ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedry silničních staveb

Analýza vybraných reologických charakteristik asfaltových pojiv

Analysis of selected rheological characteristics of bituminous binders

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Lucie Benešová

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: doc. Ing. František Luxemburk, CSc.
Ing. Jan Valentin, Ph.D. (školitel specialista)

Praha, 2019

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Lucie Benešová

Název disertační práce: Analýza vybraných reologických charakteristik asfaltových pojiv

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele specialisty Ing. Jana Valentina, Ph.D..
Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:
TE01020168 (CESTI) Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrstrukturu
TA02030639 (CRAPave) Trvanlivé akustické asfaltové vrstvy s uplatněním výkonových asfaltových pojiv modifikovaných mikrogranulátem pryže, včetně inovativní technologie jejího mletí
TA04031255 (WMARec) Vývoj funkčních asfaltových pojiv pro teplé asfaltové směsi se zvýšeným podílem asfaltového R-materiálu
SGS16/054/OHK1/1T/11 Korelační vztahy deformačních vlastností asfaltových pojiv a směsí

V Praze dne ....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta stavební

Katedra silničních staveb

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala školiteli specialistovi, Ing. Janu Valentinovi, Ph.D. za odborné vedení a poskytnuté konzultace během zpracování disertační práce. Dále bych chtěla poděkovat celému kolektivu silniční laboratoře Českého vysokého učení technického v Praze za ochotu kdykoli pomoci. Kristýně Miláčkové patří moje poděkování za poskytnutí části výsledků, které jsem v práci použila. Poděkování patří i mé rodině, která mi byla po celou dobu oporou a pomáhala mi především s opatrováním syna.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta stavební

Katedra silničních staveb

ABSTRAKT

Charakteristickou vlastností asfaltových pojiv je jejich závislost na teplotě a velikosti zatížení. Z tohoto důvodu je důležité se zaměřit na funkční zkoušení asfaltových pojiv, především na reologické zkoušky, které se uvedené závislosti věnují. Hlavním obsahem práce je popis a zkoumání dvou základních reologických zkoušek prováděných na dynamickém smykovém reometru, sloužící k charakterizování přetvárných vlastností asfaltových pojiv. První z nich je oscilační zkouška s režimem frekvenční sweep a druhou zkouškou je Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCR). Stěžejním cílem práce je stanovení limitních hodnot základních charakteristik obou metod, neboť ani pro jednu nejsou definovány v žádné technické normě. Navíc pro novější zkoušku MSCR existuje několik sporných otázek ohledně konfigurace zkoušky. I tato problematika je podrobně řešena a v závěru jsou shrnuta doporučení pro modifikaci standardní metody.

Klíčová slova: Reologie, asfaltové pojivo, funkční zkoušky, zkouška MSCR, oscilační zkouška Frequency Sweep, dynamický smykový reometr

ABSTRACT

The typical characteristic of bituminous binders is their dependence on temperature and acting load. For this reason, it is important to focus on the performance-related testing of bituminous binders, especially the rheological tests that deal with these dependencies. The main content of this thesis is a description and an investigation of two basic rheological tests performed on dynamic shear rheometer used for characterization of deformation properties of bituminous binders. The first test is the oscillation test with frequency sweep mode and the second is the Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCR). The main aim of the thesis is to set limit values of characteristics related to these two test methods because neither of them is defined in any technical standard. In addition, there are a number of controversial questions about the test configuration for the newer MSCR test method. This issue is also studied in detail and recommendations for modification of the standard method are provided in the conclusion.

Keywords: Rheology, bituminous binder, performance-related tests, MSCR test, oscillatory test Frequency Sweep, dynamic shear rheometer

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta stavební

Katedra silničních staveb

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[m^2]	Plocha
AASHTO		Americká asociace státních silnic a dopravních činitelů (American Association of State Highway and Transportation Officials)
ABCD		Asphalt Binder Cracking Device
AMAP		Sdružení výrobců modifikovaných pojiv (Association of Modified Asphalt Producers)
ASTM		Americká společnost pro zkoušení a materiály (American Society for Testing and Materials)
a_t	[-]	Faktor posunutí
b	[m]	Šířka
BBR		Průhybový trámečkový reometr (Bending Beam Rheometer)
BCM		Koloidní model (Bitumen Colloidal Model)
c_1, c_2	[-]	Materiálový součinitel
CD		Testovací režim s řízeným přetvořením (controlled deformation)
CP		Geometrie dynamického smykového reometru kužel/deska
CR		Testovací režim s řízenou smykovou rychlostí (controlled rate)
CR		Pryžový granulát
CS		Testovací režim s řízeným napětím (controlled stress)
ČSN		Česká technická norma
DENT		Zkouška Double-edge-notched tension
DKT	[°C]	Dolní kritická teplota
DPF		Model Disperzní polární tekutiny (Dispersed Polar Fluid)
DSR		Dynamický smykový reometr (Dynamic Shear Rheometer)
DTT		Zkouška přímého tahu (Direct Tension Test)
E	[Pa]	Youngův modul pružnosti
EN		Evropská norma
EVT		Ekviviskózní teplota (Equiviscous Temperature)
f	[Hz]	Frekvence
F	[N]	Síla
FS		Oscilační zkouška Frequency Sweep test
FTT		Zkouška houževnatosti (Fracture Toughness test)
G*	[Pa]	Komplexní smykový modul
G´	[Pa]	Reálná (elastická) složka komplexního smykového modulu
G´´	[Pa]	Imaginární (viskózní) složka komplexního smykového modulu
G_v	[Pa]	Viskózní složka tuhosti tečení
h	[m]	Výška vzorku
HiPAT		Typ dlouhodobého stárnutí při vysokém tlaku (Hight Pressure Ageing Test)
HKT	[°C]	Horní kritická teplota
J_{nr}	[kPa^{-1}]	Nevratná smyková poddajnost
$J_{nr,diff}$	[%]	Procentuální rozdíl v nevratné smykové poddajnosti (parametr citlivosti)

$J_{nr,slope}$	[%]	Parametr citlivosti nevratné smykové poddajnosti
LAOS		Zkouška Large Amplitude Oscillatory Shear
LAS		Zkouška Linear Amplitude Sweep
LSV		Viskozita při nízkých smykových rychlostech (Low shear viscosity)
LVR		Lineárně viskoelastická oblast (Linear Viscoelastic Region)
MC		Řídící křivka (master curve)
MSCR		Zkouška Multiple Stress Creep Recovery
NV		Nízkoviskózní vosky
PAO		Amorfní přísada poly-alfa-olefinů
PAV		Urychlené laboratorní dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (Pressure Ageing Vessel)
m(t)		Sklon křivky dotvarování
NA		Přírodní asfalt
PG		Výkonová třída (Performance grade)
PI	[-]	Penetrační index
PMB		Polymerem modifikované asfalty
PP08		Geometrie DSR desek s průměrem 8 mm
PP25		Geometrie DSR desek s průměrem 25 mm
r	[m]	Vzdálenost od středu zkušební geometrie
%R	[%]	Elastické zotavení
R_{diff}	[-]	Procentuální rozdíl v elastickém zotavení
RCAT		Urychlené laboratorní dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (Rotating Cylinder Ageing Test)
RCR		Zkouška Repeated Creep and Recovery
RFT		Typ krátkodobého stárnutí metodou rotující baňky (Rotating Flask Test)
RTFOT		Typ krátkodobého stárnutí (Rolling Thin Film Oven Test)
S(t)	[Pa]	Modul tuhosti za ohybu
SA		Silniční asfalty
SARA		Skupinová analýza chemického složení asfaltu (zkratka vychází z úvodních písmen Saturates, Asphaltenes, Resins a Aromatics)
SENB		Zkouška Single-Edge Notched Bending
SGS		Studentská grantová soutěž
SHRP		Strategický silniční výzkumný program (The strategic Highway Research Program)
SKT	[°C]	Střední kritická teplota
SMA		Asfaltový koberec mastixový (Stone mastic asphalt)
t	[s]	Čas
T	[°C]	Teplota
T	[Nm]	Točivý moment
T_{VET}	[°C]	Viskoelastická teplota přechodu
TFOT		Typ krátkodobého stárnutí (Thin Film Oven Test)
TTS		Princip superpozice času a teploty (time-temperature superposition)
u	[m]	Posun

WLF	Model Williams–Landel–Ferry
ZSV	Viskozita při nulovém smyku (Zero shear viscosity)

γ	[-]	Poměrné smykové přetvoření
γ_{max}	[-]	Amplituda smykového přetvoření
$\dot{\gamma}$	[1/s]	Smyková rychlost
δ	[°]	Úhel fázového posunu (ztrátový úhel)
ε	[-]	Relativní přetvoření
ε_1	[-]	Celkové přetvoření
ε_{10}	[-]	Nevratná část přetvoření
ε_p	[-]	Poměrné přetvoření pružiny
ε_t	[-]	Poměrné přetvoření tlumiče
η	[Pa.s]	Dynamická viskozita
η_0	[Pa.s]	Dynamická viskozita při nulovém smyku
η_∞	[Pa.s]	Nekonečná smyková viskozita
λ	[s]	Retardační čas
σ	[Pa]	Napětí
σ_p	[Pa]	Napětí pružiny
σ_t	[Pa]	Napětí tlumiče
τ	[Pa]	Smykové napětí
τ_{max}	[Pa]	Amplituda smykového napětí
ω	[rad/s]	Úhlová frekvence
θ	[rad]	Maximální úhlový posun (pootočení)
Δt	[s]	Časové zpoždění mezi napětím a přetvořením
ν	[m^2/s]	Kinematická viskozita

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta stavební

Katedra silničních staveb

OBSAH

1. ÚVOD 4

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE 6

3. TEORETICKÁ ČÁST 8

3.1 Současný stav řešené problematiky 8
3.1.1 Problematika trvalých deformací 10

3.2 Asfaltové pojivo 11
3.2.1 Rozdělení asfaltů 12
3.2.1.1 Přírodní asfalty 14
3.2.1.2 Ropné asfalty 15
3.2.2 Historie používání asfaltů 15
3.2.3 Zpracování ropy a výroba základního asfaltu 16
3.2.4 Mikrostruktura a chemické vlastnosti 18
3.2.5 Fyzikální vlastnosti asfaltového pojiva 22

3.3 SHRP projekt 22

3.4 Reologie 23
3.4.1 Podstata reologie 24
3.4.2 Newtonská a nenewtonská kapalina 26
3.4.2.1 Nenewtonské kapaliny 26
3.4.3 Základní reologické prvky a modely 28
3.4.4 Reologické vlastnosti asfaltových pojiv 33

3.5 Od empirických k reologickým zkouškám 35

3.6 Reologické zkoušky asfaltových pojiv 36
3.6.1 Základní reologické zkoušky asfaltových pojiv 37

3.7 Klasifikace asfaltových pojiv v USA 40

3.8 Dynamický smykový reometr (DSR) 43
3.8.1 Dynamicko-mechanická analýza měření na DSR 46
3.8.2 Lineární viskoelastická oblast 46

3.9 Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu 47
3.9.1 Princip oscilačního měření 51
3.9.2 Grafická interpretace výsledků oscilační zkoušky 54
3.9.3 Modely predikující tuhost asfaltových směsí s využitím tuhosti pojiv 57

3.10 Zkouška MSCR 58
3.10.1 Standardní princip a výpočet zkoušky MSCR 62
3.10.2 Teoretický model zkoušky MSCR 66

3.11 Současné funkční požadavky asfaltových pojiv 67

3.12 Stárnutí asfaltového pojiva 68

4. VLASTNÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOST 71

4.1 Oscilační zkouška FS 72
4.1.1 Silniční asfalty 74
4.1.2 Polymerem modifikované asfalty 77
4.1.3 Asfalty modifikované pryžovým granulátem 80
4.1.4 Stárnutí 85
4.1.4.1 Silniční asfalty 85
4.1.4.2 Polymerem modifikované asfalty 90
4.1.5 Izochrony a izotermy 93
4.1.6 Cole-Cole a Black diagram 94
4.1.7 Řídící křivky 96
4.1.8 Shrnutí oscilační zkoušky FS 98
4.1.9 Vybrané zajímavé skupiny 101
4.1.9.1 Porovnání pojiv PMB 25/55-55 [207] 102
4.1.9.2 Porovnání Silničního asfaltu 50/70 a dvou PMB pojiv 103
4.1.9.3 Porovnání pojiv PMB s vybranými přísadami [205] 105
4.1.9.4 Použití pryžového granulátu a aktivátoru [209] 106
4.1.9.5 Použití pryžového granulátu a přírodního asfaltu [208] 108

4.2 Zkouška MSCR 109
4.2.1 Silniční asfalty 110
4.2.2 Polymerem modifikované asfalty 116
4.2.3 Asfalty modifikované pryžovým granulátem 120
4.2.4 Stárnutí 126
4.2.4.1 Silniční asfalty 126
4.2.4.2 Polymerem modifikované asfalty 132
4.2.5 Vliv zvolené teploty a úrovně napětí [28] 136
4.2.6 Vliv zvolené geometrie měřicího přístroje [28] 147
4.2.7 Vliv počtu cyklů na výpočet jednotlivých charakteristik [28] 150
4.2.8 Celkové zhodnocení zkoušky MSCR 168
4.2.9 Vybrané zajímavé skupiny 176
4.2.9.1 Porovnání pojiv PMB 25/55-55 [207] 176
4.2.9.2 Porovnání Silničního asfaltu 50/70 a dvou PMB pojiv 179
4.2.9.3 Porovnání pojiv PMB s vybranými přísadami [205] 181
4.2.9.4 Použití pryžového granulátu a aktivátoru [209] 183

4.2.9.5 Použití pryžového granulátu a přírodního asfaltu [208] 185

4.3 Vzájemná korelace mezi jednotlivými výsledky 187

4.4 SGS projekt 190

5. ZÁVĚR 192

POUŽITÁ LITERATURA 196

SEZNAM OBRÁZKŮ 215

SEZNAM TABULEK 221

PŘÍLOHY 223

Příloha A 223

Příloha B 224

Příloha C 235

Příloha D 248

1. ÚVOD

Celosvětový rozvoj společnosti vede ke zlepšení životní úrovně obyvatelstva, ale současně přináší i řadu problémů. V oblasti dopravních staveb mezi ně patří stoupající intenzita silniční dopravy a rostoucí dopravní zatížení na pozemních komunikacích. Přes 80 % evropské silniční sítě je tvořeno asfaltovými vozovkami [1], na které jsou kladeny stále větší nároky z hlediska kvality povrchů, spojené s dlouhodobými požadavky na celkovou životnost. Jednotlivé druhy asfaltových směsí jsou závislé nejen na typu a zrnitosti použitého kameniva, ale klíčovým prvkem ovlivňujícím chování celé asfaltové směsi je výběr a množství asfaltového pojiva.

Asfaltové pojivo odpovídá jen malému procentnímu podílu celkového objemu asfaltové směsi (okolo 5 %), avšak změny v molekulární distribuci a mechanickém uspořádání různých složek v asfaltovém pojivu mají značný efekt na vlastnosti asfaltové směsi. To je způsobeno skutečností, že malé modifikace v chemickém a strukturálním složení asfaltové matrice mají vliv na reologické, viskoelastické a termoplastické chování celého kompozitního materiálu.

Z tohoto důvodu se zvyšují nároky na asfaltová pojiva, které jsou v rozporu s jejich zhoršenou kvalitou při výrobě v rafinerii. Zhoršená kvalita vyráběných asfaltových pojiv se projevuje rychlejším stárnutím, nižší odolností vůči extrémním teplotám, vyšší křehkostí a celkovou nižší trvanlivostí. Progres v oblasti rafinérských technologií umožňuje efektivněji zpracovávat surovou ropu, především v případě získávání lehkých a středních derivátů. Zdokonalenými postupy rafinace ropy se získává větší množství těchto derivátů a to na úkor těžkých složek v ropě. Asfaltové pojivo vyráběné z těžkých derivátů má díky tomu jiný poměr základních složek s celkovým dopadem na jeho kvalitu. Současný vývoj v oblasti asfaltových pojiv umožňuje základní pojiva z destilace modifikovat přidáním vhodných přísad a docílit vylepšených vlastností asfaltových pojiv.

Používání modifikovaných pojiv se proto v posledních letech výrazně zvyšuje. V roce 2017 se v ČR při pokládce asfaltových vozovek použilo 26,6 % modifikovaných pojiv [2]. K modifikaci se nejčastěji využívají polymery (přibližně 14 % celkové spotřeby asfaltových pojiv v EU [3]). Další možností je modifikace drcenou pryží z ojetých pneumatik, popřípadě přidání speciálních aditiv. Asfaltové pojivo je viskoelastický materiál a popis jeho vlastností je dost složitý. Modifikací navíc dochází ke změně chemických a fyzikálně-mechanických vlastností. Z tohoto důvodu se zvyšuje důležitost oboru nazývaného **reologie**, který se zabývá především deformačním chováním a s ním souvisejícími charakteristikami.

Nejrozšířenější technické normy asfaltových pojiv v ČR jsou však založeny na chování běžných nemodifikovaných pojiv a dostatečně nevystihují potenciál modifikovaných pojiv. Základními empirickými zkouškami jako je bod měknutí, penetrace, bod lámavosti nebo zpětné přetvoření lze asfaltová pojiva charakterizovat či třídit, ale k přesnějšímu popisu chování je vhodné využívat reologické = funkční zkoušky (příp. též označované jako zkoušky užitného chování).

