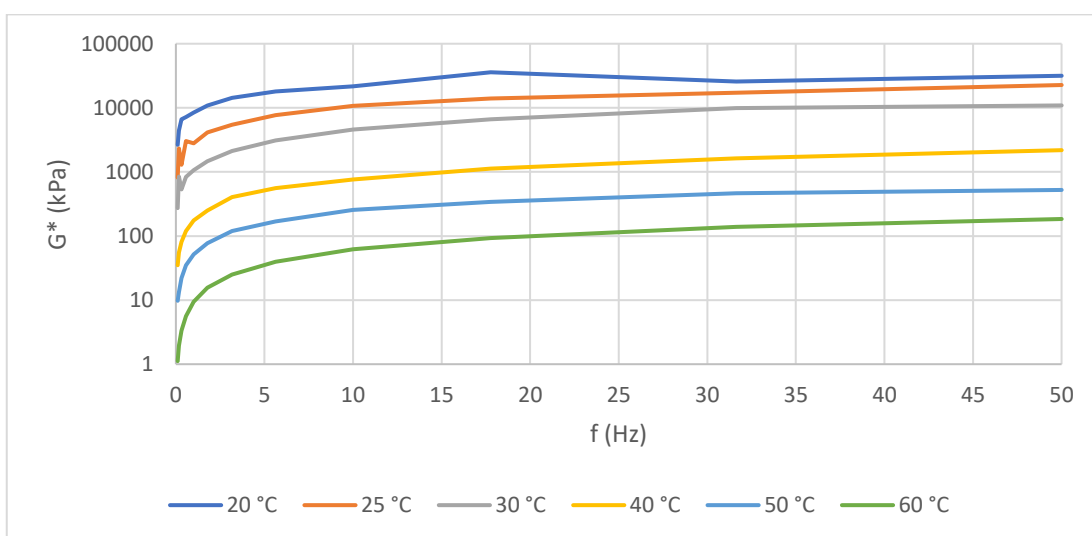
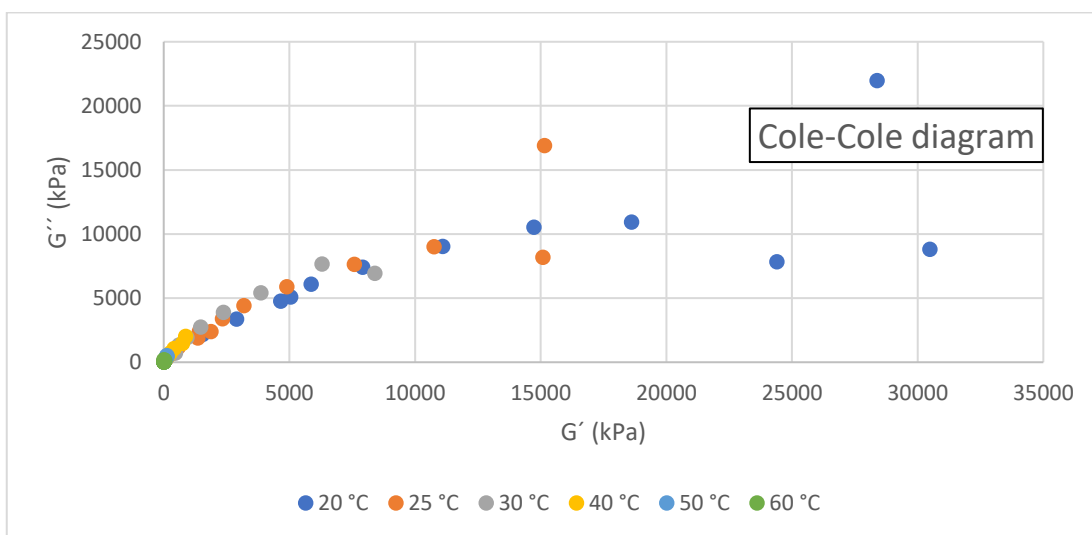
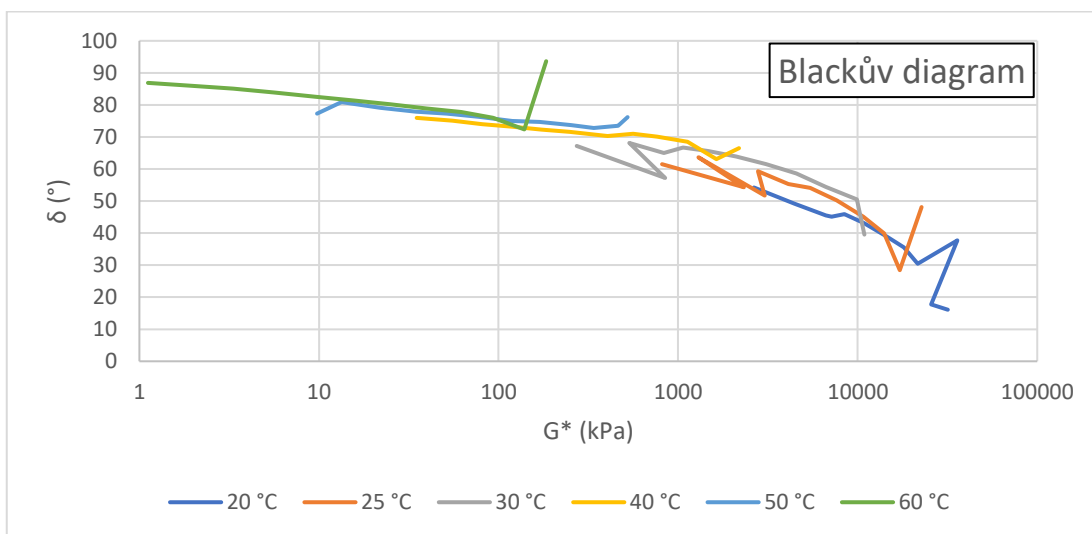
Příloha 5: FST; 50/70 + Chornice



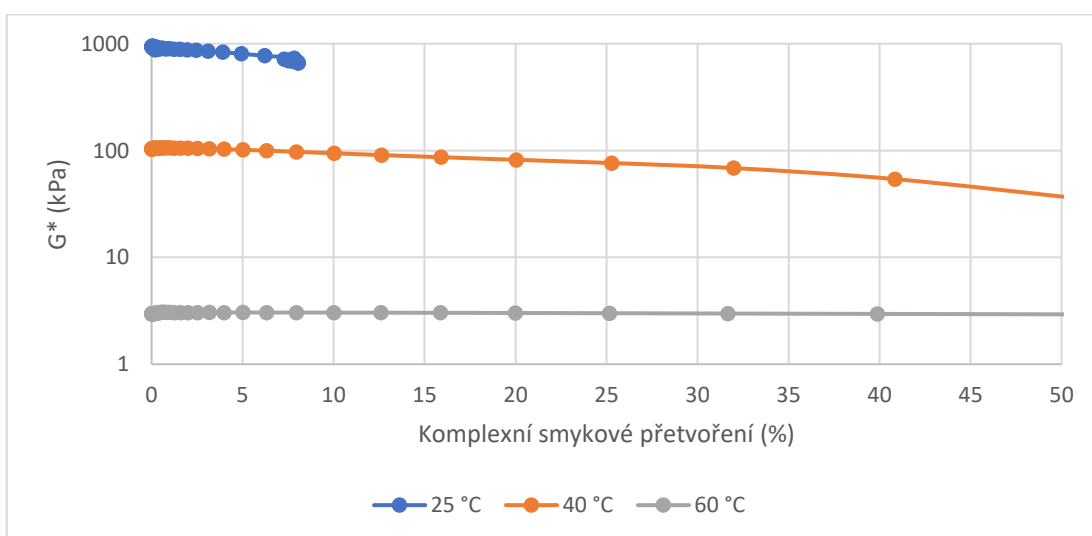
