

# **METODIKA PRO STANOVENÍ MÍRY INTERAKCE MINERÁLNÍHO FILERU S ASFALTOVÝM POJIVEM A JEHO ZTUŽUJÍCÍCH VLASTNOSTÍ**

Teoretické zásady a praktické použití nového přístupu  
k vyhodnocování ztužujících vlastností filerických materiálů  
v mastixové maltě

Metodika vznikla v rámci řešení projektu TAČR TH02020246 „Sledování  
vlastností drobného kameniva za účelem prodloužení životnosti asfaltových  
vozovek“

Autoři:

RNDr. Svatopluk Stoklásek (Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební)

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

Ing. Zdeněk Hegr (Skanska a.s.)

Ing. Miloš Kašpárek (COLAS CZ, a.s.)

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

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

Brno, říjen 2019

## Obsah

1.	Základní použité zkratky a pojmy.....	3
2.	Cíl metodiky .....	4
3.	Popis problematiky a zdůvodnění potřeby metodiky .....	5
3.1.	Zkoušky fileru – současný stav .....	6
3.2.	Nové metody a jejich využití .....	11
4.	Hlavní teoretické principy .....	12
4.1.	Koncept volného asfaltu .....	12
4.2.	Gradient ztužení – „Gradient of Stiffening“ .....	13
4.3.	Konceptuální model – „Interagující objem asfaltu“ .....	14
5.	Popis základů metodiky .....	16
5.1.	Určení koncentračních oblastí z měření viskozity.....	16
5.2.	Určení koncentračních oblastí z měření kríповého dotvarování.....	19
6.	Technické podmínky měření a interpretace výsledků .....	22
6.1.	Obecné zásady vzorkování a měření.....	22
6.1.1.	Velikost částic ve vzorku mastixu.....	22
6.1.2.	Příprava vzorku .....	23
6.1.3.	Vyjadřování výsledků .....	23
6.2.	Měření viskozity a interpretace výsledků .....	24
6.3.	Provedení MSCRT a interpretace výsledků.....	26
6.3.1.	Vyjádření výsledků .....	27
6.3.2.	Nastavení – okrajové podmínky zkoušky.....	27
7.	Příklady použití metodiky pro posouzení vlivu vlastností fileru na ztužení asfaltové malty .	33
7.1.	Viskozitní snímek koncentračních řad mastixu .....	34
7.2.	Krípový snímek koncentračních řad mastixu .....	40
8.	Metodický postup pro popis míry interakce minerálního fileru s asfaltovým pojivem a jeho ztužujících vlastností .....	46
9.	Popis novosti metodiky a její uplatnění.....	49
10.	Seznam publikací, které předcházely metodice.....	50
11.	Dedikace na projekt .....	50
12.	Jména oponentů a názvy jejich organizací.....	51
13.	Citovaná literatura .....	51
	Příloha 1. Vybrané reologické modely pro suspenze .....	55
	Příloha 2. Schematický nákres aparátu pro stanovení sypné hmotnosti .....	56
	Příloha 3. Možnosti analýzy dat získaných na mastixech.....	57
	Příloha 4. Kritické frakční objemy uceleného souboru filerických materiálů.....	58

## 1. Základní použité zkratky a pojmy

**Mastixová malta** – směs fileru a asfaltového pojiva

**Filer** – velmi jemné částice kameniva, frakce kameniva s převažující velikostí zrn do 0,063 mm vznikající při výrobě kameniva, která je přidávána do asfaltové směsi za účelem ztužení pojivové složky a úpravu volumetrických parametrů směsi (ovlivnění VMA)

**DSR** – dynamický smykový reometr, umožňuje provádět reologická měření asfaltových pojiv a mastixových malt

**MSCRT** – zkouška opakovaného smykového zatěžování a dotvarování podle normy ČSN EN 16659 prováděná pomocí dynamického smykového reometru, viz (1)

**Kritický frakční objem** – volumetrický parametr, který definuje, jaký podíl objemu zdánlivě zaujímá minerální složka v asfaltové nebo mastixové směsi. Kritický objem lze stanovit laboratorními metodami. Po jeho dosažení dochází ke skokové změně některých vlastností mastixu

**Viskozitní reologické snímkování** – získané hodnoty měření viskozity jednotlivých členů koncentrační řady mastixu s jedním použitým druhem fileru

**Krípové reologické snímkování** – získané hodnoty měření dotvarování jednotlivých členů koncentrační řady mastixu s jedním použitým druhem fileru

**Škálování výsledků** – použitá stupnice pro jednotlivé osy diagramu, ve kterém jsou zaznamenány naměřené výsledky

**Reciproční škálování** – osa diagramu je zobrazována jako reciproční hodnota dané veličiny

**Logaritmické škálování** – osa diagramu je zobrazena jako logaritmická hodnota dané veličiny

**Rigdenova mezerovitost** – mezerovitost suchého zhutněného fileru při vynaložení předepsané hutnicí práce. Parametr je přímo úměrný kritickému frakčnímu objemu

**VMA** – mezerovitost směsi kameniva v asfaltové směsi

**VFB** – stupeň vyplnění mezer pojivem

**FrXA** – kritický frakční objem konstruovaný z nízké koncentrační oblasti (region A) při viskozitním snímkování mastixu a recipročním škálování, viz kapitola 6.2

**FrXB** – kritický frakční objem konstruovaný z vysoké koncentrační oblasti (region B) při viskozitním snímkování mastixu a recipročním škálování, viz kapitola 6.2

**IG-Y** – kritický frakční objem konstruovaný z vysoké koncentrační oblasti (region B) při kríčovém snímkování mastixu a logaritmickém škálování osy y, viz kapitola 6.3

**R-Y** – kritický frakční objem konstruovaný z vysoké koncentrační oblasti (region B) při kríčovém snímkování mastixu a recipročním škálování osy y, viz kapitola 6.3

**SFrXA, SFrXB, SIG-Y, SR-Y** – kritické frakční objemy zohledňující velikost změny sledovaného řídicího parametru vyvolané změnou koncentrace, tedy s přihlédnutím ke korekci na hodnotu směrnice řídicí přímky

## 2. Cíl metodiky

**Tento dokument s názvem „Metodika pro stanovení míry interakce minerálního fileru s asfaltovým pojivem a jeho ztužujících vlastností“** se zabývá tématem, které nebylo pro potřeby silničního stavitelství dosud v ucelené formě zpracováno. Laboratorní zkoušky popisované v této metodice jsou založeny na využití reologických metod pomocí přístroje, který se nazývá dynamický smykový reometr a jenž umožňuje velmi přesnou reologickou charakteristiku viskoelastických materiálů.

Hlavním cílem metodiky je vytvoření postupů, které by dokázaly lépe kvalitativně charakterizovat filerický materiál, jenž je významnou složkou asfaltových směsí. Silničním technologům a dalším odborníkům v oblasti materiálového inženýrství se tak naskýtá možnost využití dalšího mocného nástroje pro posouzení kvality a vlastností této materiálové složky.

Metodika je jedním z výstupů obsáhlejší práce zabývající se kvalitou používaného drobného kameniva a to především ve vztahu k nežádoucím reologickým jevům a jejich možného výskytu během pokládky a hutnění asfaltových směsí určených pro konstrukce netuhých vozovek. **Prvotním cílem práce byla především snaha rozlišit vliv slídových minerálů přítomných v matečné hornině.** Uvedené techniky slouží nejen ke kvalitativní deskriptivní charakterizaci granulometricky nejjemnější složky kameniva a jeho přímého ztužujícího účinku v mastixové maltě, ale i k obecnému popisu chování nejjemnější frakce kameniva ve směsi s asfaltovým pojivem. Děje se tak pomocí obecných veličin, které jsou skutečným odrazem generických vlastností fileru.

Použitý přístup má významný metodologický dopad na danou oblast, protože umožňuje:

- studovat přímou interakci fileru s asfaltovým pojivem a tak predikovat jevy, které určují vlastnosti mastixové malty,
- posuzovat vlastnosti a vliv filerických frakcí na vlastnosti asfaltových směsí, včetně toho, jak složení horniny a modifikace povrchu fileru mění vlastnosti mastixové malty,
- odhadnout celkový vliv granulometrie a specifického povrchu jemných částic na reologické vlastnosti mastixové malty,
- ve spojení s mineralogickým fázovým rozbohem horniny, který byl popsán v (2), odhadnout vliv jednotlivých minerálů na ztužení mastixové malty.

Všechny výše zmíněné aspekty umožňují v materiálovém výzkumu asfaltových směsí dosáhnout vyšší kvalitativní úrovně tohoto materiálu. Jedním z cílů práce bylo obrátit pozornost odborné veřejnosti právě k problematice vlivu fileru na asfaltovou směs, která v České Republice i dnes stojí mimo zájem hlavního proudu. A to zejména v oblasti výzkumu příčin poruch asfaltových vrstev a jejich potlačování. Metodika explicitně poukazuje na

skutečnost, že **vlastnosti mastixu se při zvyšování obsahu filerové složky mění od určitého bodu skokově.**

Obecně lze říci, že metodika je primárně určena silničním technologům, pracovníkům laboratoří podílejících se na přípravě receptur a výzkumným pracovníkům zabývajícím se problematikou asfaltových směsí a asfaltových pojiv. Z hlediska manažerského přístupu může sloužit jako referenční přístup při:

- vyhodnocování zdrojů minerálních surovin (kameniva),
- posouzení kvality technologie při zpracování dobývané minerální suroviny (kameniva),
- optimalizaci technologických procesů a receptur na obalovnách asfaltových směsí,
- materiálovém výzkumu filerických frakcí kameniva.

**Konkrétní postup laboratorních prací a vývojový diagram pro určení vnitřních vlastností filerických materiálů v kompozitním mastixovém systému jsou souhrnně uvedeny v kapitole 8 – „Metodický postup pro popis ztužujících vlastností fileru“. V kapitolách 3 až 7 jsou vysvětleny teoretické principy, které jsou nutné pro pochopení dané problematiky, včetně popisu možností metody při praktickém použití a praktických příkladů.**

### 3. Popis problematiky a zdůvodnění potřeby metodiky

Asfaltové směsi, používané pro výstavbu netuhých vozovek pozemních komunikací, jsou složeny z asfaltového pojiva a kameniva, popřípadě některých dalších přísad. Kamenivo tvořící základ výroby asfaltových směsí se podle velikosti maximálního nominálního zrna rozděluje do tří skupin – filer, drobné kamenivo a hrubé kamenivo. Základní pojivovou složku přidávanou do asfaltových směsí tvoří asphalt, který je produktem zpracování surové ropy na destilačních a rektifikačních kolonách rafinérií. Jedná se o vakuový destilační zbytek, který může být dále upravován a modifikován. Charakteristiky vstupních surovin významně determinují konečné vlastnosti asfaltových směsí.

Bližší pohled na strukturu asfaltové směsi odhaluje, že v procesu její výroby pojivo nejen obaluje zrna kameniva, ale smíšením s velmi jemnými částicemi tvoří mastixovou maltu, která **je ve skutečnosti pojivovou a částečně i napětí přenášející fází v hutněné asfaltové směsi.** Vlivem přítomnosti fileru dochází paralelně ke ztužení asfaltového pojiva a ovlivnění volumetrických parametrů asfaltových směsí. Proto významnou roli hraje i funkce výplňová, která reguluje mezerovitost asfaltové směsi tím, že mastixová malta svým objemem obsazuje dutiny a volný prostor ve zhutněné vrstvě asfaltové směsi a reguluje tak velikost pórů přístupných vodě (viz parametr VMA a VFB). U asfaltových směsí, především asfaltových betonů, je třeba pečlivě optimalizovat množství mastixové malty, aby nedošlo k redukcii

vnitřního tření a směs nebyla náchylná na vznik plastických deformací v důsledku kumulace viskózního toku při cyklickém zatěžování. Z toho vyplývá, že konečné vlastnosti mastixové malty jsou rozhodující pro oba konce spektra užitečných teplot a určují jak nízkoteplotní, tak středněteplotní vlastnosti asfaltové směsi.

Filerová frakce kameniva je podle ČSN EN 13043 (3) definována jako frakce obsahující jemné částice kameniva, z nichž většina propadne sítím 0,063 mm, a která se může přidat k stavebnímu materiálu pro dosažení jeho určitých vlastností. Původ fileru nacházejícího se v asfaltové směsi je dvojího druhu. Jednak se jedná o velmi jemné částice, které vznikají při výrobě užších frakcí kameniva. Většina těchto částic se koncentruje ve frakci 0/2 mm nebo 0/4 mm. Část jemných částic rovněž ulpívá na zrnech hrubozrnných frakcí a musí být do celkové bilance zahrnuta. Filerové částice pocházející z mateřské horniny jsou z velké části při průchodu sušícím bubnem obalovny odloučeny od větších zrn, zachyceny v kolektorovém filtračním systému a dopraveny do speciálního zásobníku, z kterého jsou při výrobě asfaltové směsi zpětně hmotnostně dávkovány do směsi kameniva. V tomto případě pak hovoříme o tzv. vratném fileru. Je nutné podotknout, že odloučení jemných částic na obalovně není stoprocentní a kamenivo v zásobnících horkého třídění stále obsahuje jistou část filerických zrn. Úroveň odloučení záleží na výchozím obsahu fileru v jednotlivých frakcích kameniva, nastavení technologie obalovny a podtlaku v odlučovacím systému. Tím se řídí i výsledná granulometrie (zrnitost) vratného fileru. Je logické, že vlastnosti takto získaného materiálu v sobě odráží petrografický charakter matečné horniny, její proměnlivost a technologii zpracování kameniva v lomu.

Další zdroj jemných částic pochází od externího přídatného fileru ve formě jemně mleté vápencové moučky, která má a priori bazický charakter. Přídatný filer se vyrábí definovaným způsobem mletí. Poměr vratného a přídatného fileru je pro každou konkrétní asfaltovou směs stanoven výrobním předpisem.

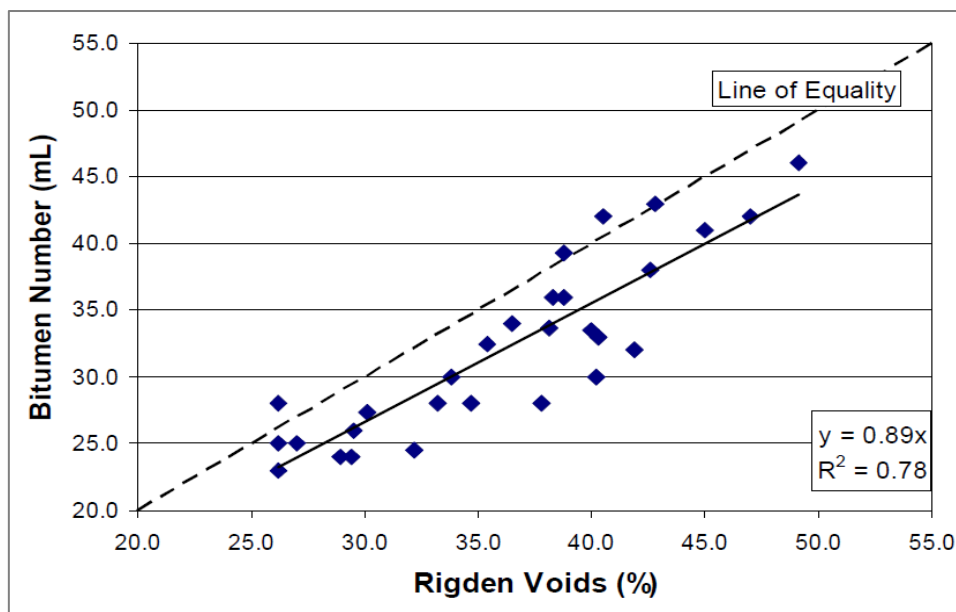
### 3.1. Zkoušky fileru – současný stav

Při ověřování vlastností asfaltových směsí v rámci počátečních zkoušek typu se u filerové frakce stanovují pouze granulometrické vlastnosti a křivka zrnitosti asfaltové směsi. Jiné charakteristiky se běžně na rozdíl od asfaltového pojiva u fileru mimo počáteční zkoušky typu jemně mleté vápencové moučky nestanovují. Většinou se tak neděje ani z pohledu širšího ověření vhodnosti materiálového zdroje. Z hlediska metod pro eventuální kvalitativní nadstavbové posouzení fileru jsou dostupné zkušební metody uvedené v tabulce 1. Většina těchto metod je zmíněna ve výrobové normě ČSN EN 13043 (4), specifikující vlastnosti kameniva používaného do konstrukčních vrstev pozemních komunikací.

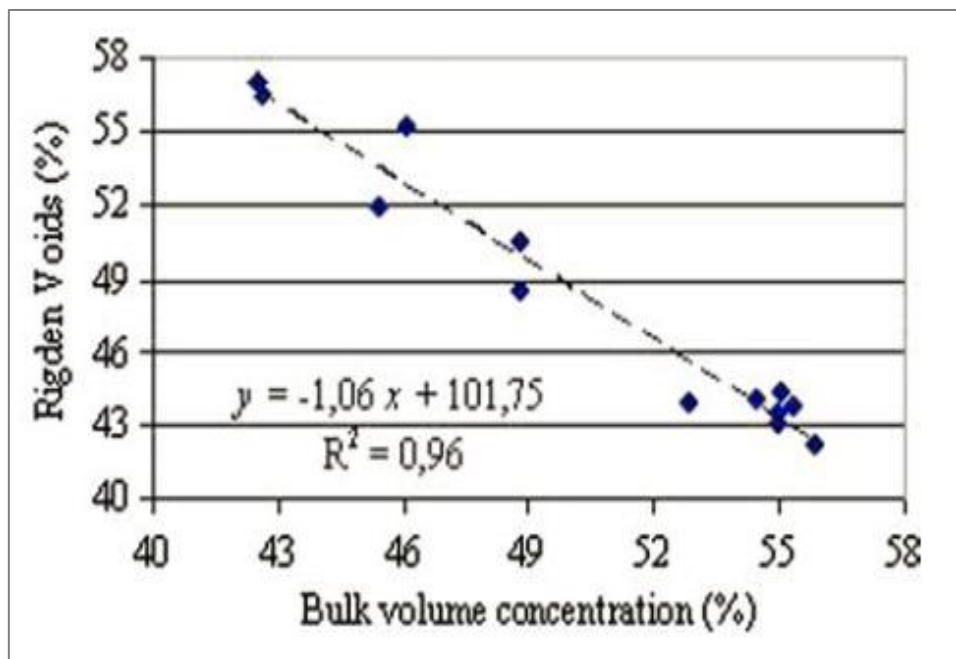
Tabulka 1: Normované zkoušky pro kvalitativní posouzení vlastností fileru

Norma	Zkrácený název	Odkaz	Pozn.
ČSN EN 933-1	Stanovení zrnitosti	(5)	
ČSN EN 933-8+A1	Zkouška ekvivalentu písku	(6)	
ČSN EN 933-9	Zkouška methylenovou modří	(7)	
ČSN EN 933-10	Zrnitost fileru stanovená proséváním proudem vzduchu	(8)	
ČSN EN 1097-3+A1	Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti	(9)	Příloha A
ČSN EN 1097-4	Mezerovitost suchého zhutněného fileru	(10)	
ČSN EN 1097-5	Stanovení vlhkosti sušením v sušárně	(11)	
ČSN EN 1097-7	Měrná hmotnost stanovená pyknometrickou zkouškou	(12)	
ČSN EN 13179-1	Zkouška delta kroužek a kulička	(13)	
ČSN EN 13179-2	Asfaltové číslo přídatného fileru	(14)	
ČSN EN 1744-4	Citlivost na vodu filerů pro asfaltové směsi	(15)	
ČSN EN 196-2	Stanovení obsahu uhličitanu	(16)	Cementy
ČSN EN 196-6	Blainova zkouška – stanovení měrného povrchu	(17)	Cementy

Všechny tyto uvedené zkoušky jsou postaveny na zkoušení samotného fileru. Jediné dvě výjimky, které zkouší nebo simulují vlastnosti filerických materiálů v asfaltové matici, je Zkouška delta kroužek a kulička (13), popřípadě stanovení Asfaltového čísla přídatného fileru (14). Přičemž druhá zkouška je podle zkušeností získaných při jejím provádění velice náročná na pečlivost provedení, vliv granulometrie a dalších faktorů. Touto zkouškou se prokazuje vytvoření vodního filmu na povrchu filerických zrn, tedy množství kapaliny, která napodobuje přítomnost asfaltového pojiva. Při jeho nárůstu dochází u testované suspenze k zlomovému poklesu rezistence vůči proniknutí zkušebního válečku do materiálu. Podle literatury existuje přímá úměra mezi velikostí Rigdenovy mezerovitosti suchého zhutněného fileru a velikostí hodnoty asfaltového čísla, koeficient determinace však dosahuje hodnot pouze  $R^2 = 0,78$ , viz diagram na obrázku 1. Pro většinu deskriptivních zkoušek vlastností současně platí, že existuje úměra různých sledovaných veličin mezi zúženými řezy/frakcemi  $<0,000/0,0063 \text{ mm}>$  a  $<0,063/0,125 \text{ mm}>$ . Při stanovení asfaltového čísla to neplatí, neboť na druhém (hrubozrnějším) řezu není již zkouška proveditelná.



**Obrázek 1:** Vztah asfaltového čísla přídavného fileru a Rigdenovy mezerovitosti, (18)



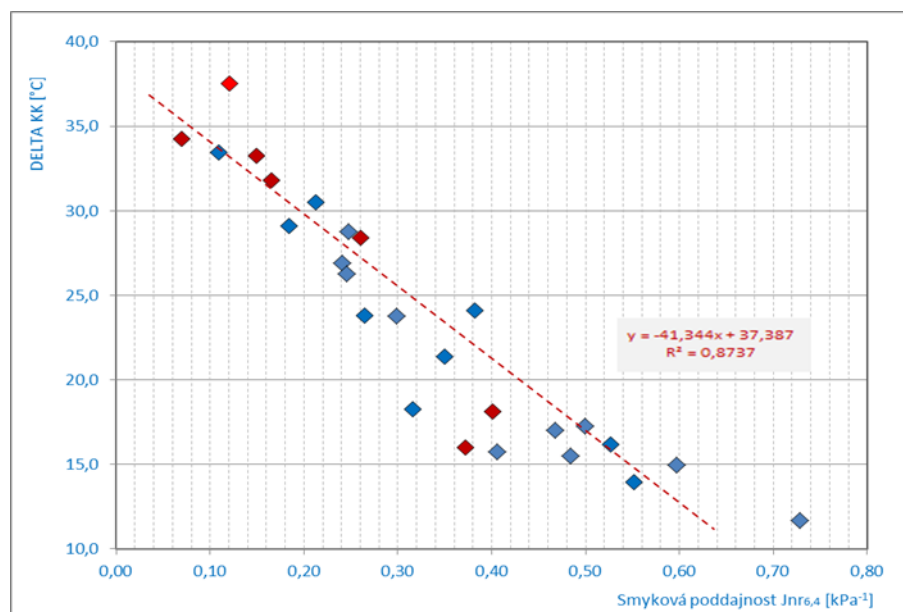
**Obrázek 2:** Zkouška přídavkem kerosinu a Rigdenovy mezerovitosti, převzato z (19)

Podle diagramu uvedeného v práci (19) (obrázek 2) se zdá, že u obdobné zkoušky při použití čistého kerosinu dostáváme mnohem lépe vyjádřené výsledky. Tato modifikovaná zkouška stanovuje, kolik ml kerosinu pojme 15 g fileru, než dojde ke skokové změně koheze. Zkouška přídavkem kerosinu je označována jako „bulk volume concentration test“.

Naproti tomu zkouška delta kroužek a kulička opravdu popisuje chování filerického materiálu v reálných podmínkách mastixové malty. Výsledky této zkoušky a vzájemné relativní porovnání poskytují informace o ztužujících vlastnostech fileru ve směsném materiálu s asfaltovým pojivem. Pro vyjádření tohoto ztužení slouží rozdíl hodnot bodu měknutí mezi

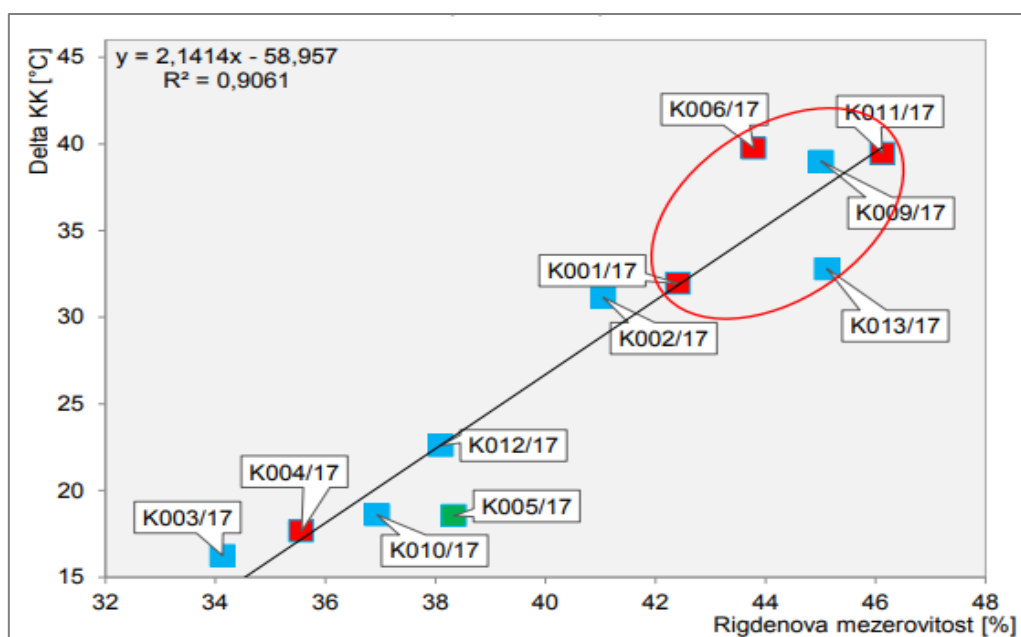


výchozím asfaltovým pojivem (podle normy se pracuje se silničním asfaltem penetrační třídy 70/100) a mastixu vzniklého míšením zkoumaného fileru a primárního asfaltu. Rozdíl těchto hodnot je mírou ztužujících vlastností fileru v daném referenčním koncentračním bodě 37,5 obj. % fileru. Je třeba zdůraznit, že **mastix je vytvořen na základě objemových jednotek tak, aby filer zaujímal v mastixu stále stejné procento objemu**. Proto je pro vytvoření takové směsi nutné znát výchozí objemové hmotnosti obou komponent suspenze. Uvedená zkouška delta kroužek a kulička má charakter reologické zkoušky a proto je pravděpodobné, že u mastixu se silničním asfaltem budou hodnoty významně korelovat s hodnotou smykové poddajnosti  $J_{nr}$  měřené při teplotě 60 °C zkouškou MSCRT. Některé další vztahy mezi jednotlivými zkouškami jsou uvedeny v (20).