K měření funkčních zkoušek se uplatňují sofistikované zkušební přístroje jako je dynamický smykový reometr (DSR) nebo průhybový trámečkový reometr (BBR). Hlavním důvodem pro zavádění funkčních charakteristik je, že přesněji vystihují chování blížící se reálným podmínkám. Reologickými zkouškami je možné hodnotit měnící se teploty, různé

velikosti zatížení, případně celkovou dynamiku zatížení konstrukce vozovky. S tím souvisí rostoucí důraz na reologické vlastnosti, které jsou díky viskoelastickému charakteru asfaltových pojiv i směsí významným hlediskem.

Další předností funkčních charakteristik je, že umožňují lépe odhadnout a předpovědět odolnost asfaltové směsi vůči nejčastějším poruchám vozovek, zejména vyjíždění kolejí při vysokých teplotách, vznik únavových trhlin při opakovaném namáhání a vznik mrazových trhlin při nízkých teplotách (obr. 1). Podle Association of Modified Asphalt Producers (AMAP) se tato poškození vyskytují v následujícím poměru: 48 % trvalé deformace, 25 % únavové trhliny, 22 % nízkoteplotní trhliny a 5 % ostatní poruchy [4]. Česká republika se nachází v klimatickém pásmu s výrazně proměnlivou teplotou v průběhu roku, a proto se se všemi hlavními poruchami vozovek na našem území setkáváme.

Reologické zkoušky se používají poměrně krátkou dobu a je nutné nejen vyvíjet nové zkušební postupy, ale především jednoznačně stanovit okrajové podmínky zkušebních metod a současně porovnávat stávající zkoušky. Významným problémem omezujícím rozšíření funkčních zkoušek je technická složitost, finanční a v některých případech i časová náročnost měření.

Vlastní disertační práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V první části je shrnut současný stav řešené problematiky, obecně je popsáno asfaltové pojivo a sumarizován americký výzkumný projekt The strategic Highway Research Program (SHRP). Následně je vysvětlena věda nazývající se reologie a reologické zkoušky. Hlavní důraz je kladen na popis přístroje dynamického smykového reometru (DSR) a zkoušek měřených při vyšších provozních teplotách. Praktická část se věnuje především dvěma reologickým zkouškám prováděných na DSR. První je oscilační zkouška Frequency Sweep test (FS) a druhou je zkouška Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCR). Obě zkoušky by měly předpovídat odolnost asfaltové směsi vůči tvorbě trvalých deformací způsobené zejména akumulovaným přetvořením v asfaltovém pojivu v důsledku zatížení dopravou.

Obr. 1: Nejčastější poruchy vozovek: vyjeté koleje, únavové trhliny a nízkoteplotní trhliny [7]

[5, 6]

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce se zabývá vybranými reologickými (funkčními) zkouškami asfaltových pojiv se zaměřením na zkoušky stanovené na dynamickém smykovém reometru (DSR) při středních a vyšších teplotách, vystihujících náchylnost k tvorbě trvalých deformací. Jedná se o komplexní zkoušky s vysokou vypovídající hodnotou o chování asfaltových pojiv při různých podmínkách (teplotních, způsobu namáhání, velikosti a délce zatížení atd.). Pochopení reologických vlastností asfaltových pojiv je stěžejním úkolem při výběru vhodných materiálů pro stavbu asfaltových vozovek, protože trvanlivost asfaltových směsí je značně závislá na kvalitě a chování asfaltového pojiva.

V minulosti existovala k charakterizaci chování asfaltových pojiv za vysokých teplot pouze empirická zkouška – bod měknutí. Jedná se o jednoduchou a stále běžně používanou zkoušku, která ovšem není úplně vhodná pro popis odolnosti asfaltového pojiva proti trvalým deformacím. Hlavním důvodem je, že rozdílné typy asfaltových pojiv mají v bodě měknutí různé mechanické vlastnosti. Zavádění reologických vlastností se proto stalo nutností především díky využívání modifikovaných pojiv, k jejichž popsání jsou empirické zkoušky nedostatečné.

V případě aplikace modifikovaných pojiv je vyšší předpoklad dosažení trvanlivějších vozovek. K modifikaci existuje řada zcela odlišných přísad (polymery, pryžový granulát, chemické modifikátory a další), jejichž chování je při různých teplotách a zatížení značně rozdílné. Kvůli tomu je nezbytné na jednotlivé skupiny nahlížet samostatně a vymezit pro ně jednotlivé funkční požadavky. V současnosti dochází k revizím jednotlivých norem asfaltových pojiv se zmínkami o funkčních zkouškách, ale častěji se jedná jen o doporučení provádět tato měření bez specifikace mezních hodnot.

K určení náchylnosti asfaltových pojiv vůči trvalým deformacím se aktuálně upřednostňuje používání relativně nové funkční zkoušky na DSR – Multiple Stress Creep and Recovery Test (**MSCR**). Popis metody je detailně popsán v kapitole 3.10. Zkoušce MSCR se věnuje pozornost již několik let i v silniční laboratoři na ČVUT v Praze, ale stále se u některých asfaltových pojiv získávají nelogické výsledky. Snahou je zjistit důvod nelogických výsledků (zejména záporných hodnot vypočítaných charakteristik) a navrhnout nápravná opatření pro zlepšení. Problémy se vyskytují především u modifikovaných pojiv, a proto je nutné se této problematice blíže věnovat. Současně existují obavy ohledně předepsaných parametrů zkoušky a analýzy výsledků. S tím souvisí i výběr vhodné geometrie zkoušení, volba teploty nebo délka relaxační fáze. Další nejasností je nastavení úrovně napětí, za které by měla zkouška probíhat, aby všechna asfaltová pojiva byla zkoušena v nelineární viskoelastické oblasti. U zkoušky je ještě nezbytné ověřit, zda pro výpočet jednotlivých charakteristik je korektní počítat se všemi deseti cykly zatížení a odlehčení, anebo by bylo přesnější uvažovat jen posledních několik cyklů. Pro změřené hodnoty je dále třeba zvolit povolené hodnoty tak, aby bylo možné vyloučit nevhodná asfaltová pojiva. Tato problematika je podrobněji vysvětlena v kapitole 4.2.

Druhou zkouškou, na kterou se zaměřuje pozornost v disertační práci, je stanovení hodnot komplexního smykového modulu a fázového úhlu. Zkouška se rovněž měří na DSR, ale v oscilačním režimu (popis zkoušky je zevrubněji uveden v kapitole 3.9). Metoda se v ČR provádí déle, ale většinou se zjišťuje pouze konkrétní hodnota komplexního smykového

modulu a fázového úhlu pro jednu teplotu a jednu frekvenci. V současné době se preferuje měření frekvenčních ramp, díky čemuž je možné se setkat se zkratkou – **FS** (Frequency Sweep). K interpretaci výsledků se uplatňuje řada možných přístupů (viz kapitola 3.9.2) a i u této zkoušky je potřebné jednoznačně formulovat nejen okrajové podmínky měření, ale i limitní hodnoty naměřených charakteristik. Podrobně je popsáno v kapitole 4.1.

Měření deformačních charakteristik pouze na asfaltových pojivech není zcela dostačující, a proto se doporučuje získané poznatky ověřit i na asfaltových směsích. Porovnání s asfaltovými směsmi však není cílem této disertační práce. Přesto se této problematice věnoval v roce 2016 studentský projekt v rámci univerzitního programu Studentské grantové soutěže ČVUT v Praze (SGS). Cílem projektu bylo určení korelačních vztahů mezi deformačními charakteristikami asfaltových směsí a pojiv. Závěry SGS projektu jsou stručně shrnuty v kapitole 4.4.

Disertační práce se okrajově věnuje i stárnutí asfaltových pojiv, neboť pojivo v asfaltové vozovce degraduje a mění některé své primární vlastnosti. K degradaci dochází již během výroby asfaltové směsi (zahříváním asfaltového pojiva), což je důvod, proč by se měly obě výše zmíněné zkoušky provádět na vzorcích podrobených krátkodobému stárnutí. Naopak dlouhodobé stárnutí modeluje stárnutí v průběhu životnosti asfaltové vozovky a je důležité zejména kvůli vzniku trhlin (nízkoteplotních i únavových). Simulace dlouhodobého stárnutí je ale nutná i z pohledu recyklování vozovek, protože je podstatné vědět, jak se bude znovupoužité asfaltové pojivo chovat v případě recyklace asfaltové vozovky.

3. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část se věnuje dosavadním poznatkům k dané problematice asfaltových pojiv. Je zde definováno asfaltové pojivo, včetně jeho vlastností a vědní obor reologie. Následně jsou charakterizovány různé reologické zkoušky asfaltových pojiv. Hlavní náplní disertační práce jsou zkoušky měřené na dynamickém smykovém reometru (DSR), který je blíže popsán v kapitole 3.8. Následné kapitoly jsou věnovány zvoleným zkušebním metodám (stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu i zkoušce MSCR) a jejich principům. Další kapitoly v teoretické části shrnují třídění asfaltových pojiv v USA, funkční požadavky na asfaltová pojiva v ČR a stárnutí asfaltových pojiv.

3.1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Jednou z příčin zhoršujícího se stavu silniční sítě v ČR i ve světě je snižující se kvalita asfaltových pojiv a nedostatečná schopnost interpretace a korelace mezi chováním asfaltového pojiva a asfaltové směsi. Výsledkem jsou vozovky s nízkou odolností a životností neschopné odolávat rostoucímu dopravnímu a klimatickému zatížení. Proto je snahou používat asfaltová pojiva s lepšími vlastnostmi v porovnání s běžnými silničními asfalty. Díky tomu dochází k vývoji a aplikování široké škály modifikátorů zlepšujících charakteristiky základních pojiv a tím i asfaltové směsi. V ČR se přibližně 1/4 asfaltových směsí vyrábí s modifikovanými pojivy [2].

Vzhledem k rychlému rozvoji nových typů modifikačních přísad se v současné době jedná o návrhu vytvořit zcela novou evropskou normu pro modifikovaná asfaltová pojiva sjednocující všechny typy speciálně modifikovaných pojiv (mimo polymerem modifikovaná pojiva označovaná PMB). Mezi modifikátory by patřily syntetické vosky, povrchově aktivní látky, nízkoteplotní tenzidické přísady, bio-přísady či bio-polymery, pryžový granulát atd. Záměrem je zabránit vzniku řadě nových norem pro každý typ modifikovaných pojiv. [8]

Nejrozšířenější technické normy asfaltových pojiv jsou založeny zejména na chování běžných nemodifikovaných pojiv a dostatečně nevystihují potenciál modifikovaných pojiv. Po mnoho let byla asfaltová pojiva charakterizována pomocí empirických metod. Mezi nejčastěji používané zkoušky patřila penetrace, bod měknutí a duktilita. Tradiční zkoušky se uplatňovaly především ke stanovení konzistence. Výhodou empirických testů je jejich obecná dostupnost, snadná realizace a historické zkušenosti. Hlavním problémem empirických zkoušek je ale teplota, při které se provádí. Měří se při jedné nebo dvou teplotách, jež nevystihují teplotní rozsah, kterému jsou asfaltové vozovky vystaveny.

I když tradiční systém fungoval přiměřeně dobře, zavedení modifikovaných asfaltů, diverzifikace asfaltových rafinérských surovin a poptávka po materiálech s vyšší odolností zvýšily nároky pro stávající zkušební metody. Z tohoto důvodu zahájila Federální správa dálnic (the Federal Highway Administration) v USA celostátní výzkumný program nazvaný Strategic Highway Research Program (SHRP) [9], díky čemuž došlo k nejvýraznějšímu rozšíření praktického využívání funkčních zkoušek a zavedení odpovídajících užitných charakteristik založených na sledování reologických zákonitostí.

Cílem projektu byla revize stávajících zkušebních postupů a následné zavedení nových metod. V rámci SHRP se pozornost u asfaltových pojiv zaměřila na reologické vlastnosti,

kterým se do té doby odborníci moc nevěnovali. Během výzkumu byly stanoveny nové metody a také vyvinuty nové zkušební přístroje, které se dnes běžně používají. Pro zavedení zkušebních metod do praxe se pro asfaltová pojiva vytvořily nové klasifikační skupiny/třídy, které zahrnují klimatické a geografické vlivy. V USA tak vzniklo sedm užitných tříd PG (Performance Grades) [10]. Více informací o klasifikaci asfaltových pojiv v USA je v kapitole 3.7. V Evropě se podobný přístup zatím neuplatňuje, ačkoli jisté pokusy o zavedení byly v minulosti opakovaně diskutovány. Program SHRP je podrobněji popsán v kapitole 3.3.

Jednou z nejčastějších poruch asfaltových vozovek je tvorba trvalých deformací, která má výrazný vliv na životnost vozovky, zejména v teplých klimatických oblastech a v kombinaci s těžkými a pomalu se pohybujícími vozidly [11-13]. Podle autorů Sybilski a kol. [14], mají vlastnosti pojiva přibližně 40% vliv na vytváření trvalých deformací, a je tedy velmi důležité znát reologické vlastnosti asfaltového pojiva. Pro jednodušší materiály, jako je např. běžný silniční asfalt, je reakce na zatížení pouze lehce ovlivněna druhem napětí, reakce modifikovaných asfaltů (především PMB) je ale značně závislá na napětí i deformaci. Z tohoto důvodu je složité najít vlastnost pojiva, která by spolehlivě předvídala chování asfaltové směsi v oboru vyšších provozních teplot.

Dříve byla odolnost asfaltového pojiva vůči deformačním účinkům určena bodem měknutí [15]. Nově se začaly používat reologické vlastnosti pojiva jako je komplexní smykový modul G* a fázový úhel δ a z nich odvozený parametr G*/sin(δ), který byl představen v již zmiňovaném programu SHRP. Více studií [16-19] přesto prokázalo, že parametr G*/sin(δ) nedostatečně predikuje odolnost modifikovaných pojiv (zejména s vyšším obsahem polymeru) vůči tvorbě trvalých deformací. Je to způsobeno skutečností, že u většiny PMB se objevuje zpožděná elasticita, kterou tento parametr nezohledňuje [20-22] a navíc se zkouška provádí v lineární viskoelastické oblasti. Asfaltová pojiva se chovají jako lineární viskoelastické materiály pouze pro malá napětí (deformace), přičemž vyjíždění kolejí je způsobené akumulací nevratné deformace vozovky při opakovaném zatížení dopravou (při nízkých rychlostech nebo vysokých teplotách). Trvalé deformace tudíž nejsou lineárním viskoelastickým jevem, a proto měření lineárních viskoelastických vlastností asfaltových pojiv není dostačující [19, 23].

Řada vědců [16, 22-25] se snažila navrhnout alternativní způsoby jak posoudit náchylnost k tvorbě nevratných deformací celého spektra asfaltových pojiv, zahrnující nemodifikovaná i modifikovaná asfaltová pojiva. Jednou z alternativních možností, která nahrazuje parametr G*/sin(δ), je stanovení viskozity při nulovém smyku (ZSV) [21, 22, 26], což je viskozita měřená při smykové deformaci a při smykové rychlosti blížící se nule nebo viskozita při nízkých smykových rychlostech (LSV). Další možností je posouzení parametru nevratné poddajnosti {1-1/[tan(δ)·sin δ]}/G* z dynamické oscilační zkoušky, který odvodil Shenoy [25]. Společným jmenovatelem těchto zkoušek je, že jsou měřeny v lineární viskoelastické oblasti (LVR).

Proto se jeví jako vhodnější k popsání vlastností asfaltového pojiva za vyšších teplot vícenásobné zatěžování v nelineární viskoelastické oblasti. V roce 2001 byla zveřejněna zpráva NCHRP Report 459 [16], ve které byla představena zkouška Repeated Creep and Recovery (RCR) prováděná pomocí DSR v režimu tečení (creep). Z této zkoušky se získává parametr nazvaný viskózní složka tuhosti tečení – G_v. Hlavní výhody zkoušky RCR ve srovnání s parametrem G*/sin(δ) jsou popsány v práci [27]. Nejpodstatnějším zjištěním je, že opakované

zatížení tečením simuluje skutečné zatížení na vozovce lépe než oscilační zatížení. Další možností, která se rychle ujala, je zkouška MSCR vyvinutá v USA D'Angelem [23]. Jedná se o relativně novou zkoušku, při jejímž realizování a vyhodnocování existuje řada sporných otázek. Na některé z nich se disertační práce snaží odpovědět v praktické části.

[28-33]

3.1.1 PROBLEMATIKA TRVALÝCH DEFORMACÍ

Trvalé deformace a zejména vyjeté koleje jsou nejčastější poruchou pružných vozovek [4]. Jsou způsobeny smykovou deformací v asfaltové směsi, která je konsekvencí opakované aplikace zatížení [21, 34, 35]. Zjednodušeně řečeno vznikají v důsledku pojezdů těžkých automobilů (nákladních), které přetváří silniční vozovku. Deformace se pohybují od méně než desetiny milimetru za chladného počasí (vozovka a podloží je velmi tuhé), po milimetry za teplého počasí (povrch vozovky je horký a měkký). Po průjezdu automobilu by se měla vozovka ideálně vrátit zpět do své původní polohy, často se však povrch vozovky zcela nezotaví a zůstane malé množství plastické deformace. U nekvalitních asfaltových vozovek nebo u nevhodně navržených vozovek stačí několik pojezdů ke vzniku viditelných deformací. Naopak u kvalitních vozovek jsou trvalé deformace patrné až po 10 miliónech i více pojezdů.