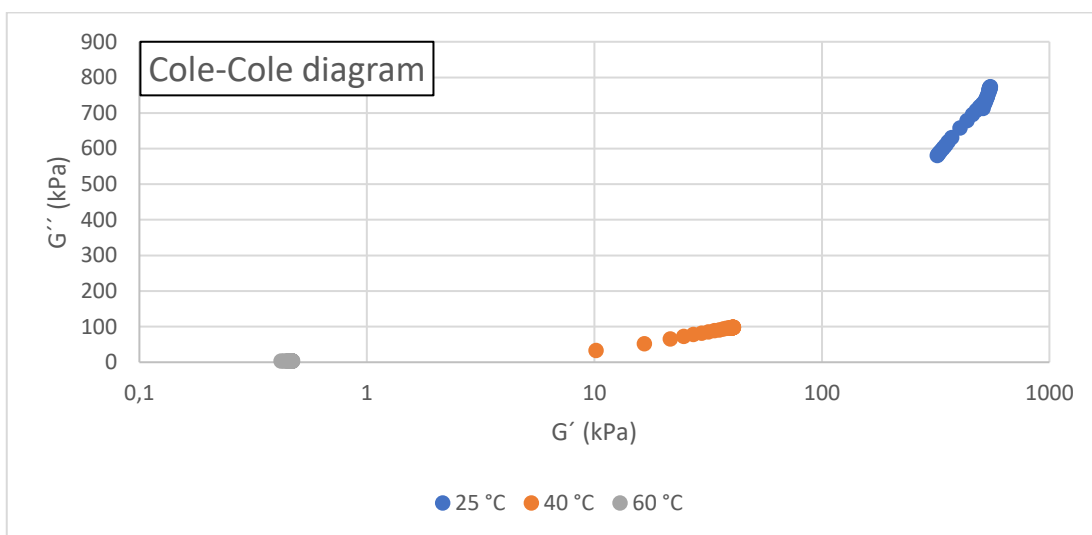
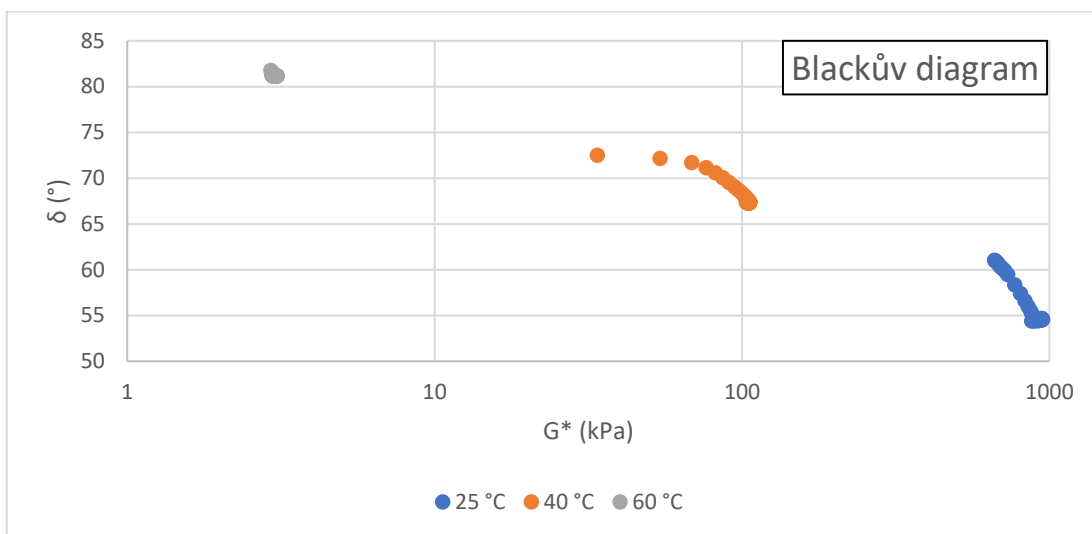
Příloha 6: FST; 50/70 + Destro



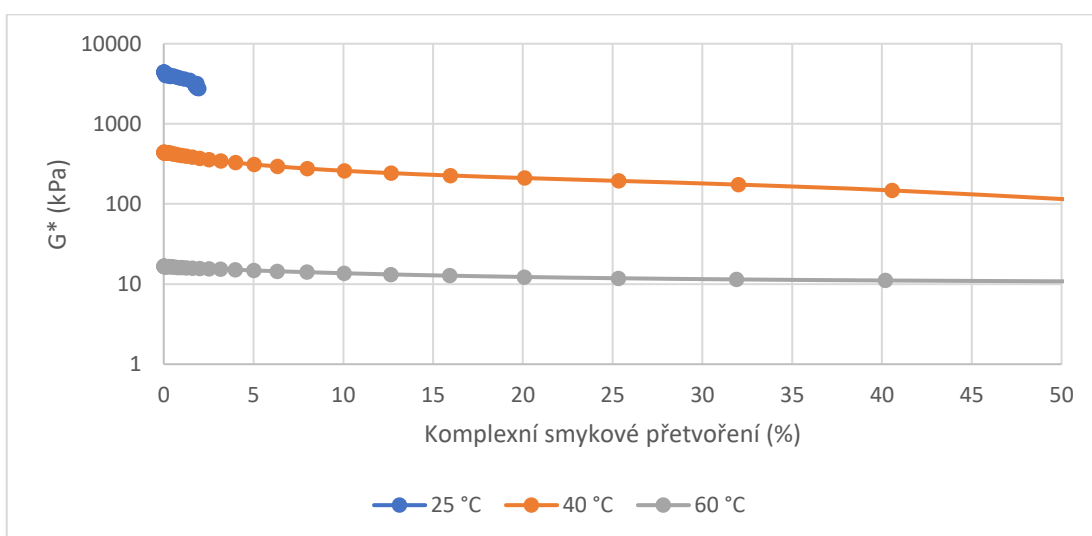
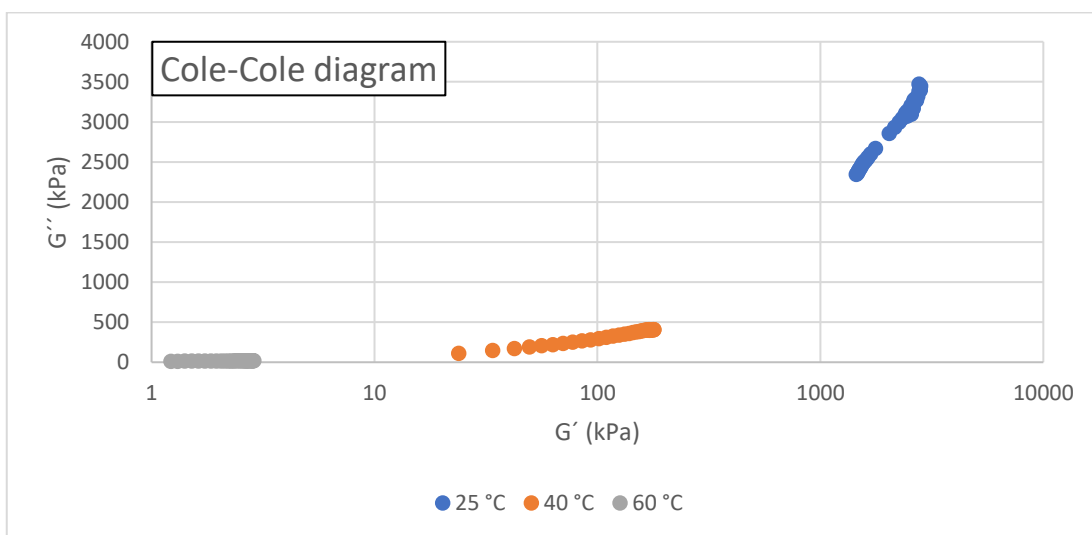