**Obrázek 3:** Vztah mezi hodnotou nevratné smykové poddajnosti  $J_{nr6,4}$  při teplotě 60 °C a hodnotou zkoušky delta kroužek a kulička pro jednotlivé filerové materiály zkušební souboru, převzato z (20)

Ukazuje se, že zkouška delta kroužek a kulička vykazuje souvztažnost k výsledkům dalších zkoušek, a to především k hodnotě mezerovitosti suchého zhutněného fileru, která se také označuje jako Rigdenova mezerovitost (RV). Jedná se o zkoušku, jež byla popsána již v roce 1947 (21). Podstata zkoušky spočívá ve zhutnění vysušeného filerického vzorku definovaným způsobem a za vynaložení předepsaného objemu práce. Následně je stanovena míra jeho zhutnění pomocí množství volného prostoru v definovaném objemu vzorku, tedy jeho mezerovitost. Bylo prokázáno, že existuje vztah mezi touto vlastností fileru a mírou ztužení. Zkouška měří vnitřní vlastnosti filerických materiálů a zároveň umožňuje interpretovat tyto fyzikální výsledky pro jedinečné hodnocení filerických materiálů, a kvůli své intrinziční povaze Rigdenovy mezerovitosti.



**Obrázek 4:** Vztah zkoušky delta kroužek a kulička a Rigdenovy mezerovitosti řezu <0,000/0,063 mm> filerů , převzato z (22)

Schopnost dosáhnout limitního hutnění se tedy ukazuje **být jedinečnou a opakující se materiálovou vlastností filerické frakce vystupující jako řídicí vlastnost při jeho interakci s asfaltovým pojivem**. Tuto veličinu úměrnou Rigdenově mezerovitosti lze vyjádřit pomocí veličiny nazývané maximální frakční objem  $\Phi_B$ , která často vystupuje v různých reologických modelech popisujících viskozitní chování suspenzí, viz Příloha 1. Schopnosti zaujmout při definovaném hutnění určitý prostor s limitní mezerovitostí se odvíjí od determinujících vlastností fileru jako je jeho granulometrie, morfologický tvar jednotlivých zrn (na ose ideální koule versus destička/jehla), ostrohrannost, okrouhlost, hrubost povrchu zrna, jeho porozita (především u jemně mleté vápencové moučky), včetně vlivu petrografického složení. Vztah s těmito vnitřními vlastnostmi fileru je komplexní a multiparametrický.

Podrobný popis dopadu maximálního frakčního objemu fileru na vlastnosti mastixu je uveden v následující kapitole. Podle různých prací RV koreluje s některými měřenými veličinami mastixové malty, jako je bod měknutí mastixu, jeho penetrace při 25 °C, méně koreluje s viskozitou a významně méně s tuhostí mastixové malty (19). Specifický povrch měřený v cm<sup>2</sup> na g materiálu, popřípadě při sférolitických vzorcích průměrný diametr filerových zrn měřený laserovou difrakcí, ovlivňují ve srovnání s RV moduly tuhosti a přibližně stejně hodnoty suspenzní viskozity. Zde záleží při jakých teplotách a jakou metodou jsou viskozity měřeny. Obecně lze konstruovat víceparametrický model, který zohledňuje příspěvky jednotlivých vlastností. Nejhůře predikovatelná je hodnota modulu tuhosti (víceparametrický regresní model s koeficientem determinace pouze  $R^2 = 0,61$ ).

Velmi rychlá metoda pro hrubý odhad ztužujícího potenciálu fileru se jeví měření mezerovitosti volně sypaného materiálu různých řezů frakce 0/4 mm, a to především řezu <0,063/0,125 mm>. Tato zkouška dokáže indikovat geometrické vlastnosti částic, které hrají podstatnou roli pro vzájemnou interakci mezi jednotlivými zrny ve fileru. Podstata metody, která není v České republice normována, vychází z americké specifikace AASHTO T 304 (23) se zjednodušující úpravou aparátů, viz příloha 2. Základem celé zkoušky je zajistit definované a opakovatelné podmínky volného pádu zrn zkoušeného kameniva a jeho uvolňování materiálu do výpustě. Výpočet mezerovitosti volně sypaného materiálu se děje ze znalosti objemové hmotnosti kameniva daného řezu/frakce a objemu zachytného kontejneru pod výpustí. Laboratorní test má přiměřenou korelaci k Rigdenově zkoušce a může být využit jako rychlá kvalitativní kontrola změn vlastností drobného kameniva frakce 0/4 mm (20).

### 3.2. Nové metody a jejich využití

Veškeré tyto zkoušky, které popisují ztužení (nebo jeho predikci) filerového mastixu v jednom bodě, umožňují pouze relativní porovnání. Z hlediska zkušeností v dané oblasti je za problematické považována především příliš vysoká hodnota ztužení, která může vést k rozvoji nadměrného výskytu poruch v hutněných asfaltových vrstvách. Více podrobností a vztahy mezi jednotlivými zkouškami lze nalézt v (20).

Moderní reologické metody založené na využití přístroje DSR umožňují aplikovat celou paletu reologických testů. Proto je možné studovat interakci asfaltového pojiva a její změny v závislostech na proměnlivých vlastnostech výchozího materiálu jako komplexní problém. Byť je tento přístup založen na známé teorii kritického frakčního objemu, vysvětluje ji v novém pohledu na filer a jeho funkci v asfaltové směsi. Teorie byla konstituována v nedávné době pod názvem konceptuální teorie fileru. Základní myšlenky teorie působení filerických materiálů v asfaltové směsi/mastixu a její důsledky jsou vysvětleny v následující kapitole.

Tyto koncepty nejsou v České republice příliš známy a využívány. Introdukci těchto poznatků do praxe se do rukou odborné veřejnosti dostává zcela nový nástroj, který otevírá možnosti studia asfaltových směsí na úrovni mastixové malty a přenosu těchto vlastností na výkonové charakteristiky vyráběných směsí. Jedná se o techniky ke stanovení kritických frakčních objemů a rychlosti změn vlastností při změně koncentrace odrážející vnitřní vlastnosti filerických materiálů. Je třeba mít ale stále na paměti, že se jedná stále o nepříliš rozšířené metody a je nutné na základě rozsáhlejších zkušeností vyhodnotit jejich význam.

Jako nejdůležitější přínos nového přístupu se dá považovat explicitní vyjádření:

- existence limitní hranice koncentrace fileru v asfaltové směsi, od které dochází při zvyšování přídatku fileru k razantnímu nárůstu ztužení,
- možnosti studovat charakter vzájemné interakce mezi jednotlivými zrny fileru,
- možnosti studovat přímou interakci mezi jemnými částicemi a asfaltem (to znamená, že například při změně charakteru asfaltového pojiva vidíme nejen změnu hodnoty reologické veličiny, ale dokážeme zaznamenat fundamentální charakter této změny).

## 4. Hlavní teoretické principy

V rámci metodiky jsou níže použity a vysvětleny pouze základní myšlenky, které stojí v pozadí popisovaných laboratorních technik. Podrobnější teoretické informace a ucelený přehled je možno najít v literárním přehledu (24).

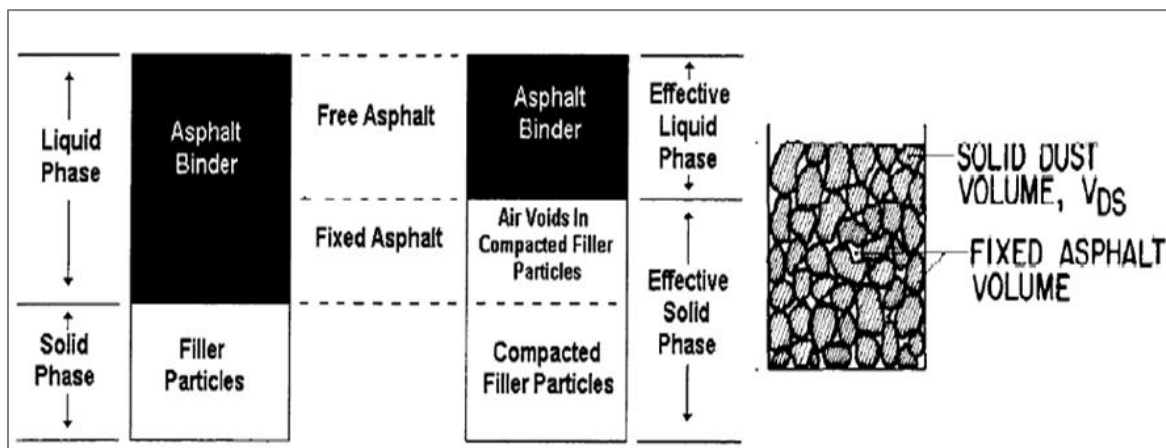
### 4.1. Koncept volného asfaltu

Koncept volného asfaltu zavedl ve své dnes už klasické a stále citované práci (21) Rigden již v roce 1947. Je všeobecně uznávaný, přičemž se na něj doposud odvolávají mnozí současní výzkumníci. V literatuře se objevuje pod názvem „free bitumen concept“ nebo pod původním názvem „fractional voids concept“.

Celá myšlenková konstrukce souvisí s Rigdenovou mezerovitostí neboli maximální zhutnitelnou frakcí  $\Phi_{\max}$ . Při tomto volumetrickém poměru zaujímá filer fixní, dále již nezhutnitelnou strukturu („Rigdenova frakce“), která je vnitřní vlastností fileru a závisí na jeho gradaci, geometrickém tvaru, angularitě apod. Asfalt, který je potřebný k vyplnění volných dutin v takovém zhutněném systému se nazývá „vázaný asfalt“ („fixed asphalt“), zatímco asfalt přidávaný následně po dosažení úplného vyplnění dutin se nazývá volný asfalt („free asphalt“) (viz obrázek 5). Rigden postuloval teorém, že změny ve viskozitě jsou nezávislé na charakteristice asfaltu nebo charakteristice fileru, vyjma hodnoty maximální zhutnitelné frakce. Později se Heukelom (25) rovněž zabýval touto základní myšlenkou a prokázal, že pokud je množství asfaltu menší než je třeba k vyplnění všech mezer a obsazení povrchu všech zrn (včetně dutin a pórů), má výsledný mastix vysokou tuhost, naopak při přebytku asfaltu dostáváme méně ztužené materiály. Vyšší Rigdenova mezerovitost znamená vyšší ztužení mastixu filerem při stejném volumetrickém podílu filerové frakce. Zároveň ztužení bude záviset na objemovém zlomku, který zaujímá filer v mastixu.

Explicitně vyjádřeno, Rigdenova mezerovitost/frakce/objem definuje minimální objemový zlomek, který při stanovené úrovni hutnicí práce je daný typ fileru schopen zaujmout. Tato veličina je řízena mnoha faktory, které vyjadřují charakter a míru interakce mezi jednotlivými

zrny fileru<sup>Pozn.1</sup>. Při zvyšování volumetrického zlomku asfaltového pojiva jsou obsazována zrna a vyplňovány mezery až do okamžiku, kdy určité množství asfaltu přestane být lokalizováno v těchto pozicích a tloušťka asfaltového filmu začíná narůstat, od toho okamžiku hovoříme, že podíl asfaltového pojiva, které způsobuje nárůst asfaltového filmu, se nazývá volný asfalt a tuhost mastixu jím začíná být ovlivněna.



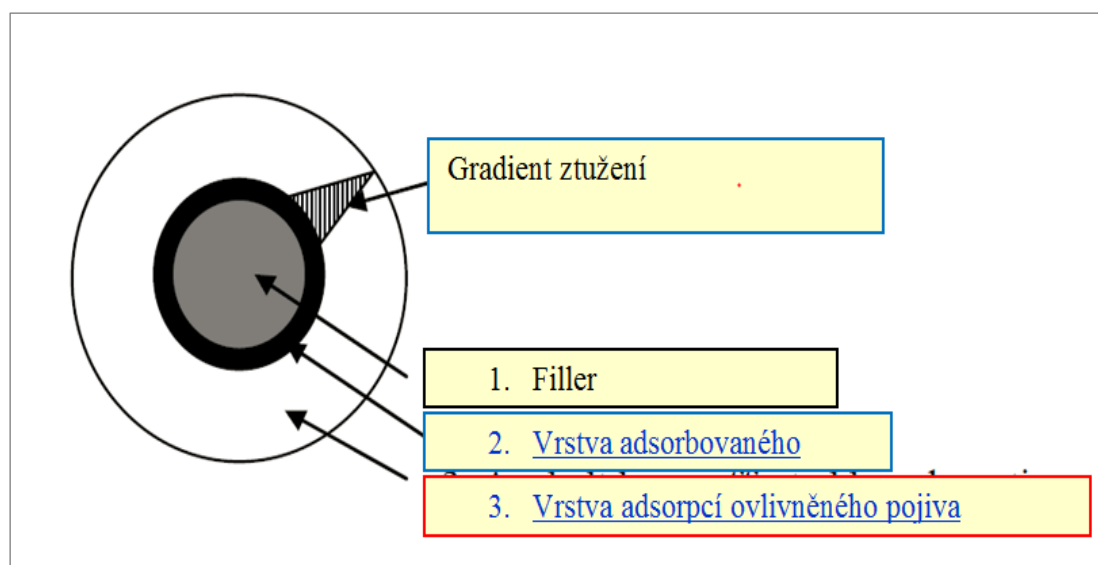
**Obrázek 5:** Schéma Rigdenova konceptu „volného asfaltu“ a „vázaného asfaltu“ v asfaltové směsi (26)

## 4.2. Gradient ztužení – „Gradient of Stiffening“

Další významnou ideou byla myšlenka „Gradient of Stiffening“, kterou navrhl ve své práci Tunnicliff v roce 1962 (27). Zohlednil nejen distribuci velikosti částic, ale „de facto“ i tloušťku asfaltového filmu. Teorie mohla vysvětlit, proč materiály, které tvoří silnější tloušťku asfaltového filmu, mají lepší pojivovou schopnost. Myšlenka je založena na hypotetickém popisu interakce mezi povrchem fileru a kontinuální fází asfaltového pojiva. Přímá interakce se děje na povrchu pevné částice. Zároveň však předpokládá, že i vzdálenější přiléhající asfaltový materiál je touto interakcí ovlivněn, ale tento vliv se vzrůstající vzdáleností od povrchu minerální částice klesá v určitém gradientu. Jak je vidět z diagramu na obrázku 6, rozlišuje se mezi adsorbovaným pojivem na povrchu fileru a pojivem v přechodové mezivrstvě ovlivněným adsorbovanou vrstvou. Tento postulát vysvětluje, proč filery stejné granulometrické distribuce, tvaru a povrchové textury mohou poskytovat odlišnou tuhost mastixové malty, pokud se liší v mineralogii a chemické podstatě. Právě gradient síly interakce se může těmito dvěma faktory lišit, což rezonuje v odlišné vlastnosti. Například v práci od Winniforda (28) je ukázáno, že ošetření fileru nepolární tenkou vrstvou má za

**Pozn.1** Je zřejmé, že vzájemnou interakci zrn ovlivňuje například geometrický tvar částic. Kulovité částice zaujímají zcela jiný prostor v neuspořádaném systému, než neuspořádaný systém destiček. Na uvedeném případě se také jinak projevuje i změna granulometrie. Dalším faktorem je hodnota frikce mezi zrny, popřípadě i elektrostatické repulze či atrakce, tedy jevy determinované spíše petrografickým původem. Rigdenova zkouška je prováděná na suchém fileru. V případě, že systém obsahuje i asfalt, vzrůstá významně i vliv specifického povrchu a pórovitost materiálů, který rozhoduje o vázání asfaltu.

následek redukcí adsorpce asfaltenů a vzrůst viskozity 2 až 100 krát vůči povrchově nemodifikovanému fileru. Ve stejné práci jsou také zmíněny pokusy s chemickým složením asfaltů. Při stoupajícím obsahu asfaltenů v kombinaci s acidním typem fileru viskozita mastixu klesala, ale v kombinaci s bazickým filerem naopak stoupala. Koncept vysvětluje pozitivní vliv hašeného vápna, a proč je vápenný hydrát tak účinný (29), (30)<sup>Pozn.2</sup>. Regresní víceparametrický model vlivu obsahu CaO (spolu s RV a tuhostí pojiva) na moduly tuhosti při nízkých teplotách lze najít v (31). Existuje několik prací, které si všímají vlivu chemické interakce na vlastnosti mastixu (32), (33), (34), (35), (36), přestože chemická interakce není příliš studovaná vlastnost. Každopádně je znám pozitivní vliv hydratovaného vápna na asfaltové směsi.



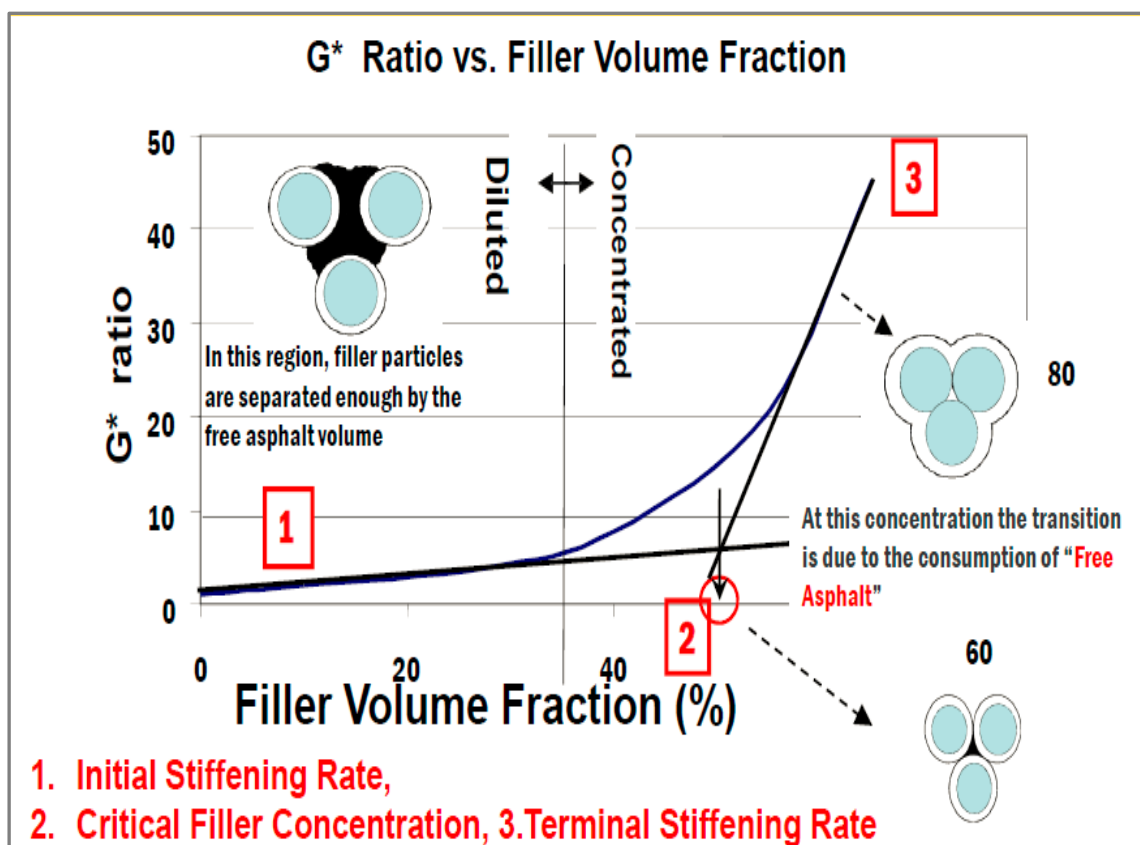
**Obrázek 6:** Schéma konceptu gradientu ztužení, schéma ukazující hypotetickou interakci mezi asfaltovým pojivem a filerem, převzato z (27)

### 4.3. Konceptuální model – „Interagující objem asfaltu“

Na základě analýz různých druhů reologických modelů pro popis kompozitního mastixového systému (37) přišli Faheem a Bahia se zpřesňujícím konceptuálním modelem, který zavádí pojem „Influenced Asphalt Volume“, („interagující/ovlivněný objem asfaltu/pojiva“) a jenž nahrazuje Rigdenův pojem „vázaný asfalt“. Rigden založil svůj přístup na vzrůstu kohezních sil při překročení určité hranice objemu pojiva v mastixu a objemových poměrů při zhutňování suchého fileru. Autoři konceptuálního modelu rozvíjeli Tunnicliffovu myšlenku povrchově interagujícího pojiva, ale uvědomili si její význam pro vysoké objemové koncentrace fileru, kdy většina asfaltového pojiva je vázaná v asfaltovém filmu na povrchu filerových zrn.

<sup>Pozn.2</sup> Jedním z důvodů je i velmi vysoká porozita hydratovaného vápna

Faheem a Bahia zavádí dvě koncentrační zóny – koncentrovanou a zředěnou. Ve zředěné zóně je zřejmé, že mezipovrchovými interakcemi na rozhraní filer/pojivo je ovlivněna menší část pojiva, a proto ztužovací efekt závisí na volumetrické koncentraci fileru, Rigdenově mezerovitosti a maximálním nominálním zrnů fileru. V koncentrované zóně je ztužení závislé na „Interagující objemu asfaltu“, neboli jaký je poměr této části „povrchově spotřebovaného“ asfaltového pojiva k celkovému objemu asfaltového filmu, viz Diagram 7. Schopnost mastixu deformačně odolávat vnesenému napětí je zjevně řízena jeho deformačně nejslabším článkem, tedy objemovou frakcí asfaltového pojiva, které není adsorbováno či chemicky vázáno na povrchu filerových zrn. Pokud začne objemová koncentrace fileru růst, spotřebovává se stále více tohoto nedotčeného pojiva a deformační síly se přesouvají do interfáze filer/pojivo. Následkem je nárůst relativní tuhosti (měřeno vůči čistému výchozímu pojivu). Na určité koncentrační hranici fileru (objemové) se nachází již všechen asfalt ve „stavu ovlivnění“ povrchovými vlastnostmi pevné filerické složky. Tloušťka asfaltového filmu je stejná jako „aktivní zóna“. Tento kritický bod, reprezentující přechod ze zředěné do koncentrované oblasti, můžeme odhadnout z měření závislosti vhodné reologické veličiny na objemové koncentraci fileru.



**Obrázek 7:** Průběh závislosti relativního modulu tuhosti mastixu měřeného v DSR v závislosti na objemové frakci fileru (38), Zóny: 1 – Počáteční ztužovací nárůst, 2 – Kritická koncentrace fileru (vol %), 3 – Závěrečný ztužovací nárůst

## 5. Popis základů metodiky

Podstata metodiky spočívá ve využití základních teoretických principů, které byly popsány v předcházející kapitole, a nalezení použitelných metod, které dokáží s dostatečnou citlivostí vystihovat jednotlivé oblasti chování.

**Nový komplexní popis mastixu je založen na předpokladu, že minerální složky v asfaltové matici při zvyšování jejího obsahu vytváří dvě koncentrační oblasti. V těchto rozdílných zónách se celkové chování kompozitní mastixové malty zásadně liší.** Na základě stanovení reologických vlastností členů vhodně zvolené koncentrační řady dokážeme určit frakční objem fileru, ve kterém k danému zlomu ve vlastnostech dochází. Dvě koncentrační zóny fileru jsou definovány rozdílnou vzájemnou interakcí jednotlivých zrn v mastixové maltě. Přínosem metodiky „METODIKA PRO STANOVENÍ MÍRY INTERAKCE MINERÁLNÍHO FILERU S ASFALTOVÝM POJIVEM A JEHO ZTUŽUJÍCÍCH VLASTNOSTÍ“ je rozpracování možnosti využít co nejjednodušší zkoušky, které je možno provést na dynamickém smykovém reometru (DSR) a zavést je jako deskriptivní zkoušky k všeobecnému použití v praxi silničního stavitelství.

### 5.1. Určení koncentračních oblastí z měření viskozity

Z hlediska reologie se jeví pro určení kritické koncentrace asfaltu jako veličina první volby komplexní smykový modul tuhosti mastixu měřeného na přístroji DSR. Záhy se ale ukázalo, že nalezení koncentračního zlomu pomocí modulu tuhosti je problematické, protože generované křivky z koncentrační řady jsou velmi ploché, tedy vyjádření přechodu z jedné oblasti do druhé je velmi pozvolné, a tudíž ze své podstaty velmi nepřesné<sup>Pozn.3</sup>. Proto Fahhem a Bahía zavedli pro určení kritické koncentrace asfaltu novou techniku DSR zvanou „TACKINESS“, doslova lepidlost, protože její stanovení z komplexního modulu tuhosti je z praktického hlediska nepřesné. Metoda se provádí v DSR při teplotě 37 °C a podrobnosti lze nalézt v (39). Využívá skutečnost, že adheze a koheze je dobře měřitelná míra interakce mezi kapalnou a pevnou fází. V kritické koncentraci začíná koheze v mastixu klesat. Tato technika je pro praktické použití poněkud těžkopádná.

Proto byly hledány jiné reologické veličiny, které mají dobře vyjádřený koncentrační zlom. Na příkladu relativní zdánlivé viskozity je možné objasnit základní konstrukci odvození kritických veličin, které lze z měření koncentračních řad získat.<sup>Pozn.4</sup>

---

**Pozn.3** Hodnota komplexního smykového modulu tuhosti je velmi dobrá veličina pro bodové srovnání tuhosti materiálů, ale nevhodná k extrakci vnitřních závislostí. Přechodová oblast je velice mělká, protože do obou koncentračních oblastí se prolínají stejné vlivy bez převahy jednoho z nich. Zároveň je to nejhůře korelující veličina ve víceparametrických regresních modelech.

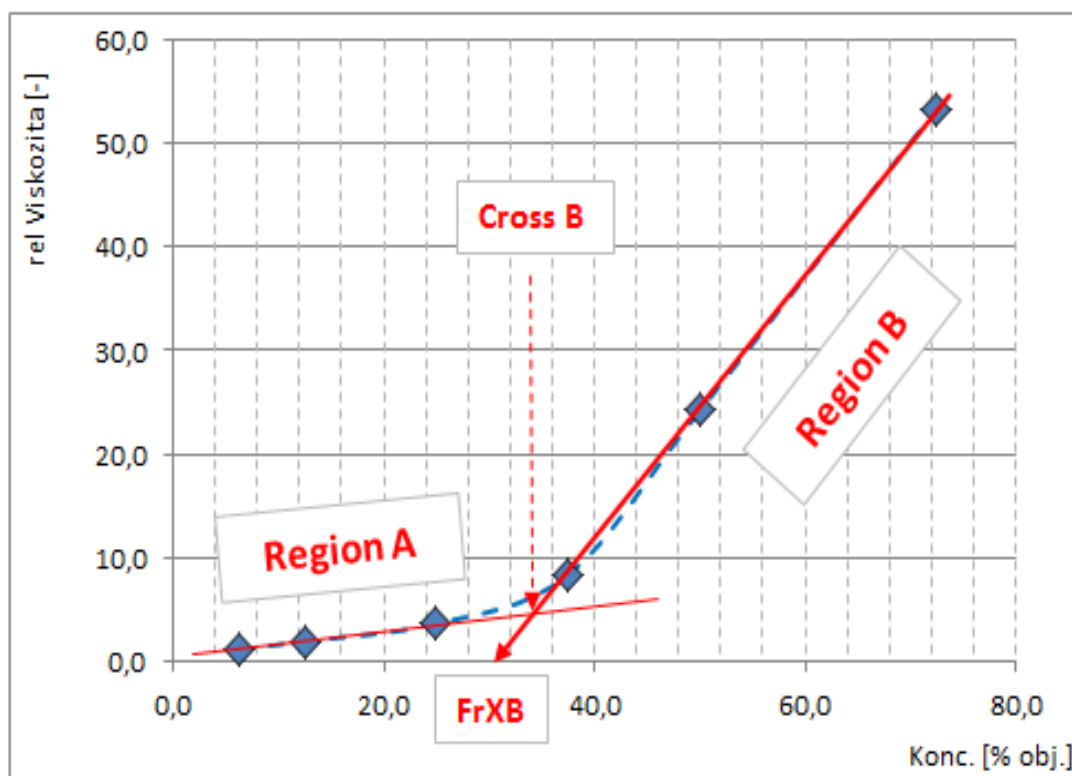
**Pozn.4** Pro suspenzní systémy typu kapalina – pevná látka bylo vytvořeno několik základních modelů, které tyto systémy popisují. Ve všech hraje roli objemová frakce pevné látky. Sofistikovanější varianty pracují s kritickou frakcí. Základní deskriptivní rovnice pro popis suspenzních materiálů jsou uvedeny v Příloze 1.