Vyjeté koleje jsou vážným problémem, protože se mohou plnit vodou (během dešťových nebo sněhových srážek) a následně způsobit aquaplaning a ztrátu kontroly nad vozidlem. Hloubka vyjeté koleje více než 10 mm je obvykle považována za nadměrnou a představuje podstatné bezpečnostní riziko. Vyjeté koleje výrazně zkracují životní cyklus vozovky a navíc způsobují významnou ztrátu jízdních vlastností vozovky.

Druhou související formou trvalé deformace jsou podélné vlny (rolety). Vyskytují se těsně před křižovatkami v důsledku častého brždění vozidel, které působí boční silou na povrch asfaltové směsi. Tím dochází k trvalým deformacím vozovky kolmo ve směru jízdy. Často mají formu série vln na povrchu vozovky.

Přestože chování asfaltové vozovky ovlivňuje složení asfaltové směsi a vlastnosti kameniva, zásadní roli mají i vlastnosti asfaltového pojiva. Správnou volbou asfaltového pojiva je možné předejít uvedeným poruchám. Vzhledem k tomu, že se plastické deformace vyskytují především při vysokých teplotách, je třeba měřit vlastnosti spojené s trvalými deformacemi v horním rozsahu provozních teplot vozovky. V průběhu stárnutí se asfaltové pojivo stává tužší a zvyšuje odolnost směsi vůči trvalým deformacím. Proto je vhodné, aby se kritéria plastických deformací zakládaly na zkušebním vzorku krátkodobě zestárlém, který nejlépe simuluje asfaltové vlastnosti na počátku životnosti vozovky.

Obr. 2: Trvalé deformace: vyjeté koleje (vlevo) a rolety (vpravo) [38, 39]

[29, 33, 35-37]

3.2 ASFALTOVÉ POJIVO

Asfaltové pojivo je spolu s kamenivem jednou ze základních složek asfaltové směsi. Asfaltové pojivo přenáší v asfaltové vrstvě konstrukce vozovky primárně síly v tahu a naopak kostra směsi (kamenivo) přenáší převážně tlakové síly. Vlastnosti výsledné asfaltové směsi závisí na druhu a množství obou složek. Pojivo má stěžejní vliv na celkovou kvalitu i cenu asfaltové vozovky, ačkoli ho bývá ve směsích jen okolo 5 % až 6 %. Asfaltové pojivo slouží k obalení kameniva, a proto musí mít dostatečnou schopnost přilnutí ke kamenivu a současně musí zajistit kohezi směsi. Hlavní úlohou asfaltového pojiva v asfaltových směsích je schopnost vyrovnávat napětí z dopravního a klimatického zatížení a díky tomu předcházet poruchám vozovek. Podle příspěvku Hanzíka [40], pojivo ovlivňuje ze 40 % odolnost proti vyjíždění kolejí, z 60 % únavové vlastnosti a z 90 % nízkoteplotní chování.

Ve stávající evropské i české specifikaci Asfalty a asfaltová pojiva – Terminologie [41] je asfalt definován jako "téměř netěkavý, přilnavý a hydroizolační materiál pocházející z ropy nebo přítomný v přírodním asfaltu, který je úplně nebo téměř úplně rozpustný v toluenu a při normální teplotě je velmi viskózní nebo téměř tuhý".

Jedná se o organickou koloidní směs s vysokou molekulovou hmotností, obsahující uhlovodíky, kde je zastoupeno až kolem tisíce různých sloučenin. Skládá se ze dvou hlavních složek:

- pevná složka neboli **asfaltény**;
- tekutá složka neboli **maltény** (oleje a pryskyřice).

Asfaltové pojivo je viskoelastický, termoplastický materiál charakterizovaný určitou úrovní tuhosti, ale současně teče a rozptyluje energii ztrátami tření jako viskózní tekutina. Všechny viskoelastické materiály se vyznačují mechanickou odezvou závislou na čase, teplotě a velikosti zatížení, která se na ně aplikuje, viz obrázek 22 v kapitole 3.4.4.

Vlastnosti asfaltového pojiva závisí na zdroji surové ropy a na jejím zpracování. Asfaltová pojiva mají tendenci být velmi tuhá a křehká při nízkých teplotách, silně tekutá při vysokých teplotách a při středních teplotách se chovají jako pružné polotuhé látky. Extrémní změny vlastností mohou způsobit poruchy ve vozovce. Při vysokých teplotách je vozovka s příliš měkkým pojivem náchylná k tvorbě trvalých deformací. Naopak vozovky obsahující asfaltové pojivo, jež je příliš tuhé při nízkých teplotách, jsou náchylné k nízkoteplotním trhlinám.

Asfaltová pojiva jsou také citlivá na čas i rychlost zatížení. Při rychlém zatížení je asfaltové pojivo mnohem tužší než při zatížení pomalou rychlostí. Proto je třeba specifikovat při zkoušení asfaltových pojiv čas a rychlost zatížení. Další charakteristikou asfaltových pojiv komplikující specifikaci a testování těchto materiálů je účinek procesu stárnutí během míchání, pokládky a životnosti, což také ovlivňuje jejich reologii se základním efektem tvrdnutí.

Asfaltové pojivo je nepatrně tekuté i při pokojové teplotě, kdy se jeví jako křehký, sklovitý materiál. Reakce může trvat měsíce nebo dokonce roky, než je zřetelná pouhým okem. Důkazem je nejdéle trvající laboratorní experiment na světě, který je k vidění na universitě v Brisbane nebo ho můžeme sledovat přímo online [42]. Ve skleněném trychtýři je asfaltové pojivo a při běžné okolní teplotě se již od roku 1927 sleduje jeho tečení (obr. 3.). Profesor Thomas Parnell chtěl tehdy dokázat, že i na první pohled tuhá látka jako asfaltové pojivo má

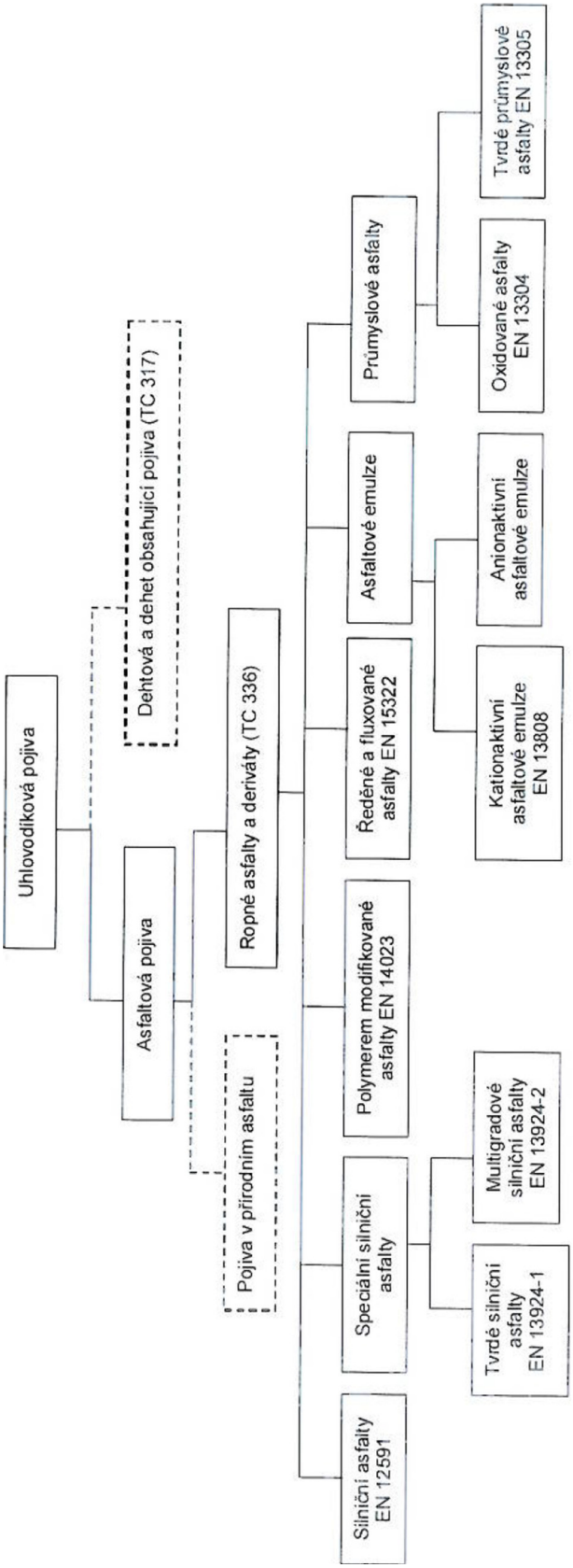
vlastnosti tekutiny, přestože při pokojové teplotě je křehké a je možné ho rozbít kladivem. Profesor Parnell asfaltové pojivo zahřál a nalil do skleněného trychtýře s uzavřeným dnem. Po 3 letech usazování Parnell odstranil dno a začala se tvořit první kapka, jež spadla za osm let. Od počátku experimentu se uvolnilo zatím jen 9 kapek. Je to způsobeno viskoelastickými vlastnostmi asfaltového pojiva, které jsou popsány a vysvětleny v kapitole 3.2.5.

Obr. 3: Experiment padající kapky asfaltového pojiva [43]

[6, 29, 36, 44-47]

3.2.1 ROZDĚLENÍ ASFALTŮ

Asfalty se řadí do skupiny živic, což je souhrnné označení vysoce viskózních organických látek rozpustných v sirouhlíku nebo toluenu. V dopravním stavitelství se rozlišují živice asfaltické, kam patří ropné nebo přírodní asfalty a živice pyrogenetické neboli dehty. V minulosti se dehet často využíval, ale pro negativní vlivy na životní prostředí a zejména karcinogenním účinkům je nyní jeho aplikování zakázáno. V současné době se používají z 95 % ropné asfalty [48]. Základní terminologie asfaltových pojiv dle ČSN EN 12597 [41] je zobrazena na obr. 4.



Obr. 4: Terminologie uhlovodíkových pojiv [41]

[6, 49]

3.2.1.1 PŘÍRODNÍ ASFALTY

Přírodní asfalty se získávají těžbou z přírodních nalezišť – z jezer nebo hornin. V případě těžby hornin mluvíme o asfaltových dolech, kde se jedná o směs jemného kameniva (popelu) a asfaltu. Asfaltová jezera jsou nejčastěji používaným typem přírodního asfaltu. Největší a zároveň nejznámější se nachází ve státě Trinidad a Tobago, konkrétně Pitch Lake (obr. 5.) s rozlohou přibližně 35 ha a hloubkou až 90 m [50]. Dalšími známými nalezišti jsou jezera ve Venezuele, na Bermudách nebo Mrtvé moře. Pro ČR je nejbližším zdrojem přírodního asfaltu důl Selenica v Albánii (obr. 6).

Konzistence přírodních asfaltů je polotuhá až tuhá. K získání čistého asfaltu je nutné nejprve rozehřát a poté prolít přírodní asfalt přes síta, na která se zachytávají hrubé nečistoty a organické zbytky. Díky přítomnosti vyššího množství asfalténů jsou přírodní asfalty v porovnání s ropnými asfalty tvrdší, a proto nejsou vhodné pro přímé použití v silničním stavitelství. Jednou z možností jejich využití je přidání k měkkým ropným asfaltům s efektem zlepšení odolnosti proti trvalým deformacím nebo jako aditivum pro lité asfalty.

Obr. 5: Asfaltové jezero Pitch lake – Trinidad [51,52]

Obr. 6: Asfaltový důl v Albánii – Selenica [53, 54]

[6, 49]

3.2.1.2 ROPNÉ ASFALTY

Mnohem častěji používanou skupinou asfaltových pojiv jsou ropné asfalty, které se získávají destilací surové ropy. Zjednodušený proces zpracování ropy je popsán v kapitole 3.2.3. Podle způsobu výroby se ropné asfalty dělí na:

- **destilační** – získané přímo po destilaci;
- **polofoukané** – vyráběné umělým stárnutím destilačních asfaltů (částečnou oxidací);
- **foukané** (oxidační) – vyráběné umělým stárnutím destilačních asfaltů, nejsou vhodné pro využití v silničním stavitelství z důvodu vysoké viskozity, používají se při výrobě asfaltových pásů a střešních krytin (vč. asfaltových šindelí);
- **modifikované** – destilační nebo polofoukané asfalty s přidáním různých aditiv;
- **ředěné** – destilační nebo polofoukané asfalty ředěné prchavými látkami (např. benzinem nebo kerosinem) za účelem získání řidšího materiálu, který umožňuje zpracování za běžných i mírně vyšších teplot (z ekologických důvodů se nedoporučují používat).

[49]

3.2.2 HISTORIE POUŽÍVÁNÍ ASFALTŮ

Slovo asfalt pochází z řeckého slova asfaltos, které se dá volně přeložit jako pevný nebo stabilní. První použití asfaltu bylo pravděpodobně v době okolo roku 4500 př. n. l. obyvateli údolí řeky Eufrat v jihovýchodní Mezopotámii. Mezi řekou Nil v Egyptě a Indusem v Indii byla nalezena řada přírodních ložisek asfaltu. Zpočátku byl využíván jako malta do kamenných a cihelných zdí nebo jako tmel sloužící k utěsnění spár mezi prkny dřevěných lodí, vodních nádrží a koupelí v tamních chrámech. Vykopávky v Teli-Asmaru (severovýchodně od Bagdádu) dokazují, že Sumerové používali asfalt jako stavební materiál mezi lety 3200 až 2900 př. n. l.

Egypťané kolem roku 2500 př. n. l. používali asfalt při balzamování mrtvol, kdy tělo omotali obvazy a následně zalili asfaltem. Další upotřebení asfaltu bylo jako malta k zabránění skalních erozí podél břehů Nilu. Za vlády babylonského krále Khammurabiho okolo roku 2200 př. n. l. se natíraly domy a lodě asfaltovým tmelem. Přibližně roku 2000 př. n. l. se s asfaltem pracovalo při výstavbě Babylonské věže, důkazem jsou zmínky v Bibli.

První zaznamenaná aplikace asfaltu jako silničního stavebního materiálu byla v Babylonu kolem roku 625 př. n. l. za vlády krále Nabopolassara, kdy byla vystavena ulice z pálených cihel a asfaltu. Za vlády jeho syna Nebukadnesara byl postaven 110 metrů dlouhý most přes řeku Eufrat poblíž Babylonu. Pilíře byly tvořeny pálenými cihlami vloženými do asfaltového tmelu a i základna každého pilíře byla pokryta asfaltem. Nebukadnesar také vybudoval velké kanalizační potrubí s využitím asfaltu.

Až o mnoho století později objevili Evropané přirozená ložiska asfaltu. Staří Římané tento materiál používali k utěsnění svých lázní, nádrží a akvaduktů. Při své třetí cestě do Ameriky, v roce 1498, Kolumbus opravil pomocí asfaltu lodě poničené bouřkou. Na této plavbě objevil totiž ostrov Trinidad a asfaltové jezero Pitch lake (obr. 5.). Historici zjistili, že okolo roku 1500 Inkové v Peru vytvořili komplikovaný systém cest, z nichž některé byly podobné modernímu asfaltovému makadamu.

V 18. století byl kategorizován benzín, petrolej, zemní dehet a nakonec i asfaltové pojivo. Do širšího povědomí a užívání se asfaltová pojiva dostala ale až na začátku 19. století. První asfaltové směsi z přírodního asfaltu nebo dehtu v Evropě byly vyrobené v polovině 19. století (Velká Británie a Francie). Historickým mezníkem byl rok 1873, kdy byla v Baku uskutečněna první výroba asfaltu metodou kontinuální vakuové destilace, která se stala předchůdcem dnešních výrobních metod. Rafinované ropné asfalty se zpočátku používaly jako přísada pro změkčení přírodního asfaltu z důvodu lepší manipulace a pokládky. Rok 1876 se považuje za počátek využívání ropných asfaltů v silničním stavitelství, protože se poprvé použil na výstavbu silnice ve Washingtonu, D.C. I přesto téměř veškerý asfalt do roku 1900 pocházel z přírodních zdrojů.

Výrazný rozvoj aplikování asfaltových pojiv byl zaznamenán na počátku 20. století v souvislosti s nástupem petrochemického průmyslu. V roce 1907 výroba ropného asfaltu překonala používání přírodního asfaltu. Postupně docházelo k nárůstu automobilového provozu, díky čemuž bylo zapotřebí rozšířit infrastrukturu a pokládat kvalitnější vozovky. Velký rozmach silničního stavitelství vedl k inovacím jak při výrobě, tak při pokládce asfaltových vozovek. Obzvlášť během druhé světové války se technologie v oblasti asfaltových vozovek vyvíjely rychlým tempem.

[6, 55-59]

3.2.3 ZPRACOVÁNÍ ROPY A VÝROBA ZÁKLADNÍHO ASFALTU

Na přelomu 20. století se rozvinuly moderní technologie rafinace ropy. Do té doby se asfaltová pojiva získávala téměř výhradně z přírodních zdrojů, zatímco dnešní asfaltová pojiva se vyrábějí především destilací ropy.