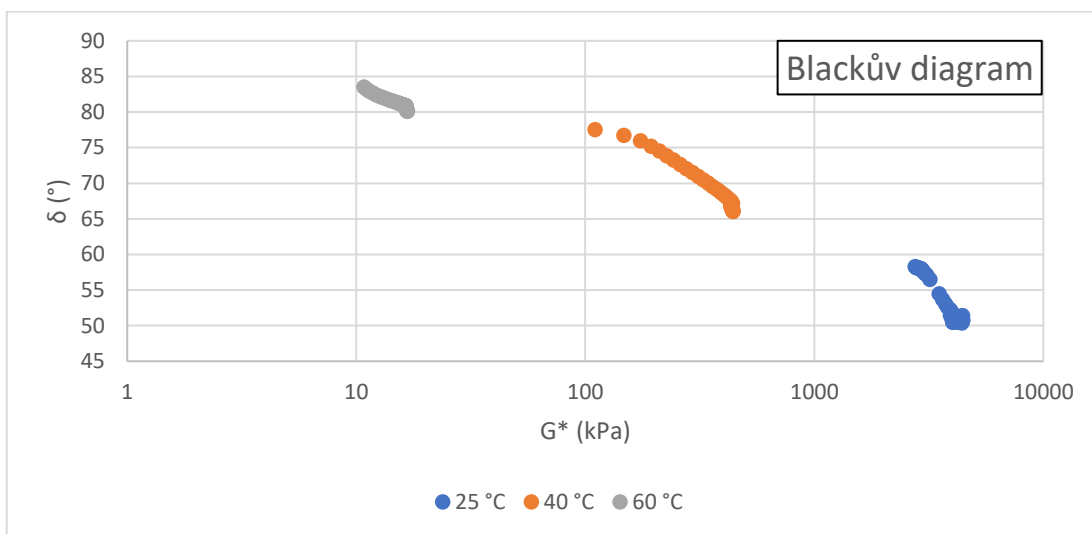
Příloha 7: FST; 50/70 + Ocel. struska



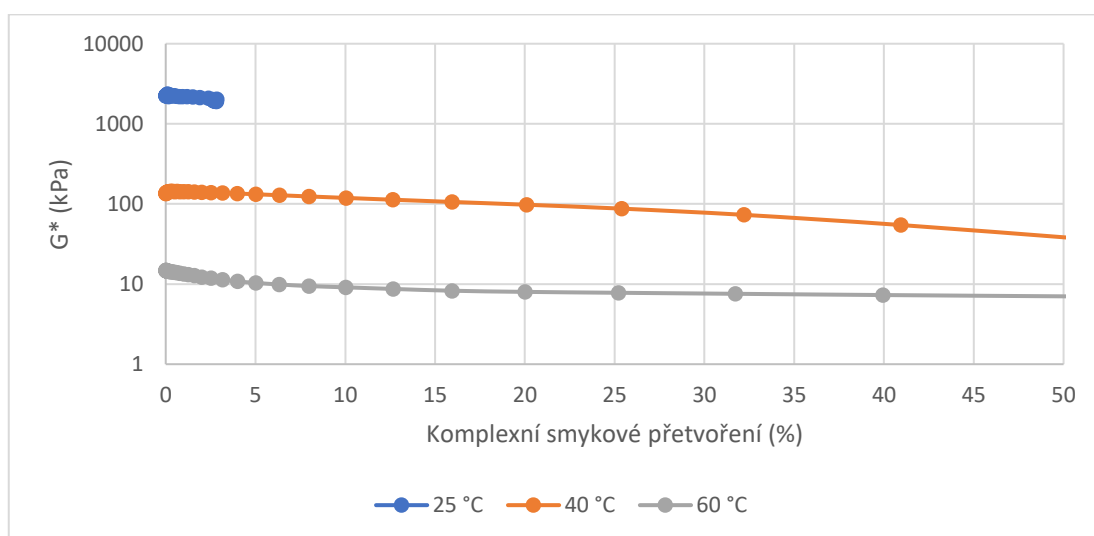
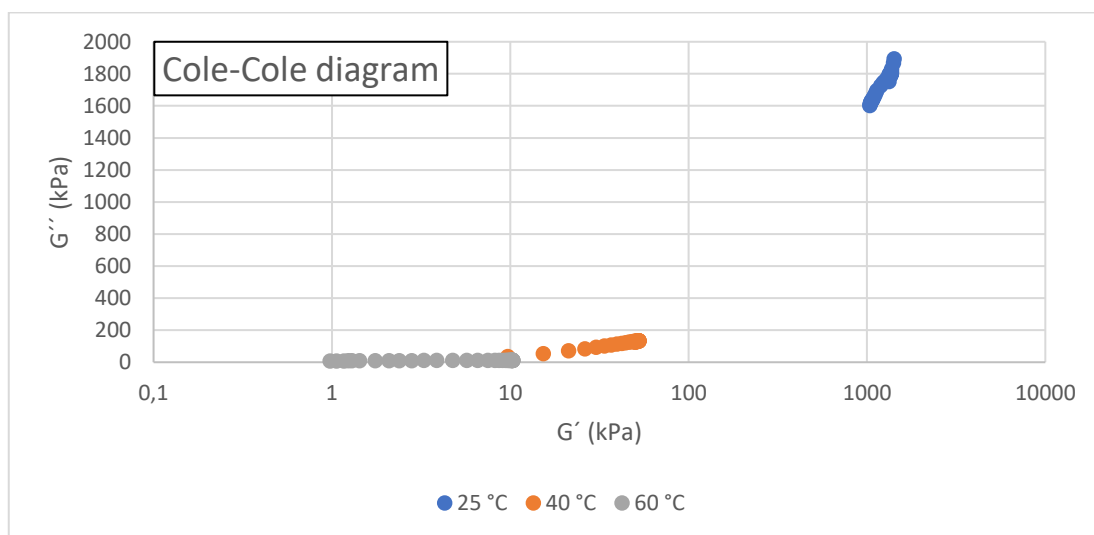
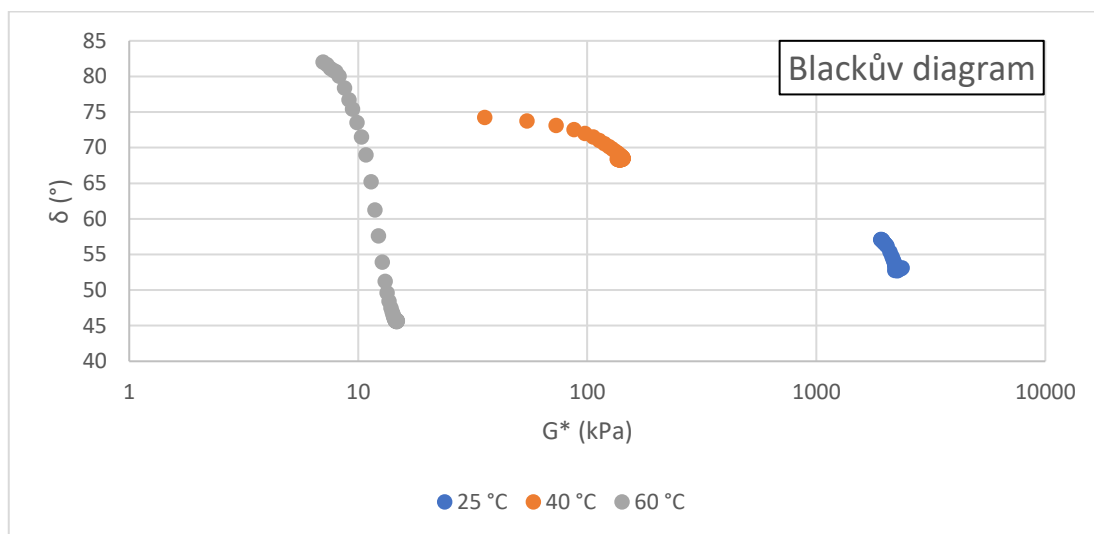