Jak bylo uvedeno výše, lze na koncentračních řadách demonstrovat dvě oblasti:

- a) **Region A** – oblast vysokého ředění minerální složky, která ovlivňuje vlastnosti pojiva v nejbližším okolí filerických zrn
- b) **Region B** – oblast vysokých koncentrací minerální složky, zvyšující pravděpodobnost kontaktu jednotlivých obalených zrn mezi sebou.

V závislosti na zvoleném škálování určující veličiny dostáváme grafickou lineární změnu hodnot v jednotlivých regionech, která je řízena převládajícím typem interakce jemných částic v mastixu (viz obrázek 8). Počátky projevů těchto interakcí jsou vyjádřeny hodnotou objemového zlomku (koncentrace fileru), kterou můžeme odečíst při extrapolovaném průtnutí lineární závislosti s osou x (vodorovná osa) a rovněž směrnici (úhlem, který extrapolovaná přímka s osou x svírá), **jež je vyjádřením změny v intenzitě převládající interakce při změně koncentrace fileru.**



**Obrázek 8:** Konstrukce frakčních objemů z koncentračních řad: průběh závislosti veličiny relativní zdánlivé viskozity na objemové koncentraci fileru

V případě regionu B, vyjádřeného lineárním škálováním veličiny zdánlivé relativní viskozity, má zjištěný frakční objem význam hypotetického maximálního objemového množství filerových zrn s dostatečnou tloušťkou filmu neovlivněného asfaltového pojiva (volného asfaltu), které určuje vlastnosti mastixu. Od tohoto objemu začíná převládat vzájemné ovlivňování filerických částic mezi sebou a tloušťka asfaltového filmu se obecně začíná

zmenšovat. Proto kritický frakční objem  $FrX_B$  určuje bod, kdy se mění chování reologického parametru (viskozity) a směrnice přímky vycházející z tohoto bodu definuje rychlost změny měřeného parametru v závislosti na změně koncentrace.

Nalezení předělu, a tedy kritického frakčního objemu, je možno konstruovat buď jako průnik dvou extrapolovaných křivek jednotlivých oblastí (Cross B) nebo jako průnik extrapolované křivky regionu B s osou x. Jak bude vysvětleno dále, z hlediska fyzikální interpretace a využití metody pro komplexnější popis mastixové malty je výhodnější používat spíše extrapolaci přímky proložené body v řídicím regionu, který v tomto případě odráží vzájemnou interakci jednotlivých zrn fileru v materiálu.

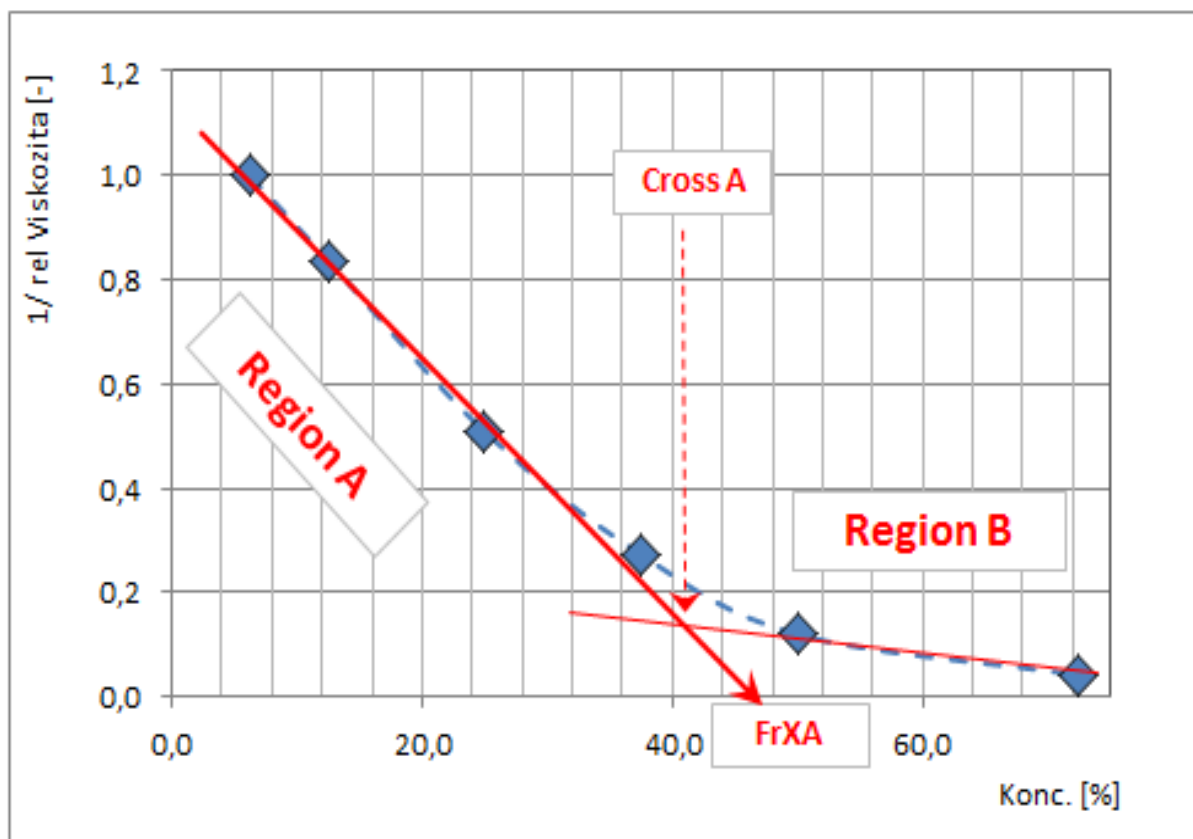
Vyjádřený tvar přechodové oblasti je prostoupen prolínáním vlivů obou oblastí, a proto nemusí být vždy stejný. Rádus, přesah a zalomení přechodového oblouku do jednotlivých regionů závisí na síle interakce, jež může být proměnlivá. Lze se domnívat, že pokud body v krajních polohách nejbližší zlomu neleží v přímce a začínají se odchylovat od přímky, jsou již ovlivněny přesahem z druhého regionu. To platí především pro větev recipročních hodnot zdánlivých viskozit v regionu A. Podle zkušeností odchylky od přímky v regionu B se týkají především krajních koncových bodů, kde se dá předpokládat, že s extrémním snížením tloušťky asfaltového filmu nastupují i jiné typy interakce mezi jednotlivými částicemi.

Chceme-li studovat míru ovlivnění asfaltového pojiva povrchovými a morfologickými vlastnostmi jednotlivých navzájem se neovlivňujících zrn velmi jemných částic, tedy využít Tunnicliffovu myšlenku gradientu ztužení, musíme použít jiný typ škálovací techniky. Tento přístup je známý v reologii v případě, že frakční objemy hrají roli parametru v reologických rovnicích, viz například (40). Pro jejich stanovení se využívá dvouparametrická metoda (41), která vyžaduje logaritmickou nebo reciproční konverzi os diagramu. V tomto případě je tedy měřená reologická veličina na ose y vyjádřena jako reciproční hodnota  $1/Y$ , koncentrační osa x zůstává lineární (viz obrázek 9). Kritický frakční objem  $FrX_A$  pak představuje průnik extrapolované přímky v regionu/oblasti A s osou x.

Fyzikální význam reprezentuje **nejmenší hypotetický objem minerální fáze v asfaltovém pojivu**, který dostaneme při nekonečném zmenšování jednotlivých zrn fileru, kdy bude veškerá objemová fáze pojiva ovlivněna povrchovou interakcí s takto nekonečně zmenšenými jednotlivými částicemi. Poloha kritického frakčního objemu závisí tedy na hloubce ovlivnění asfaltu – tj. gradientu ztužení. Při silné interakci se posouvá hodnota doleva k menším frakčním objemům a naopak <sup>Pozn.5</sup>.

---

**Pozn.5** *Z teoretického hlediska se dá předpokládat, že na rozdíl od regionu B, bude hrát menší roli směrnice této přímky (bude se měnit méně). Naopak významněji se bude ale posouvat po ose X poloha  $FrX_A$ , tedy rozdíly mezi kritickými frakčními objemy budou větší než v oblasti B. Je to z důvodu, že interakce je spíše popsána rozsahem ovlivněné vrstvy než gradientem ztužení, neboť střední průměrná hodnota ovlivnění je zřejmě nezávislá na tloušťce vrstvy.*



**Obrázek 9:** Průběh závislosti reciproční veličiny relativní zdánlivé viskozity na objemové koncentraci fileru

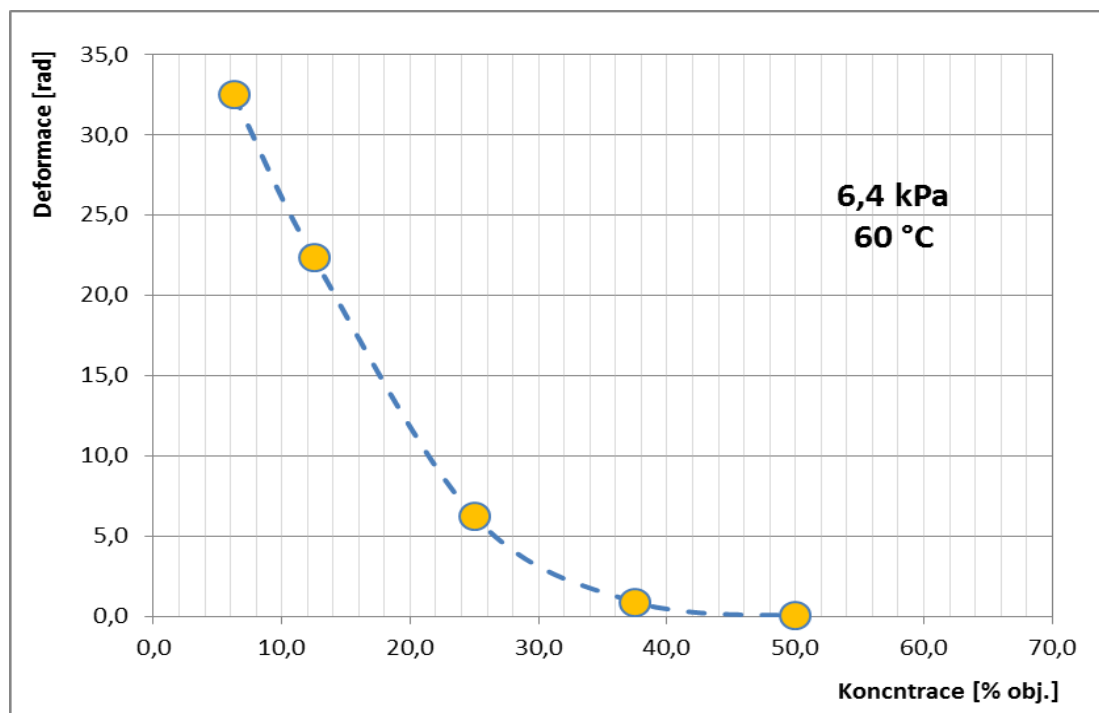
## 5.2. Určení koncentračních oblastí z měření krípevého dotvarování

Zvolené techniky tedy umožňují porovnat vlastnosti asfaltových mastixových materiálů v závislosti na kvalitě jemných částic. Metoda měření zdánlivé viskozity je vhodná především pro posouzení interakce v oblasti A, tedy k vyhodnocení přímého ovlivnění asfaltového pojiva vlastnostmi zkoumaného fileru. Oblast B sice jednoznačně vypovídá o ztužujících vlastnostech fileru a chování mastixu za koncentračním prahem, avšak pro přímé posouzení deformační rezistence v závislosti na vlastnostech použitého fileru je vhodnější aplikovat postupy krípevého smyku. Jednou z mnoha možností je využít metodu MSCRT, která se používá především pro klasifikaci modifikovaných asfaltů z hlediska náchylnosti k trvalé deformaci. Jedná se o zkoušku dotvarování s cyklicky se opakujícími zatěžovacími pulzy.

Princip měření signálních parametrů je identický a odpovídá pouze rozdílu v charakteru měřených veličin oproti viskozitnímu záznamu – výrazně klesá v regionu A, velmi pomalu v regionu B <sup>Pozn.6</sup>. Příklad záznamu měřené deformační odezvy mastixu při měření pulzního dotvarování ve zkoušce MSCRT je uveden na obrázku 10. Hledané frakční objemy jsou v regionu A na rozdíl od viskozitní reprezentace odečteny na základě přímky proložené

**Pozn.6** Při viskozitní konfiguraci hodnoty měřené veličiny (viskozity) v regionu A mírně stoupají, v regionu B stoupají rychle. Princip konstrukce a odečet jednotlivých parametrů zůstává zachován.

v lineárních souřadnicích měřených hodnot, v regionu B pak na základě přímky proložené v recipročních souřadnicích osy Y.

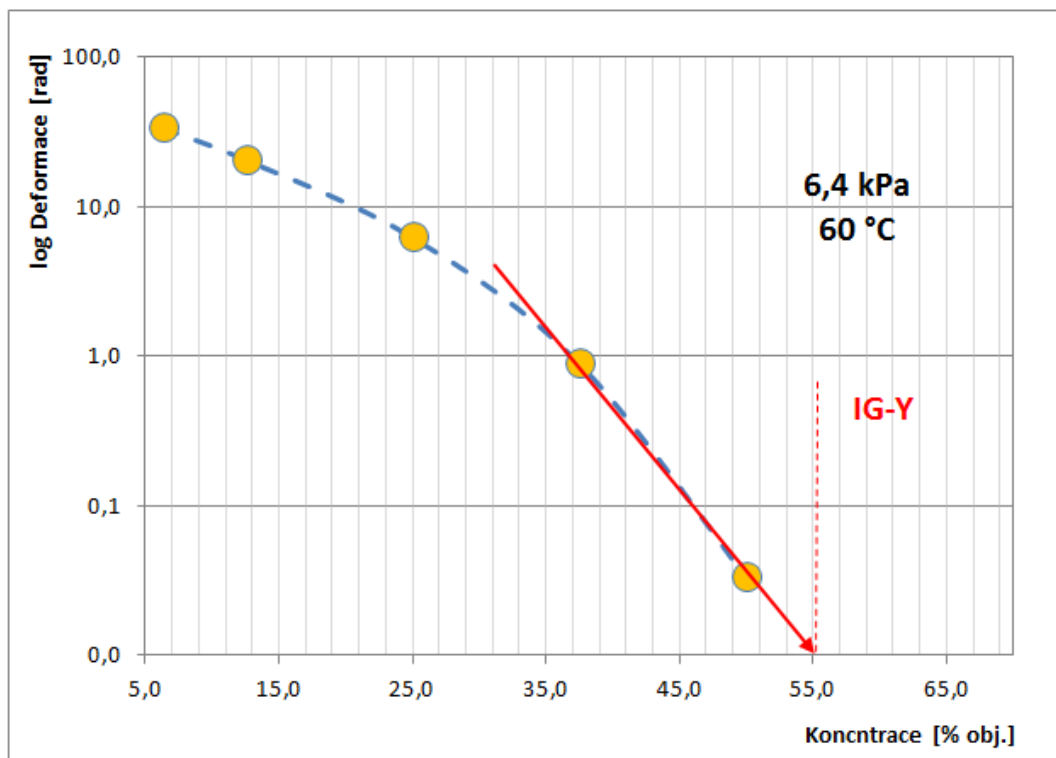


**Obrázek 10:** Průběh závislosti deformační odezvy mastixové malty vyjádřené koncovou polohou měřící geometrie pro zkoušku dotvarování v konfiguraci testu MSCR

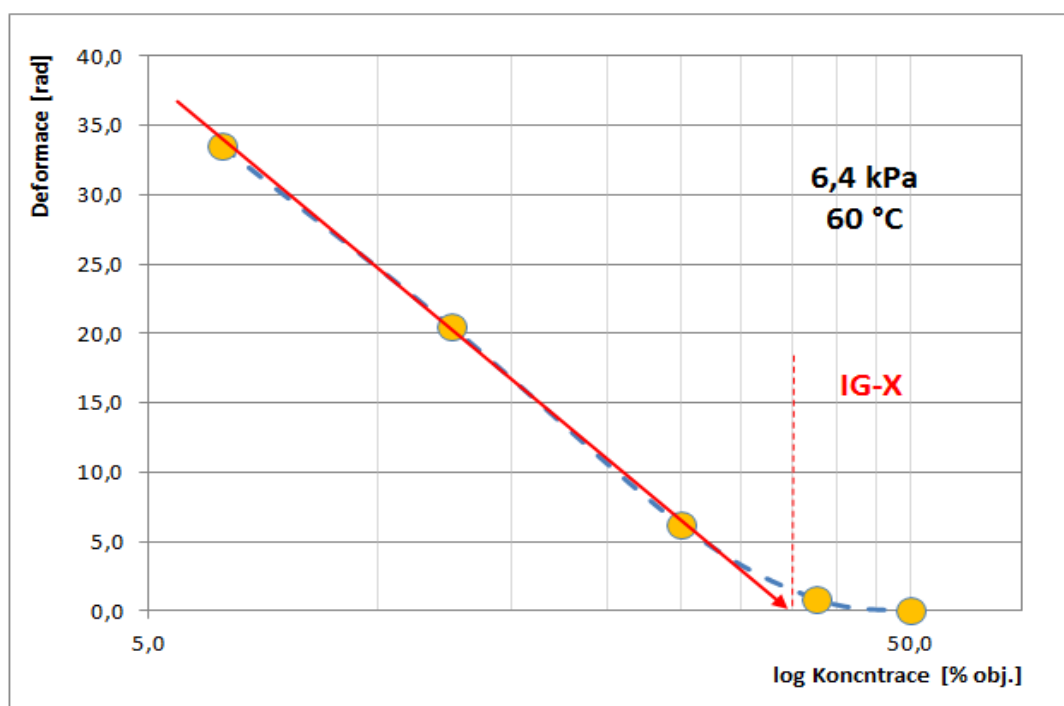
Použití metody MSCRT reflektuje jiné podmínky měření. Viskozitní reologická reprezentace mastixu je založena na co nejvíce rovnovážném stavu na základě smykového přizpůsobení a v rámci možností dosažení maximálního lamelového toku po poměrně dlouhé době stabilizace za konstantní smykové rychlosti (zkouška řízená pretvořením). Na rozdíl od viskozity odráží konfigurace zkoušky MSCRT nativní stav filerového mastixu tak, jak se nachází v asfaltové směsi<sup>Pozn.7</sup>. Poměrně omezený počet pulzů sice způsobuje taktéž tokové přizpůsobení, ale zkouška je v tomto případě řízena vloženým napětím a vyvolaná deformační odezva je naopak měřenou veličinou. Proto mohou mít křivky a přechodové oblasti mírně jinou tvarovou morfologii.

**Pozn.7** Jako příklad počátečního ovlivnění měření morfologií částic může být uveden velmi výrazný vliv orientace destičkových těles ve směru smyku. Tento jev je patrný především v přítomnosti slídy. Rovněž některé minerály jsou náchylné k různým asociacím filerických částic, vytváření klastrů a podobně. Tyto struktury mohou ovlivnit míru ztužení a další reologické parametry zejména při nedokonalém míšení při přípravě vzorku. Obecně lze říci, že přizpůsobení geometrického tvaru částic smykovým silám se projevuje počátečním poklesem měřené viskozity. Naopak rozrušení asociace částic v mastixu se může projevovat nárůstem viskozity na počátku měření. Tyto efekty nejsou při použití techniky cyklického krípkového zatěžování zcela kompenzovány, ale naproti tomu lépe odpovídají poměrům ve skutečné funkční vozovce.

Důsledkem skutečností popsaných v předchozím odstavci je, že v některých případech se jeví výhodněji použití logaritmického škálování řídicí osy (viz obrázky 11 a 12). Je třeba ovšem mít na paměti, že se tím posouvá poloha průmětu křivek s projekční osou grafu, takže z pohledu absolutních hodnot docházíme k zcela jiným výsledkům.



**Obrázek 11:** Stanovení frakčního objemu IG-Y pomocí logaritmického škálování osy Y



**Obrázek 12:** Stanovení frakčního objemu IG-X pomocí logaritmického škálování osy X

Graficky znázorněné možnosti pro výpočet typů frakčních objemů při použití konfigurace MSCRT je uvedeno v příloze 3. Jejich využití pak v následující kapitole. Ukázka příkladové studie metodologicky využívající uvedených technik při studiu vlivu visbreakingového asfaltu na vlastnosti mastixové malty je uvedeno v následujících kapitolách.

## 6. Technické podmínky měření a interpretace výsledků

### 6.1. Obecné zásady vzorkování a měření

V předchozích kapitolách bylo popsáno teoretické zdůvodnění a konstrukce základních parametrů užitých k unikátnímu popisu mastixového systému. Z praktického hlediska je metoda založena na měření reologických vlastností jednotlivých bodů koncentračních řad, vzniklých zvyšováním obsahu filerické složky mastixu tak, aby byla pokryta celá oblast s přiměřenými a měřitelnými vlastnostmi mastixu. Zvolené body koncentrační řady jsou arbitrární a jejich poloha by měla zajišťovat dostatečnou přesnost regresních přímk v obou oblastech. Při práci na metodice byly zvoleny násobky výchozí koncentrace uvedené v tabulce 2, přičemž poslední koncentrace se využívala pouze u materiálů s nejnižším ztužujícím efektem v mastixové maltě. Je zřejmé, že vnášené obsahy obou komponent musejí být přepočítány na objemové zlomky, tedy je nutné znát objemové hmotnosti výchozích materiálů. Jedině tento postup zajišťuje normalizované podmínky pro měření změny vlastností.

**Tabulka 2:** Referenční body koncentračních řad fileru

Koncentrační řady mastixu – objemový podíl filerové složky k celkovému objemu mastixu						
Objem [% <sub>vol</sub> ]	6,25	12,5	25,0	37,5	50,0	62,5
Označení	E%.vol	D%.vol	C%.vol	B%.vol	A%.vol	00%.vol

#### 6.1.1. Velikost částic ve vzorku mastixu

Uvedené postupy jsou univerzální a závisí na vlastnostech jednotlivých složek mastixu. V současném stavu vývoje není brán zřetel na granulometrii vzorku, byť je to významný faktor, který rozhoduje o celkovém ztužení mastixu. Separace vlivu čáry zrnitosti fileru se provádí technikami, které nejsou předmětem tohoto dokumentu. Při zkouškách se pouze předpokládá, že filerové materiály byly omezeny nuceným (vzduch, mechanickým pohybem štětce) prositím kalibrovaným sítem s nominální velikostí ok do 0,063 mm. Při dodržení postupu (míra intenzity nuceného průchodu zrn) dostáváme podle zkušeností více či méně

podobné distribuce zrnitosti. Porovnáním řezů materiálu  $\langle 0,000/0,063 \text{ mm} \rangle$  a  $\langle 0,063/0,125 \text{ mm} \rangle$  lze dojít k závěru, že mezi vlastnostmi těchto dvou řezů existuje povětšinou vztah přímé úměry, viz (42). Z hlediska přípravy vzorku je rozhodující velikost částic, podle které je nutno řídit rozmezí vzdálenosti mezi horní a spodní částí měřicí geometrie. **Granulometrie ovlivňuje i kvalitu laminárního toku, který rozhoduje o kolísání okamžitých hodnot, dosažení rovnoměrného smyku (steady flow) a podílu náhodného turbulentního toku.** To platí především u měření založených na snímání viskozity. Vždy je třeba tyto efekty brát při interpretaci měření do úvahy, protože jejich projevy mohou být reprezentovány odklonem naměřených hodnot od obecné tendence změny vlastností.

### 6.1.2. Příprava vzorku

Vzorky mastixu se připravují ručním mícháním podle postupu uvedeného v normě ČSN EN 13179-1 (13). Z hlediska zabránění nadměrné oxidaci asfaltového pojiva je třeba dodržovat uvedené časy (použít stopky) a teplotu snímat kontinuálně vpichových digitálním teploměrem. Míchací tyčinka o průměru 8 mm by měla být vyrobena ze skla, na dolním konci zahnutá se zploštěním. Vzorky pro dynamický smykový reometr se zásadně nepřelévají nadměrným množstvím mastixu. Popřípadě se okamžitě po nalití seříznou nahřátým nožem na požadovanou výšku.

Měření reologických parametrů na připravených odlitých discích se provádí v souladu s normou ČSN EN 14770 (43). Připravené vzorky mastixu v silikonových formách by se měly zpracovat do 24 hodin od vzorkování (platí především pro nižší koncentrace fileru).

**Zároveň mastix představuje heterogenní suspenzní systém, jenž je velmi citlivý na manipulaci zejména za vyšších teplot, kdy klesá jeho viskozita. Podle dosavadních zkušeností je příčinou segregace fileru v pojivu při vkládání mezi geometrie reometru, která může vést k odlehkým výsledkům a snížení opakovatelnosti či reprodukovatelnosti.** Vrchní část vzorku je totiž ochuzena o filerovou fázi, která se hromadí v jeho spodní části. Výsledkem jsou dvě rozdílné viskozitní zóny (systém se chová, jako by se měřil méně viskózní materiál na menší štěrbině). Proto při adjustaci odlitého disku hrají roli teplotní a časová hlediska operace. Především roztečení vzorku výrazně deformuje výsledné hodnoty. Je proto nutné optimalizovat postup umístění materiálu do reometru, ověřit opakovatelnost a reprodukovatelnost výsledků (včetně vlivu šířky zkušební štěrbině mezi měřicími geometriemi). Cílem by mělo být vytvoření laboratorní rutiny, která v maximální míře omezí tyto nežádoucí segregační efekty a vede ke spolehlivým výsledkům.