Úprava ropy se provádí v ropných rafinériích – v České republice jsou v provozu 3 rafinérie. Rafinérie v Litvínově a v Kralupech nad Vltavou (společnost UNIPETROL) zpracovávají největší objem ropy. Obě rafinerie se zaměřují na výrobu lehkých ropných frakcí (benzin a motorová nafta). Třetí rafinérií je závod PARAMO v Pardubicích, který se orientuje zejména na výrobu olejů, maziv a asfaltových výrobků včetně asfaltových pojiv. Dalšími rafineriemi v oblasti střední Evropy jsou rafinérie v Leuně, Vohburgu nebo Karlsruhe (Německo), Schwechatu (Rakousko), Bratislavě (Slovensko) a Płocku (Polsko). [60]

Obr. 7: Rafinerie Paramo [61]

Asfaltové pojivo se vyrábí z těžkého zbytku, jenž zůstává poté, co jsou paliva a mazadla odstraněna z ropy. Tento těžký zbytek lze dále zpracovávat různými způsoby, dokud nesplní požadovaný soubor specifikací pro asfaltová pojiva. V následujících odstavcích jsou stručně popsány základní stupně zpracování ropy při výrobě asfaltových pojiv. Schematické znázornění výroby asfaltového pojiva je na obr. 8. Pro podrobnější popis rafinérských procesů je možné odkázat například na publikaci Základy zpracování a využití ropy [62] nebo Petroleum processing overview [63].

Odsolování ropy

Aby se do rafinérií zbytečně nedopravovala voda, je většina odstraněna společně se solí v místě těžby ropy. Finální odsolení probíhá v rafinerii v odsolovací stanici použitím elektrostatického odsolení. Hlavním důvodem je zamezení koroze a usazování solí v technologických zařízeních rafinérie a ucpávání pórů katalyzátorů.

Atmosférická destilace ropy

Díky různému bodu varu je možné oddělit jednotlivé frakce. Odsolená ropa se dostává do odpařovací kolony, kde se odstraní nejlehčí frakce jako je lehký benzin, plyny a vodní pára. Po dalším předehřátí v peci se při mírně vyšším tlaku než je tlak atmosférický oddestiluje kerosin, těžký benzin, petrolej a plynový olej. Ze spodní části kolony se odvádí destilační zbytek neboli mazut. Následně jsou jednotlivé frakce odsířeny pomocí hydrogenační rafinace a zpracovány na síru, topný olej, propan-butan, benzin, letecký petrolej a motorovou naftu.

Vakuová destilace mazutu

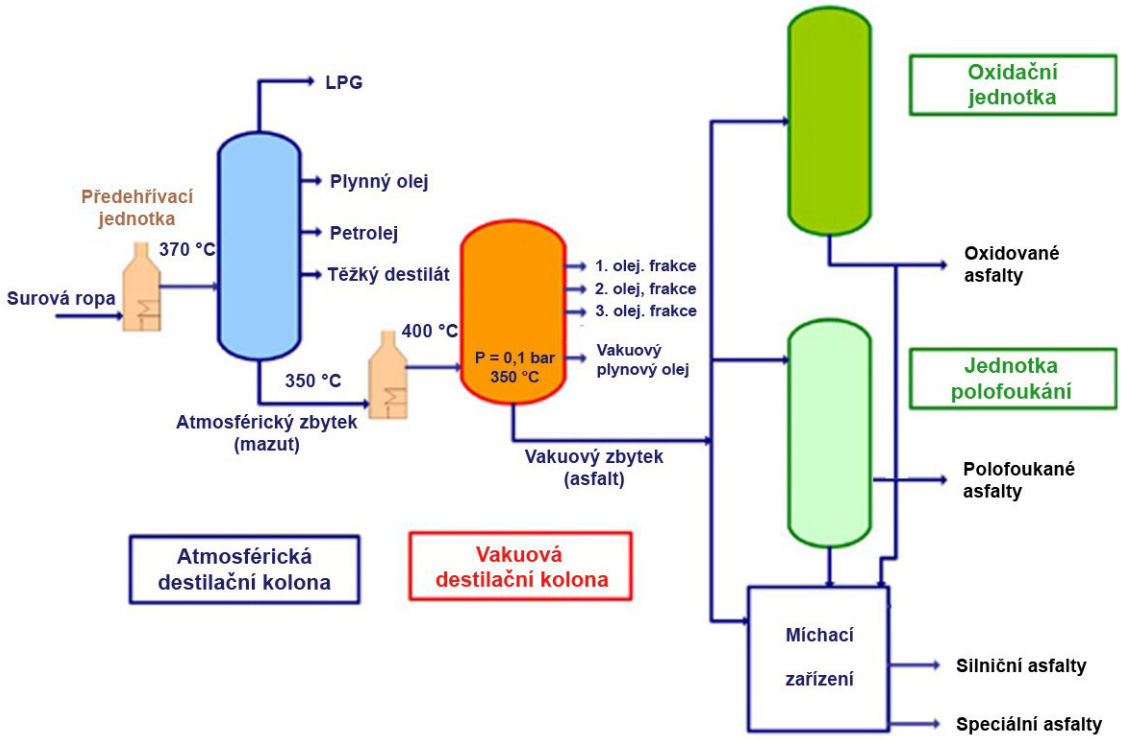
Mazut se dále zpracovává vakuovou destilací za mírně vyšší teploty a za sníženého tlaku. Působením nižšího tlaku se sníží bod varu přítomných sloučenin a díky tomu je možné z mazutu oddestilovat další frakce bez termického rozkladu. Tímto způsobem se oddestilují olejové frakce s různou viskozitou a zbytkové plyny. Spodkem kolony se odebírá asfalt, který je možné následně upravit (např. přidáním olejových podílů).

Oxidace asfaltu (foukané a polofoukané asfalty)

Z některých druhů ropy nelze vakuovou destilací připravit silniční asfalty o požadovaných vlastnostech, a proto je třeba vlastnosti asfaltu dále upravovat. Jednou z možností je úprava kontinuální oxidací. Foukání se používá k výrobě asfaltů z příliš tekuté nebo výrazně teplotně citlivé ropy, či k produkci velmi tvrdých asfaltových pojiv.

Hlavní reakcí je oxidativní dehydrogenace vzdušným kyslíkem. Během reakce vznikají uhlovodíky s větší molekulární hmotností (nárůst asfalténů), a tím dochází ke zvýšení tvrdosti asfaltového pojiva. Oxidované asfalty pozitivně ovlivňují bod měknutí, zároveň se ale stávají křehčími (zhoršení bodu lámavosti) a zvyšují viskozitu. Samotná oxidace asfaltu se provádí v oxidačním reaktoru, do kterého se vhání stlačený kyslík po dobu několika hodin. Reakce probíhá při zvýšené teplotě a někdy za přítomnosti katalyzátoru [64]. Plynné fáze (odplyn) se z horní části reaktoru vedou do separátoru, kde se oddělí od vyfoukaného oleje. Ze spodní části reaktoru se získává oxidovaný asfalt.

Mírné foukání vzduchu produkuje polofoukaný asfalt, jenž se používá pro výrobu asfaltových směsí. Foukané asfalty se vyrábějí podobně, ale za vyšší teploty a po delší reakční dobu. Foukané asfalty jsou proto výrazně tvrdší a využívají se především jako střešní izolace, k výstavbě komunikací se nedoporučují pro vysokou náchylnost ke vzniku trhlin.



Obr. 8: Proces výroby ropného asfaltu [49].

Rafinérie běžně vyrábějí pouze dva stupně asfaltového pojiva – měkké a tvrdé. Střední gradace se získávají zpravidla jejich smícháním v určitých poměrech. Vlastnosti takto získaných asfaltových pojiv je možné dále upravovat navazujícími procesy a technologiemi jako je modifikace (nejčastěji polymery), emulgování, rozpouštění atd.

[36, 49, 50, 65-67]

3.2.4 MIKROSTRUKTURA A CHEMICKÉ VLASTNOSTI

Mimo omezené množství přirozeně se vyskytujícího asfaltu jsou komerční asfaltová pojiva produkty rafinace ropy. Proto mikrostruktura a mechanické vlastnosti asfaltového pojiva silně závisí na původu ropy [68] a na způsobu výroby [69].

Asfaltové pojivo je komplexní organická směs molekul, převážně uhlovodíků (přes 90 %), různých rozměrů a hmotností s malým množstvím strukturně analogických heterocyklických druhů (heteroatomů). Hlavní heteroatomy jsou síra, dusík a kyslík [70]. Asfaltové pojivo obsahuje ještě stopové množství kovů jako je vanad, nikl, železo, hořčík a vápník, které se vyskytují ve formě anorganických solí a oxidů nebo v porfyrinových strukturách. Navíc se v asfaltovém pojivu nachází i různé nečistoty. Zastoupení jednotlivých prvků má značný vliv na interakci sloučenin v asfaltovém pojivu a tím i na mechanické vlastnosti. Elementární analýza

asfaltových pojiv ukazuje, že většina asfaltových pojiv je složena převážně z uhlíku (85 %), vodíku (10 %), síry (do 6 %), kyslíku (do 1,5 %) a dusíku (do 1 %) [49].

Existují tři hlavní teorie objasňující mikrostrukturu asfaltového pojiva [66]. **Model Disperzní polární tekutiny** (DPF – Dispersed Polar Fluid), popisuje asfaltové pojivo jako jednofázový systém, tj. jednoduchou homogenní kapalinu [37, 71]. Druhý model, tzv. **Nynas Bitumen Solubility Model**, je založen na vzájemné rozpustnosti látek a zahrnuje informace o soudržnosti, molekulárním objemu, disperzních a polárních interakcích a také o vodíkových vazbách [72]. Tradičním a nejrozšířenějším modelem je **koloidní model** (BCM – Bitumen Colloidal Model), jenž tvrdí, že asfaltové pojivo je koloidní disperze vysoce molekulárních asfaltenů rozptýlených v kontinuálním prostředí nízkomolekulární olejové fáze (maltenech) [64, 73, 74].

Jedním z nejběžnějších postupů používaných při charakterizaci asfaltového pojiva je Corbettova metodika [75], která vedla ke standardizaci metody: Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions (ASTM D4124-09) [76]. Tato metoda využívá chromatografie a rozděluje asfaltové pojivo do čtyř frakcí založených převážně na rozdílných úrovních polarity a molekulové hmotnosti. Nejběžnější terminologické konvence pojmenování vedou ke zkratce SARA, odvozené z každé příslušné frakce: **s**aturáty, **a**romáty, pryskyřice (**r**esins) a **a**sfaltény. Molární hmotnost asfaltového pojiva se zvyšuje v pořadí S < A < R < A (470 až 3500 g/mol) [50]. Běžně se asfaltové pojivo rozděluje na dvě skupiny molekul. První skupinou jsou maltény obsahující saturáty, aromáty a pryskyřice a druhou skupinou jsou asfaltény.

Asfaltény: nejtěžší a nejpolárnější složka asfaltových pojiv z hlediska velikosti molekul. V asfaltovém pojivu jich bývá 5-25 % a právě množství má stěžejní vliv na reologii asfaltového pojiva. Čím jich je více, tím je pojivo viskóznější a tužší (klesá penetrace a roste bod měknutí), ale současně i křehčí (zhoršuje se bod lámavosti). Jsou to černé, drobné a pevné látky zahušťující asfaltové pojivo a přitom značně ovlivňující jeho adhezní vlastnosti. Zároveň jsou nerozpustné a nejsou ovlivněny oxidací. V koloidní struktuře asfaltu tvoří jádra micel. Asfaltény se v ropném průmyslu někdy označují jako cholesterol ropy, protože ucpávají potrubí a dokonce i horninové masivy, v nichž je surová ropa obsažena. Jsou vysokovroucí a jejich molekulová hmotnost se mění v závislosti na zdroji ropy.

Maltény (deasfaltované oleje): vytváří tekutou složku asfaltového pojiva, obsahující oleje a pryskyřice. Jedná se o alifatickou nepolární látku podléhající oxidaci, která je rozpustná v nízkomolekulárních parafinických rozpouštědlech.

Saturáty (nasycené sloučeniny): bílé až béžové olejové látky v množství 5-20 %. Složka s nejlehčí molekulovou hmotností, jež je i nejstabilnější při stárnutí. Mají parafinickou a naftenickou strukturu a neobsahují kyslík ani dusík.

Aromáty (naftenové aromáty): tmavě hnědé látky s nepatrně větší molekulovou hmotností než saturáty. V asfaltovém pojivu jich je zpravidla nejvíce 40-65 %. Při oxidaci mají tendenci zvětšování molekulové hmotnosti a přeměny na pryskyřice, případně na asfaltény.

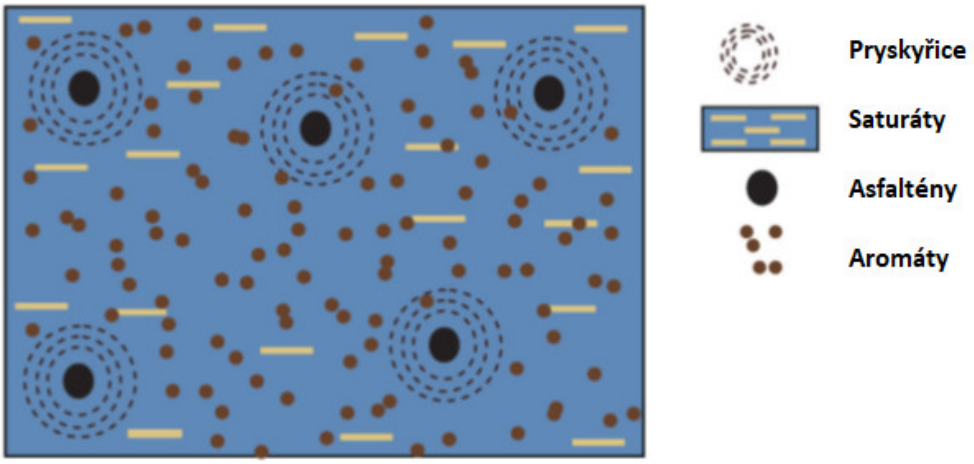
Pryskyřice (polární aromáty): druhé nejtěžší látky z hlediska molekulové hmotnosti, tmavě hnědé barvy. Jedná se o polopevné látky, kterých je v asfaltovém pojivu 20-30 %. Většinou tvoří obal asfaltenů a oxidací se často mění na asfaltény. Poměr pryskyřic a asfaltenů

určuje, zda jde o roztok typu SOL nebo GEL. Mají důležitou roli ve stabilitě asfalténů. Předpokládá se, že dispergují asfaltény, a tím jim brání v separaci [77].

Výše zmíněné složky nevytváří zcela homogenní směs. Asfaltové pojivo je možné rozdělit na dvě fáze. První je micelární fáze, jež je pevného skupenství a tvoří ji polární molekuly (asfaltény obalené pryskyřicemi). Micelární fáze vytváří slabé sítě polárních sdružení, které primárně dávají pojivu své elastické vlastnosti a při zahřátí se tyto slabé interakce rozpadají na Newtonské kapaliny [78]. Druhá fáze je mezimicelární, je kapalná a tvoří ji oleje. Množství micel a jejich rozptýlení v kapalné fázi ovlivňuje vlastnosti asfaltového pojiva. Současně i teplota ovlivňuje vazbu mezi micelami, která není zcela pevná. Zvyšováním teploty se micely zmenšují a olejová fáze se naopak zvětšuje. Asfaltová pojiva s dobře dispergovanými asfaltény vykazují vysokou teplotní citlivost a tažnost, nízkou míru stárnutí a newtonské chování. Naopak asfaltová pojiva s nedostatečně rozptýlenými asfaltény, mají nízkou teplotní citlivost a tažnost, rychle stárnutím tvrdnou a vyznačují se nenewtonským chováním [45].

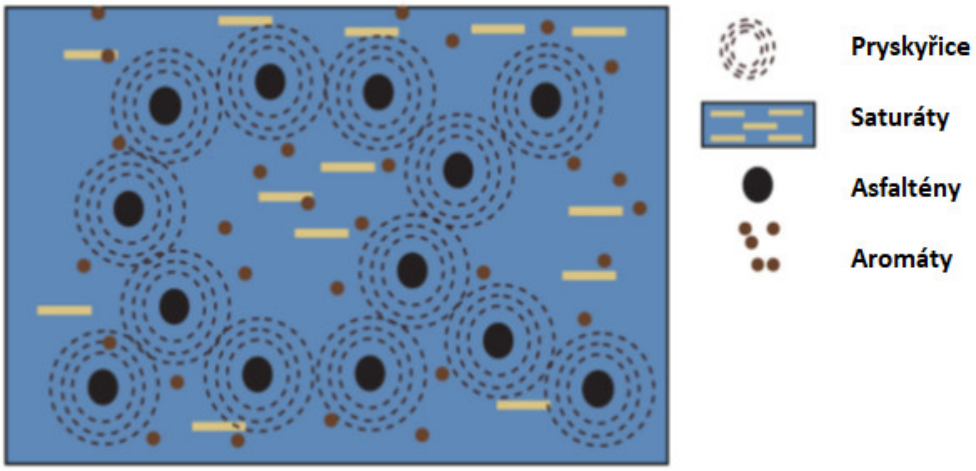
Změnou poměru jednotlivých složek dochází k výrazným reologickým změnám [79]. Například pokud je obsah asfalténů udržován konstantní, ale zvýší se množství pryskyřic, asfaltové pojivo se stane tvrdší. Stejného tvrdnoucího účinku lze dosáhnout zvýšením koncentrace asfalténů. Při běžných teplotách má hlavní vliv na reologii asfaltových pojiv množství asfalténů. Menší vliv má množství ostatních složek, jež stabilizují celý systém.

Pokud asfaltové pojivo obsahuje dostatečné množství pryskyřic a aromátů s dobrou rozpouštěcí schopností, jsou asfaltény rovnoměrně rozptýleny a zcela obaleny. Výsledné micely pak mají v asfaltovém pojivu dobrou mobilitu. V tomto případě se jedná o asfaltové pojivo typu SOL (obr. 9), které je velmi měkké a s nízkou viskozitou.