Příloha 8: FST; 50/70 + Chlum



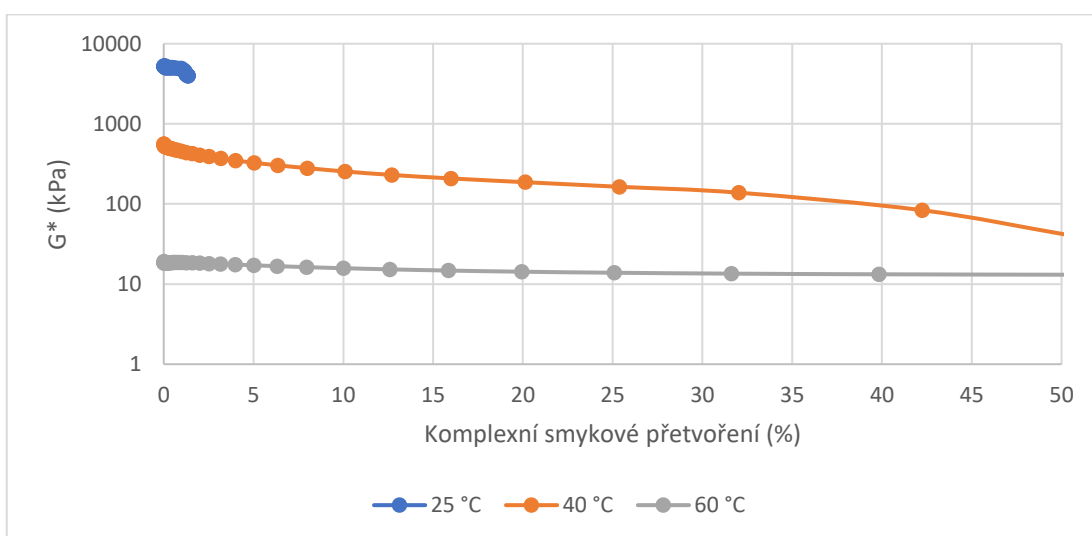
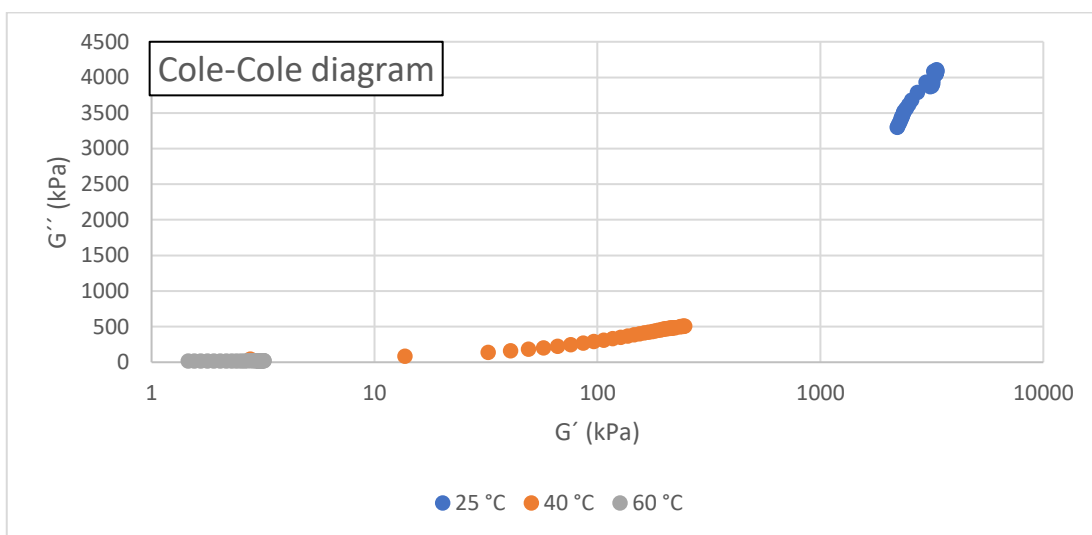
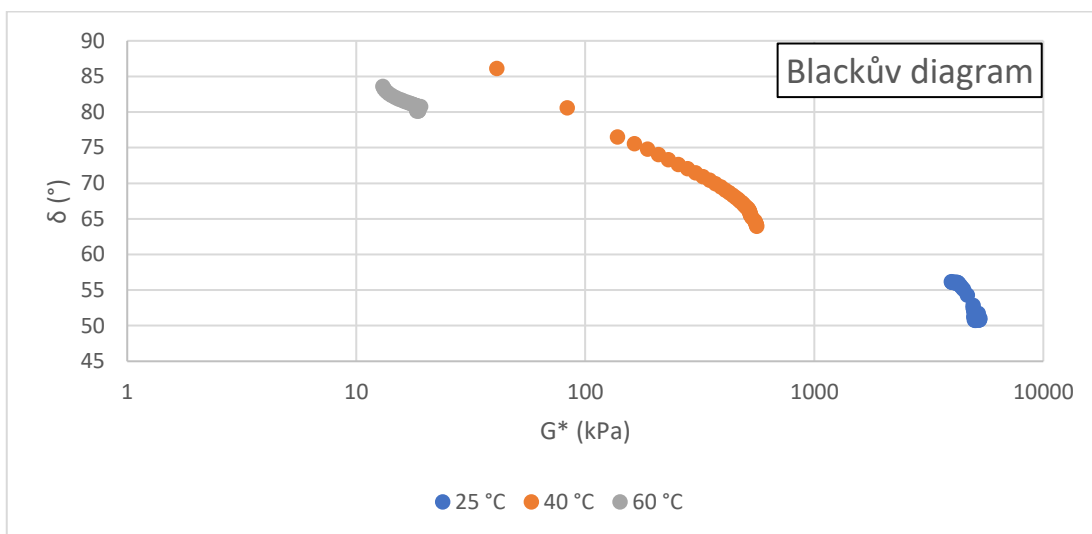
Příloha 9: AST; 50/70 Reference