### 6.1.3. Vyjadřování výsledků

**Měřené reologické výsledky se vyjadřují v relativních jednotkách, které zajišťují, že jednotlivá měření jsou navzájem srovnatelná.** Relativní jednotky představují poměr mezi hodnotou sledované/měřené reologické vlastnosti mastixu k hodnotě stejné veličiny

použitého výchozího pojiva<sup>Pozn.8</sup>. Postup umožňuje srovnávat výsledky, které jsou očištěny od vlivu vlastností pojiva, jako je odlišná počáteční viskozita a podobně. Rovněž je potlačen vliv termooxidačního zatížení výchozího asfaltového pojiva při jeho opakovaném rozehtívání atd.

## 6.2. Měření viskozity a interpretace výsledků

Viskozitní měření se jeví jako nejpříznivější metoda z hlediska nejvyšší citlivosti na změny v systému.

Problémy ovšem působí skutečnost, že se mastixy s vyšší koncentrací fileru velmi obtížně měří v systému deska – kužel kvůli potenciálním větším zrnům. Proto v případě koncentračních řad byla použita geometrie deska – deska podle přílohy B, ČSN 65 7222-3 (44), která ale nezaručuje unifikovanou smykovou rychlost v celém objemu vzorku. Proto u rozdílně pseudoplastických vzorků může být do výsledků zanesena a priori mírná chyba měření. **Z tohoto důvodu můžeme naměřená data považovat pouze za ZDÁNLIVOU VISKOZITU, která se dá ovšem považovat za dostatečně přesnou veličinu pro posouzení ztužující vlastností fileru a popisu jejich rozdílných vlastností. U měření suspenzních materiálů způsobují mnohem větší problémy projevy turbulentního toku vyvolané přítomností pevných částic v suspenzním/kompozitním systému. Pro přesnější data je nutné použít jiné techniky, výrazně snížit referenční teplotu měření a hodnoty smykových rychlostí posunout co nejnižší.** Přesto kodifikace postupů s využitím dynamického smykového reometru je vzhledem k jejich jednoduchosti a proveditelnosti cenná pro využití ke studiu filerických materiálů a mastixů.

### Nastavení – okrajové podmínky

Jak bylo zdůrazněno výše, měření viskozity je deformační/reologická zkouška řízená přetvořením. Během zjišťování vlastností vzorku v dynamickém smykovém reometru dochází k tokovému přizpůsobení částic. Veškerá data se získávají při **smykové rychlosti  $2 \text{ s}^{-1}$** , která se zdá být dostatečně nízkou. Optimalizace na hodnotu smykové rychlosti nebyla provedena a může být změněna na základě zkušeností získaných při používání metody. Viskozitní data v referenční teplotě  $135 \text{ }^\circ\text{C}$  byla odečtena z měření teplotní rampy v rozmezí teplot  $145 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $115 \text{ }^\circ\text{C}$  a gradientu  $0,6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , protože vzorek může být při smykovém namáhání ve vyšší teplotě lépe tokově konsolidován. K cílové hodnotě se proto přibližujeme z vyšších teplot, za kterých probíhá konsolidace. To je cenné především při stoupající koncentraci fileru, přičemž se snižováním podílu asfaltové fáze klesá koheze, tedy míra vnitřní soudržnosti. Dosažení kritické koheze při dlouhodobém deformačním zatížení se projeví usmýknutím vzorku a jeho porušením v paralelní rovině. Proto některé velmi aktivní filery nejsou ve vyšších

---

**Pozn.8** Veličiny vyjádřené pomocí hodnot ve formě poměrů vůči standardu připojují adjektivum „specifické“. Základním rysem je, že jsou bezrozměrné. Proto například veličina specifická objemová hmotnost nemá jednotku. Z tohoto důvodu můžeme použít v případě viskozity místo slova relativní i sousloví poměrná viskozita.



koncentracích fileru měřitelné. Vizuální vzor průběhu křivek viskozity zůstává zachován, ale posouvá se na ose doleva. V důsledku kolísání okamžité viskozity jako projevu turbulentního toku je třeba zahrnout do průměru dostatečné množství dat (akvizice jednotlivých bodů měření po 1 s). Zdá se, že stejné výsledky lze dosáhnout z dostatečně konsolidovaného bodového měření. Opakovatelnost měření je velmi dobrá. Velikost štěrbin mezi horní a dolní geometrií je nutné nastavit na 1,0 mm nebo 1,5 mm.

### Deskriptivní kritické veličiny

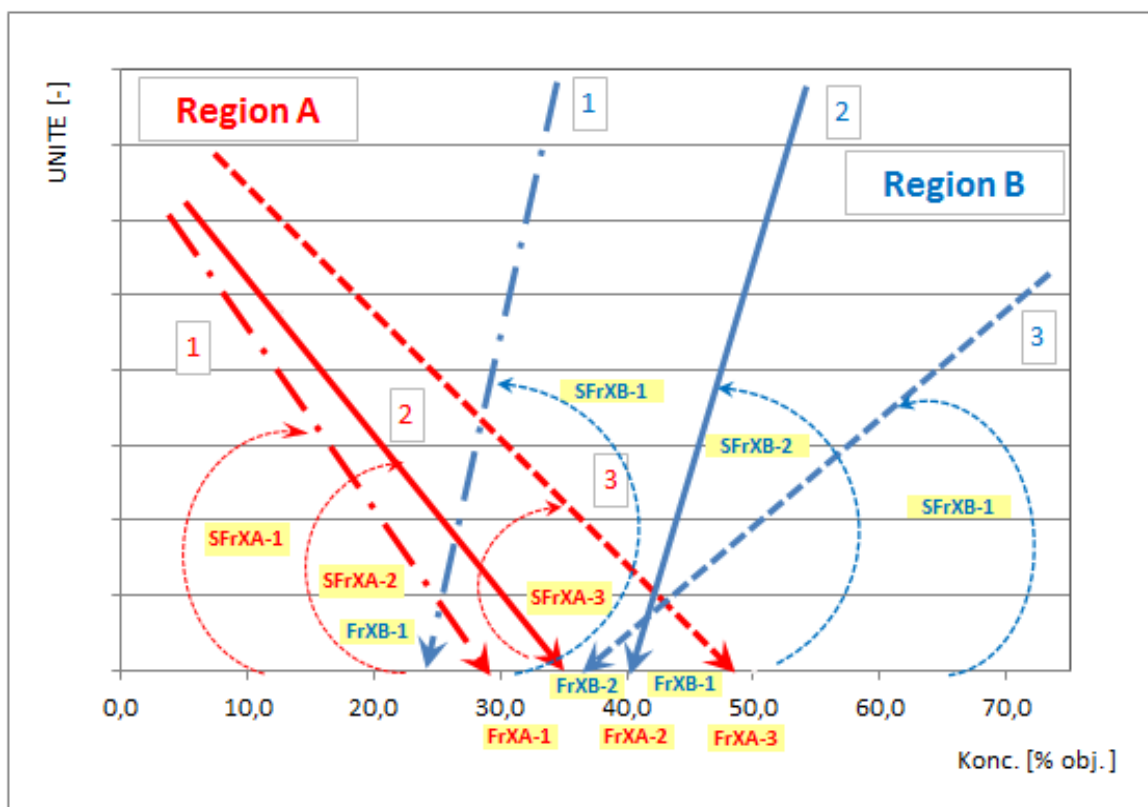
Konstrukce základních deskriptivních veličin ve formě kritických frakčních objemů je popsána v kapitole 5.1 „Určení koncentračních oblastí z měření viskozity“. V ní uvedené diagramy graficky vizualizují princip založený na dvou různých koncentračních oblastech, které se škálují rozdílně s projekcí výsledných přímk na osu X. Uvedené veličiny spojené s jednotlivými oblastmi popisují různé druhy interakce a jsou uvedeny v tabulce 3. Parametr Cross A a Cross B má menší vypovídající hodnotu, proto byl opominut.

Naproti tomu se ukazuje užitečné zavést kompozitní modifikovaný parametr SFrX<sub>A</sub>, SFrX<sub>B</sub>, který zohledňuje i rychlost změny sledované veličiny v dané oblasti. Jedná se o korekci FrX<sub>A</sub>, FrX<sub>B</sub> podílem hodnoty směrnice řídící přímky. Upravený deskriptivní parametr má označení SFrX<sub>A</sub>, SFrX<sub>B</sub>. Jeho výhodou je obsah sdružené informace, kdy jednou číselnou hodnotou dokážeme popsat chování vlivu fileru na ztužení mastixové malty ve všech koncentračních bodech. Kvůli přehlednosti je SFrX<sub>A</sub> matematicky převedeno na celé kladné číslo. Příklad rozdílů v kritických frakčních hodnotách vizualizovaný v grafické formě je uveden na obrázku 13.

**Tabulka 3:** Základní deskriptivní veličiny konstruované viskozitním snímkováním

Název	Konstrukce	Popis
<b>FrX<sub>A</sub></b>	průnik přímky $1/\eta_{rel}$ s osou X	frakční objem minerální fáze z regionu A při recipročním škálování
<b>FrX<sub>B</sub></b>	Průnik přímky $\eta_{rel}$ s osou X	frakční objem minerální fáze z regionu B při lineárním škálování
<b>SFR<sub>A</sub></b>	$SFrX_A = FrX_A/S * C$ *)	Korigovaný FrX <sub>A</sub> podílem směrnice A z rovnice přímky při projekci na osu X
<b>SFR<sub>B</sub></b>	$SFrX_B = FrX_B/S * C$ **)	Korigovaný FrX <sub>B</sub> podílem směrnice A z rovnice přímky při projekci na osu X
<b>Cross A</b>	Průnik lineárních větví $1/\eta_{rel}$ s váhou v regionu A	frakční objem minerální fáze z obou větví při recipročním škálování
<b>Cross B</b>	Průnik lineárních větví $\eta_{rel}$ s váhou v regionu B	frakční objem minerální fáze z obou větví při lineárním škálování

\*)  $Y_{vis,rel} = S \cdot X_{konc} + P$ , C – konstanta, matematicky upraveno na hodnoty vyjádřené celým desítkovým kladným číslem



**Obrázek 13:** Schématické zobrazení jednotlivých deskriptivních parametrů konstruovaných na základě viskozitního snímku koncentrační řady naměřeného na třech různých druzích fileru

Obecně měření zdánlivé viskozity jako míry ztužujících vlastností fileru zachycuje především vliv minerální složky na pojivo (region A), zároveň se tak děje při mnohem vyšších teplotách než jsou servisní teploty, kterým jsou vystaveny asfaltové směsi na vozovce. Teploty odpovídají svým oborem spíše procesu výroby, hutnění a pokládky, a proto chování mastixu vyjádřené zdánlivou viskozitou nesou v sobě cenné reologické informace právě při studiu chování asfaltových směsí během těchto výrobních stupňů. Příklady využití a interpretace výsledků na zkušebním souboru vzorků zabývajícím se vlivem slídy je uveden v kapitole 7.1.

### 6.3. Provedení MSCRT a interpretace výsledků

Viskozitní snímek mastixu a jeho koncentrační reologické závislosti odráží velice dobře míru přímé interakce fileru s asfaltovým pojivem. Pro popis konečných projevů ztužujících vlastností fileru předávaných mastixu se více hodí krípkové testy prováděné při středních servisních teplotách, kterým je ve vozovce vystavena hutněná asfaltová směs. Teplotní obor v rozmezí 40 – 70 °C představuje kritickou teplotu pro tvorbu plastických deformací na asfaltovém souvrství. Z tohoto důvodu byla adaptovaná technika MSCRT používaná pro hodnocení výkonnosti modifikovaných pojiv. Jako v případě viskozity můžeme najít několik faktorů, které jsou při použití této techniky odlišné. Zkouška MSCRT podle ČSN EN 16659 (1)

je založena na opakujícím se zatížení vzorku v sekvenci 10 konsektivních cyklů. Každý cyklus se skládá z 1 sekundového zatížení zvoleným smykovým napětím a 9 sekundové klidové fáze. Uvedený postup se opakuje na dvou hladinách smykového napětí.

V kapitole 5.2. „Určení koncentračních oblastí z měření kríповého dotvarování“ bylo vysvětleno, že měříme především nekonsolidovaný vzorek, ve kterém mohou hrát roli asociace a neukončené tokové přizpůsobení částic. Na druhou stranu se ale mnohem více blížíme k podmínkám, které panují ve skutečné vozovce. Pravděpodobně používání takto konfigurované kríповé techniky přinese v případě potřeby adjustaci počtu cyklů a upravení procesů prekondicionace vzorku. Tato skutečnost nehraje v současném stavu proliferace metody roli.

### 6.3.1. Vyjádření výsledků

Základní myšlenka popisu, na kterém je kvantifikace vlastností založena, zůstává i v případě konfigurace MSCRT stejná. Je nutné nalézt dobře vyjádřený předěl mezi dvěma koncentračními oblastmi a konstruovat řídicí přímky a jejich projekci na osu X, které definují kritické frakční objemy. Přechodová oblast není ovšem v případě krípů tak dobře vyjádřena jako u měření viskozity a je rovněž pozvolnější popřípadě mírně širší. Jak bylo popsáno v předchozích kapitolách, je někdy vhodné použití logaritmického měřítka pro nalezení kritických parametrů.

Měřenou jednotkou zkoušky MSCRT je nevratná smyková poddajnost<sup>Pozn.9</sup> vyjádřená v jednotkách  $\text{kPa}^{-1}$  odrážející fakt, že naměřená deformační odezva (bezrozměrné přetvoření) měřeného vzorku je korigována na hodnotu vneseného napětí nebo hodnota absolutní deformace znamenající polohu zatěžovací geometrie. Výsledky se vyjadřují jako kumulovaná veličina po posledním cyklu dané sekvence na použité hladině smykového napětí v relativních jednotkách<sup>Pozn.10</sup> nevratné smykové poddajnosti nebo absolutní deformace.

### 6.3.2. Nastavení – okrajové podmínky zkoušky

Především je nutno zdůraznit, že kríповá zkouška MSCRT představuje napětově řízenou zkoušku. Tato skutečnost může hrát roli při měření velmi měkkých vzorků a při měření výchozího asfaltového pojiva. V těchto případech se může projevit setrvačnost hmoty měřící geometrie, v extrémním případě vzorek čistého pojiva neklade dostatečný odpor a dojde k nekontrolovatelné rotaci měřící geometrie. V takovém případě je nutné snížit referenční

---

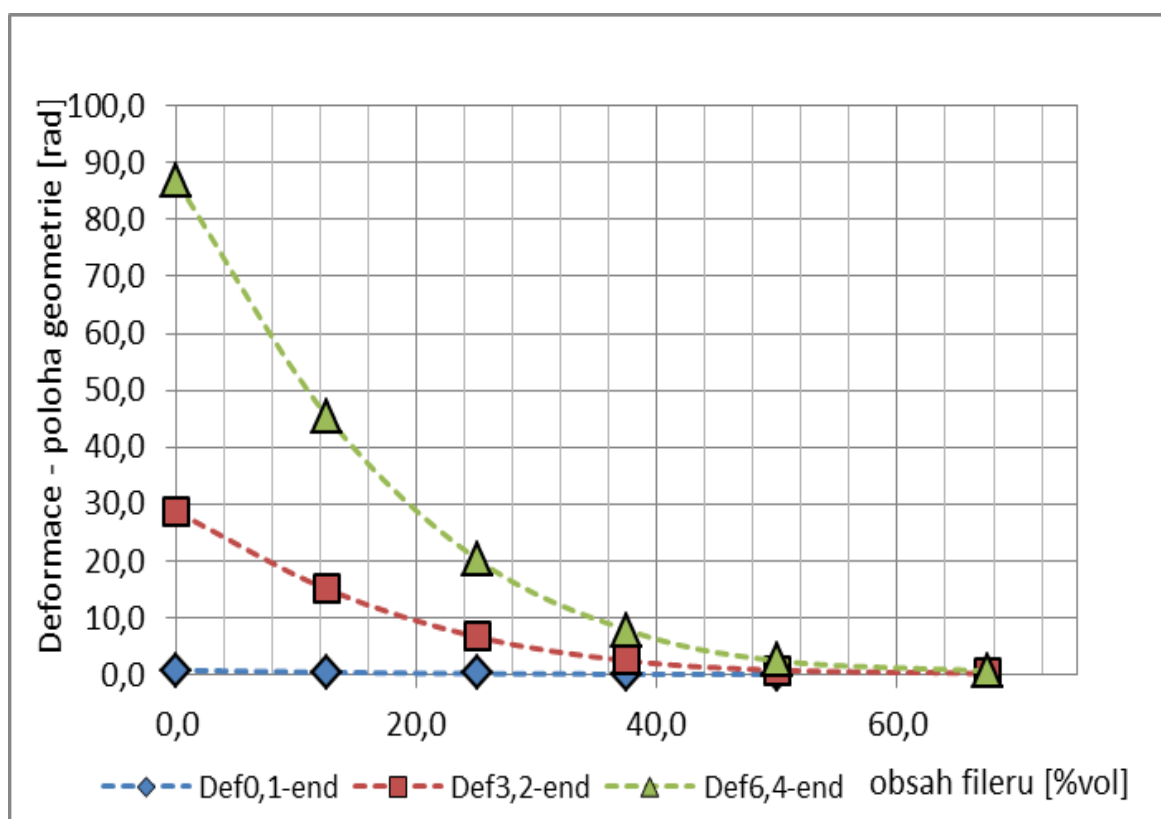
**Pozn.9** *Non-recoverable creep compliance Jnr, v případě mastixů, kdy je elastická složka velmi malá je možné hovořit jen o smykové poddajnosti*

**Pozn.10** *Vzhledem k tomu, že se pracuje pouze s jedním pojivem, a sofistikovaný reometr zajišťoval jednoznačné a přesné dosažení přednastavené hodnoty napětí, jsou demonstrační případy uváděny v jednotkách rad (radián), které jsou absolutním vyjádřením polohy horní měřící geometrie nezávislé na jejím průměru. Přesto pro praktické použití je poměrné vyjádření hodnot vůči výchozímu čistému asfaltovému pojivu žádoucí.*

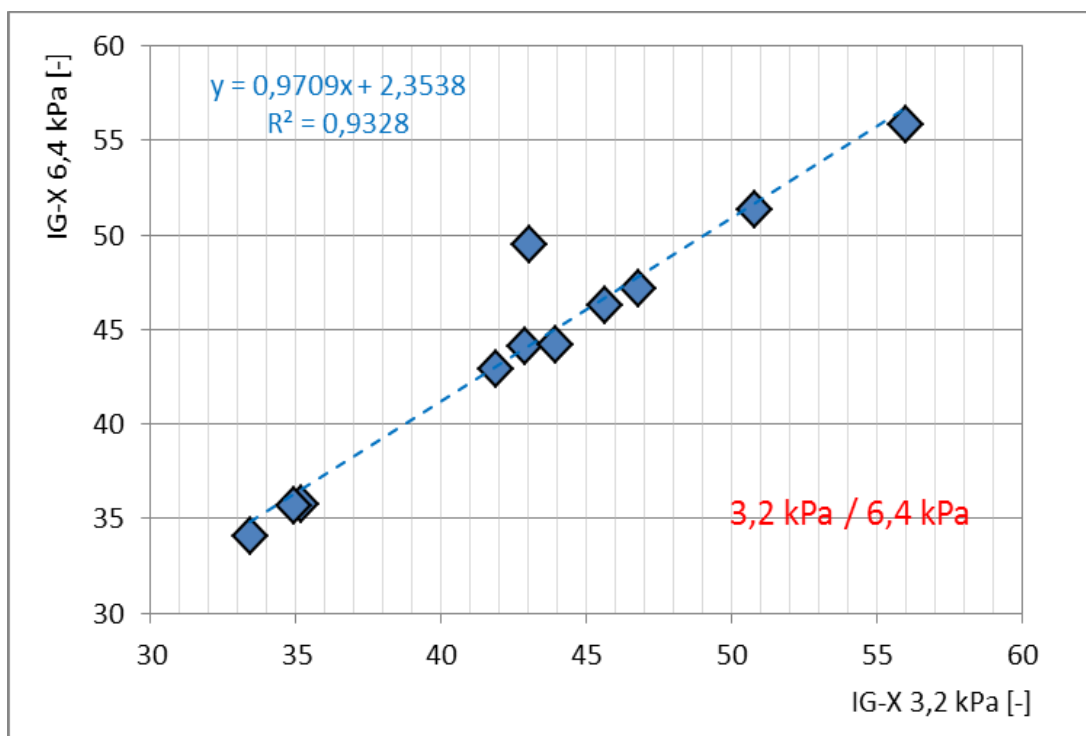
teplotu měření. Všechny výsledky naměřené na mastixových materiálech a uvedené v této metodice byly získány při teplotě 60 °C.

Příprava vzorku a jeho vložení do reometru se jeví jako klíčové pro reprodukovatelnost výsledků. **Velmi důležité je dodržovat zásadu, že teplota stlačení vzorku musí být přiměřená tuhosti a vzorek musí zachovávat polotuhou konzistenci – nesmí dojít k jeho roztečení.** Stlačení příliš tuhého vzorku v něm vyvolává dodatečné vnesené napětí, které může negativně ovlivnit přesnost naměřených hodnot deformace.

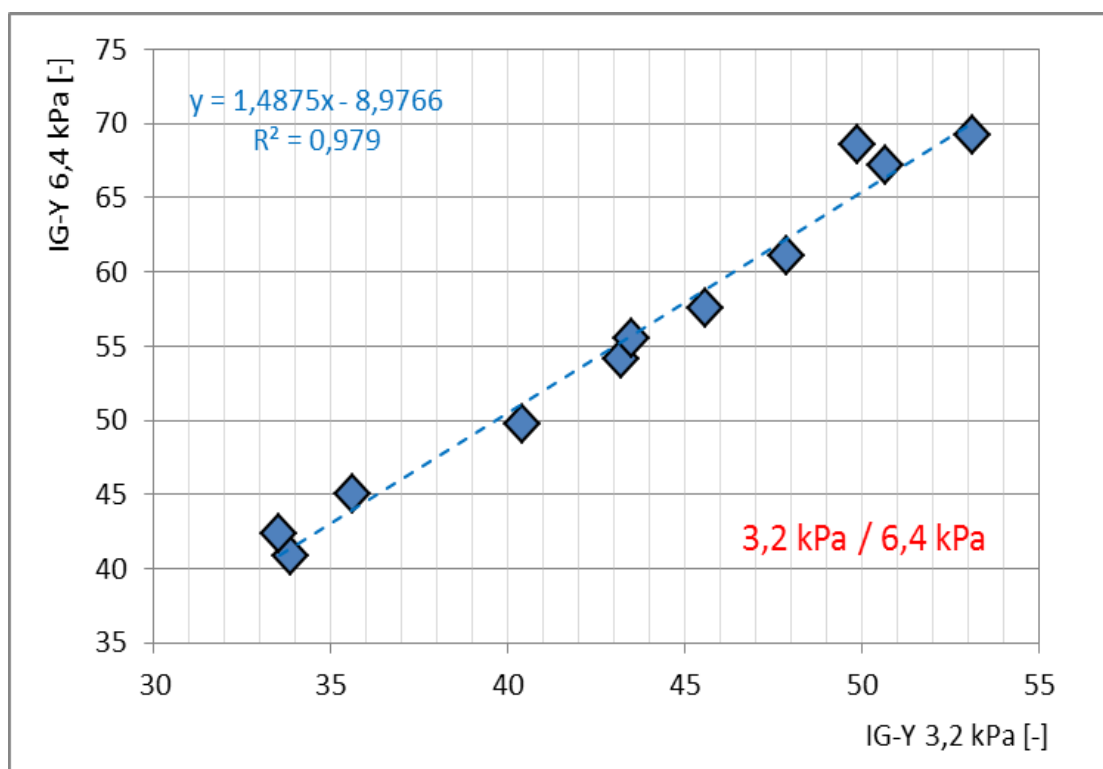
Zkouška MSCRT je pro asfaltová pojiva nastavena tak, že vzorek je zatěžován mimo lineárně viskoelastickou oblast a bylo možné zjistit projevy nevratného viskozitního přizpůsobení. V takovém případě se zatěžovací pulzní smykové napětí nastavuje na 0,1 kPa a 3,2 kPa. Z hlediska posouzení ztužujících vlastností fileru, které se měří na koncentračních řadách, by byly vyvolané deformace při vyšších koncentracích u některých filerů příliš nízké. Proto bylo nutné do měřících sekvencí zavést ještě jednu úroveň smykového napětí na hladině 6,4 kPa (příliš vysoké napětí by znemožňovalo měření čistých výchozích asfaltových pojiv). To umožní lépe diferenciovat jednotlivé druhy fileru. Záznam poměrů deformační odezvy pro jednotlivé úrovně zatížení je uveden na obrázku 14.



**Obrázek 14:** Vztah vložného smykového napětí a deformační odezvy jednotlivých koncentračních bodů obsahu fileru v mastixu, měřeno při teplotě 60 °C



**Obrázek 15:** Vztah mezi kritickými frakčními veličinami IG-X získanými v různých úrovních smykového napětí



**Obrázek 16:** Vztah mezi kritickými frakčními veličinami IG-Y získanými v různých úrovních smykového napětí

Zvyšováním aplikovaného smykového napětí se dostáváme výrazněji mimo lineárně viskoelastickou oblast s vyšším podílem viskozitního tokového přizpůsobení, ale na stanovení hodnoty kritických frakčních veličin by tato skutečnost neměla mít vliv. Z analýzy

naměřených dat vyplývá, že rozdíly stanovené pro jednotlivé veličiny při jednotlivých napětích 3,2 kPa a 6,4 kPa jsou přibližně stejné. To je vidět z diagramu na obrázku 15 pro veličinu IG-X, obdobná souvztažnost platí i pro IG-Y, viz obrázek 16. Napětí 0,1 kPa je považováno spíše za adjustaci vzorku.