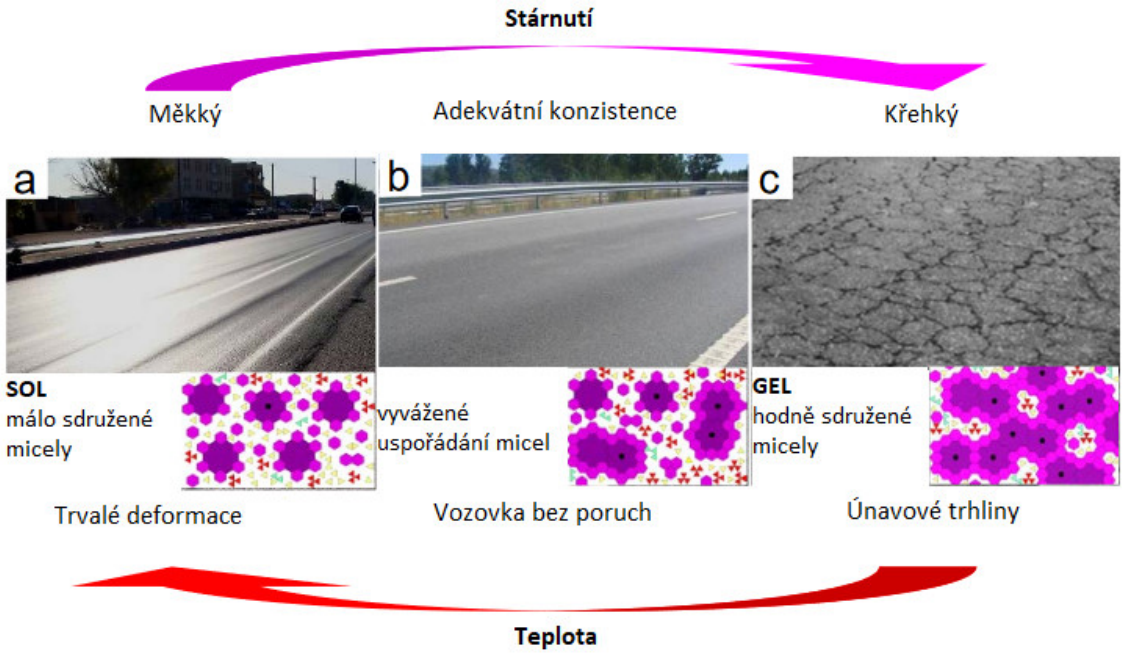
Obr. 9: Znázornění struktury asfaltu typu SOL [80]

Druhou možností je asfaltové pojivo typu GEL (obr. 10). Asfaltové pojivo tohoto typu neobsahuje dostatečné množství aromátů nebo pryskyřic, případně nemá vyhovující rozpouštěcí schopnost. Asfaltény se úplně neobalí a micely se nepravidelně spojují dohromady. Mezi asfaltová pojiva typu GEL patří například foukané asfalty používané jako hydroizolační materiál.



Obr. 10: Znázornění struktury asfaltu typu GEL [80]

Van der Poel [81] zjistil, že asfaltová pojiva typu SOL vykazují rychlý přechod od sklovitého chování k newtonskému chování, zatímco asfalty typu GEL vykazují mnohem pozvolnější změny. Ačkoli se Van der Poel přímo nezamýšlel spojit tyto nálezy se stavem koloidní disperze asfaltových pojiv, jeho použití výrazů SOL a GEL pro popis asfaltových pojiv představuje implicitní přijetí koloidního modelu. Struktura běžných silničních pojiv by měla být mezi typem SOL a GEL. Schématický vztah mezi koloidním modelem asfaltového pojiva s účinkem stárnutí a teploty na asfaltovou vozovku je uveden na obr. 11.

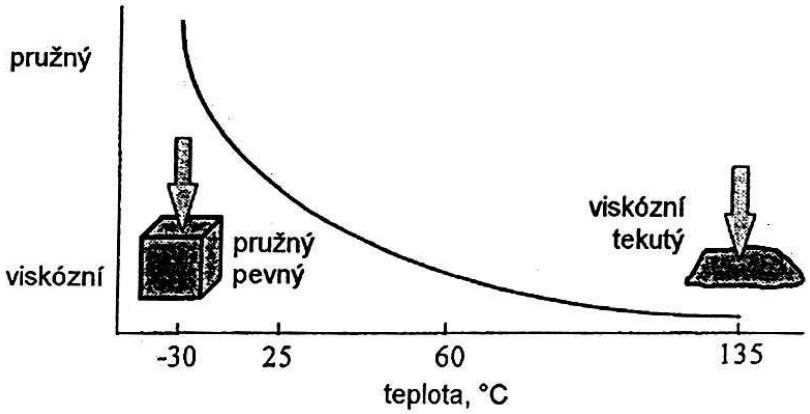


Obr. 11: Rozdíl v uspořádání micel u asfaltových pojiv typu SOL a GEL (saturáty jsou žlutě a modře, aromáty červeně, pryskyřice růžově, asfaltény fialově a černé tečky symbolizují oxidaci) [82]

[6, 37, 45, 49, 50, 59, 64, 66, 77, 80, 82-88]

3.2.5 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI ASFALTOVÉHO POJIVA

Základní vlastností asfaltového pojiva je jeho viskoelastické chování neboli chování závislé především na teplotě, rychlosti a velikosti zatížení. Chování viskoelastických materiálů se pohybuje mezi ideální tekutinou (viskózní chování) a ideální pevnou látkou (elastické chování). Při vysokých teplotách (přibližně nad 60 °C) vykazuje asfaltové pojivo newtonovské proudění a chová se jako kapalina s konzistencí podobnou motorovému oleji. Naopak při nízkých teplotách (cca pod -20 °C) je asfaltové pojivo velmi křehké. Při středních teplotách (mezi -20 °C až 60 °C) má pojivo konzistenci podobnou tmelu nebo měkké gumy a právě tento stav se na vozovce vyskytuje běžně. Vliv teploty na vlastnosti asfaltového pojiva je zjednodušeně zobrazen na obr. 12.



Obr. 12: Závislost teploty na viskoelastických vlastnostech asfaltového pojiva [91]

Konzistence asfaltového pojiva se nejčastěji měří zkouškou penetrace a bodem měknutí. Čím nižší je hodnota penetrace, tím tvrdší je asfaltové pojivo a naopak. Zkouška stanovení penetrace jehlou (ČSN EN 1426) [89] je dosud základem evropského systému klasifikace asfaltů, ve kterém jsou asfaltová pojiva rozdělena do různých penetračních tříd. Teplotní citlivost asfaltových pojiv lze popsat pomocí penetračního indexu (PI) zavedeným Pfeifferem a Van Doormaalem v roce 1936 [90]. Hodnota PI se vypočte z hodnot penetrace a bodu měknutí. Čím vyšší je hodnota PI, tím méně je pojivo teplotně citlivé a naopak. Obecně platí, že PI se pohybuje v rozmezí od -3 do +8 při zahrnutí všech druhů asfaltů, ale obvykle leží mezi -2 a +2 [81]. Foukané asfalty se pohybují v kladných hodnotách (nejčastěji mají PI vyšší než +2) a běžná nemodifikovaná pojiva mají PI od -1 do +1.

Další empirickou zkušební metodou zjišťující základní fyzikální vlastnosti je zkouška kapilární viskozity nebo bodu lámavosti podle Fraasse. Viskozita se měří za účelem stanovení tekutosti asfaltového pojiva při míchání a hutnění vozovek. Naopak zkouška bodu lámavosti se používá k popisu odolnosti vůči vzniku mrazových trhlin.

[36, 50, 66, 92]

3.3 SHRP PROJEKT

Strategický silniční výzkumný program (SHRP – Strategic Highway Research Program) byl zahájen v roce 1987 v USA. Jednalo se o rozsáhlý a původně jen pětiletý výzkumný program

financovaný ve výši 150 milionů dolarů. Hlavní myšlenkou bylo zlepšit trvanlivost a výkonnost asfaltových materiálů.

Program SHRP byl koncipován jako odpověď na zhoršení kvality asfaltových pojiv na nepřijatelnou úroveň po arabském embargu na ropu v roce 1972. Předpokládalo se, že kvalitativní změny asfaltových pojiv byly příčinou mnoha selhání asfaltových směsí. Ropné rafinérie snižovaly kvalitu asfaltových pojiv s takovou vynalézavostí, že v tehdejší době používané zkoušky asfaltových pojiv (empirické zkoušky) nebyly schopny detekovat zhoršení kvality. Z tohoto důvodu bylo primárním cílem části SHRP vyvinout zkušební metody pro zjišťování reologických vlastností a odpovídající specifikace asfaltových pojiv.

Projektu se účastnili američtí i evropští odborníci, kteří se shodli na nutnosti nového hlediska na asfaltová pojiva aplikovaná v dopravních stavbách. Snahou bylo zaměřit se na potenciál dynamických vlastností asfaltových pojiv při působení proměnlivých podmínek jako je teplota, velikost zatížení nebo frekvence.

Výstupem vládního projektu SHRP byl nový samo-konzistentní model asfaltového pojiva [37]. Dále se prozkoumal mechanismus oxidačního stárnutí asfaltového pojiva a vliv oxidace na stárnutí. V návaznosti na problematiku stárnutí byly navrženy moderní metody simulace stárnutí. Současně vznikly specifikace (PG) asfaltových pojiv a v neposlední řadě se vyvinuly nové nebo zdokonalené laboratorní metody, které přesněji předpovídají chování asfaltového pojiva. Mezi ně patří dynamický smykový reometr (DSR) pro predikci chování při středních a horních teplotách vozovky, průhybový trámečkový reometr (BBR) pro dolní teploty vozovky, zkouška přímého tahu (DTT) pro dolní teploty, zkouška PAV pro simulaci dlouhodobého stárnutí nebo stanovení viskozity rotačním viskozimetrem.

Výsledkem byla možnost popsat a předvídat očekávané vlastnosti vymezující chování jakéhokoliv asfaltového pojiva, díky čemuž lze zvolit nejvhodnější pojivo pro danou pozemní komunikaci. Reologická měření se následně stala významnou součástí nových specifikací v USA.

[9, 37, 93]

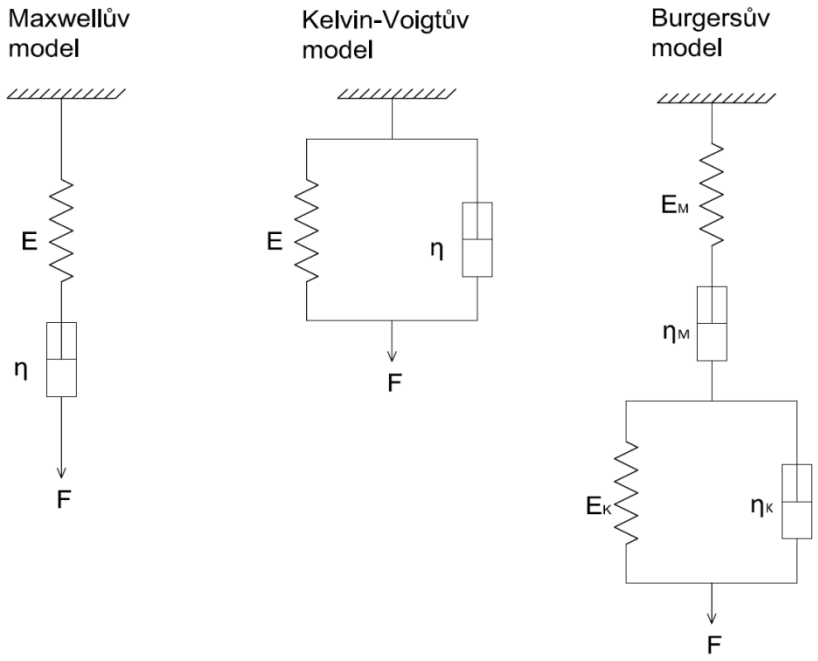
3.4 REOLOGIE

Termín **reologie** je odvozen z řeckého slova rheos (tečení, proudění) a logos (studium) [94]. Technická definice zní: „věda deformace a tečení“. Tento pojem byl poprvé popsán v roce 1929 profesory Marcusem Reinerem (inženýr) a Eugenem Cookem Binghamem (chemik) z USA podle Herakleitova výroku „všechno plyne, všechno se mění“ [10]. Jedná se o vědní obor zabývající se přetvářením a tečením materiálů, které neodpovídají základním zákonům viskózního a pružného chování. V 17. století byly základní zákony definovány Isaacem Newtonem (Newtonská kapalina) a Robertem Hookem (Hookův zákon pro pevnou hmotu). Během 19. století se zjistilo, že v závislosti na podmínkách testování se některé materiály chovají jako kapaliny i pevné látky. Díky tomu se došlo k závěru, že ve fyzice chybí odvětví charakterizující tyto materiály. Nejvýznamnější rozvoj reologie nastal až ve 20. století.

Reologie vymezuje vlastnosti látek pomocí popisu mechanického chování. Zabývá se zkoumáním deformačních vlastností hmot vystavených působení vnějších sil. Řeší problematiku přetváření materiálu, vztahy mezi napětím, deformací a rychlostí deformace ovlivněné časem a teplotou. Ve spojitosti s tím je možné simulovat různé vlivy a zatížení

vyskytující se v reálných situacích. Reologie se proto nepoužívá jen pro stanovení charakteristik deformace pevných látek a charakteristik proudění tekutých materiálů, ale především se zabývá popisem chování komplexních viskoelastických materiálů vykazujících vlastnosti pevných látek i kapalin.

Různé materiály a jejich chování je možné popsat s využitím reologických modelů. Základní modely popisující viskoelastický materiál jsou: Maxwellův, Kelvin-Voigtův a Burgersův model (obr. 13). Modely jsou tvořeny dvěma základními prvky: **pružinou** charakterizující Hookovu pevnou látku a **tlumičem** popisujícím Newtonskou kapalinu. **Maxwellův model** je založen na sériovém zapojení pružiny a tlumiče. Naopak **Kelvin-Voigtův model** zapojuje pružinu a tlumič paralelně. Sériovým zapojením Maxwellova a Kelvin-Voigtova modelu se získá **Burgersův model**, který se nejčastěji volí pro popis zkoušky MSCR. Podrobnější popis reologických prvků a modelů je v kapitole 3.4.3.



Obr. 13: Reologické modely viskoelastické látky

[10, 92, 94, 95]

3.4.1 PODSTATA REOLOGIE

Viskozita se řadí mezi základní veličiny reologie a vystihuje tekutost materiálu. Charakterizuje tokové chování a zjišťuje míru vnitřního odporu materiálu vůči vnějšímu zatížení neboli odporu proti tečení. S vysokou viskozitou materiály téměř netečou, ale s nízkou viskozitou tečou téměř jako voda. Podle způsobu měření se dělí na dynamickou viskozitu (η) a kinematickou viskozitou (ν), které jsou vzájemně provázané prostřednictvím hustoty látky.

K určení viskozity materiálu je nezbytné znát smykové napětí τ a smykové přetvoření γ. Pro nejjednodušší viskózní kapaliny (newtonské kapaliny) se předpokládá platnost Newtonova zákona viskozity, tj. zákona o přímé úměrnosti mezi napětím a rychlostí deformace. Zjednodušeně lze smykové napětí a přetvoření popsat pomocí elastického kvádru, jehož

podstava je připevněna k podložce. Pokud se na plochu aplikuje konstantní boční síla v rovině horní podstavy, dojde v případě ideálního pevného tělesa k pružné deformaci (smyku) s posunem „u“ (obr. 14). Pro výpočet smykového napětí platí rovnice 1:

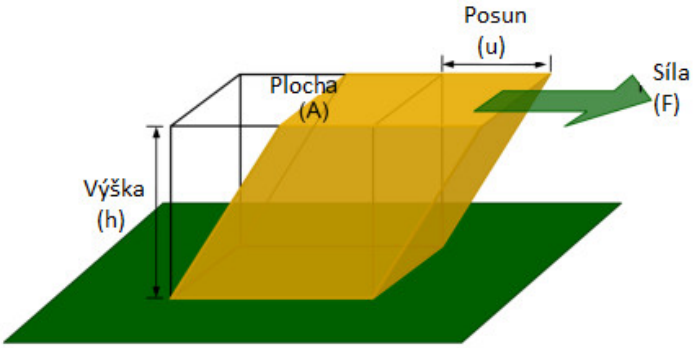
$$\tau = \frac{F}{A} \tag{1}$$

Kde: τ…smykové napětí [Pa]
F…síla [N]
A…plocha [m^2]

Smykové přetvoření pak lze vypočítat z rovnice 2:

$$\gamma = \frac{u}{h} \tag{2}$$

Kde: γ…poměrné smykové přetvoření [-]
u…posun [m]
h...výška zkušebního tělesa [m]



Obr. 14: Znázornění smykového přetvoření pro ideálně pevnou látku deformující se elasticky [94]

Působením smykového napětí dochází u ideálních kapalin k deformaci (toku) s konstantní mírou, kterou nazýváme smyková rychlost (neboli smykový gradient, rychlost smykového přetvoření nebo smykový spád). K výpočtu smykové rychlosti se používá diferenciální rovnice 3:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \tag{3}$$

Kde: $\dot{\gamma}$...smyková rychlost [1/s]
dγ…derivace smykového přetvoření [-]
dt…derivace dle času [s]

Na základě Newtonova zákona je dynamická viskozita definována rovnicí 4:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{4}$$

Kde: η…dynamická viskozita [Pa.s]
τ…smykové napětí [Pa]
$\dot{\gamma}$...smyková rychlost [1/s]

Nejčastěji používanými přístroji, jimiž lze stanovit viskozitu, jsou kapilární nebo rotační viskozimetry. Další možností je měření pomocí dynamického smykového reometru, jenž určuje viskozitu přes geometrické faktory krouticího momentu a počet otáček.