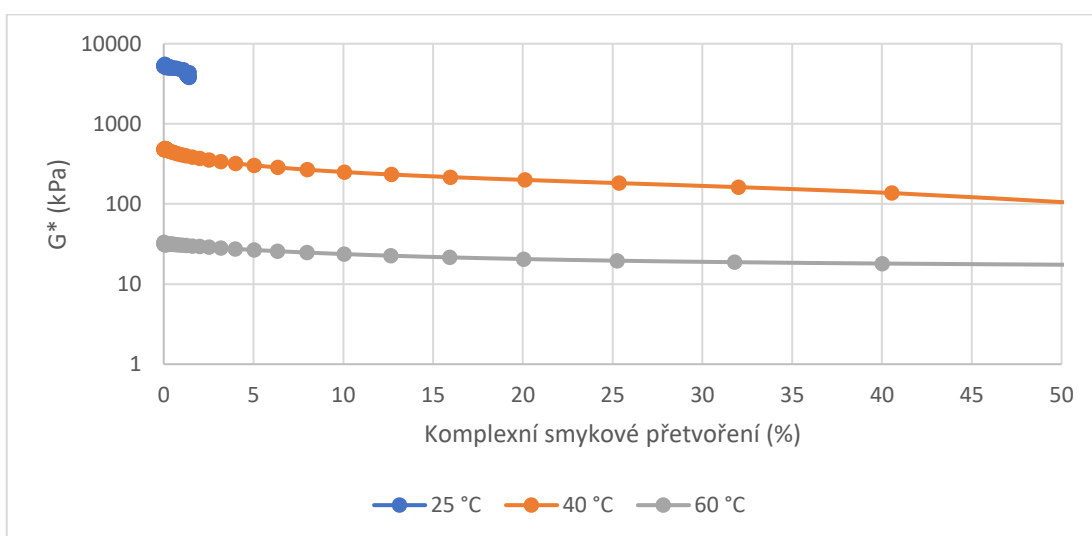
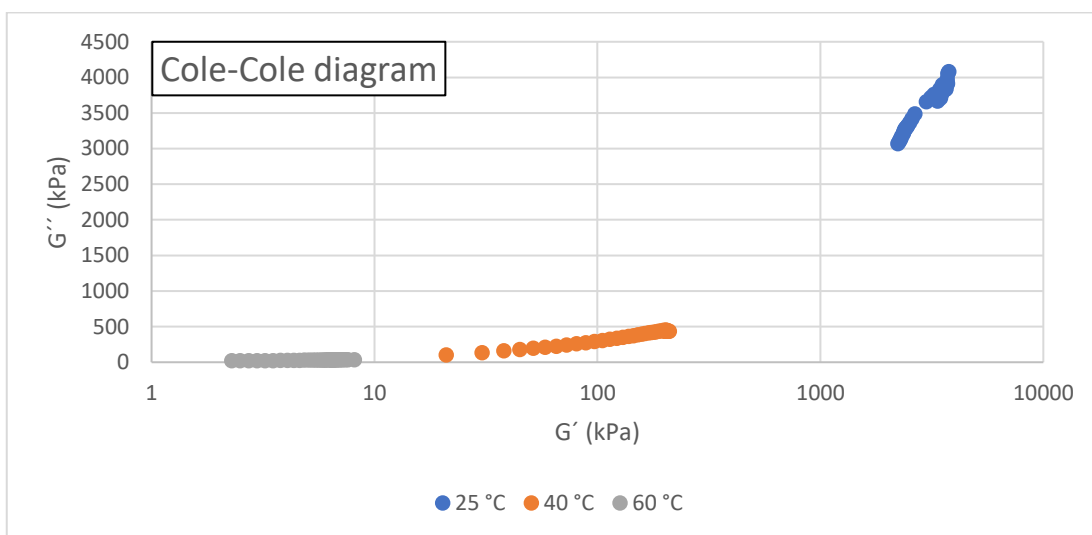
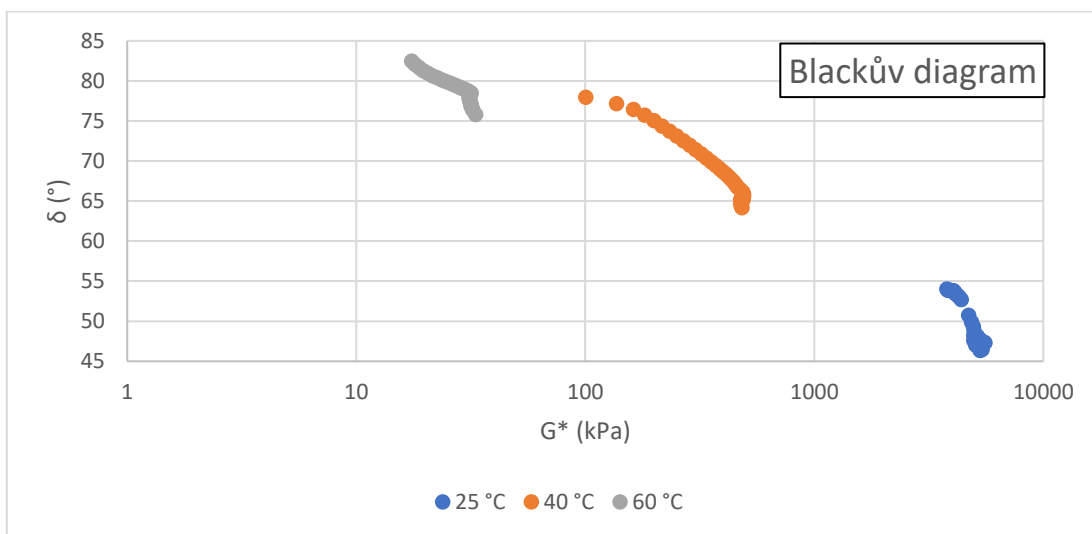
Příloha 10: AST; 50/70 + Velké Hydčice