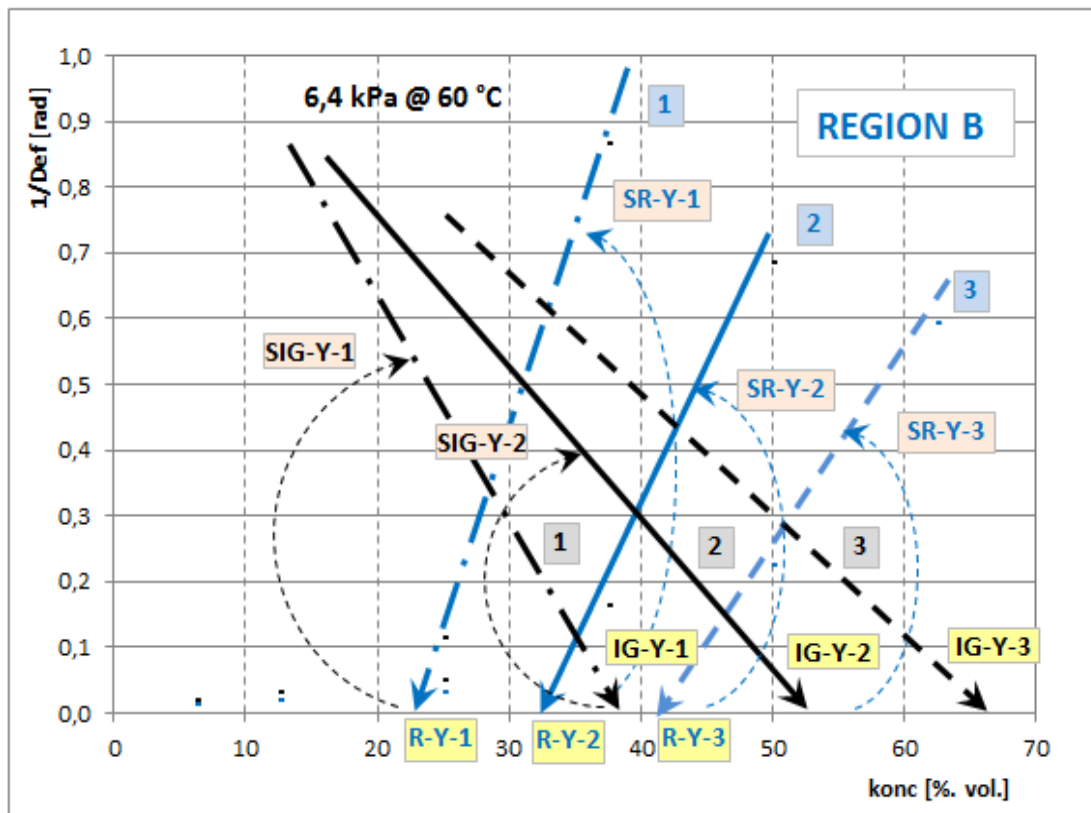
### Deskriptivní veličiny

Konstrukce základních deskriptivních veličin ve formě kritických frakčních veličin je popsána v kapitole 5.2. „Určení koncentračních oblastí z měření kríповého dotvarování“, opět s vizualizací pomocí diagramů souhrnně uvedených v příloze 3. Navržené veličiny spojené s jednotlivými oblastmi popisují různé druhy interakce a jsou přehledně popsány v tabulce 4. Kríповé snímkování koncentrační řady se vyznačuje širší přechodovou oblastí, a proto obdobně jako u viskozitního snímkování se parametry Cross A a Cross B spíše opomíjejí. Měřená veličina – nevratná smyková poddajnost  $J_{nr}$  nebo deformace vyjádřená polohou úhlové výchylky měřící geometrie v radiánech, má ve zkoumaných regionech opačný průběh než viskozita. V regionu A, tj. koncentračně nízká oblast, je třeba pro konstrukci přímky použít logaritmické škálování. V lineárním škálování je tato závislost zjevně polynomická. Dá se očekávat, že signální parametry kritických frakčních objemů A budou mnohem méně vypovídající než konstrukce veličin založených na závislostech v regionu B. Při kríповém pokusu se prolínají mnohem více vlastnosti regionu A do celkového ztužení. Důkazem toho je konstrukce parametru IG-Y, který v sobě zřetelně zahrnuje i přechodovou oblast.

**Tabulka 4:** Základní deskriptivní veličiny konstruované viskozitním snímkováním koncentračních řad umožňující popis vlivu fileru na vlastnosti mastixu

Název	Konstrukce	Popis
<b>R-Y</b>	Průnik přímky z $1/J_{nr_{rel}}$ s osou X	Kritický frakční objem minerální fáze z regionu B při recipročním škálování osy y
<b>SR-Y</b>	$SR-Y = R-Y/S * C^{*})$	Kritický frakční objem R-Y z regionu B korigovaný podílem směrnice z rovnice přímky při projekci na osu X <sup>*)</sup>
<b>IG-Y</b>	průnik přímky $\log J_{nr_{rel}}$ s osou X	frakční objem minerální fáze z regionu B při logaritmickém škálování osy Y
<b>SIG-Y</b>	$SIG-Y = IG-Y/S * C^{*})$	Korigovaný kritický frakční objem minerální fáze z regionu B směrnici S z rovnice přímky při projekci na osu X <sup>*)</sup>
<b>IG-X</b>	Průnik přímky z $\log X_{konc}$ s osou X	Kritický frakční objem minerální fáze z regionu A při logaritmickém škálování osy X
<b>SIG-X</b>	$SIG-X = IG-X/S$	Korigovaný kritický frakční objem minerální fáze z regionu A směrnici S z rovnice přímky při projekci na osu X <sup>*)</sup>

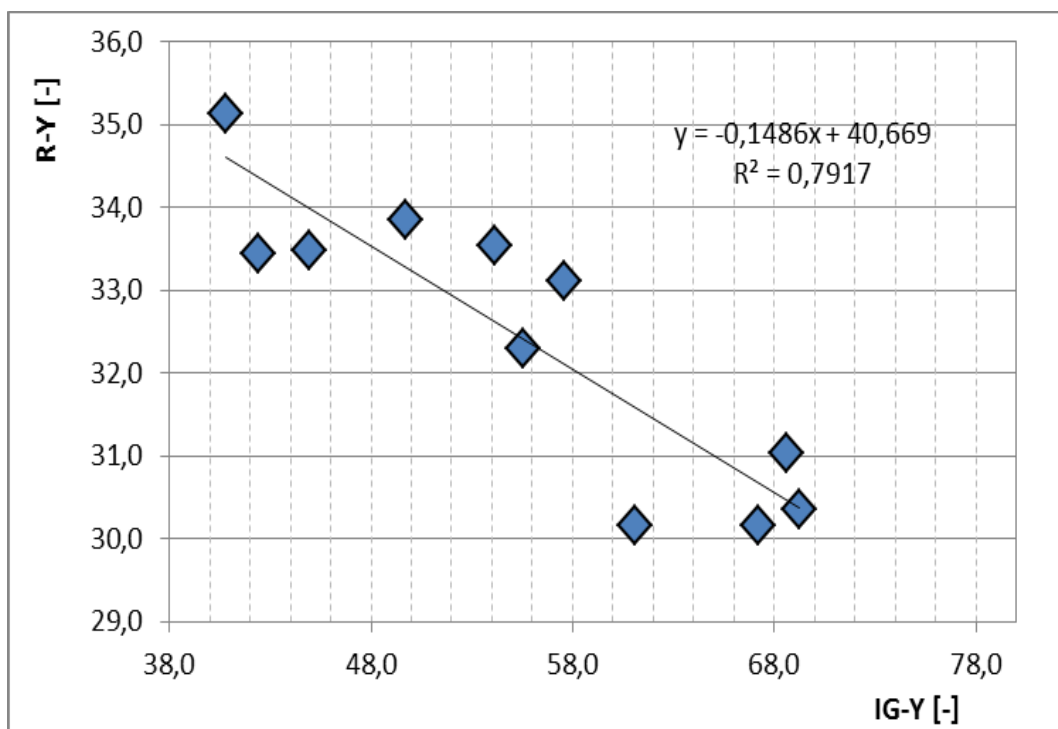
<sup>\*)</sup>  $Y_{J_{nr_{rel}}} = S \cdot X_{konc} + P$ , C – konstanta, matematicky upraveno na celé kladné číslo



**Obrázek 17:** Schématické znázornění významu deskriptivních parametrů R-Y, SR-Y, IG-Y, SIG-Y

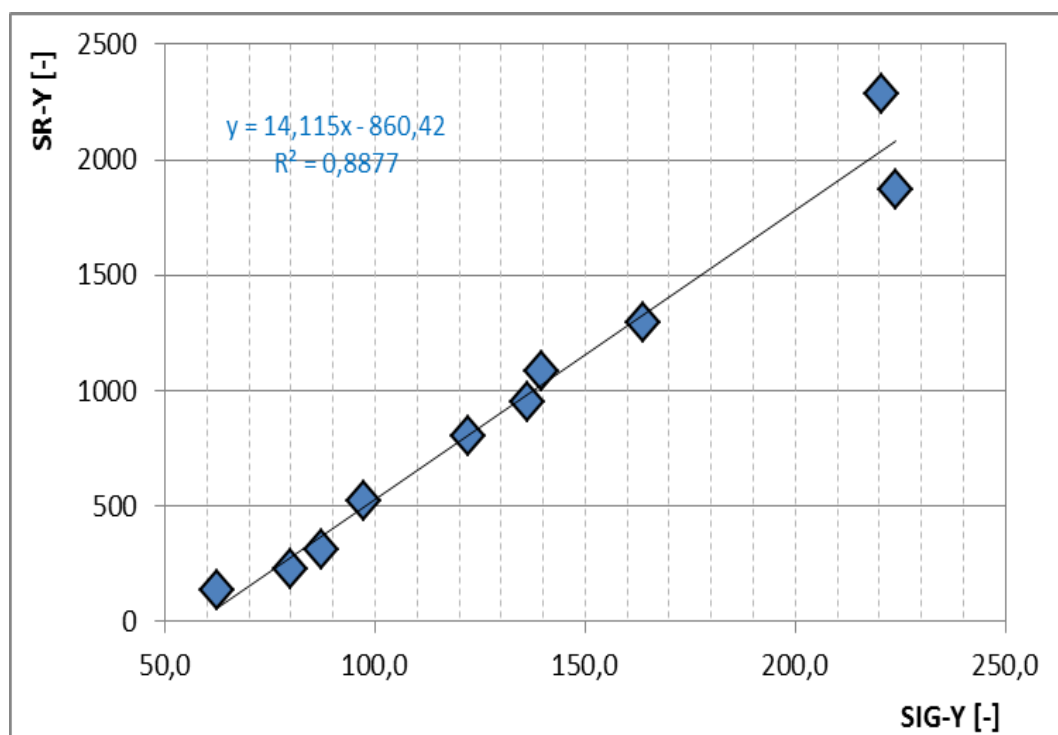
Proto technika MSCRT slouží především k posouzení celkového ztužení mastixu vlivem fileru. Jednotlivé parametry pro vyjádření tuhosti mastixu a jejich schématické naznačení jsou znázorněny na obrázku 17. Diagram zobrazuje reálné rozdíly mezi třemi různě tuhými mastixovými materiály, které byly použity i k demonstraci viskozitního snímkování při výzkumu koncentračních řad hornin s vyšším obsahem slídových minerálů.

Porovnáváme-li pouze hodnoty kritických objemů získaných postupem R-Y s hodnotami získanými postupem IG-Y, zdá se, že jednotlivé parametry nejsou příliš provázané a vyjadřují na rozdíl od viskozity jiné nekorespondující typy interakce, viz diagram na obrázku 18. Jak bylo zmíněno výše, odráží to pravděpodobně skutečnost, že konstrukce IG zohledňuje více chování v přechodové oblasti.



**Obrázek 18:** Schématické znázornění významu deskriptivních parametrů R-Y, SR-Y, IG-Y, SIG-Y

Zavedením korekce na rychlost změny velikosti deformace nebo nevratné smykové poddajnosti vyvolané nárůstem koncentrace se vztahy mezi jednotlivými veličinami začnou **simplifikovat** a je zřejmé, že jsou nositeli stejné informace (viz diagram na obrázku 19). Použití konkrétních technik k popisu chování filerů v mastixu je závislé na jednotlivých případech a pro některé typy studií se může jevit určitý typ konstrukce výhodnější.



**Obrázek 19:** Vztah mezi deskriptivními veličinami SR-Y a SIG-Y



Z tohoto důvodů je zřejmé, že právě tyto veličiny je možné použít pro elegantní popis ztužení mastixu vyvolaný filerem při změně koncentrace. Výhodou je, že **klasifikace je možná na základě pouze jedné hodnoty**. Z teoretického hlediska je důležité, že metodika upozorňuje technology silničního stavitelství, že **existuje jistá koncentrace fileru v mastixové maltě asfaltové směsi, od které dochází k prudkému nárůstu ztužení asfaltové směsi**<sup>Pozn.11</sup>. Podstatné je, že pro mineralogicky různé filery je tato koncentrace různá. Proto metodika popisu ztužujících vlastností může být využita jako základ pro další výzkum vlastností asfaltových směsí. Z praktického hlediska se jeví pro určení koncentračního prahu v konkrétních materiálech vhodnější postupy platné pro parametr R-Y. Tato veličina vyjadřuje reálný koncentrační práh, od kterého začíná deformační tuhost mastixového systému narůstat. Naproti tomu parametr IG-Y a SIG-Y byl do metodiky zahrnut z důvodů experimentálního využití spíše výzkumného charakteru.

Detailnější využití funkčních zkoušek mastixů založených na kríповých snímkováních jsou uvedeny v kapitole 7.2.

## 7. Příklady použití metodiky pro posouzení vlivu vlastností fileru na ztužení asfaltové malty

V této části jsou uvedeny některé možnosti použitých popsaných technik pro snímkování reologických vlastností mastixu a jejich přesah do posouzení míry ovlivnění vlastností mastixu jeho příslušnou minerální složkou. Reálné výsledky byly naměřeny v rámci projektu TAČR TH02020246 „Sledování vlastností drobného kameniva za účelem prodloužení životnosti asfaltových vozovek“. Projekt byl a priori cílen na výzkum vlivu slídových materiálů a jejich projevů v mastixech a potažmo v asfaltových směsích. Je možné konstatovat, že z petrografického pohledu představuje minerální slída a její alterační produkty všudypřítomný materiál, který se v různých koncentracích nachází v převážné většině hornin<sup>Pozn.12</sup>. Zkušební soubor se skládal z jednotlivých vzorků drobného kameniva frakce 0/4 mm odebraných z různých aktivních lomů v České republice. Předmětné lomy dodávají na obalovny minerální materiál pro výrobu asfaltových směsí. Až na výjimky bylo pro přípravu mastixů použito stejné standardní pojivo třídy 70/100 stejné šarže.

---

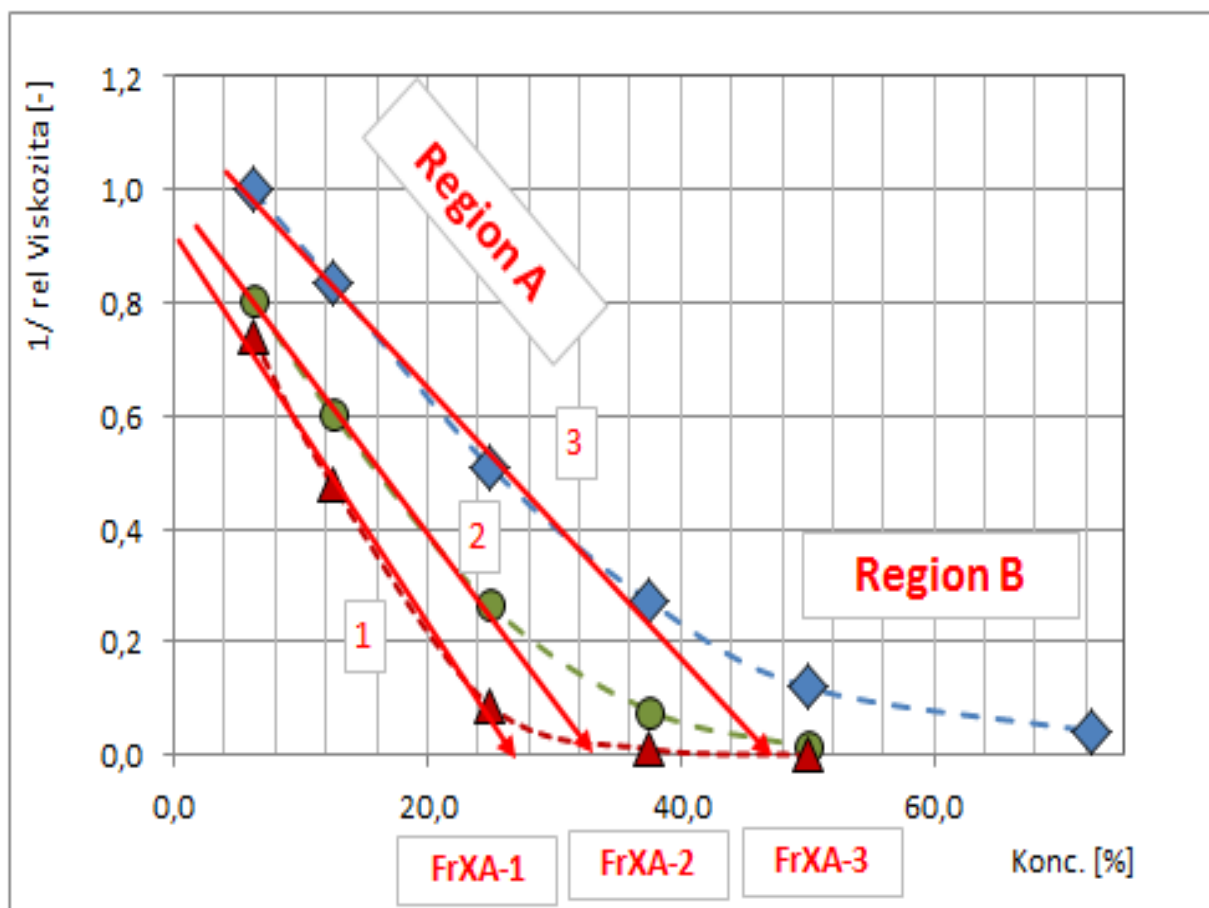
**Pozn. 11** Metodika se zbývá především popisem a způsobem měření a vyhodnocení výsledků, které umožní její proliferaci pro další studium asfaltových směsí. Proto konsektivní úvahy vyplývající ze skutečnosti, že v asfaltové směsi existuje jistý koncentrační práh, od kterého se skokově mění ztužení, nejsou předmětem tohoto dokumentu. Zohledníme-li fakt, že obecně v asfaltových směsích nelze pracovat s koncentrací, ale s tloušťkou asfaltového filmu, bude z těchto úvah vyplývat požadavek na nutnou detailní znalost granulometrie fileru, popřípadě jeho měrného povrchu stanoveného metodou BET.

**Pozn.12** Ovšem například v bazaltu (čediči) se slídové minerály jako biotit nebo muskovit, popřípadě jejich alterační produkty, téměř nevyskytují. Čedič je zároveň bazická hornina (bazalt), která má velkou afinitu k asfaltovému pojivu, projevující se vysokou mírou ztužení. Na opačném konci spektra z hlediska afinity k asfaltovému pojivu a acidobazicity stojí křemen.

## 7.1. Viskozitní snímek koncentračních řad mastixu

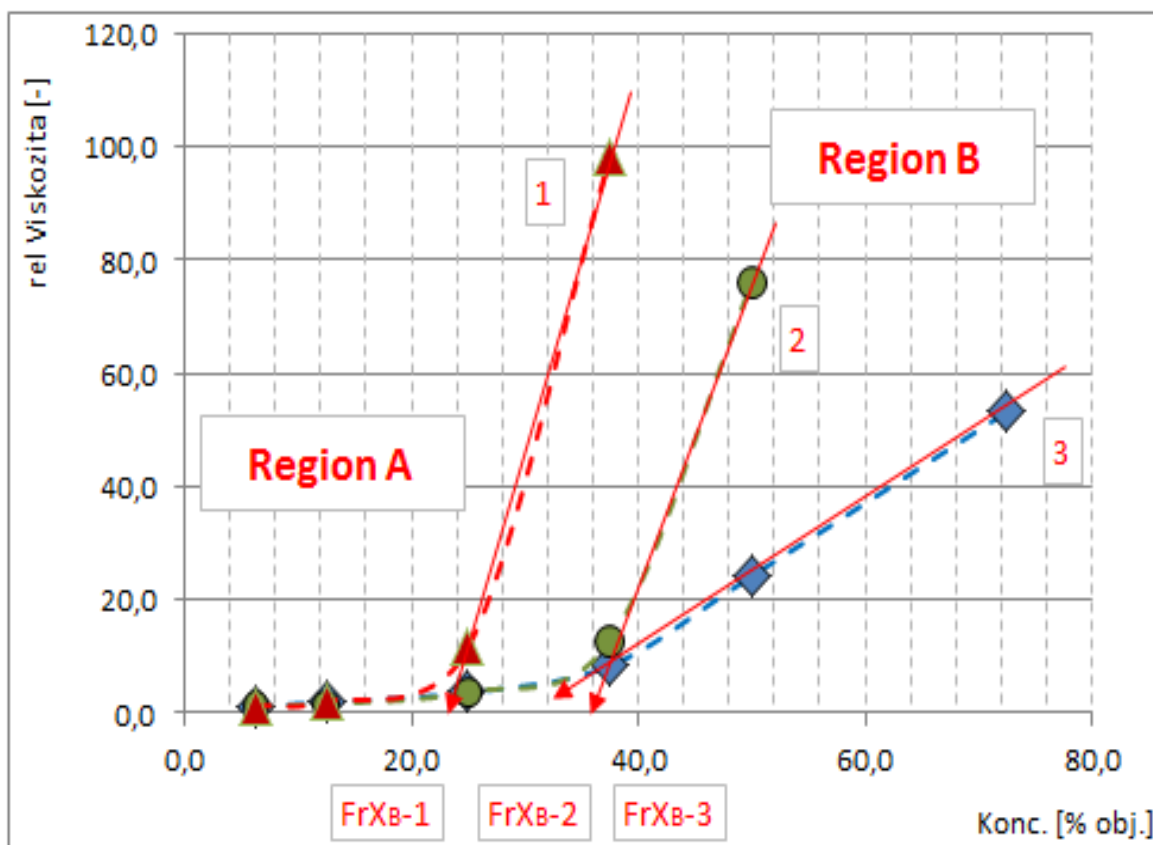
Níže uvedené diagramy v této sekci mají demonstrovat, jak je možné rozřadit jednotlivé druhy fileru ve zkušební souboru pomocí získaných kritických veličin. **Jejich interpretace nebyla záměrně komentována, ani vztahena na jednotlivé třídy filerických materiálů. Cílem bylo ukázat, že způsob projekce, lépe řečeno výběr popisných kritických veličin nebo jejich souvztažností vyzdvihuje jednotlivé odlišné formy interakce nebo její intenzity mezi filerem a asfaltovým pojivem v mastixu.** Tyto skutečnosti mohou být základem při studiu vlastností mastixu a jejich predikce.

Příklad rozdílného chování reálných mastixů je ukázán na obrázku 20 a 21. Zároveň jejich konstruované řídicí přímky jsou při zachování všech proporcí schematicky sceleny v demonstračním schématu na obrázku 13. Použité tři vzorky odebrané v lomech obsahují různé množství slídy. Samotný minerál je charakterizován nejen svými specifickými povrchovými vlastnostmi, ale následně i extrémně vysokou ztužovací aktivitou. Pro slídu je typický vysoký měrný povrch daný morfologickým tvarem (destičkové částice vzniklé snadnou bazální odlučitelností slídových minerálů).



**Obrázek 20:** Rozdílný průběh veličiny relativní zdánlivé viskozity na objemové koncentraci fileru pro petrograficky různé druhy filerických materiálů, měřeno při teplotě 135 °C

Všechny vzorky byly připraveny stejným způsobem a se stejným pojivem při dodržení postupu uvedeného v ČSN EN 13179-1. Vzorek 1 má obsah slídy nejvyšší a vzorek 3 pak nejnižší. Vzorky se liší i typem slídových materiálů. Z průběhů hodnot měřené zdánlivé viskozity jednotlivých bodů koncentrační řady je vidět rozdílné chování zkoumaných filerů, které se projevuje v poloze kritických frakčních objemů.

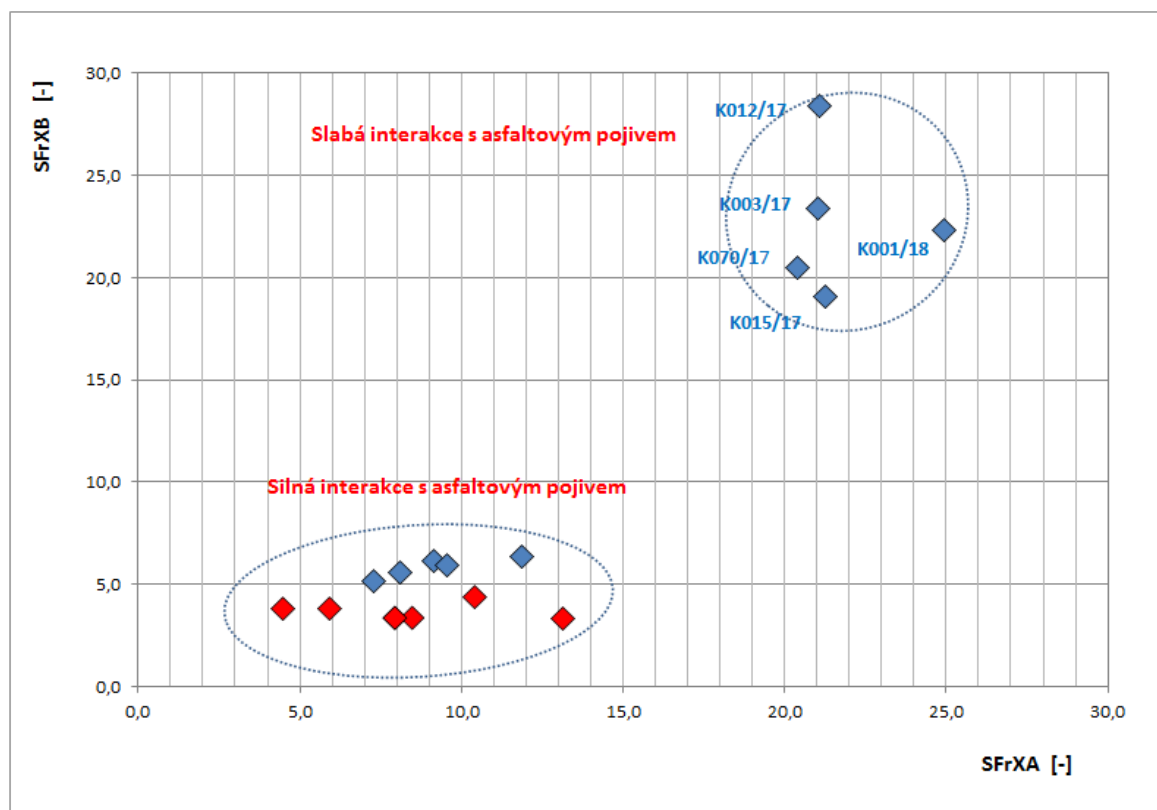


**Obrázek 21:** Rozdílný průběh veličiny reciproční relativní zdánlivé viskozity na obj. koncentraci fileru pro petrograficky různé druhy filerických materiálů, měřeno při teplotě 135 °C

V případě filerických materiálů vzorku 2 a 3 leží frakční objemy poměrně blízko sebe, ale významně se liší ve směrnici řídící přímky – tedy v rychlosti změny ztužení v závislosti na koncentraci. Jak bylo zdůvodněno v předchozí kapitole, v regionu A je na rozdíl od regionu B vyjádřen vliv původu fileru spíše rozdíly v poloze kritického frakčního objemu než různou směrnici přímky.