Obr. 15: Příklady látek s různou viskozitou [97]

[10, 96, 98]

3.4.2 NEWTONSKÁ A NENEWTONSKÁ KAPALINA

Na základě smykové viskozity je možné rozdělit materiály na dva základní typy – newtonské a nenewtonské. **Newtonská kapalina** (ideální tekutina) je charakteristická tím, že při laminárním (nevířivém) toku má lineární závislost mezi tečným napětím (třecí silou) a smykovou rychlostí – Newtonův zákon proudění. Pro newtonské kapaliny, které jsou ryze viskózní, je tedy viskozita přímo úměrná vnitřnímu tření kapaliny. Tyto látky vykazují konstantní hodnotu smykové viskozity pro různé hodnoty smykové rychlosti při dané teplotě (viskozita je rovnoběžná s vodorovnou osou). Newtonské kapaliny jsou například voda, vzduch, jednoduché uhlovodíky nebo zředěné koloidní disperze, popřípadě silniční asfalty nebo asfaltové směsi při vysokých teplotách.

Naopak u **nenewtonské kapaliny** je poměr tečného napětí a smykové rychlosti závislý na hodnotě smykové rychlosti (není konstantní). Tento poměr se označuje jako zdánlivá viskozita nebo nenewtonská viskozita. U nenewtonské kapaliny závisí viskozita nejen na fyzikálně-chemické struktuře látky, teplotě a tlaku, ale i smykové rychlosti a době působení zatížení. Většina látek v našem okolí vykazuje nenewtonské chování (např. krev, čokoláda, jogurt nebo polymery) [99].

K vyjádření viskozity slouží viskózní křivky a tokové křivky (obr. 16). U newtonských kapalin je dostačující pro vykreslení tokové křivky zjistit hodnoty ve dvou bodech, naopak pro nenewtonské kapaliny se musí měřit na celém intervalu smykové rychlosti.

[10, 92, 98, 100, 101]

3.4.2.1 NENEWTONSKÉ KAPALINY

Základní charakteristikou nenewtonských kapalin je, že jejich viskozita se mění se změnou smykové rychlosti. Nenewtonské kapaliny je možné podle závislosti smykové viskozity na rychlosti smykového přetvoření rozdělit na:

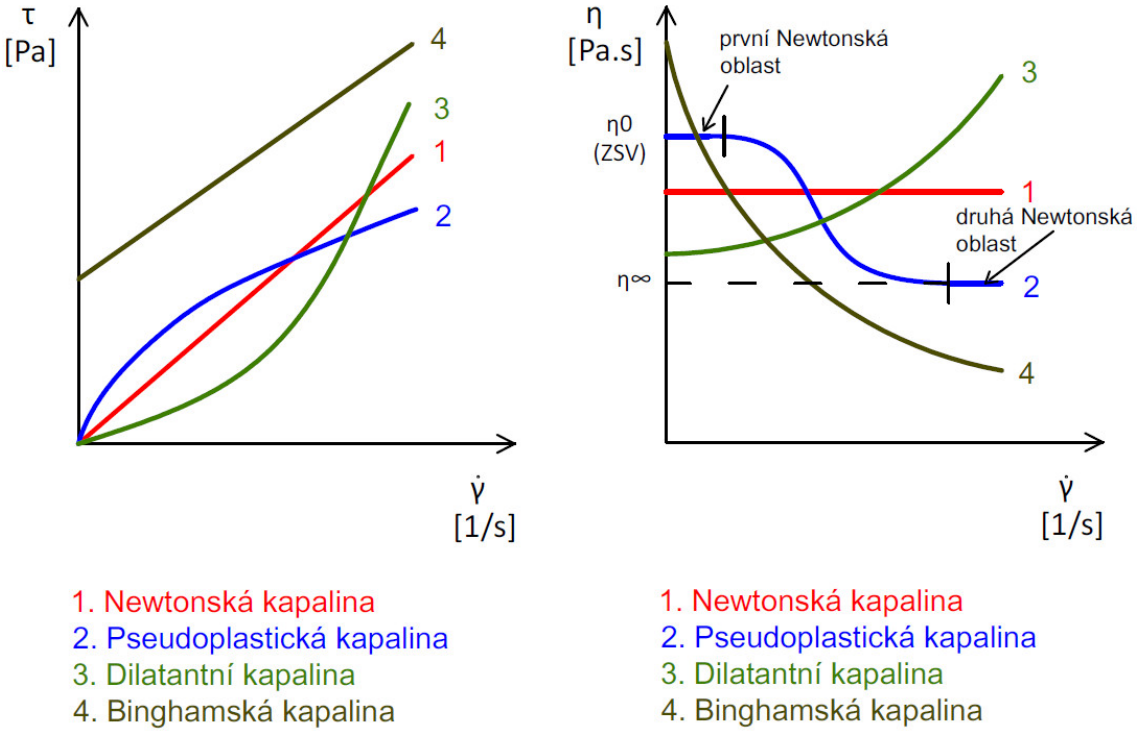
Pseudoplastické kapaliny (shear-thinning) – neboli řídnoucí látky, jsou nejběžnějším typem nenewtonského chování. Přírůstek smykového napětí, který je nutný pro zajištění proudění, se s rostoucí smykovou rychlostí snižuje. Patří sem strukturně viskózní kapaliny, pro něž jsou charakteristické dvě limitní hodnoty zdánlivé viskozity. Při nárůstu smykové rychlosti ve střední oblasti se dynamická viskozita snižuje, na rozdíl od oblasti malých smykových

rychlostí, kde má konstantní hodnotu dynamické viskozity (první Newtonská oblast). V oblasti velkých smykových rychlostí je dynamická viskozita poměrně nízká a není závislá na smykové rychlosti, protože zde dochází k porušení struktury (druhá Newtonská oblast). Pseudoplastické kapaliny tedy dosahují konstantní hodnoty viskozity při velmi nízkých a velmi vysokých hodnotách smykové rychlosti. Tyto limity jsou pojmenovány jako 1. Newtonská oblast (charakteristická gelovým stavem) a 2. Newtonská oblast (charakteristická solovým stavem). Při dostatečně nízkých smykových rychlostech je konstantní hodnota viskozity (η_0), nazývána nulovou smykovou viskozitou (ZSV – zero shear viscosity). Při kritické smykové rychlosti nebo smykovém napětí je pozorován velký pokles viskozity, což znamená začátek oblasti smykového řídnutí. Při vysokých smykových rychlostech se sleduje druhá konstanta viskozity (η_∞), nazývána nekonečnou smykovou viskozitou a může být o několik řádů nižší než η_0 v závislosti na materiálu. Běžná i modifikovaná pojiva mají při středních teplotách nejčastěji pseudoplastické chování. Další používané pseudoplastické látky jsou např. krémy, čokoláda, barvy, šampon nebo kečup.

Dilatantní kapaliny (shear-thickening) – neboli houstnoucí látky, jejichž viskozita se zvyšuje s rostoucí smykovou rychlostí. Dilatantních kapalin se vyskytuje mnohem méně, patří sem např. bentonitové suspenze, rozpouštědla barev, med nebo mokrý písek.

Binghamské kapaliny – neboli ideálně plastické látky, jejich viskozita klesá s rostoucí smykovou rychlostí. Mají plastickou složku deformace a dochází u nich k toku až po překročení prahového smykového napětí (mez toku). Zahrnují např. některé stavební materiály, suspenze křídy a vápna, roztoky nebo taveniny polymerů atd.

Tokové a viskózní křivky jednotlivých látek jsou zobrazeny na obr. 16.



Obr. 16: Toková a viskózní křivka [98, 100]

[10, 92, 96, 98, 100]

3.4.3 ZÁKLADNÍ REOLOGICKÉ PRVKY A MODELY

Reologické prvky a modely se používají k zjednodušenému popisu chování různých materiálů a stavů, kterým jsou vystaveny. Základními prvky jsou pružná látka (Hookova pružina), vazká kapalina (Newtonův tlumič), tvárná látka (St. Venantova látka), tuhá látka (Euklidova hmota) nebo vláčná látka. Pro deskripci asfaltových směsí a pojiv jsou nejdůležitější první dva prvky, uvedené níže.

Většina materiálů vykazuje reologické chování na pomezí mezi tekutinami a pevnými látkami a jsou proto klasifikovány jako viskoelastické materiály, zobecňované složenými reologickými modely. V důsledku toho je možné kombinovat pružiny a tlumiče tak, aby modelovaly reálné viskoelastické chování. K přesnějšímu popisu viskoelastického chování asfaltových pojiv nebo směsí je vhodné zvolit výrazně složitější modely využívající více prvků. Příkladem je Kelvin-Voigtův řetězec, generalizovaný Kelvinův nebo Maxwellův model, Huet-Sayeght model, DBN model nebo 2S2P1D model.

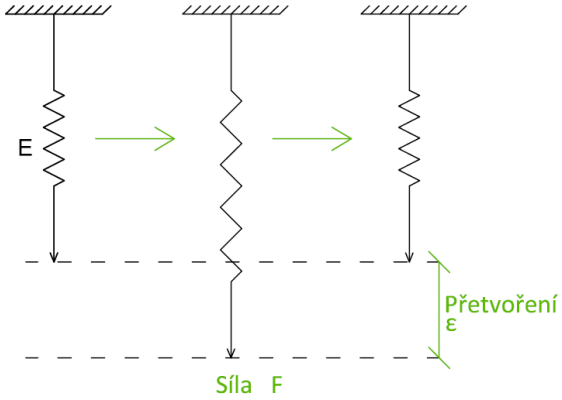
Hookova pružina

Pružina je základním prvkem, jenž popisuje lineárně elastické chování. Reprezentuje pevnou látku (např. ocel), která se řídí Hookovým zákonem. Hookův model tvoří samostatný prvek – pružina s jednou materiálovou konstantou E (Youngův modul pružnosti). Modul pružnosti je měřítkem tuhosti nebo odolnosti proti deformaci. Pro čistě elastický materiál neexistuje žádná časová závislost, takže při aplikaci napětí je pozorováno okamžité namáhání. Napětí (σ) je lineárně úměrné výsledné deformaci pružiny (pokud není překročena hranice pružnosti). Po odstranění napětí se pružina vrátí do výchozího tvaru (obr. 17). Pokud je překonána mez pružnosti, chování se stane nelineárním a pružina může být trvale zdeformována. Základní vztah Hookova zákonu je vyjádřen rovnicí 5. Ze základní rovnice je možné snadno odvodit rovnici pro poměrné přetvoření (rovnice 6).

$$\sigma = E.\varepsilon \tag{5}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{6}$$

Kde σ…napětí [Pa]
E…Youngův modul pružnosti [Pa]
ε…poměrné přetvoření [-]



Obr. 17: Odpověď ideálně pevné látky (pružiny) při aplikaci a následném odstranění síly

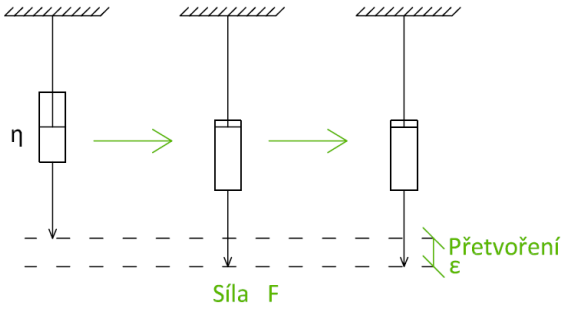
Newtonův tlumič

Tlumič je základním prvkem, který vystihuje viskózní chování. Popisuje vazké kapaliny s parametrem viskozity η (např. voda) a řídí se Newtonovým zákonem. Viskozita je měřítkem odporu vůči toku. Tlumič je mechanické zařízení sestavené z pístu pohybujícího se přes viskózní newtonskou tekutinu. Jestliže napětí (síla) působí na tlumič, tlumič se okamžitě začne deformovat a pokračuje v deformaci konstantní rychlostí, dokud není odstraněno napětí (obr. 18). Napětí (σ) při pohybu pístu je určeno působící rychlostí. Energie potřebná pro deformaci nebo posunutí se rozptýlí uvnitř tekutiny (obvykle jako teplo) a přetvoření je trvalé. Vývoj přetvoření v ideální tekutině (Newtonův zákon) je dán výrazem z rovnice 7. Z Newtonova zákona lze odvodit rovnici pro poměrné přetvoření (rovnice 8).

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{7}$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma.t}{\eta} \tag{8}$$

Kde σ…napětí [Pa]
η…dynamická viskozita [Pa.s]
dε/dt…derivace přetvoření podle času [1/s]
ε…poměrné přetvoření [-]
t…čas [s]



Obr. 18: Odpověď ideální tekutiny (tlumiče) na aplikaci a následné odstranění síly

Maxwellův model

Nejjednodušší znázornění viskoelastické látky (např. asfaltového pojiva) je pomocí Maxwellova modelu. Model vznikne sériovým řazením Hookovy pružiny s parametrem E a Newtonovým tlumičem s parametrem η (obr. 19). Pružina představuje vratnou část deformace a naopak tlumič nevratnou část deformace. Díky sériovému zapojení prvků je přetvoření Maxwellovy hmoty při působení napětí rovno součtu deformací jednotlivých prvků (rovnice 9). Při aplikaci zatížení je ze začátku odezva převážně elastická (protažení pružiny). Po protažení pružiny se začne pohybovat i tlumič. Po ukončení zatížení se pružina navrátí do původního stavu, ale protažení tlumiče zůstane ve formě plastické deformace. Použité zatížení vyvolá shodné napětí pro oba prvky (rovnice 10). Tento model charakterizuje relaxační chování asfaltového pojiva.

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_t \tag{9}$$

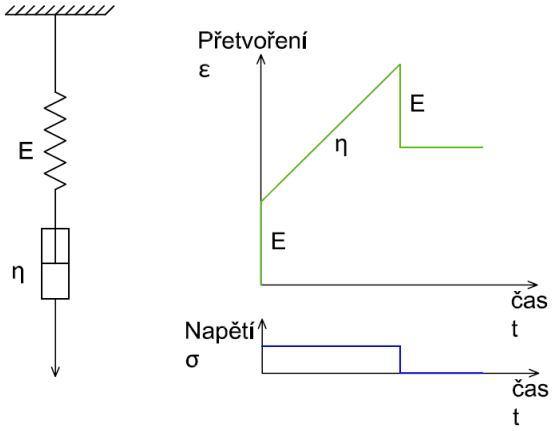
$$\sigma = \sigma_p = \sigma_t \tag{10}$$

Kde ε…poměrné přetvoření Maxwellovy hmoty [-]
ε_p…poměrné přetvoření pružiny [-]
ε_t…poměrné přetvoření tlumiče [-]
σ… napětí Maxwellovy hmoty [Pa]
σ_p…napětí pružiny [Pa]
σ_t …napětí tlumiče [Pa]

Po dosazení do rovnice 9 za přetvoření tlumiče (rovnice 8) a přetvoření pružiny (rovnice 6) je možné přetvoření v Maxwellově modelu vyjádřit následujícím výrazem (rovnice 11):

$$\varepsilon = \sigma\left(\frac{1}{E} + \frac{t}{\eta}\right) \tag{11}$$

Kde ε… poměrné přetvoření Maxwellovy hmoty [-]
σ…napětí [Pa]
E…Youngův modul pružnosti [Pa]
t…čas [s]
η…dynamická viskozita [Pa.s]



Obr. 19: Maxwellův model a základní grafy napětí a přetvoření v čase

Kelvinův model (Model Kelvin-Voigtovy hmoty)

Viskoelastickou látku lze podobně popsat modelem Kelvin-Voigtovy hmoty, který využívá stejnou kombinaci prvků (pružina a tlumič), ale spojené paralelně (obr. 20). Tento model se používá zejména pro zkoušku dotvarování (tečení). Při působení zatížení není deformace okamžitá, ale zpožděná (závislá na čase), protože přítomnost tlumiče zpomaluje reakci pružiny a systém se nejprve chová jako viskózní kapalina a později jako elastická pevná látka. Rychlost s jakou se tento přechod uskutečňuje, závisí na retardačním čase λ (rovnice 17). Retardační čas je doba potřebná k dosažení přetvoření přibližně 63 % své konečné asymptotické hodnoty (u Kelvinova modelu) [92]. Výsledná deformace je u obou prvků totožná (rovnice 13), ale celkové napětí (rovnice 12) je součtem napětí jednotlivých prvků.