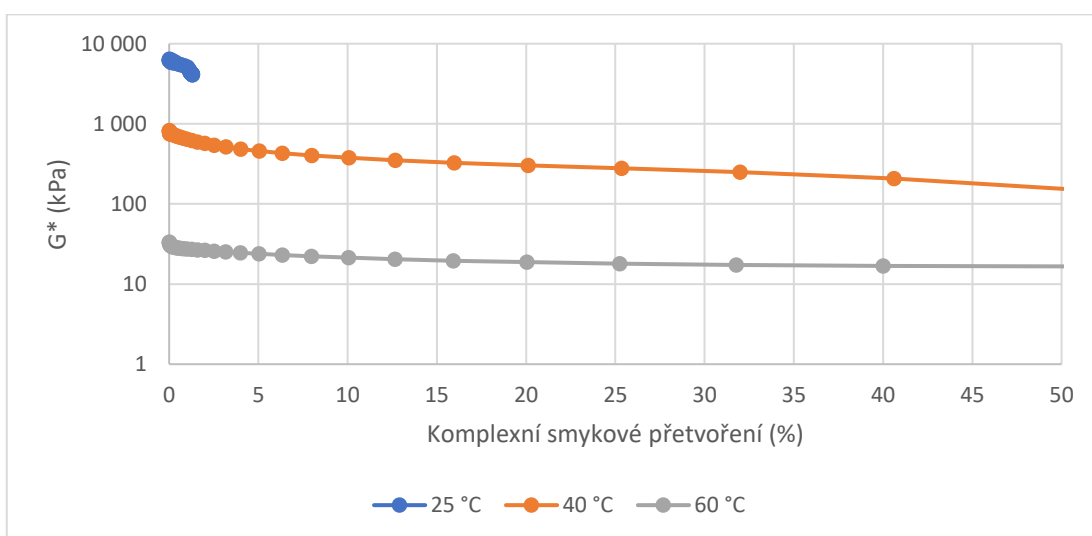
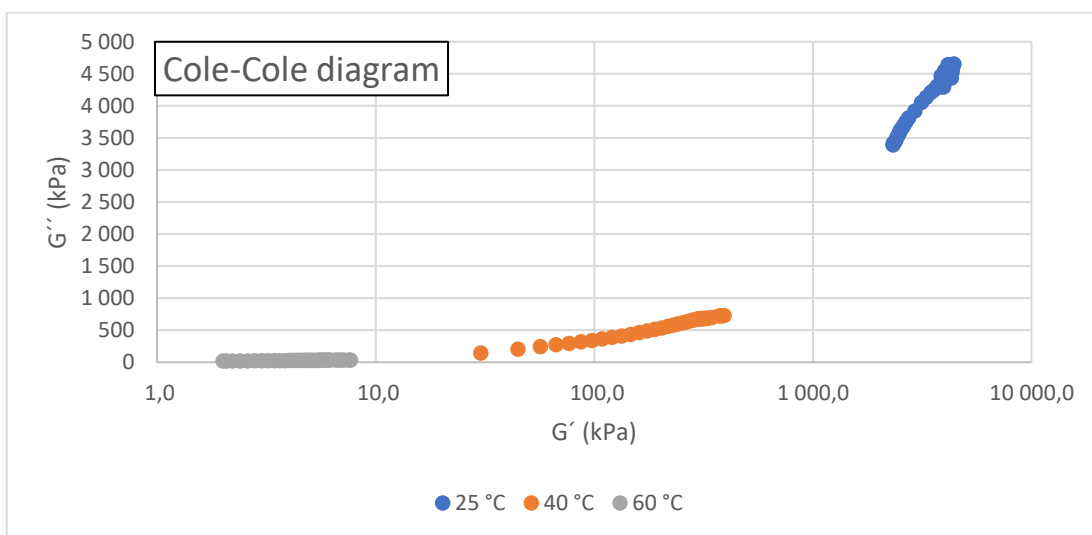
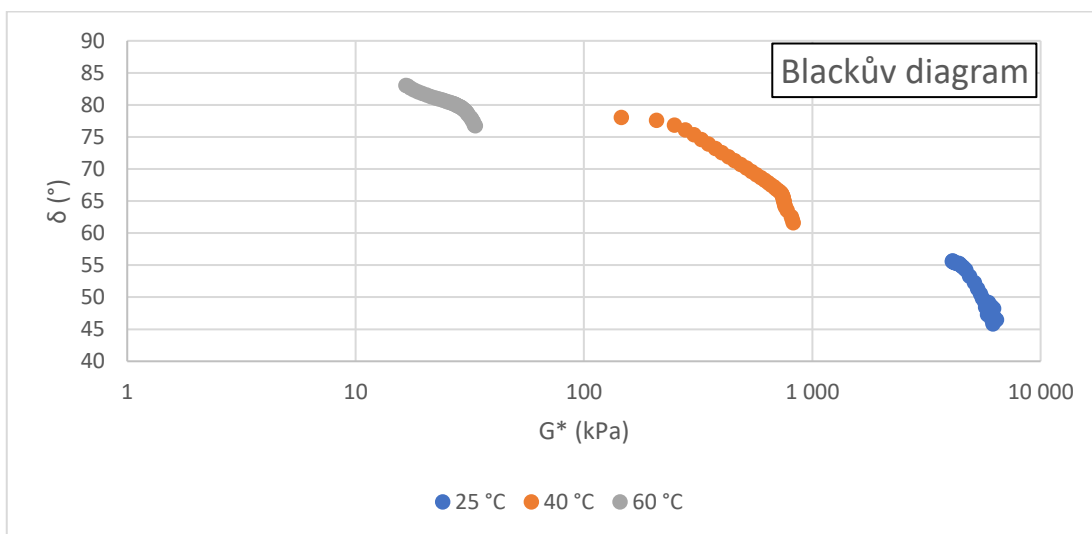
Příloha 11: AST; 50/70 + Plešovice



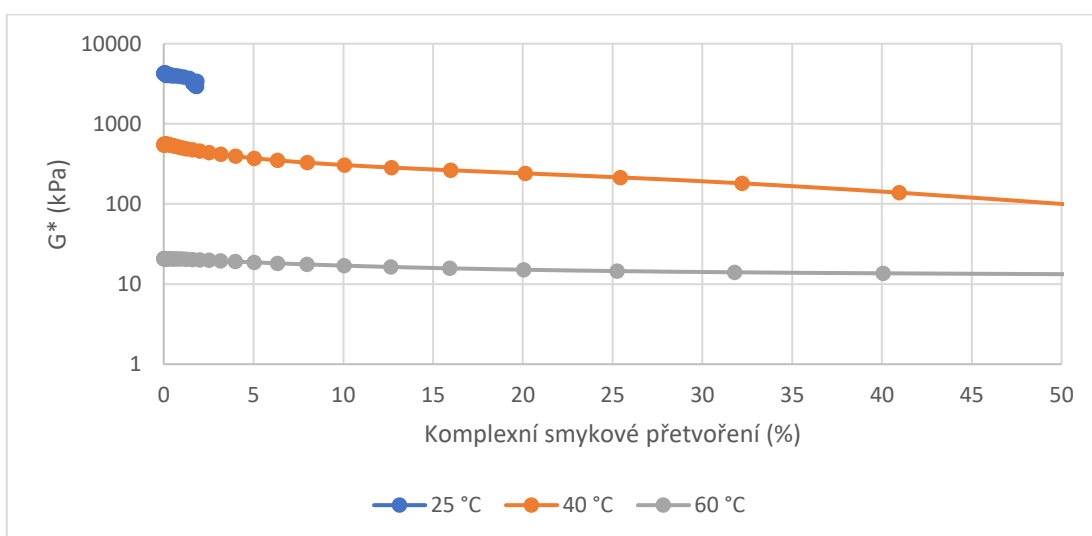