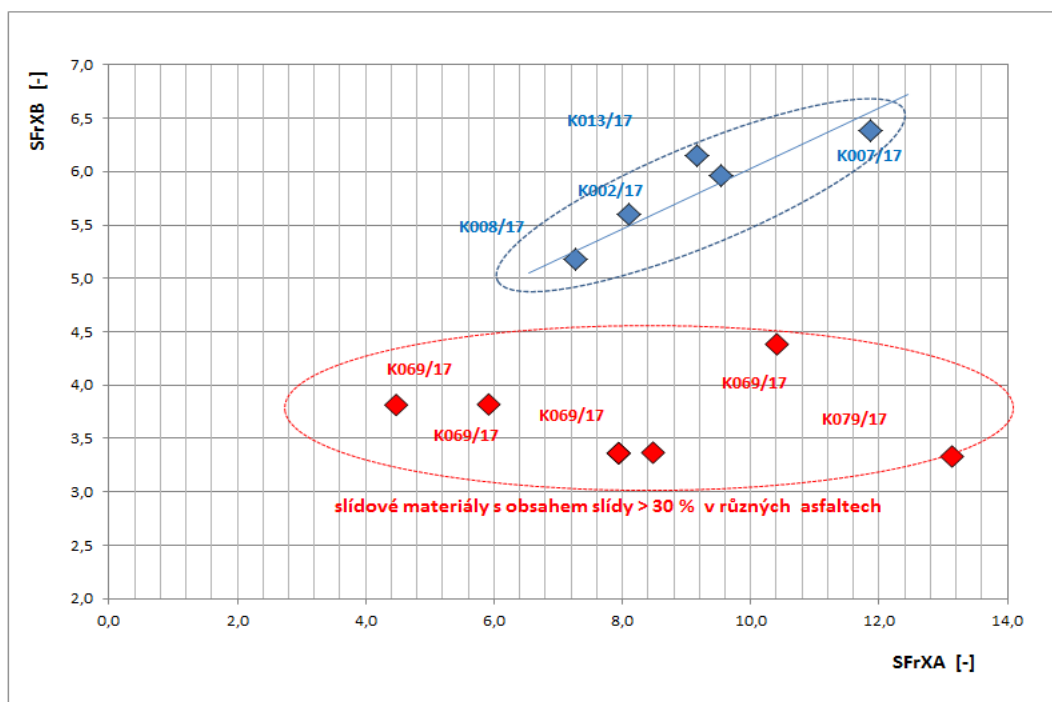
Míru ztužení můžeme sice odhadnout pomocí jednoho změřeného bodu ve vhodně zvolené koncentraci, ale nové postupy nám dovolují popsat systém z hlediska vnitřních vlastností. Tyto vlastnosti jsou na první pohled skryté, a jednobodovým měřením je nejsme schopni

postihnout. Už jen porovnání vztahu kritických veličin  $SFrX_A$  a  $SFrX_B$  nám odhalí rozpad zkušební souboru šestnácti filerů na dvě skupiny, viz diagram na obrázku 22.



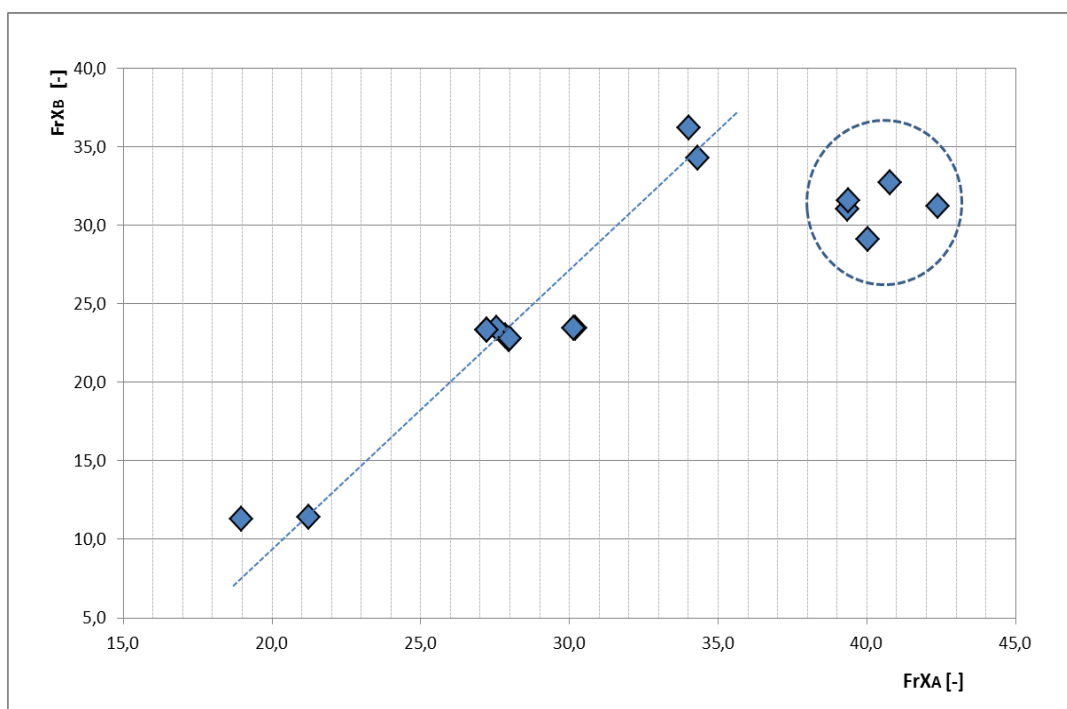
**Obrázek 22:** Porovnání vztahu kritických veličin  $SFrX_A$  a  $SFrX_B$  a rozpad výsledků zkušební souboru na dvě skupiny,  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D = 2\text{ s}^{-1}$

Skupiny se seřadují zjevně podle síly interakce k pojivu, která je řídicí veličinou. Při bližším pohledu na skupinu se silnou interakcí vidíme opět strukturální rozvrstvení mezi jednotlivými členy, viz obrázek 23. Z diagramu na následujícím obrázku 24 je patrné, že v této skupině slídkové materiály v důsledku své morfologie poskytují stejnou hodnotu kompozitního indexu  $SFrX_B$ , ale liší se výrazně v kompozitním parametru  $SFrX_A$ . Je to proto, že do souboru byly zařazeny i mastixy s různými asfalty (výsledky jsou vyjadřovány v relativní/poměrné viskozitě). Slída je aktivní minerál s velmi silným vlivem na vlastnosti mastixu. Jednotlivé body stejného materiálu se mohou mezi sebou lišit v závislosti na chemickém složení výchozího asfaltového pojiva, což vyvolává posun v hodnotě  $SFrX_A$ .



**Obrázek 23:** Porovnání vztahu kritických veličin SFrX<sub>A</sub> a SFrX<sub>B</sub>, struktura skupiny silně interagujících filerů, detail obrázku 22, 135 °C, D = 2s<sup>-1</sup>

Čisté porovnání kritických frakčních objemů nám opět potvrzuje odlehlost skupiny se slabou interakcí. Zároveň je zřejmé, že u silně interagujících filerů jsou oba parametry FrX<sub>A</sub> i FrX<sub>B</sub> navzájem přímo úměrné. Přičemž hornina, kde slída nehraje hlavní roli, se vyčleňují do jedné od přímky odlehle skupiny (viz obrázek 24).



**Obrázek 24:** Porovnání vztahu kritických veličin FrX<sub>A</sub> a FrX<sub>B</sub>, struktura skupiny silně interagujících filerů, odpovídá skupině vzorků z obrázku 23, 135 °C, D = 2s<sup>-1</sup>

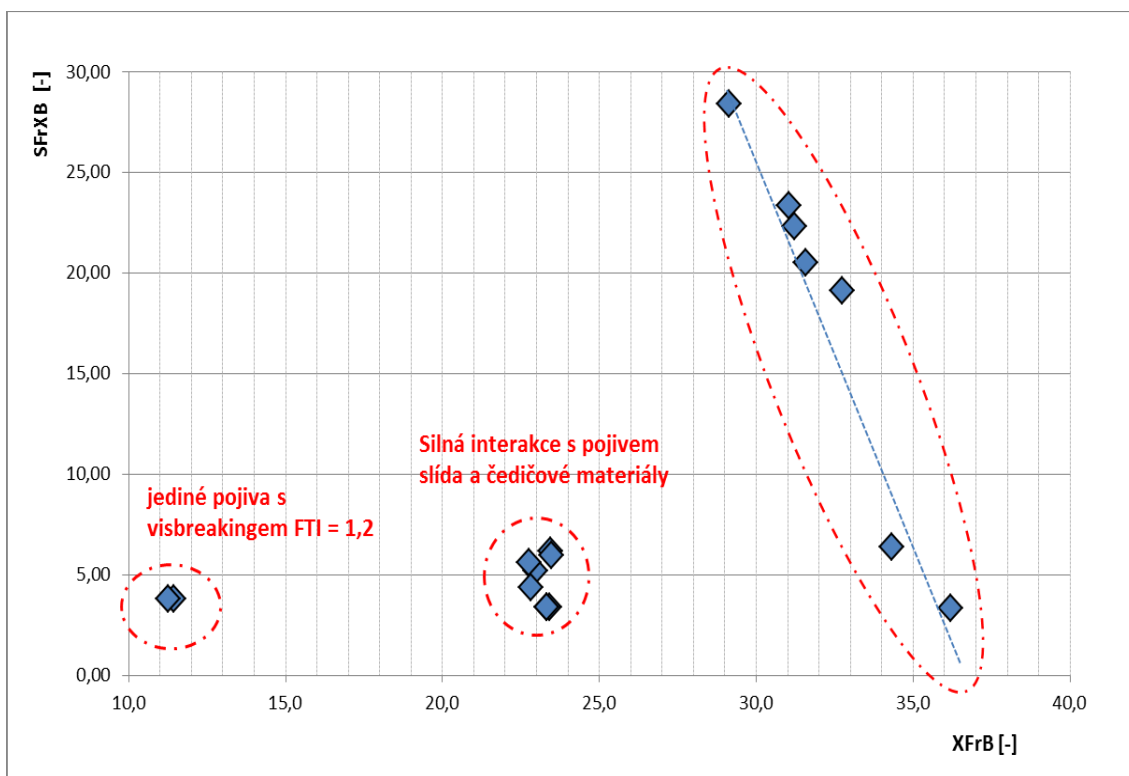
Naopak roztržení je vidět při konstrukci diagramu porovnávajícího hodnoty  $FrX_A$  vůči  $SFrX_A$ .  $SFrX_A$  bere do úvahy i gradient změny v závislosti na růstu koncentrace. V takovémto způsobu vyhodnocení je možno postihnout přímo vliv interakce s pojivem, a tak studovat projevy vlivu zpracování, složení a původu asfaltového pojiva na reologické chování mastixu a nepřímě i na chování asfaltových směsí. V diagramu na obrázku 25 se jednoznačně vyčlení jediná dvě pojiva s vysokou příměsí stabilizované visbreakingové složky. Ta se projevuje snížením FTI k hodnotě 1<sup>Pozn.13</sup> a odpovídající změnou viskozitního chování.



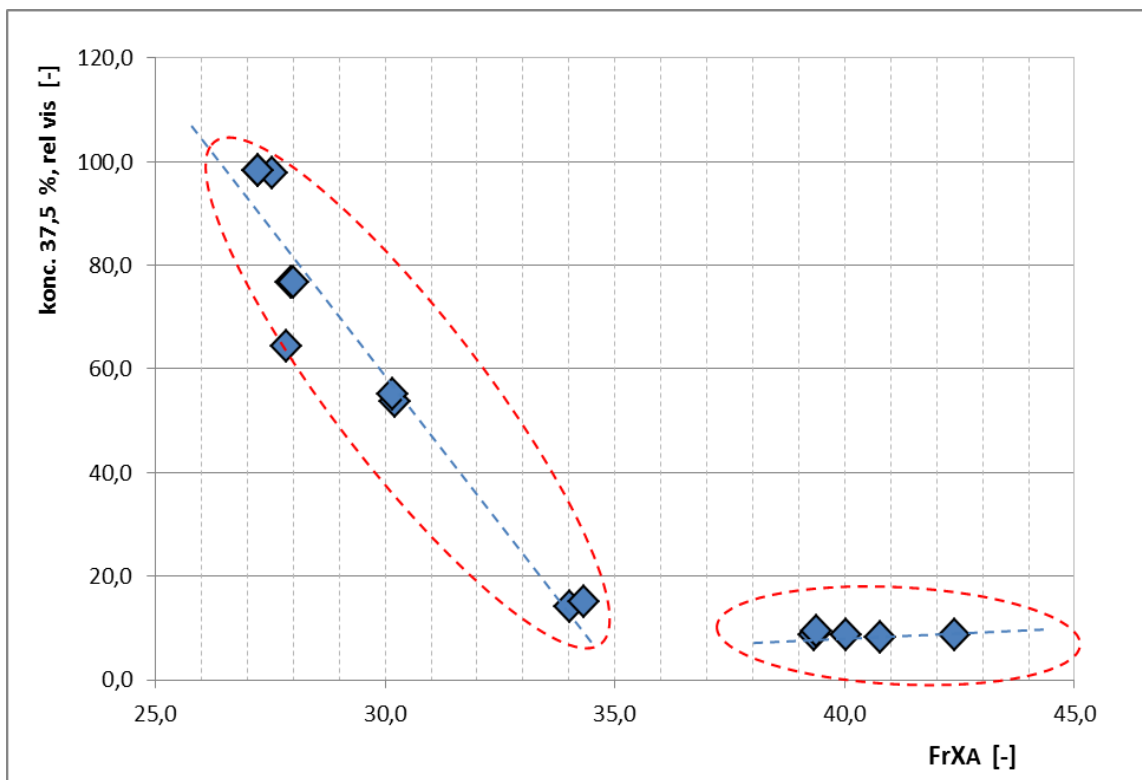
**Obrázek 25:** Porovnání vztahu kritických veličin  $FrX_A$  a  $SFrX_A$ , separace vlivu gradientu změny, 135 °C,  $D = 2s^{-1}$

K ještě většímu strukturálnímu rozvrstvení dochází při stejné konstrukci na základě kritických parametrů  $SFrX_B$  a  $FrX_B$  odečtených z regionu B, viz diagram na obrázku 26. Také zde je patrný rozpad do několika skupin naznačující preferenční klasifikaci podle charakteru interakce fileru v mastixu, ať je povaha této interakce jakákoliv. Na druhé straně metoda viskozitního snímkování má menší prediktivní sílu k přesnému odhadu konkrétní hodnoty zdánlivé relativní viskozity. Jak je vidět z diagramů na obrázcích 27 a 28, jsou některé skupiny pro jednotlivé členy méně citlivé na změnu signálního parametru kritických frakčních veličin a naopak u jiných malá změna vyvolává velice strmou odezvu měřené veličiny.

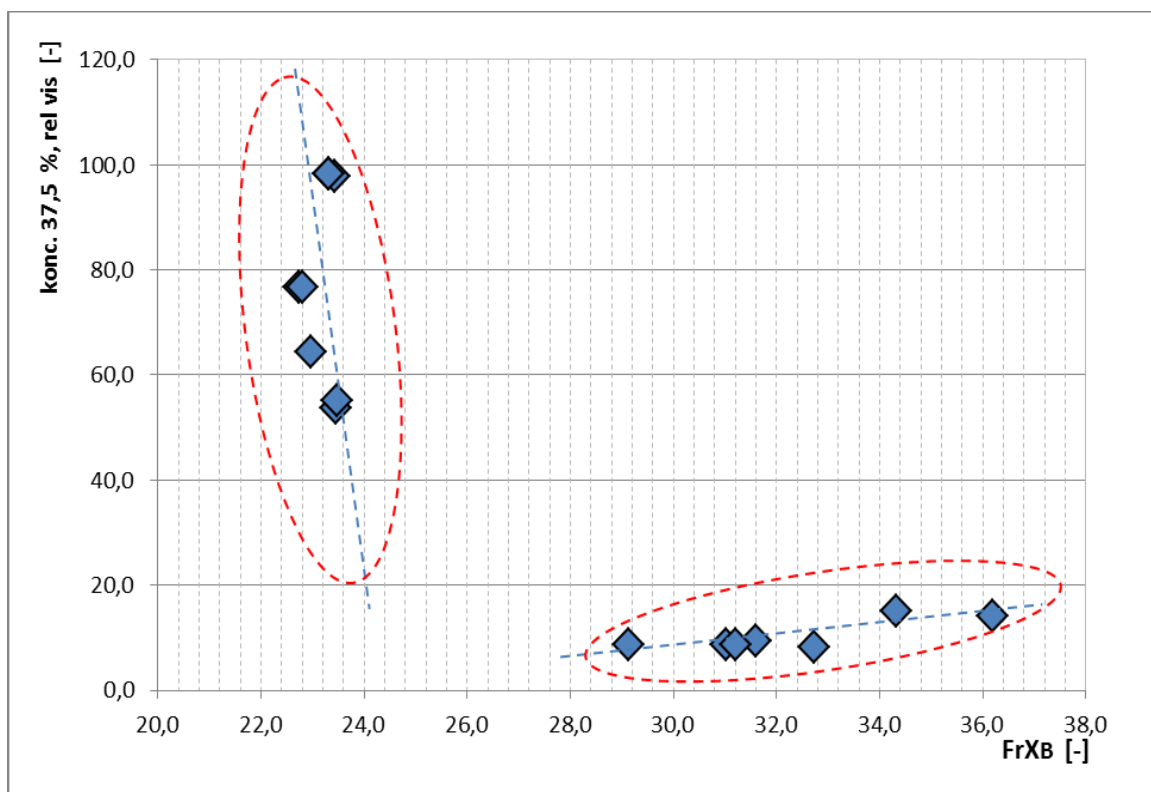
**Pozn.13** FTI je flokulační toluenový index, stanovený na základě precipitačních titrací asfaltu. Vyjadřuje míru disperzní stability asfaltu, viz. (46)



**Obrázek 26:** Porovnání vztahu kritických veličin  $FrX_B$  a  $SFrX_B$ , separace vlivu gradientu změny v region B, 135 °C,  $D = 2 s^{-1}$



**Obrázek 27:** Porovnání vztahu kritické veličiny  $FrX_A$ , na odhad hodnoty viskozity, 135 °C,  $D = 2 s^{-1}$



**Obrázek 28:** Porovnání vztahu kritické veličiny  $FrX_B$ , na odhad závislosti zdánlivé relativní viskozity,  $135\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $D = 2\text{ s}^{-1}$

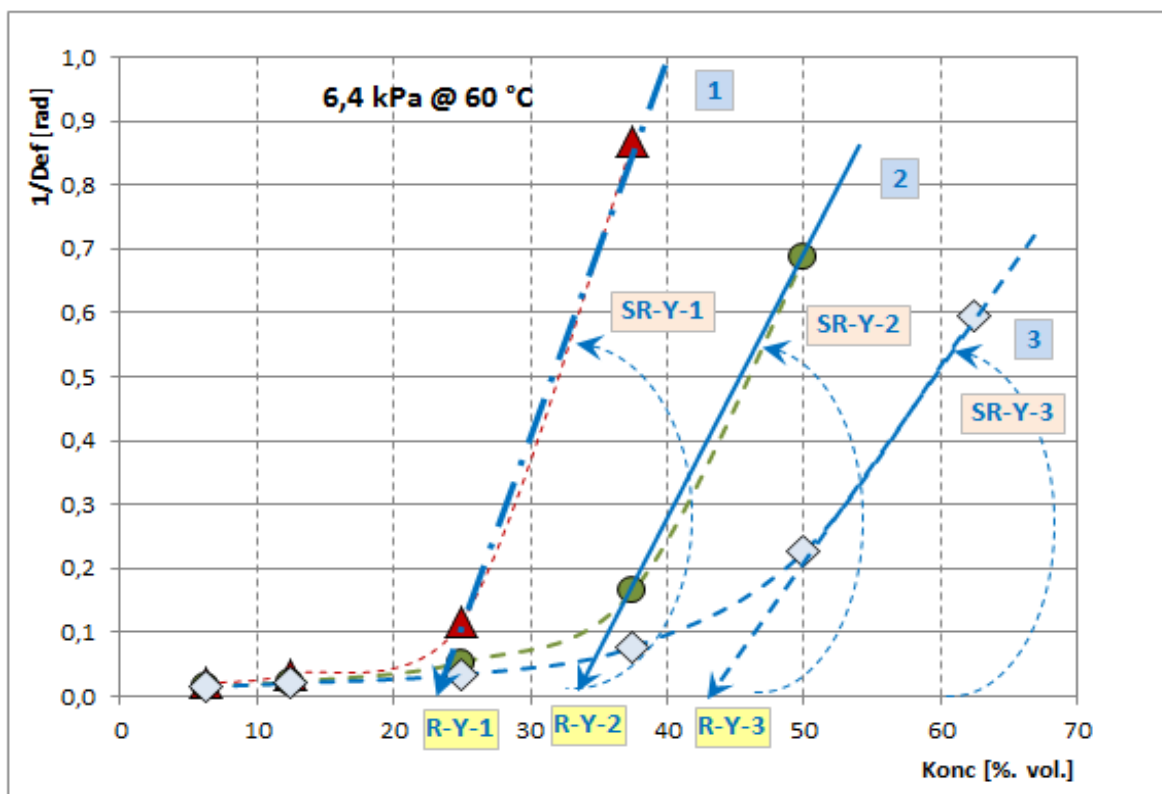
Z výše uvedeného je vidět, že metoda viskozitního snímkování koncentrační řady je použitelná především pro systematické skupinové zařazení, tedy k vyjádření typologie fileru a jeho chování v mastixu. Další slibnou oblastí je studium vlivu různých pojiv na chování mastixu.

Pomocí přístroje DSR lze zaznamenat i velmi malé rozdíly mezi zdánlivou viskozitou měřenou pro jednotlivé filery. Analýzou vnitřní struktury podskupin jsme schopni zachytit subtilní změny v chování mastixů v závislosti na kritických frakčních objemech. To vyžaduje extrémní pečlivost a přesnost provedení, aby byly eliminovány potenciální odlehlé výsledky. Je třeba ověřit, že zjištěné kritické veličiny opravdu charakterizují odlišné chování vnášené do reologie mastixu filerem.

## 7.2. Kríkový snímek koncentračních řad mastixu

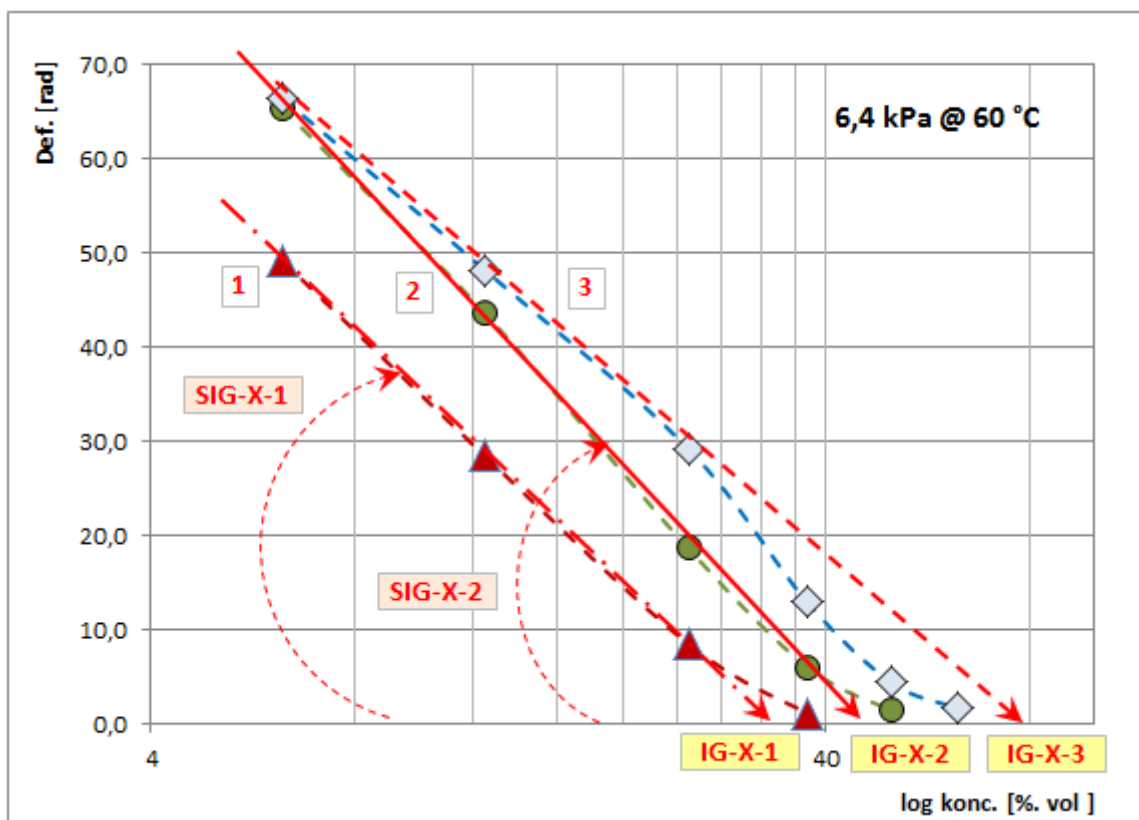
Využití deskriptivních parametrů IG-Y a R-Y pro hodnocení vlastností jednotlivých filerů na základě reologické charakterizace koncentračních řad v konfiguraci zkoušky MSCRT je ukázáno na obrázcích 29, 30 a 31. Opět se jedná se o stejné materiály, které byly použity k demonstraci generických parametrů v případě viskozitního snímku pro jednotlivé mastixy v různých koncentracích fileru.



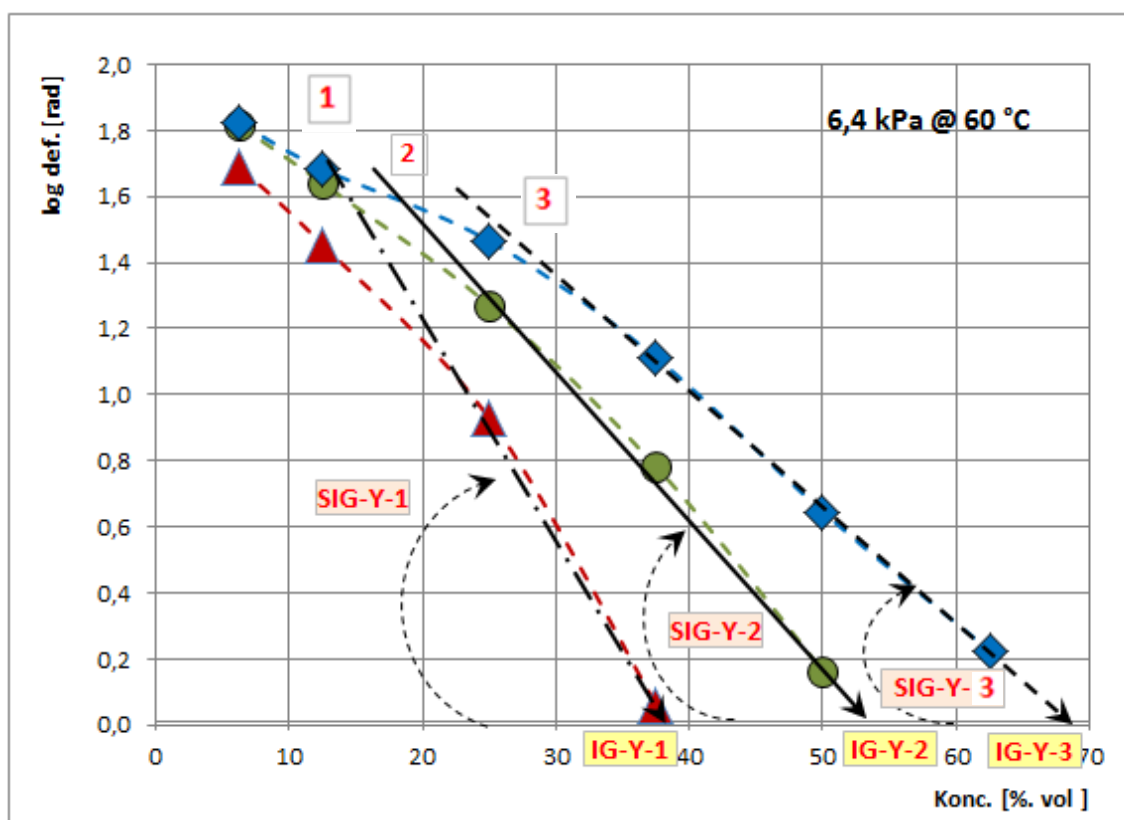


**Obrázek 29:** Porovnání kritické veličiny R-Y a SR-Y pro tři různé druhy fileru

Zdaleka nejdůležitějším výstupem měření deformačních rezistencí koncentrační řady je **možnost jednoparametrického popisu ztužujících schopností filerických materiálů**, který v regionu B může velmi dobře predikovat výslednou hodnotu deformační odolnosti fileru. Jako nejvhodnější se jeví popis pomocí veličiny IG-Y, popřípadě SIG-Y. Z praktického hlediska je ovšem výhodnější používat konstrukce založené na veličině R-Y. Samotný parametr R-Y ale nemá podle dosavadních výsledků takovou prediktivní sílu, jelikož nevykazuje tak dobrou korelaci s konečnou hodnotou deformace / smykové poddajnosti, viz diagram na obrázku 32. Jak bude ukázáno dále, v jeho případě je nejprve nutné zavést zohlednění rychlosti změny měřené veličiny vyvolané koncentrační změnou fileru (tj. zohlednit směrnici přímky).