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_t \tag{12}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_p = \varepsilon_t \tag{13}$$

Kde σ…celkové napětí Kelvin-Voigtovy hmoty [Pa]
σ_p…napětí pružiny [Pa]
σ_t …napětí tlumiče [Pa]
ε…poměrné přetvoření Kelvin-Voigtovy hmoty [-]
ε_p…poměrné přetvoření pružiny [-]
ε_t…poměrné přetvoření tlumiče [-]

Dosazením za napětí pružiny (σ_p – rovnice 5) a tlumiče (σ_t – rovnice 7) do rovnice 12, získáme rovnici pro celkové napětí (rovnice 14). V případě, že je počáteční přetvoření nulové, je možné rovnici 14 integrovat (při konstantním napětí). Výsledkem je časově závislé přetvoření v modelu Kelvin-Voigtovy hmoty při působení zatížení (rovnice 15). Identický postup se použije pro stanovení vztahu přetvoření po odtížení (integrací rovnice 14 a dosazením okrajových podmínek), kdy získáme rovnici 16. Rychlost poklesu přetvoření je i zde závislá na retardačním čase λ (rovnice 17).

$$\sigma = E.\varepsilon + \eta\frac{d\varepsilon}{dt} \tag{14}$$

Kde σ…celkové napětí Kelvin-Voigtovy hmoty [Pa]
E…Youngův modul pružnosti [Pa]
ε…poměrné přetvoření [-]
η…dynamická viskozita [Pa.s]
dε/dt…derivace přetvoření podle času [1/s]

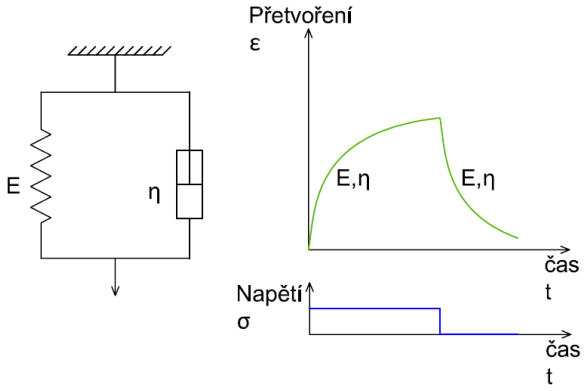
$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E}\left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}\right) \tag{15}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma}{E}\left(e^{-\frac{t_2}{\lambda}}\right) \tag{16}$$

Kde ε_1… poměrné přetvoření Kelvin-Voigtovy hmoty při zatížení [-]
ε_2… poměrné přetvoření Kelvin-Voigtovy hmoty po odtížení [-]
σ…napětí [Pa]
E…Youngův modul pružnosti [Pa]
t…čas zatížení [s]
t_2...čas po odtížení [s]
λ…retardační čas [s]

$$\lambda = \frac{\eta}{E} \tag{17}$$

Kde λ…retardační čas [s]
η…dynamická viskozita [Pa.s]
E…Youngův modul pružnosti [Pa]



Obr. 20: Kelvinův model a základní grafy napětí a přetvoření v čase

Burgersův model

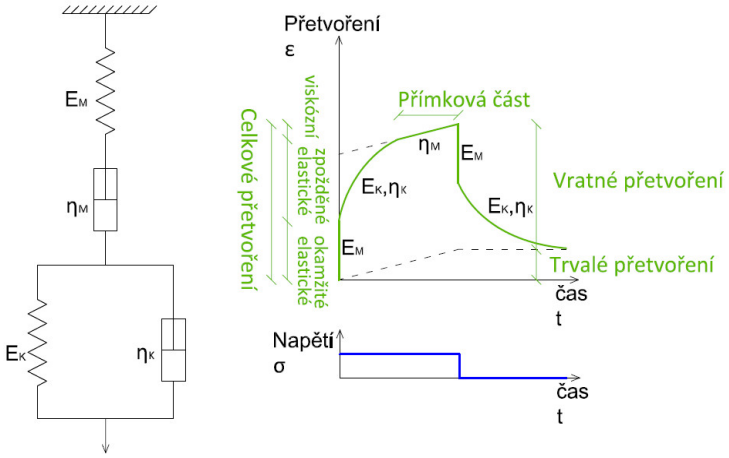
Burgersův model (obr. 21) vystihuje nejlépe z uvedených modelů viskoelastické chování asfaltových směsí a pojiv na aplikované napětí. Je to i nejčastěji užívaný model pro popis zkoušky MSCR. Burgersův model se používá zejména u reologických systémů, kde se objevuje zpožděná elasticita. Jedná se o sériové zapojení Maxwellova a Kelvin-Voigtova článku, první představuje chování při nízkých frekvencích a druhý při vysokých frekvencích. Podrobnější deskripce jednotlivých složek přetvoření je v kapitole 3.10.2. Při měření na DSR je často možné sledovat pouze část spektra, v závislosti na citlivosti reometru a relaxačním čase testovaného materiálu. Z principu sériového zapojení vyplývá, že celkové napětí je shodné u Maxwellova i Kelvin-Voigtova článku (rovnice 18) a stejně tak přetvoření u Burgersova modelu při zatížení je součtem přetvoření Maxwellova a Kelvin-Voigtova článku (rovnice 19). Rovnice 20 pak popisuje přetvoření Burgersovy hmoty po odtížení.

$$\sigma = \sigma_M = \sigma_K \tag{18}$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_M + \varepsilon_K = \sigma\left(\frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M}\right) + \frac{\sigma}{E_K}\left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}\right) = \sigma\left[\frac{1}{E_M} + \frac{t}{\eta_M} + \frac{1}{E_K}\left(1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}\right)\right] \tag{19}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma t}{\eta_M} + \frac{\sigma}{E_K}\left(e^{-\frac{t_2}{\lambda}}\right) \tag{20}$$

Kde σ… celkové napětí Burgersovy hmoty [Pa]
σ_M...napětí Maxwellovy hmoty [Pa]
σ_K… napětí Kelvinovy hmoty [Pa]
ε_1… poměrné přetvoření Burgersovy hmoty při zatížení [-]
ε_2… poměrné přetvoření Burgersovy hmoty po odtížení [-]
ε_M… poměrné přetvoření Maxwellovy hmoty [-]
ε_K… poměrné přetvoření Kelvinovy hmoty [-]
σ…napětí [Pa]
E_M… Youngův modul pružnosti Maxwellovy hmoty [Pa]
η_M…dynamická viskozita Maxwellovy hmoty [Pa.s]
E_K… Youngův modul pružnosti Kelvinovy hmoty [Pa]
t…čas zatížení [s]
t_2...čas po odtížení [s]
λ…retardační čas (η_K/E_K)[s]

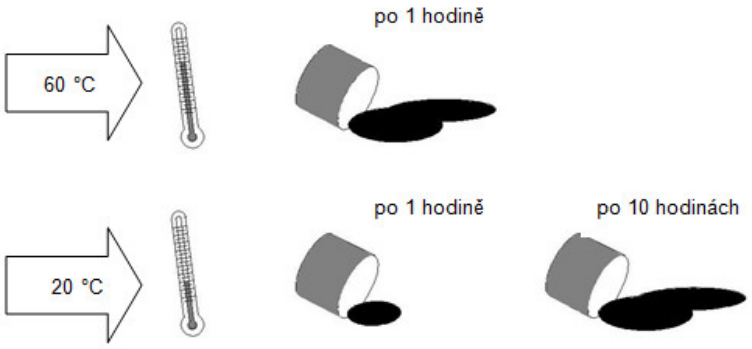


Obr. 21: Burgersův model a základní grafy napětí a přetvoření v čase

[92, 98, 102, 103]

3.4.4 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH POJIV

Stejně jako u mnoha jiných viskoelastických materiálů jsou reologické vlastnosti asfaltového pojiva prvotně určeny chemickým složením a molekulárními interakcemi (strukturou uhlovodíků i heterocyklických skupin). V případě asfaltového pojiva jsou proto základní vlastnosti vymezeny zdrojem ropy [104]. Druhým atributem viskoelastických látek je závislost na teplotě, velikosti zatížení a čase. Tuto vlastnost názorně zobrazuje obrázek 22. Pokud chceme, aby se pojivo rozlilo, můžeme počkat delší čas nebo vzorek ohřát. Příčinou je chování asfaltového pojiva, které je částečně elastické a částečně viskózní. Díky tomu je predikce chování jednotlivých pojiv značně komplikovaná.



Obr. 22: Vztah mezi časem a teplotou asfaltového pojiva [96]

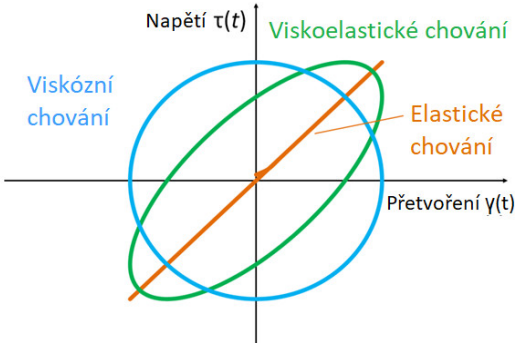
Chování asfaltových pojiv podle působící teploty a délky zatížení je možné rozdělit do tří skupin:

- **Při vysokých teplotách nebo delších dobách zatížení** (parkující nákladní vozidla, autobusové zastávky, světelné křižovatky nebo pomalu pojíždějící doprava) se asfaltové pojivo stává měkčí a jeví se jako viskózní kapalina, která se po zatížení nevrací do původního stavu. To je jednou z příčin, proč se za vyšších teplot některé asfaltové směsi deformují a dochází ke vzniku vyjetých kolejí. Vysoké

teploty jsou ale i žádoucí, například k obalení kameniva nebo zhutnění asfaltové směsi.

- **Při nízkých teplotách a vysokých frekvencích zatížení** (rychle pojíždějící nákladní automobily) se asfaltové pojivo stává tužším a má pružné (elastické) vlastnosti, ale jen do překročení meze únosnosti projevující se tvorbou smršťovacích trhlin.
- **Při středních teplotách** (nejčastější stav v ČR) se chování pohybuje mezi výše popsanými extrémy. Asfaltové pojivo i směs jsou viskózní i elastické neboli viskoelastické.

Všechny tři skupiny je možné znázornit obrázkem 23 zobrazujícím chování asfaltových pojiv v závislosti na fázovém úhlu v lineárním režimu. Pokud se fázový úhel přibližuje nule, reakce materiálu je primárně elastická a závislost napětí na přetvoření tvoří přímku. Poté co se fázový úhel blíží 90°, je odpověď viskózní a tvoří kruh. A v případě, že je fázový úhel mezi 0° a 90°, křivka je eliptická a jedná se o viskoelastické chování.



Obr. 23: Znázornění lineární viskoelasticity [105]

Reologické chování asfaltových pojiv se následně odráží ve vlastnostech asfaltových směsí. Nadměrně zatížené vozovky se deformují a jsou náchylné k vyjíždění kolejí. Naopak příliš tuhé vozovky mají sklon k únavovým nebo nízkoteplotním trhlinám (obr. 24). Model simulující nejlépe viskoelastické vlastnosti pojiva je složitý. Ve většině případů je dostačující asfaltové pojivo charakterizovat Burgersovým modelem (obr. 21), případně zjednodušeně Maxwellovým modelem (obr. 19). Oba modely využívají dva základní články – pružinu a tlumič vystihující elastické, respektive viskózní chování.

Obr. 24: Vliv reologických vlastností asfaltového pojiva na chování asfaltové vozovky [30]

[3, 5, 6, 10, 29, 66, 96, 105]

3.5 OD EMPIRICKÝCH K REOLOGICKÝM ZKOUŠKÁM

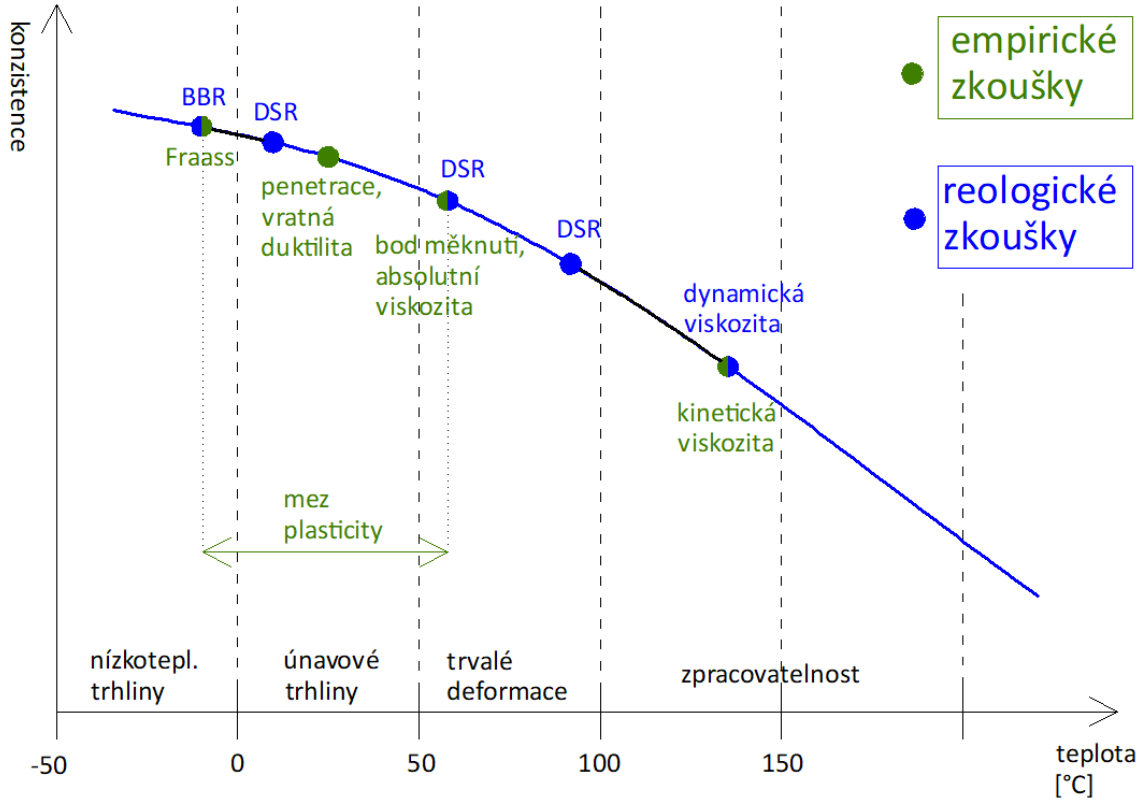
Asfaltová pojiva jsou komplexní materiály, jež je obtížné jednoznačně specifikovat. Vlastnosti asfaltových pojiv byly tradičně zkoumány empirickými zkouškami zavedenými před více jak 100 lety. Nazývají se empirické, neboť výsledky se obtížně vysvětlují v běžných fyzikálních nebo technických termínech a pro interpretaci výsledků zkoušek je zapotřebí empirických znalostí. Výsledkem je většinou jen jedna hodnota pro konkrétní okrajové podmínky. Nejčastěji používané empirické zkoušky asfaltových pojiv jsou penetrace, bod měknutí a duktilita. Obecně je známo, že tyto zkušební metody neumožňují predikovat užitné chování asfaltových směsí, především u modifikovaných pojiv. Zavedení modifikátorů vedlo k nedostatečné korelaci mezi výsledky empirických zkoušek a skutečným chováním v asfaltových vozovkách [106, 107].

Empirické zkoušky poskytují důležité informace (mnohé z nich jsou klíčové pro zatřídění zejména v evropských normách), avšak mají i své nedostatky. Poměrně dobře fungují pro zjištění konzistence pojiv, ale neměří základní vlastnosti asfaltového pojiva, jako je modul tuhosti nebo pevnost. Navíc uplatnění empirických výsledků pro návrh směsí, stanovení modulů tuhosti směsí, relaxační vlastnosti apod. je prakticky nemožné. Z tohoto důvodu byly v šedesátých letech 20. století provedeny rozsáhlé reologické studie (např. [108, 109]), na jejichž základě se zpočátku upřednostňovalo měření viskozity.

Viskozita se měří při vysokých teplotách, kdy se chování asfaltového pojiva blíží ideální tekutině. Při nízkých a středních teplotách se zkoušky viskozity stávají obtížně proveditelné i interpretovatelné. Navíc zkouška viskozity poskytuje omezené množství informací o průtokových vlastnostech materiálu. Dvě různá asfaltová pojiva mohou mít při dané teplotě stejnou hodnotu viskozity, ale je možné, že se chovají velmi odlišně kvůli rozdílům ve stupni elasticity. Viskozita však neposkytuje žádné informace o stupni elasticity, kterou vykazuje materiál při zatížení. Tehdejší specifikace asfaltových pojiv byly tedy založeny na měření viskozity, penetrace a duktility. Později nedostatky starších empirických zkoušek a zkoušky viskozity vedly k vývoji efektivnějších reologických zkoušek.

V rámci programu SHRP proto byly vyvinuty nové reologické zkoušky. Jedná se především o dynamické oscilační nebo creepové zkoušky a nízkoteplotní zkoušky pro určení vztahů napětí/deformace a jejich teplotní závislosti. Hlavní výhodou reologických zkoušek asfaltových pojiv je, že výsledné hodnoty je možné interpretovat definovatelnými fyzikálními vlastnostmi. Tyto vlastnosti lze lépe použít k modelování nebo predikci mechanických vlastností asfaltové směsi i asfaltové vozovky.

Na obr. 25 jsou přehledně zobrazeny základní empirické a funkční zkoušky v závislosti na teplotě provádění zkoušky a konzistenci asfaltového pojiva.



Obr. 25: Základní empirické a reologické zkoušky asfaltových pojiv

[30, 36, 37, 66]

3.6 REOLOGICKÉ ZKOUŠKY ASFALTOVÝCH POJIV

Reologické nebo z pohledu potřeb silničního stavitelství též označované jako funkční zkoušky slouží k popisu viskoelastických vlastností. Jejich předností je, že lépe předpovídají chování asfaltových pojiv v asfaltových směsích, především v kritických podmínkách vzniku poruch a jsou nezbytné zejména pro modifikovaná asfaltová pojiva.

Jedním z nejstarších záznamů v oblasti zkoumání reologie asfaltu je Van der Poelova stať publikovaná v roce 1954 [81]. Světoznámý nomogram se stal jedním z nejpřesnějších způsobů stanovení dynamické tuhosti asfaltových pojiv. I současné odborníky udivuje, že odvozené hodnoty z této doby prokázaly některé vlastnosti jako například princip ekvivalence teploty a frekvence. Metoda však není schopna odhadnout druhou složku komplexního smykového modulu neboli fázový úhel δ.