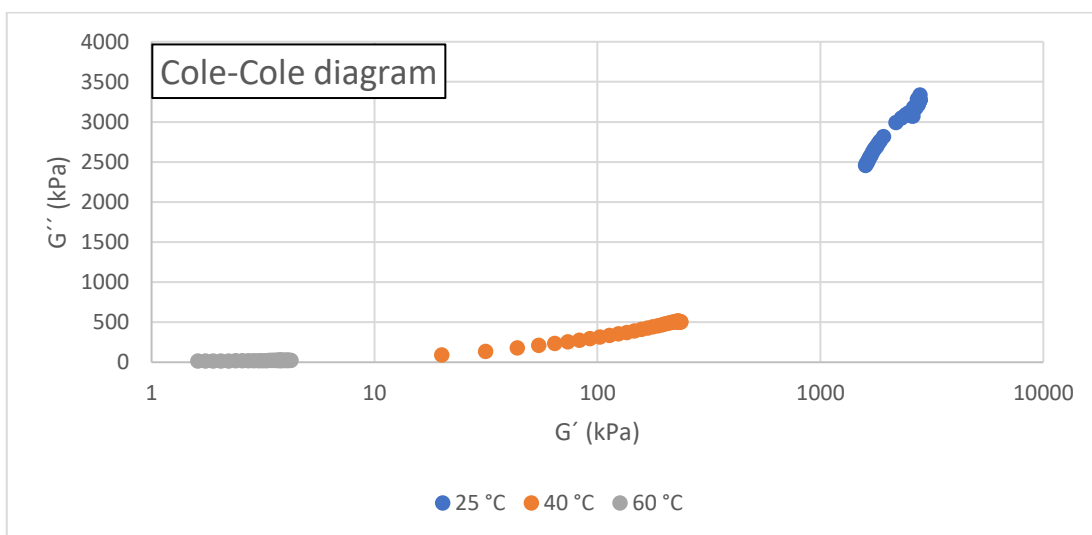
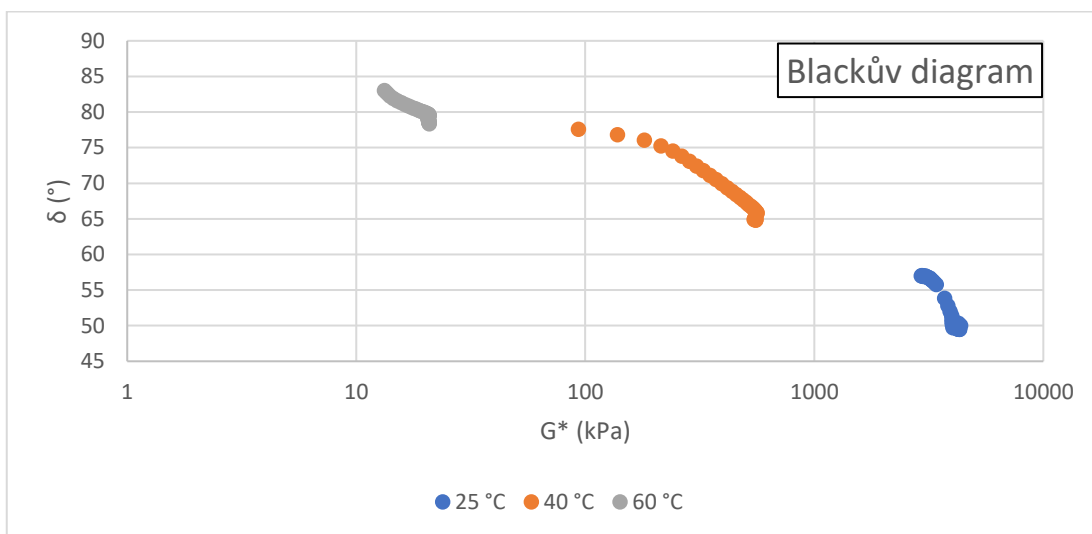
Příloha 12: AST; 50/70 + Vratný filer PKB



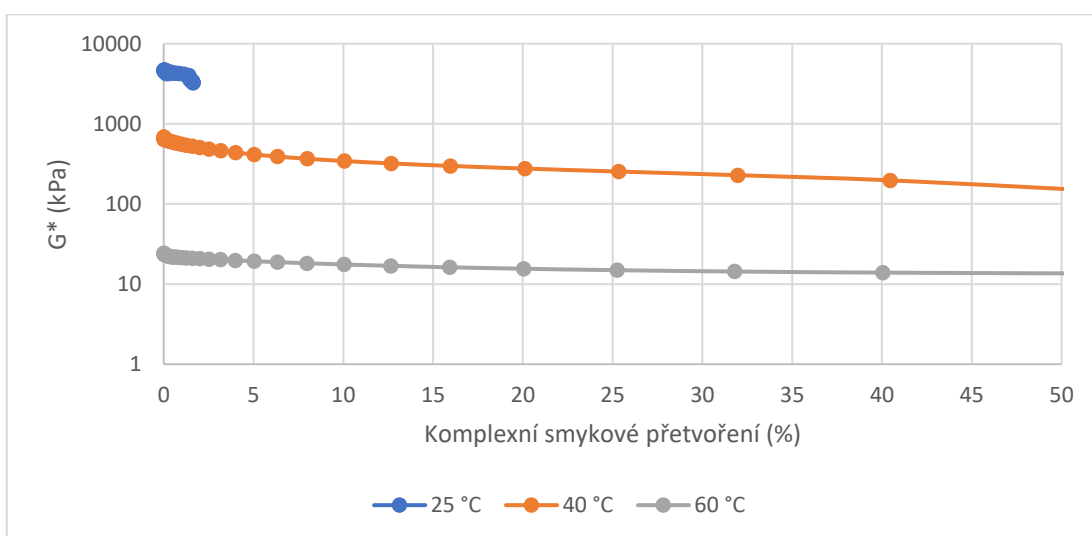
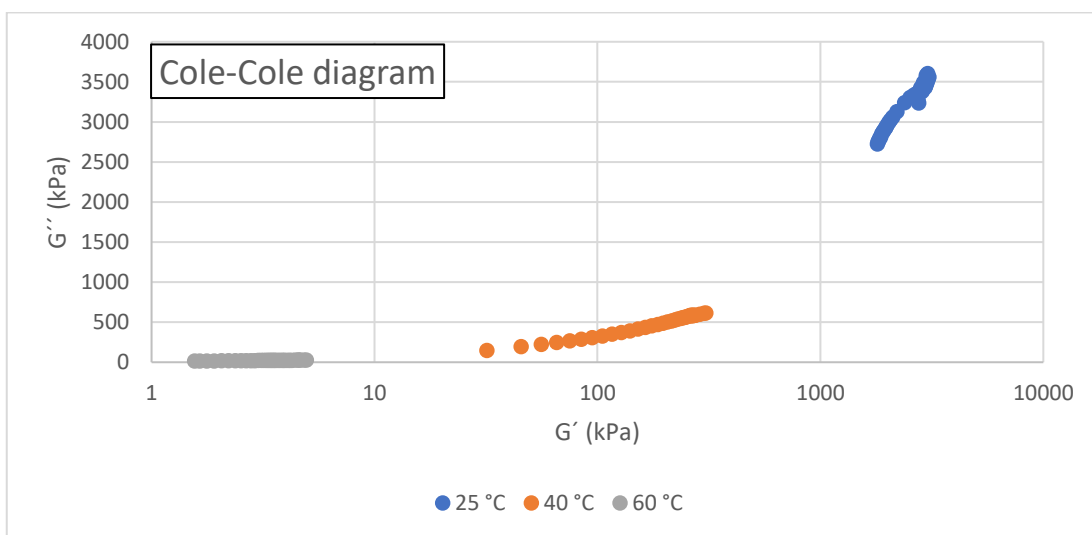