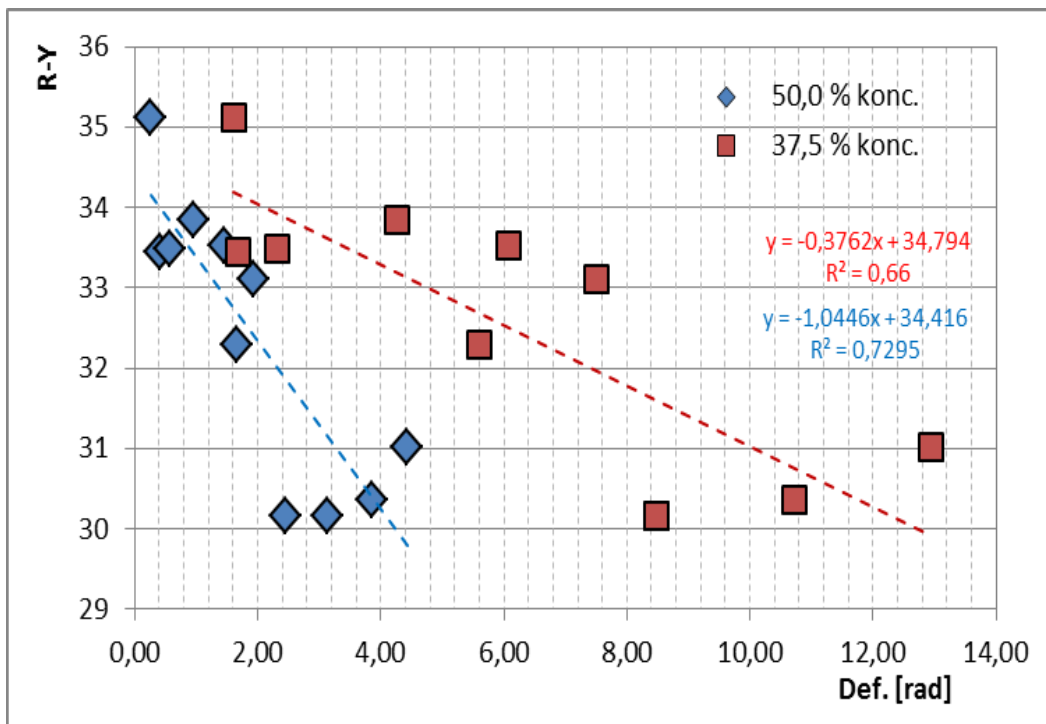


Obrázek 30: Porovnání kritické veličiny IG-X a SIG-X pro tři různé druhy fileru

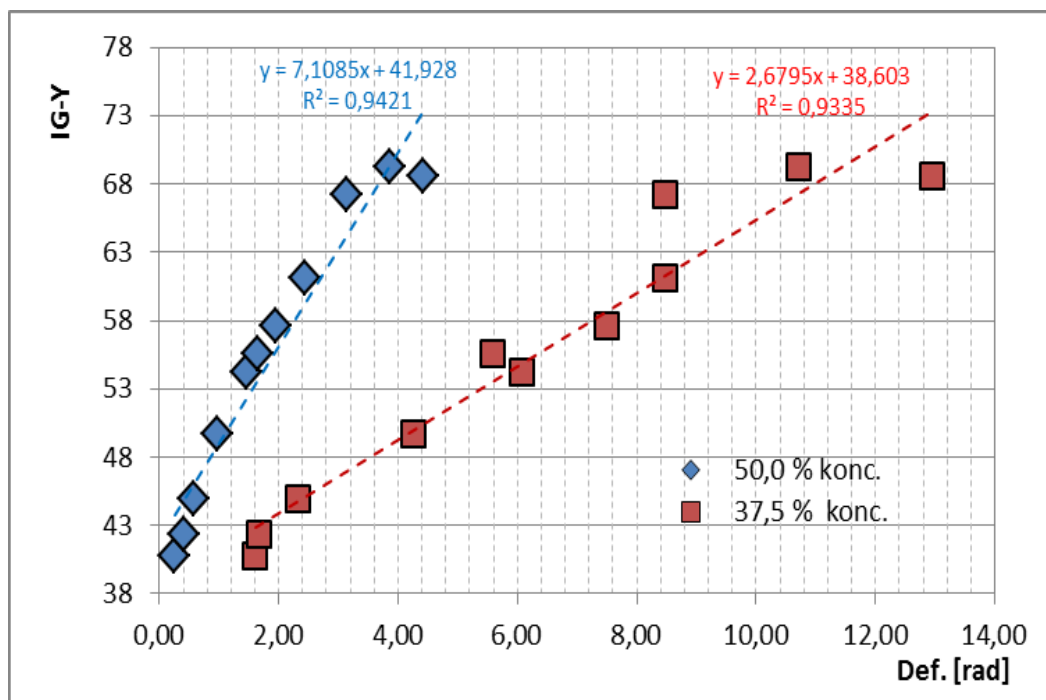


Obrázek 31: Porovnání kritické veličiny IG-Y a SIG-Y pro tři různé druhy fileru

Pouhá hodnota parametru R-Y nedokáže jednoznačně určit výslednou hodnotu ztužení mastixy na základě jeho znalosti. To lze spíše provést pomocí parametru IG-Y, který v sobě více zahrnuje přechodovou oblast, což je patrné z obrázku 33.

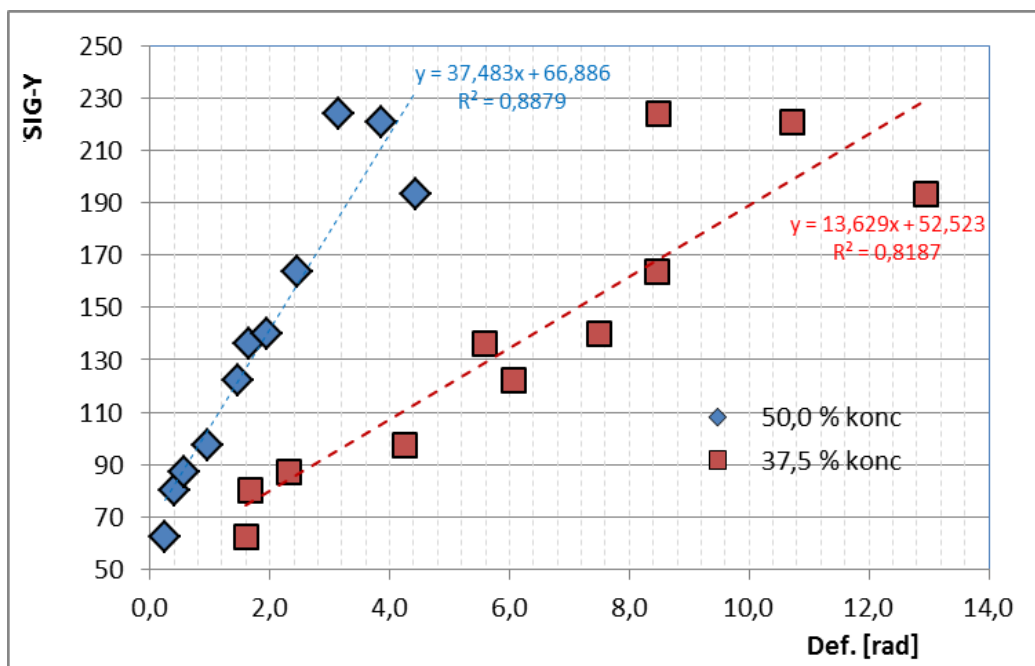


**Obrázek 32:** Souvztažnost mezi kritickou veličinou R-Y a velikostí deformace pro různé mastixy, smykové napětí 6,4 kPa, 60 °C

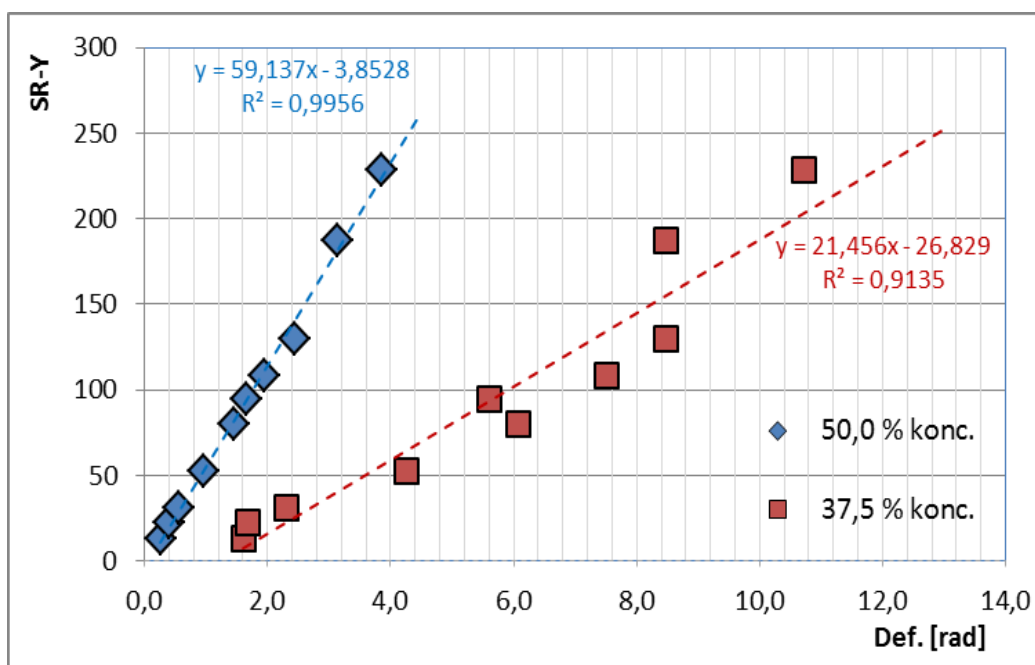


**Obrázek 33:** Souvztažnost mezi kritickou veličinou IG-Y a velikostí deformace pro různé mastixy, smykové napětí 6,4 kPa, 60 °C

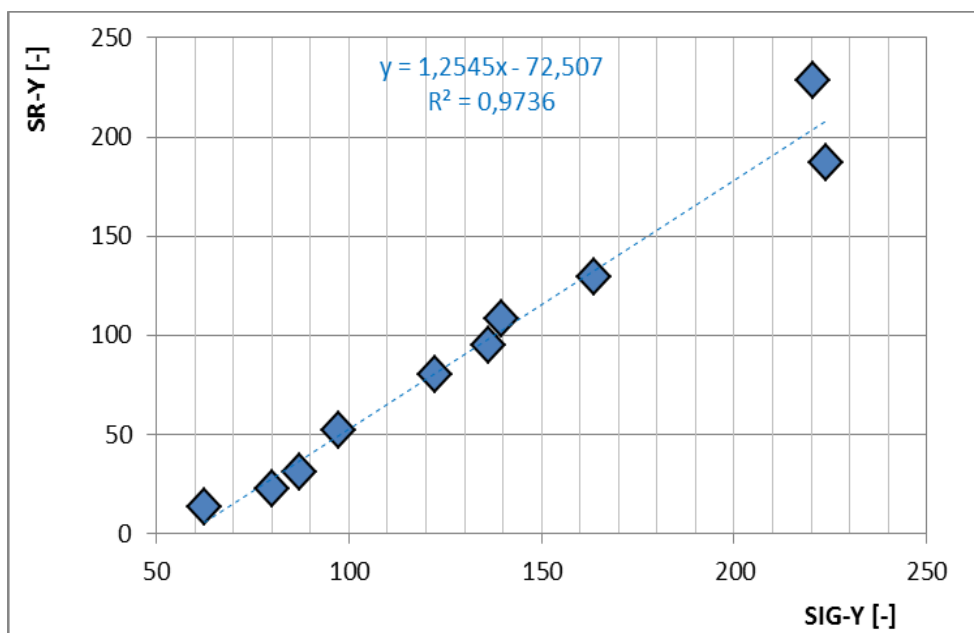
Zahrnutím směrnice konstruované řídicí přímky nad prahem se významně zlepšují prediktivní schopnosti metody pro konkrétní filery především u kritického frakčního parametru SR-Y. Naopak pro SIG-Y se tyto hodnoty mírně zhoršují, přesto zůstávají dostatečně přesné, aby vyjádřily tendenci v chování fileru (viz obrázky 34 a 35).



**Obrázek 34:** Souvztažnost mezi kritickou veličinou SIG-Y a velikostí deformace pro různé mastixy, smykové napětí 6,4 kPa, @ 60 °C



**Obrázek 35:** Souvztažnost mezi kritickou veličinou SR-Y a velikostí deformace pro různé mastixy, smykové napětí 6,4 kPa, 60 °C



**Obrázek 36:** Souvztažnost mezi kritickou veličinou SR-Y a SIG-Y mastixů, smykové napětí 6,4 kPa, 60 °C

Uvedené výsledky dokazují, že **jednparametrický popis fileru ve vztahu k jeho ztužujícím vlastnostem v mastixu je možný a dostatečně přesný**. Pro ilustraci je vztah mezi parametry SR-Y a SIG-Y, tedy frakčními objemy korigovanými na hodnotu směrnice, demonstrován na obrázku 36. Kritický parametr IG-X (logaritmické škálování koncentrace) umožňuje rovněž popsat schopnost fileru ztuhit mastixovou maltu, ale se stoupající filerovou koncentrací je toto vyjádření méně přesné. Proto nebyl tento parametr v případě ztužujících vlastností asfaltového pojiva blíže komentován.

Obě popsané metody viskozitního a kríповého snímkování je možné aplikovat na výzkum asfaltových směsí. Výsledky ukazují, že existuje jistý koncentrační práh, vyjádřený kritickými frakčními parametry, jenž se může lišit pro jednotlivé filery se všemi důsledky pro chování asfaltových směsí<sup>Pozn.14</sup>. Je opět nutné upozornit na nezbytnost pečlivého provedení měření a eliminace potenciálního vzniku odlehlých výsledků při použití techniky DSR, zejména ve vztahu k přípravě a adjustaci vzorku.

**Pozn.14** Opět je třeba upozornit, že vzhledem k tomu, že nucená extrakce/vysítí fileru z podrcené frakce 0/4 mm bylo prováděné pro každý vzorek stejně, vykazovaly filery přibližně identickou granulometrii. Proto do popisu ztuhnutí není zahrnut vliv rozdílné granulometrie.

## 8. Metodický postup pro popis míry interakce minerálního fileru s asfaltovým pojivem a jeho ztužujících vlastností

**Základní metodický postup pro stanovení obecných ztužujících vlastností fileru v mastixové maltě představuje soubor následujících kroků:**

- stanovení objemové hmotnosti fileru pyknometrickou metodou podle ČSN EN 1097-7 (12),
- eventuální stanovení granulometrie fileru jako dodatečné informace – laserová difrakce světla na částicích zkušební vzorku, viz (45),
- příprava mastixu podle postupu uvedeného v normě ČSN EN 13179-1 (13) nejméně v pěti koncentračních bodech 6,25 %, 12,5 %, 25,0 %, 37,5 %, 50,0 %,
- Měření reologických vlastností (viskozita, MSCRT) pomocí přístroje DSR podle postupu uvedeného níže.

**A. V případě testování vlivu asfaltového pojiva na charakter interakce s filerem pomocí přístroje DSR (viskozitní snímkování) je nutné zvolit:**

- měření zdánlivé viskozity pomocí geometrie deska-deska s průměrem 25 mm v referenčním teplotním bodě 135 °C nebo pomocí teplotní rampy v rozmezí 145 °C až 115 °C s rychlostí poklesu teploty 0,6 °C/min (preferováno),
- nastavení smykové rychlosti 2 s<sup>-1</sup>,
- vkládání vzorků, které musí respektovat požadavek omezení segregace vzorku podle kap. 6.1.2 (viz přiměřené množství vzorku, zabránění roztečení vzorku, okamžité provedení stlačení atd.),
- ověření reprodukovatelnosti výsledků závislosti na velikosti štěrbin (mezery) 1,0 mm (preferované) a 1,5 mm. Pokud se výsledky měření neodlišují, je možné použít štěrbinu 1,0 mm <sup>Pozn.15</sup>. Ověření se provádí na koncentraci 37,5 % obj. nebo v ideálním případě pro dvě koncentrace (např. 12,5 % a 37,5 %),
- proměření viskozity jednotlivých pěti bodů koncentrační řady – viskozitní snímek,
- zpracování výsledků – průměr hodnot okamžité viskozity za časový úsek a jeho převedením na relativní podílové hodnoty vůči viskozitě výchozího asfaltového pojiva,
- vynesení výsledků měření viskozity jednotlivých bodů koncentrační řady do diagramu,
- zvoleným škálováním zkonstruovat řídicí křivky v daném regionu,
- projekcí řídicí přímky na osu X se získají kritické frakční objemy Fr<sub>XA</sub>, Fr<sub>XB</sub>, a směrnice řídicí přímky (grafický nebo analytický postup) popsanych v kapitole 5.1,

---

**Pozn.15** Je doporučeno provádět optimalizace nastavení opakovaným měřením a zjištěním variačního koeficientu nejlépe v koncentračním bodě 37,5 % obj.

- na základě získaných kritických parametrů FrXA, FrXB, SFrXA, SFrXB, a ve vztahu k ostatním referenčním filerům posoudit vlastnosti zkoumaného fileru a použitého asfaltového pojiva v mastixu.

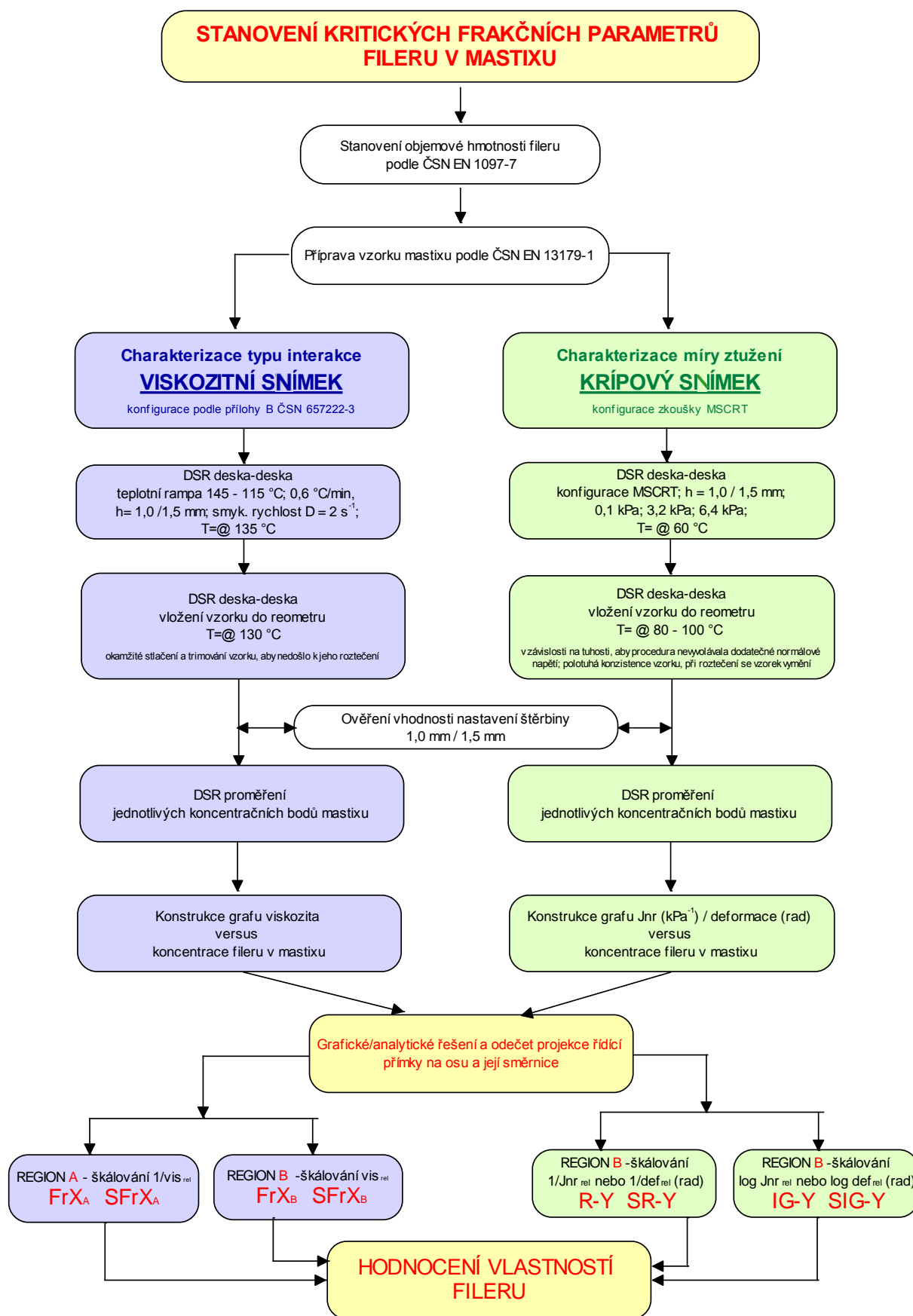
**B.** V případě testování přímého **vlivu vlastností fileru na ztužení mastixu** pomocí přístroje DSR (**kríповé snímkování – MSCRT**) je nutné zvolit:

- konfiguraci testu MSCRT podle ČSN EN 16659 prováděného při referenční teplotě 60 °C,
- zatěžovací smykové napětí pomocí tří sekvencí (každá po deseti jednosekundových pulsech a devítisekundových odtíženích) je nastaveno na hladinách smykového napětí 0,1 kPa, 3,2 kPa a 6,4 kPa, přičemž jako určující pro posouzení chování materiálu se jeví deformační rezistence při smykovém napětí 6,4 kPa; hladina 0,1 kPa slouží především k prekondicionaci vzorku,
- vzorek se vkládá do reometru při teplotě vybrané z rozmezí 70 °C až 100 °C v závislosti na jeho tuhosti. Odpor vzorku musí být při stlačení přiměřený; eventuální roztečení vzorku mastixu mimo měřicí geometrie není v žádném případě povoleno,
- ověření reprodukovatelnosti výsledků závislosti na velikosti štěrbin 1,0 mm (preferované) a 1,5 mm. Pokud se výsledky měření vzájemně neodlišují, je možné použít štěrbinu 1,0 mm. Ověření se provádí na koncentraci 37,5 %obj. nebo v ideálním případě pro dvě koncentrace (např. 12,5 % a 37,5 %),
- proměření kríповého chování (MSCRT) jednotlivých bodů koncentrační řady – kríповý snímek,
- zpracování naměřených hodnot vyjádřených buď jako nevratná smyková poddajnost  $J_{nr}$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ) nebo jako absolutní celková kumulovaná smyková deformace dané sekvence a jejich převedením na relativní podílové hodnoty vůči odpovídajícím hodnotám výchozího asfaltového pojiva,
- vynesení získaných výsledků deformační rezistence vůči jednotlivým bodům koncentrační řady do diagramu,
- zvoleným škálováním zkonstruovat řídicí křivky v daném regionu,
- projekcí řídicí přímky na osu X se získají kritické frakční objemy IG-Y, R-Y a směrnice řídicí přímky (grafický nebo analytický postup) popsanych v kapitole 5.2,
- na základě získaných kritických parametrů IG-Y, R-Y, SIG-Y a SR-Y a ve vztahu k ostatním referenčním filerům posoudit vlastnosti zkoumaného fileru.

Schematicky, ve formě vývojového diagramu, jsou uvedené kroky znázorněny na obrázku 37.

Souhrn parametrů kritických frakčních objemů mastixových malt vytvořených z uceleného souboru filerických materiálů je uveden v příloze 4.

**Obrázek 37:** Základní schéma pro zjištění frakčních objemů filerů v mastixové maltě





## 9. Popis novosti metodiky a její uplatnění

Metodika se snaží převést a modifikovat některé málo známé teoretické základy působení filerových materiálů na vlastnosti skutečné pojivové malty do zkušebních metod přístupných co největšímu okruhu silničních laboratoří a výzkumných pracovišť.

Přínosem je především seznámení odborné veřejnosti s problematikou, která není v České republice známa a je zcela nesporně opomíjena. Umožňuje tak kvantifikovat vliv jednotlivých filerů podle jejich reologického chování především s ohledem na jejich přírodní původ a petrografické složení. Metodika se uplatní především ve VÝZKUMU A TYPOLOGICKÉM POPISU FILERICKÉHO MATERIÁLU, V HODNOCENÍ KVALITY LOMŮ A JEJICH JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ DOBÝVACÍCH PROSTORŮ. Zároveň otevírá dveře ke studiu závislostí nastavení asfaltových směsí na kritickém frakčním objemu jemných částic, kterým je vyjádření koncentračního zlomu v chování skutečné pojivové ztužené malty v asfaltových směsích a míry nárůstu ztužení v oblasti za tímto koncentračním bodem. V jeho důsledku lze studovat vlastnosti asfaltových směsí právě z tohoto pohledu, a to především ve vztahu k vzniku plastických deformací a nízkoteplotního chování.

Základní inovací jsou postupy stanovení kritických parametrů a zvolené laboratorní metody využívající moderní dynamický smykový reometr v celé šíři jeho variability, neboť jeho rozšíření v silničních laboratořích stále narůstá. Uvedené využití není v literatuře zcela jednoznačně popsáno. Zvolená metoda **zdánlivé viskozity** umožňuje sledovat přímo interakci asfaltového pojiva s izolovanými jemnými částicemi fileru a míru jeho ovlivnění filerickým materiálem, ve které ještě nepřevažuje interakce jednotlivých částic fileru mezi sebou. Druhá metoda **cyklického dotvarování** (krípu) na dvou/třech úrovních smykového napětí podle normy ČSN EN 16659 se používá především v hodnocení kvality a odolnosti proti plastickým deformacím při posuzování modifikovaných asfaltů, kde klasická zkouška kroužek a kulička pro určení bodu měknutí v této oblasti na rozdíl od silničních asfaltů selhává. Tato metoda se ukázala jako vhodnější k posouzení míry ztužení za koncentračním zlomem, přestože obdobná informace je obsažena i v metodě zdánlivé viskozity <sup>Pozn.16</sup> a vice versa. U druhého způsobu můžeme ztužení asfaltového pojiva filerem vyjádřit jedním číslem, které v sobě nese komplexní informaci o vlastnostech fileru pro tuto vlastnost za kritickým koncentračním prahem.

**Použitý přístup poukazuje na skutečnost, že existuje jistá kritická hodnota, od které dochází v asfaltových směsích u některých minerálů obsažených v kamenivu k prudkému nárůstu tuhosti, který se může negativně projevat na vlastnostech asfaltových směsí. Ne všichni silniční technologové si musí být tohoto faktu vědomi. Předložená metodika dokáže pro použité materiály tyto hraniční koncentrace jednoznačně změřit a může tak tvořit základ dalšího rozvoje znalostí o asfaltových směsích.**

---

**Pozn. 16** *Problémem vysokých koncentrací je, že zdánlivá viskozita je měřena v silně turbulentním toku, který se projevuje kolísáním okamžitých hodnot na křivce.*

Oba přístupy je možné využít k identifikaci vlivu petrografického složení jednotlivých typů kameniva na vlastnosti mastixové malty a vice versa vliv samotného pojiva na vlastnosti suspenzních materiálů při neměnné minerální složce.

Je stále nutné mít na paměti, že předložená technika hodnocení vlivu kvality fileru na vlastnosti resultujícího mastixového materiálu je zcela nový laboratorní hodnotící postup vhodný především jako nástroj určený pro využití k dalšímu výzkumu daného problému. Proto se předpokládá, že praktickým používáním se dosáhne postupného zpřesnění a optimalizace postupu v jednotlivých následných iteračních krocích, a zároveň se odhalí slabiny a limity metody.

Metodika upozorňuje i na problémy, které jsou spojeny s přípravou vzorků a reprodukovatelností a opakovatelností měření. Jedná se především o vliv sedimentace částic filerů obsažených ve vzorcích připravovaných za vyšších teplot.

## 10. Seznam publikací, které předcházely metodice

STOKLÁSEK, S.; DAŠEK, O.; ŠPAČEK, P.; HEGR, Z.; KAŠPÁREK, M.; DUPUY, J.; ZRŮSTOVÁ, M.; HÝZL, P.; COUFALÍK, P.; VARAUS, M., Sledování vlastností drobného kameniva a jeho vlivu na funkční vlastnosti asfaltových směsí. In *Asfaltové vozovky 2017*. 1. České Budějovice: PRAGOPROJEKT, a.s., K Ryšánce 1668/16, 147 54 Praha 4, 2017. s. 1-9. ISBN: 978-80-906809-0-6.

STOKLÁSEK, S.; DAŠEK, O.; HEGR, Z., Reologické vlastnosti mastixové malty v závislosti na petrografickém původu filerických částic. Konference RDIT 2018. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, 2018. s. 1-16.

DAŠEK, O.; STOKLÁSEK, S.; HÝZL, P.; STEHLÍK, D., Rheological Properties of Mastic Mortar Depending on Petrographic Origin of Filler Particles, International Congress on Recent Advances in Sciences and Technology (ICORAST 2019). Kuala Lumpur. Malaysia. 20-22. únor 2019.

STOKLÁSEK, S., DAŠEK, O., VARAUS, M., HEGR, Z., KAŠPÁREK, M., Filerická frakce drobného kameniva a metody pro posouzení jejího vlivu na ztužení mastixové malty v asfaltových směsích, konference Asfaltové vozovky 19, České Budějovice, 26-27. listopad 2019.

## 11. Dedikace na projekt

Metodika byla zpracována v rámci řešení projektu Technologické agentury ČR s označením TH02020246 a názvem „Sledování vlastností drobného kameniva za účelem prodloužení životnosti asfaltových vozovek“.

## 12. Jména oponentů a názvy jejich organizací

Ing. Jiří Škrabka, Úsek kontroly kvality staveb, Ředitelství silnic a dálnic ČR

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

## 13. Citovaná literatura

1. ČSN EN 16659, Asfalty a asfaltová pojiva - Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test), listopad 2016.
2. Stoklásek, S., Dašek, O., et al., METODIKA STANOVENÍ PŘÍTOMNOSTI A OBSAHU SLÍDOVÝCH MINERÁLŮ V KAMENIVU URČENÉM PRO VÝROBU ASFALTOVÝCH SMĚSÍ, FAST VUT Brno, říjen 2018, certifikovaná metodika Ministerstvem dopravy ČR.
3. ČSN EN 13043, Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch, duben 2014.
4. ČSN EN 13043, Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch, duben 2004.
5. ČSN EN 933-1, Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor, červen 2012.
6. ČSN EN 933-8+A1, Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 8: Posouzení jemných částic - Zkouška ekvivalentu písku, prosinec 2016.
7. ČSN EN 933-9 +A1, Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 9: Posouzení jemných částic - Zkouška methylenovou modří, září 2013.
8. ČSN EN 933-10, Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 10: Posouzení jemných částic - Zrnitost fileru (prosévání proudem vzduchu), únor 2010.
9. ČSN EN 1097-3, Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 3: Stanovení sypné hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva, srpen 1999.
10. ČSN EN 1097-4, Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 4: Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru, říjen 2010.
11. ČSN EN 1097-5, Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně, říjen 2008.
12. ČSN EN 1097-7, Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 7: Stanovení měrné hmotnosti fileru - Pyknometrická zkouška, říjen 2010.
13. ČSN EN 13179-1, Zkoušení fileru pro asfaltové směsi - Část 1: Zkouška delta kroužek a kulička, únor 2014.
14. ČSN EN 13179-2, Zkoušení fileru pro asfaltové směsi - Část 2: Asfaltové číslo, zýřá 2001.

15. ČSN EN 1744-4, Zkoušení chemických vlastností kameniva - Část 4: Stanovení citlivosti na vodu filerů pro asfaltové směsi, leden 2006.
16. ČSN EN 196-2, Metody zkoušení cementu - Část 2: Chemický rozbor cementu, listopad 2013.
17. ČSN EN 196-6, Metody zkoušení cementu - Část 6: Stanovení jemnosti mletí, červen 2019.
18. Bahia, H., U., at al., Test Methods and Specification Criteria for Mineral Filler Used in HMA, University of Wisconsin-Madison Final Report for NCHRP project 9/45, Revised Draft 12/28/2010.
19. Grabowski, W., Wilanowicz, J., The structure of mineral fillers and their stiffening properties in filler-bitumen mastics, *Materials and Structures* 41(4):793-804, May 2008.
20. Stoklásek, S., Dašek, O., Varaus, M., Hegr, Z., Kašpárek, M., Filerická frakce drobného kameniva a metody pro posouzení jejího vlivu na ztužení mastixové malty v asfaltových směsích, konference Asfaltové vozovky 19, České Budějovice, 26-27. listopad 2019.
21. Rigden, P.J., The use of filler in bituminous road surfacings., *Journal of the Society of Chemical Industry*, Volume 66, September 1947.
22. Kadleček, J., Hodnocení vlastností drobného kameniva pro asfaltové směsi, diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, FAST fakulta stavební, Brno, leden 2018.
23. AASHTO T 304, Uncompacted Void Content of Fine Aggregate, 2014.
24. Stoklásek, S., Vlastnosti drobného drceného kameniva a jeho filerové složky: Vliv fileru na vlastnosti kompozitního systému – asfaltové pojivo/filer a vlastnosti asfaltových směsí, FAST VUT Brno, duben 2016.
25. Heukelom, W., The role of filler in bituminous mixes, *Proc Assoc Asphalt Paving Technologist*, Volume 34, pp. 396–429, 1965.
26. Hintz, H., Faheem, A., Bahia, H., U., Use of Additives and Fillers in Hot-Mix Asphalt, presentation, CUPGA 2010 WORKSHOP PROGRA, November 28, 2010, Edmonton, <https://www.ctaa.ca/wp-content/uploads/2012/02/Use-of-Additives-and-Fillers-in-Hot-Mix-Asphalt-Bahia.pdf>.
27. Tunnicliff, D.G., Review of Mineral Fillers, *Journal of Association of Asphalts Paving Technologist*, Vol. 3, 1962, p. 118.
28. Winniford, R.S., The rheology of asphalt-filler system as shown by the micro-viscometer, *American Society for testing and Materials*, STP309, 1961, p. 109.
29. EuLA (European Lime Association), HYDRATED LIME A PROVEN ADDITIVE FOR DURABLE ASPHALT PAVEMENTS, critical literature review, December 2011, Brussels, Belgium, [www.eula.eu](http://www.eula.eu).

30. Little, D.N., Epps, J.A., Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt, National Lime Association, April 2006.
31. NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, Research Results Digest 357, NCHRP 9-45 Project, June 2011, [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_rrd\\_357.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rrd_357.pdf).
32. Anderson, D., A., and Goetz, W., H., Mechanical Behaviour and reinforcement of mineral filler – asphalt mixtures, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists Volume 42., 1973.
33. Anderson, D., A., Tarris, J., P., Brock, J., D., Dust collector fines and their influence on mixture design, Report No: NAPA QIP 102, 1982.
34. Craus, J., Ishai, I., Sides, A., Some Physico-Chemical Aspects of the Effect and the Role of the Filler in Bituminous Paving Mixtures, Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 47, 1978, p. 558.
35. Kim, Y., R. Little, D., N., Song, I., Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics: Mechanical evaluation, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1832, 2012, p. 1.
36. Faheem, A. , Wen, H., Stephensen, L., Bahia, H. U., Effect of Mineral Filler on Characteristics of Asphalt Binder, Journal of he Association of Asphalt Paving Technologist, Vol. 77, 2008.
37. Faheem, A., Bahia, H.,U., Conceptual Phenomenological Model for Interaction of Asphalt Binder With Mineral Fillers, Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 78, 2009.
38. Faheem, A., Bahia, H.,U., Modelling of asphalt mastic in term of filler-bitumen interaction, Road Materials and Pavement Design, EATA 2010, p. 281.
39. Kanitpong, K., Bahia, H., U., Role of Adhesion and Thin Film Tackiness of Asphalt Binder in Moisture Damage of HMA, Journal of the Association of SPHALT Paving Technologist, Vol. 72, 2003.
40. Taylor, R., Surface interactions between bitumen and mineral fillers and their effects on the rheology of bitumen-filler mastics, Thesis, June 2007, University Nottingham.
41. Hurysz, K., M., Cochrane J.,K, Modelling paste properties with minimum experimentation, Journal of Ceramic Processing Research, 2004, Volume 5, No. 3, p. 191.
42. Stoklásek, S., Identifikace základních vlastností souboru vzorků směsi drobného kameniva frakce SDK 0/4 a jejich filerických podílů, FAST VUT Brno, leden 2018, Příloha k odborné zprávě o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2017,. Projekt TH02020246, FAST VUT Brno, leden 2018.

43. ČSN EN 14770, Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR), prosinec 2012.
44. ČSN 65 7222-3, Asfalty a asfaltová pojiva - Silniční modifikované asfalty - Část 3: Speciální polymerem modifikované asfalty, květen 2018.
45. Kadlčák, J., *Obrazová analýza a současné metody granulometrie*, Rešeršní část k diplomové práci, Masarykova Universita, Přírodovědecká fakulta, 2014.
46. DAŠEK, O.; STOKLÁSEK, S.; COUFALÍK, P.; HÝZL, P.; VARAUS, M. Thermooxidative properties of bituminous binders in relation to their inner chemical compatibility determined by single point prec, vol. 2017 (18), no. Supplement 1, p. 118-130. ISSN: 1468-0629.

## Příloha 1. Vybrané reologické modely pro suspenze

### Herschel-Bulkley model

$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n$		MA -1
$\dot{\gamma}$	= smyková rychlost (1/s)	
$\tau$	= smykové napětí (Pa)	
$\tau_0$	= hraniční smykové napětí (Pa)	
$K, n$	= koeficienty	

### Einsteinův model

$\eta = \eta_0(1 + [\eta]\varphi)$		MA -2
$\eta$	= viskozita suspenze (Pa.s)	
$\eta_0$	= viskozita kapalné fáze bez pevných částic (Pa.s)	
$[\eta]$	= vnitřní viskozita pevné fáze (dL/g)	
$\varphi$	= objem pevné fáze v suspenzi (obj. %)	

### Mooney model

$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{[\eta]\varphi}{1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\max}}}\right)$		MA -3
$\eta$	= viskozita suspenze (Pa.s)	
$\eta_0$	= viskozita kapalné fáze bez pevných částic (Pa.s)	
$[\eta]$	= vnitřní viskozita pevné fáze (dL/g)	
$\varphi$	= objem pevné fáze v suspenzi v % (obj. %)	
$\varphi_{\max}$	= maximální zhutnitelný objem frakce pevné fáze v % (obj. %)	

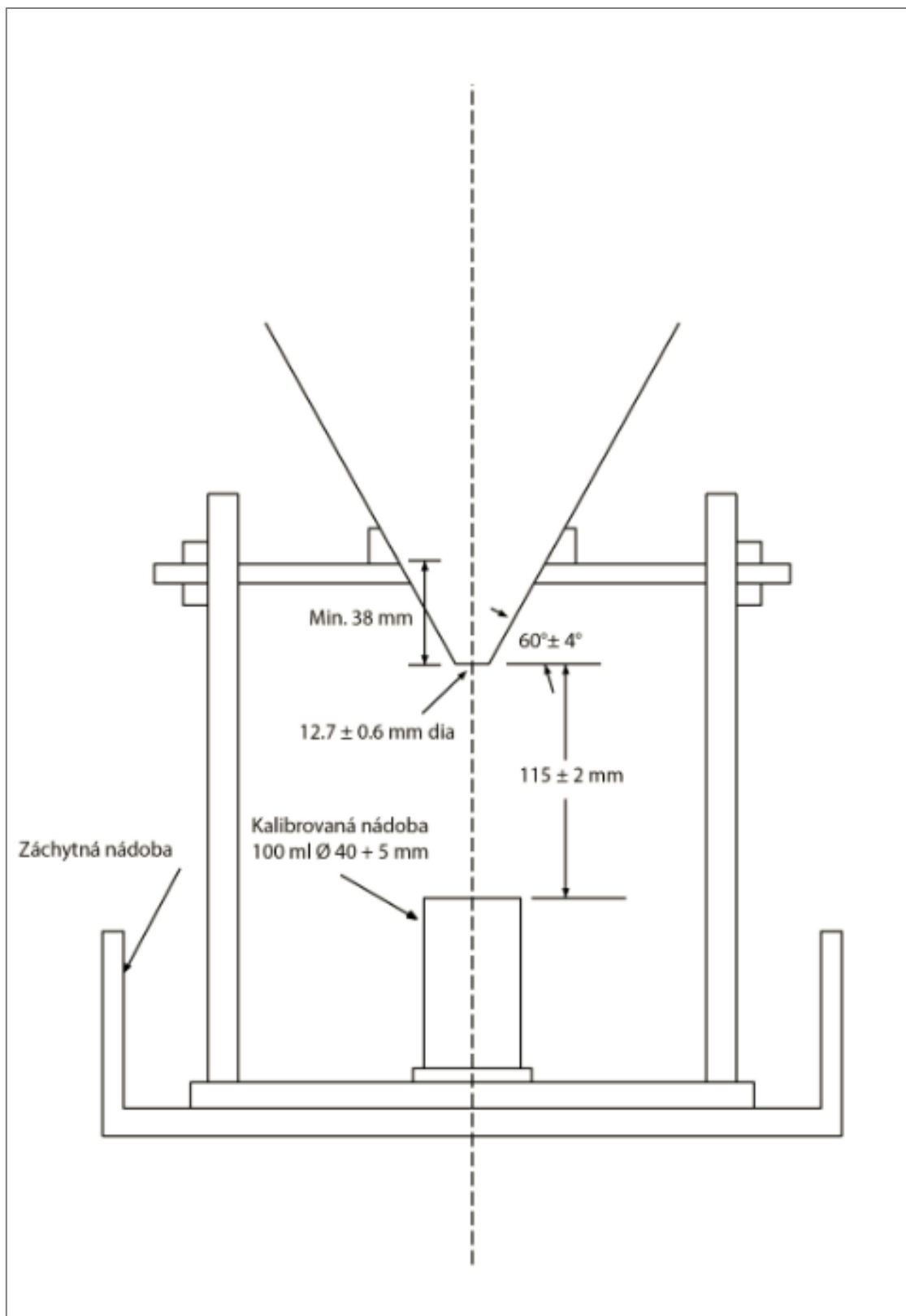
### Krieger-Dougherty model

$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\max}}\right)^{-[\eta]\varphi_{\max}}$		MA -4
$\eta$	= viskozita suspenze (Pa.s)	
$\eta_0$	= viskozita kapalné fáze bez pevných částic (Pa.s)	
$[\eta]$	= vnitřní viskozita pevné fáze (dL/g)	
$\varphi$	= objem pevné fáze v suspenzi (obj. %)	
$\varphi_{\max}$	= maximální zhutnitelný objem frakce pevné fáze (obj. %)	

### Chong model

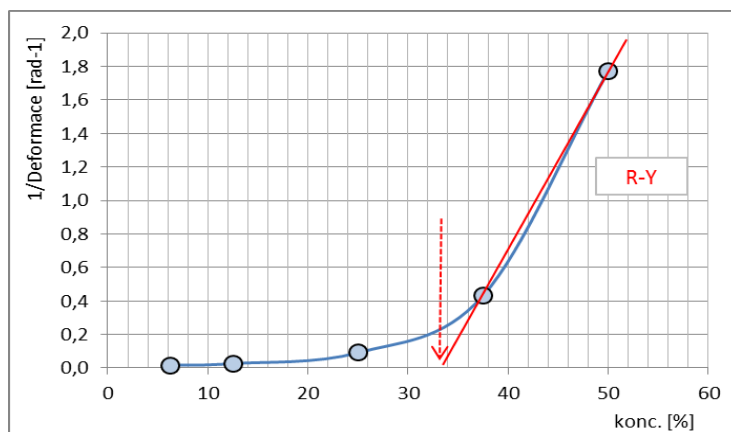
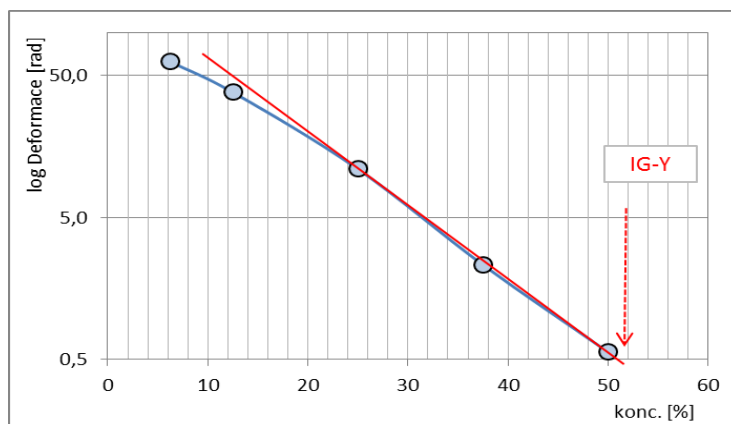
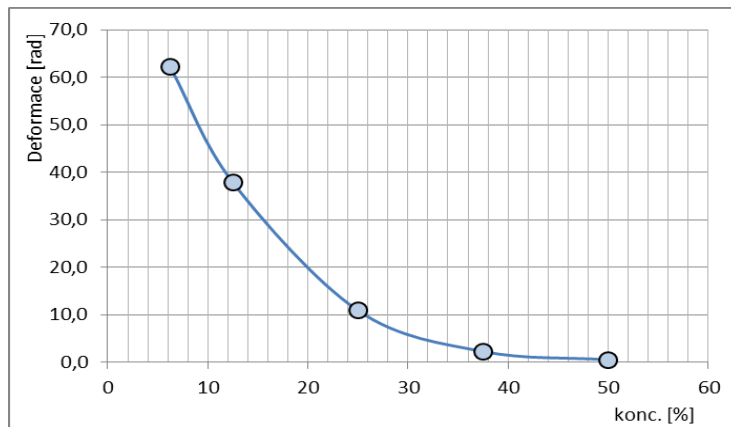
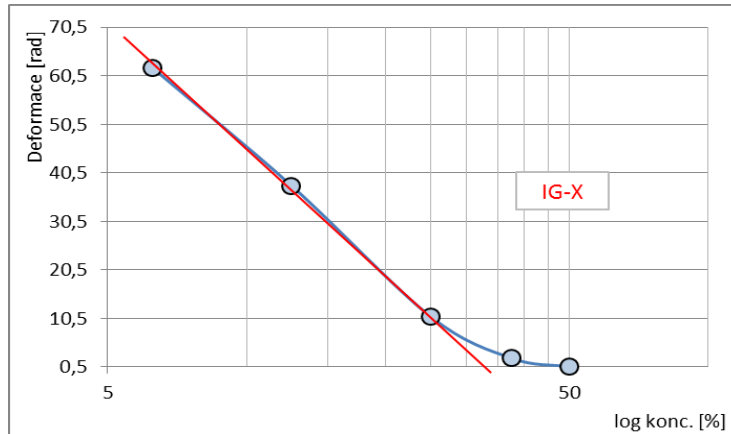
$\eta = \eta_0 \left[1 + \frac{[\eta]\varphi}{2} \left(\frac{\frac{\varphi}{\varphi_{\max}}}{1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\max}}}\right)\right]^2$		MA -5
$\eta$	= viskozita suspenze (Pa.s)	
$\eta_0$	= viskozita kapalné fáze bez pevných částic (Pa.s)	
$[\eta]$	= vnitřní viskozita pevné fáze (dL/g)	
$\varphi$	= objem pevné fáze v suspenzi v % (obj. %)	
$\varphi_{\max}$	= maximální zhutnitelný objem frakce pevné fáze v % (obj. %)	

## Příloha 2. Schematický náčrt aparátu pro stanovení synné hmotnosti





### Příloha 3. Možnosti analýzy dat získaných na mastixech



## Příloha 4. Kritické frakční objemy uceleného souboru filerických materiálů

**Tabulka P4.1:** Kritické frakční objemy mastixových malt pro region A, filerické materiály frakce 0/0,063 mm

Region A								
Označení	FrX <sub>A</sub>	SFrX <sub>A</sub> <sup>*)</sup>	FrX <sub>B</sub>	SFrXB	CROSS A	CROSS B	Hornina / Minerál	Poznámka
TA-052-056	42,4	24,93	31,2	22,33	34,81	29,76	křemen	křemenný písek
TA_067-071	40,8	21,24	32,7	19,10	32,64	35,27	křemen + rula	1 : 1
TA-072-077	39,4	20,40	31,6	20,51	36,98	34,79	vápenec	vápencový filer
TA-078-082	40,0	21,07	29,1	28,42	32,41	33,28	granit, rula	
TA-083-088	39,3	21,04	31,0	23,36	31,07	34,56	pískovec	
TA-101-105	28,0	8,10	22,7	5,60	24,73	23,50	biotit	slída 59 %, Wetfix báze
TA-106-110	21,2	5,92	11,4	3,82	12,54	12,50	biotit	slída 59 %, asfalt s FTI=1,2
TA-111-115	27,6	8,48	23,4	3,37	24,67	23,93	biotit	slída 59 %, asfalt s FTI=2,7
TA-116-120	19,0	4,48	11,3	3,81	12,51	12,50	Biotit + minerl. adit.	slída 59 % + asfalt s FTI=1,2
TA-127-131	27,9	7,27	23,0	5,18	24,91	23,56	rula	
TA-132-136	30,2	9,54	23,5	5,97	24,89	24,23	granodiorit	
TA-137-141	34,3	11,87	34,3	6,39	31,11	35,07	droba	
TA -142-146	34,0	13,14	36,2	3,33	29,99	36,73	rula	
TA_147-151	30,2	9,15	23,5	6,15	25,10	24,11	čedič	
TA-152-155	27,2	7,94	23,3	3,36	24,68	23,82	biotit	slída 59 %
<b>Minimum</b>	<b>19,0</b>	<b>4,5</b>	<b>11,3</b>	<b>3,3</b>	<b>12,5</b>	<b>12,5</b>		
<b>Maximum</b>	<b>42,4</b>	<b>24,9</b>	<b>36,2</b>	<b>28,4</b>	<b>37,0</b>	<b>36,7</b>		
<b>Rozpětí</b>	<b>13,4</b>	<b>20,4</b>	<b>24,9</b>	<b>25,1</b>	<b>24,5</b>	<b>24,2</b>		

\*) matematicky upraveno na kladné číslo v rozsahu 10 až 99

**Tabulka P4.2:** Kritické frakční objemy mastixových malt pro region B, MSCRT (smykové napětí 6,4 kPa), filerické materiály frakce 0/0,063 mm

Region B								
Označení	IG-X <sup>*)</sup>	SIG-X	IG-Y	SIG-Y <sup>*)</sup>	R-Y	SR-Y <sup>*)</sup>	Hornina / Minerál	Poznámka
TA_052-056	55,9	80,2	69,3	220,6	30,4	228,2	křemen	křemenný písek
TA_057-061	44,2	57,0	49,7	97,3	33,8	52,4	křemen + biotit	1 : 1
TA_062-066	47,1	60,7	57,6	139,7	33,1	108,2	rula + vápenec	1 : 1
TA_067-071	51,3	73,8	61,1	163,8	30,2	129,4	křemen + rula	1 : 1
TA_078-082	49,5	70,5	67,2	224,0	30,2	187,3	granit, rula	
TA_083-088	74,4	120,1	68,6	193,2	31,0	260,7	pískovec	
TA_127-131	34,0	40,0	45,0	87,3	33,5	31,2	rula	
TA_132-136	35,6	56,9	42,4	80,0	33,4	22,7	granodiorit	
TA_137-141	42,9	57,6	55,5	136,4	32,3	95,0	droba	
TA_142-146	44,1	56,8	54,2	122,3	33,5	80,4	rula	
TA_147-151	35,8	47,8	40,8	62,5	35,1	133,4	čedič	
<b>Minimum</b>	<b>34,0</b>	<b>40,0</b>	<b>40,8</b>	<b>62,5</b>	<b>30,2</b>	<b>13,4</b>		
<b>Maximum</b>	<b>74,4</b>	<b>120,1</b>	<b>69,3</b>	<b>224,0</b>	<b>35,1</b>	<b>260,7</b>		
<b>Rozpětí</b>	<b>40,4</b>	<b>80,1</b>	<b>28,5</b>	<b>161,5</b>	<b>4,9</b>	<b>247,3</b>		

*\*) matematicky upraveno na kladné číslo v rozsahu 10 až 999*