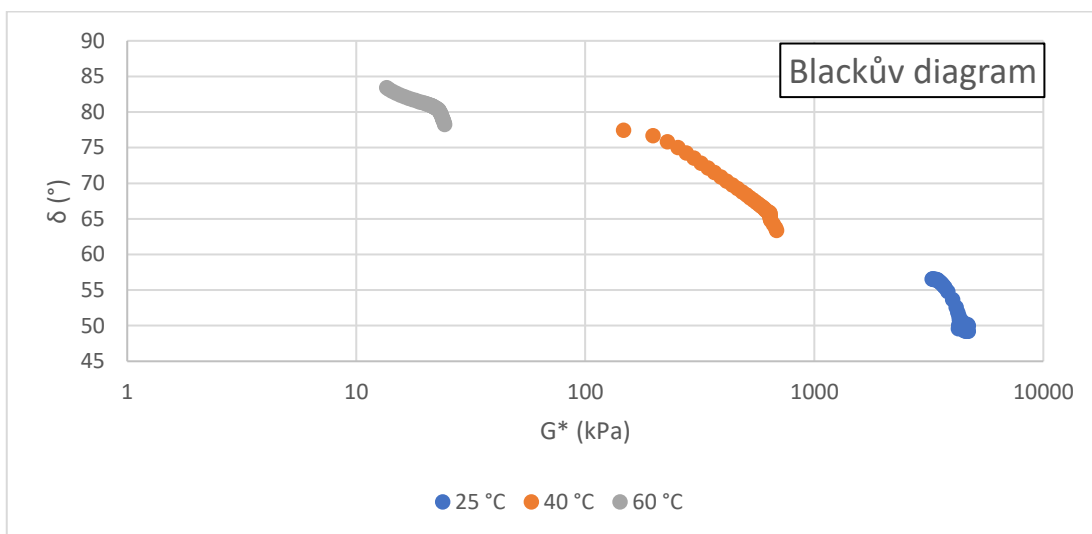
Příloha 13: AST; 50/70 + Chornice



Příloha 14: AST; 50/70 + Destro



Příloha 15: AST; 50/70 + Ocel. struska



Příloha 16: AST; 50/70 + Chlum