Rostoucí nároky na kvalitu a především trvanlivost vozovek vedly v 90. letech 20. století k rozsáhlému výzkumnému programu SHRP (kap. 3.3). Zpočátku měl projekt za cíl revizi stávajících zkušebních postupů. Druhá fáze zahrnovala vývoj nových funkčních zkušebních metod se zaměřením na reologické vlastnosti, založené především na komplexních modulech tuhosti. Hlavním důvodem bylo zjištění, že dosavadní empirické zkoušky nedostatečně a někdy nepřesně popisují viskoelastické vlastnosti [110, 111]. Mnoho výzkumů následně potvrdilo [110], že reologické charakteristiky mají lepší korelace se vznikem poruch na vozovce (vyjeté koleje, nízkoteplotní trhliny i únavové trhliny).

Některé funkční zkoušky jsou značně rozšířeny a používány, ale nejsou výrazně začleněny do norem asfaltových pojiv. V současné době probíhají jejich revize, kde se předpokládá zavedení alespoň deklarovaných hodnot. Například konzistence PMB při zvýšených provozních teplotách je v EN 14023 (Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty) [112] stále charakterizována pouze bodem měknutí, ačkoli je dobře známo, že tato charakteristika je dostatečný indikátor odolnosti proti trvalé deformaci pouze v případě nemodifikovaných asfaltových pojiv [113]. Zároveň žádné specifikace asfaltových pojiv nepředepisují minimální nebo maximální požadavky pro ověření funkčních charakteristik oscilačních zkoušek ani zkoušky MSCR.

[1, 10, 96, 113-118]

3.6.1 ZÁKLADNÍ REOLOGICKÉ ZKOUŠKY ASFALTOVÝCH POJIV

Přístrojů pro měření reologických zkoušek asfaltových pojiv existuje celá řada. Běžně používané přístroje je možné dle zkušební teploty rozdělit na tři skupiny. Měření při vysokých teplotách se provádí na viskozimetrech. Naopak pro měření pod bodem mrazu se volí průhybové trámečkové reometry (BBR). Poslední skupinou přístrojů jsou dynamické smykové reometry (DSR), které mají uplatnění především ve střední oblasti teplot (v rozmezí cca 5-90 °C). Bližší informace o přístroji DSR jsou v kapitole 3.8.

Funkční charakteristiky získané z reologických zkoušek se většinou stanovují z cyklického namáhání asfaltového pojiva nebo z měření, při nichž se nastavují různé intervaly teplot, frekvencí, eventuálně napětí. Nejčastěji používané reologické zkoušky asfaltových pojiv, včetně jejich základních parametrů, jsou zobrazeny na obr. 26. Reologické zkoušky lze rozčlenit na skupiny podle vlastností, které vymezují:

Zpracovatelnost

K určení zpracovatelnosti slouží zkouška viskozity. Z měření viskozity je možné předpovídat chování pojiva a celé asfaltové směsi při zpracování na obalovně i při pokládce. Dále je uvedená charakteristika důležitá z hlediska přepravy a manipulace s asfaltovým pojivem. Na základě měření viskozity při různých teplotách je možné odhadnout nejvhodnější (respektive minimální) teploty pro míchání, přepravu i pokládku. Ke stanovení viskozity tekutin se zpravidla využívají různé druhy viskozimetrů. Nejpreciznějším viskozimetrem je kapilární, jenž se uplatňuje pro newtonské látky a měří kinematickou viskozitu. Viskozita asfaltových pojiv se zjišťuje zejména rotačním viskozimetrem, případně DSR. Rotační viskozimetry pracují na principu měření momentu síly potřebné k rotaci vřetene ponořeného ve zkušební nádobě s asfaltovým pojivem.

Trvalé deformace

Všechny níže popsané zkoušky predikující trvalé deformace se provádí na DSR. Na základě poznatků programu SHRP se k určení přetvárných vlastností asfaltových pojiv používala především charakteristika komplexního smykového modulu (G*) a parametr G*/sin(δ). V posledních letech je upřednostňována zkouška opakovaného zatěžování a odlehčení Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCR), neboť poskytuje více informací a lépe se interpretuje. Obě metody jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

Další materiálovou charakteristikou, popisující odolnost asfaltové směsi proti tvorbě trvalých deformací, je měření viskozity při nulovém smyku (ZSV – Zero Shear Viscosity) [119]. Zkouška se měří na DSR obvykle v režimu tečení za nízkého smykového napětí, při kterém se viskozita blíží určité limitní hodnotě. ZSV je definována jako viskozita související s konstantní rychlostí deformace a při napětí blížícím se nule [23]. Napětí je proto vždy v lineární viskoelastické oblasti. Pro dosažení rovnovážného stavu je v případě modifikovaných pojiv nutné aplikovat konstantní torzní napětí několik hodin. K rovnovážnému stavu nemusí ale vždy dojít, protože může nastat dřívější selhání materiálu.

Výhoda použití ZSV spočívá v její citlivosti na molekulární strukturu pojiva a bylo prokázáno, že adekvátně řadí výkon nemodifikovaných i modifikovaných pojiv [21]. Jedním z problémů se ZSV však je, že vysoká citlivost na molekulovou hmotnost může přecenit výkon některých pojiv PMB. Podle Desmazese [120] zesíťovaná a vysoce modifikovaná pojiva se chovají jako pevné látky a nikdy nedosahují ustáleného stavu. Podrobný popis zkoušky je k dispozici např. v článku publikovaném Rowem a kol. [121].

Podobnou zkouškou je zkouška ekviviskózní teploty (EVT – Equiviscous Temperature) založená na nízké smykové viskozitě (LSV – Low Shear Viscosity) (ČSN CEN/TS 15324 [122]), kterou je také možné zjistit ZSV. Základní rozdíl zkoušky LSV je, že se provádí v režimu nízkofrekvenční oscilace. Podstatou je určení teploty, při níž je viskozita za velmi nízké smykové rychlosti rovna stanovené hodnotě. I tato zkouška se v praxi moc nevyužívá, protože je poměrně komplikovaná a časově náročná. Princip zkušební metody je navíc diskutabilní, neboť oscilace s velmi nízkými smykovými úrovněmi neimplikuje skutečné napětí a přetvoření, jemuž je pojivo vystaveno v asfaltové vozovce. Zvláště u vysoce modifikovaných asfaltů není oscilační test při nízkých smykových úrovních příliš reprezentativní.

Únavové vlastnosti

Na základě vyhodnocení únavových vlastností asfaltových pojiv je možné predikovat náchylnost asfaltových vozovek k tvorbě únavových trhlin. V Evropě však neexistuje standardizovaný zkušební postup pro posouzení odolnosti asfaltových pojiv proti únavovým trhlinám. Hlavním problémem je značná složitost principu únavy asfaltového pojiva.

Zatím nejjednodušší a proto často používanou charakteristikou je parametr $G^*.\sin(\delta)$, který se zjišťuje z měření na DSR podle ČSN EN 14770 – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR) [123], stejně jako parametr pro posouzení trvalých deformací. Některé studie ale ukázaly, že měření lineárního viskoelastického chování asfaltových pojiv nedostatečně koreluje s výsledky zkoušek únavy asfaltových směsí [124-126].

Z tohoto důvodu byla vyvinuta zkouška cyklické únavy, známá jako time sweep test. Zkouška se rovněž provádí na DSR, ale ve vysokofrekvenčním oscilačním režimu. Při dostatečně vysokém stupni tuhosti vykazuje asfaltové pojivo únavové poškození pozorovatelné postupným snižováním tuhosti s časem. Time sweep test je podobný 2 bodové zkoušce únavy na směsích EN 12697-24 [127] a provádí se při konstantní úrovni deformace. Nevýhodou je, že zkouška trvá velmi dlouho (i několik dnů) a reprodukovatelnost je pro většinu pojiv poměrně nízká [128]. V současnosti se zaměřuje pozornost na hledání zkušebních postupů, které lze aplikovat jako „zrychlené“ únavové zkoušky [129].

Relativně novou metodou pro posouzení únavového chování asfaltových pojiv je zkouška Linear Amplitude Sweep (LAS) (AASHTO TP-101-12) [130]. Zkoušku LAS lze snadno provést se standardním vybavením DSR v poměrně krátké době. Hlavním rozdílem mezi zkouškou time sweep a LAS je, že time sweep se provádí s konstantní amplitudou napětí, zatímco při zkoušce LAS se amplituda deformace systematicky zvyšuje, aby se urychlilo poškození. Díky tomu se LAS měří i v nelineární oblasti. Bližší popis zkoušky je např. v publikacích [7, 105, 128, 131].

Další zkouška určená k měření únavy je Double-edge-notched tension testing (DENT) (podrobnosti lze nalézt např. v příspěvku Andriescua a kol. [132]) nebo Large amplitude oscillatory shear (LAOS) (více o zkoušce v článku Cookmana a kol. [105]).

Nízkoteplotní vlastnosti

Je prokázáno, že nízkoteplotní vlastnosti asfaltových vozovek jsou z největší části ovlivněny nízkoteplotními vlastnostmi asfaltových pojiv [40, 66]. Zvýšená křehkost pojiva při nízkých teplotách je kritickým faktorem ovlivňujícím odolnost směsi vůči vzniku trhlin [1]. Jestliže při nízkých teplotách dosahuje tahové napětí vyšších hodnot než je tahová pevnost materiálu, dochází ke smršťování a následně ke vzniku trhlin.

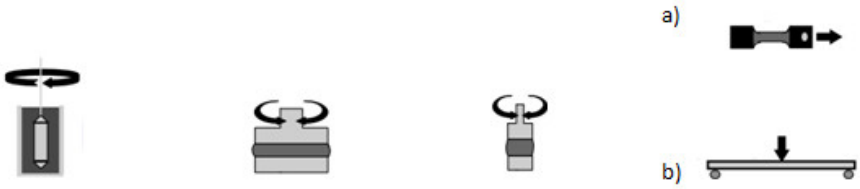
Nejčastěji používanou metodou je stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (Bending Beam Rheometer – BBR) dle ČSN EN 14771 [133]. Zkouška se provádí zpravidla na vzorku dlouhodobě zestárlém a určuje se modul tuhosti za ohybu S a m-hodnota. Zkušební těleso je po definovanou dobu zatěžováno konstantní svislou silou působící uprostřed. Měří se průhyb $\delta(t)$, který se zvyšuje působením zatížení v čase. Modul tuhosti v tahu za ohybu S(t) se vypočítá jako poměr ohybového napětí a ohybové deformace při různých teplotách. Druhou měřenou charakteristikou je sklon křivky dotvarování m(t) neboli směrnice časově závislé změny modulu dotvarování. Hodnota m(t) popisuje deformační schopnost asfaltového pojiva v daném čase.

Pro charakterizaci nízkoteplotních vlastností asfaltových pojiv existuje celá řada lomových zkoušek, např. zkouška přímého tahu (DTT – Direct Tension Test), zkouška houževnatosti (FTT – Fracture Toughness test), Double Edge Notch Test (DENT), Single-Edge Notched Bending (SENB) nebo Asphalt Binder Cracking Device (ABCD) [134].

Z lomových zkoušek se většinou používá zkouška pevnosti v přímém tahu (DTT). Podstatou zkoušky je stanovení teploty, při níž nastane křehký lom pojiva s 1% deformací v tahu. Zjišťuje se míra protažení, napětí a teplota meze pevnosti.

Tuhost

K určení tuhosti asfaltových pojiv se jeví jako nejvhodnější charakteristika komplexní smykový modul G*. Tento parametr je navíc snadno porovnatelný s charakteristikami tuhosti asfaltových směsí (v souladu s EN 12697-26 [135]).



Vlastnost:	zpracovatelnost	trvalé deformace	únavové trhliny	nízkoteplotní trhliny	
Měřící přístroj:	rotační viskozimetr	DSR (PP25)	DSR (PP08)	a) DTT	b) BBR
Stáří pojiva:	nezestárlé	nezestárlé a RTFOT	RTFOT+PAV	RTFOT+PAV	
Teplota měření:	> 100 °C	cca 40-90 °C	cca 5-40 °C	< 0 °C	
Charakteristika:	viskozita	G*/sinδ	G*.sinδ	a) ε	b) S a m

Obr. 26: Nejčastěji používané reologické zkoušky asfaltových pojiv [96]

[1, 10, 23, 36, 46, 66, 100, 113, 114, 118, 136, 137]

3.7 KLASIFIKACE ASFALTOVÝCH POJIV V USA

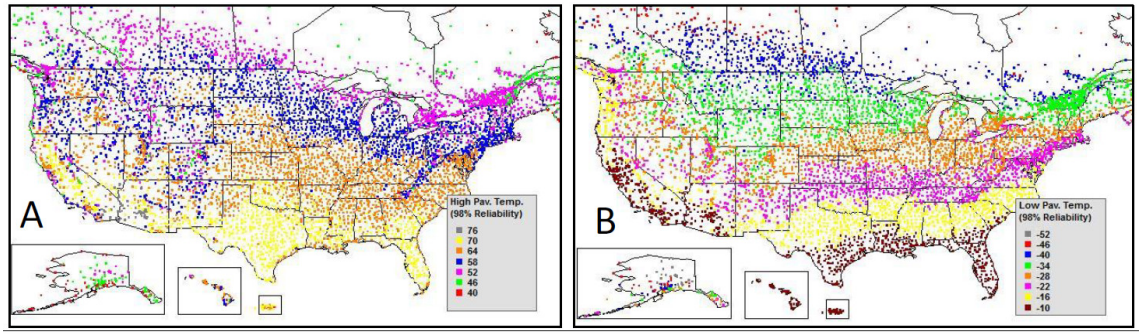
Mezi Evropou a Amerikou je zcela zásadní rozdíl v klasifikaci asfaltových pojiv. V Evropě se asfaltová pojiva třídí stále pomocí empirické zkoušky penetrace (u PMB pojiv i pomocí zkoušky bodu měknutí), v USA se z důvodu rozšíření používání modifikovaných pojiv začaly určovat základní reologické zkoušky na DSR a BBR [138].

Systém klasifikace asfaltových pojiv SUPERPAVE (SUperior PERforming asphalt PAVEments) byl vyvinut v průběhu programu SHRP a vyvíjel se od konce 80. let do poloviny 90. let. Od poloviny 90. let je využíván nejen v USA, ale i v Kanadě. Klasifikace SUPERPAVE je založena na rozdělení asfaltových pojiv do různých výkonnostních tříd PG (performance grade). Každá třída PG se skládá z horní kritické teploty (HKT) a dolní kritické teploty (DKT). HKT je nejvyšší teplota, při které má vozovka přijatelnou odolnost vůči tvorbě trvalých deformací. Naopak DKT je nejnižší teplota, při níž se očekává, že vozovka odolá vzniku trhlin [64]. Základní norma upravující zatřídění PG je AASHTO M320 (Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder) [139].

Nejvyšší riziko, že asfaltové pojivo je příliš měkké, a proto náchylné k tvorbě trvalých deformací je při vysokých teplotách, zejména u nově položených vozovek. Naopak nejvyšší riziko, že je asfaltové pojivo příliš tuhé a křehké se sklonem ke vzniku trhlin, se vyskytuje při nízkých teplotách u vozovek dlouhodobě zestárnutých. Na základě těchto poznatků byly pomocí klimatických dat pro každou oblast v USA určeny průměrné maximální teploty 7 po sobě jdoucích dní v roce (měřeny 20 milimetrů pod povrchem vozovky) a 1 denní minimální teploty vozovky na povrchu. Je třeba zmínit, že minimální teplota vozovky není stejná jako minimální teplota vzduchu. Teplota vozovky je často výrazně vyšší než teplota vzduchu pro danou lokalitu.

Na základě těchto teplot se pro každou oblast doporučují horní a dolní hodnoty PG (obr. 27). Tyto teploty představují teplotní rozsah, v němž konzistence asfaltového pojiva musí splňovat stanovené požadavky, tj. dostatečně tuhé pojivo při maximálních teplotách a tvárné při minimálních teplotách. Z praktických důvodů jsou teploty rozděleny přírůstky po 6 °C. Šesti

stupňový přírůstek je založen na předpokladu, že tuhost asfaltového pojiva se přibližně zdvojnásobí/zmenší o půlku každých 6 °C. Zatřídění se volí na stranu bezpečnou, tzv. při kritických teplotách území 68 °C a -14 °C se určí třída PG 70-16.



Obr. 27: Mapa s doporučenými třídami PG v USA [140]

Stanovení DKT asfaltového pojiva se zjišťuje zkouškou na BBR u zestárlého vzorku (metoda RTFOT+PAV). Stárnutí zvyšuje tuhost pojiva a tím dochází ke zvýšení náchylnosti vzniku nízkoteplotních i únavových trhlin. Pro tyto poruchy je kritickým stavem dlouhodobě zestárnuté asfaltové pojivo. Během měření na BBR se určuje teplota, při které po 60 s zatěžování přesáhne modul tuhosti S(t) 300 MPa, nebo při níž sklon křivky dotvarování m(t) klesne pod 0,3 podle toho, která teplota je vyšší. Z praktického hlediska je zkušební teplota o 10 °C vyšší než DKT (např. pokud má pojivo modul tuhosti 300 MPa při -6 °C, jeho DKT je -16 °C). Zvýšení teploty zkoušky je možné díky ekvivalenci času a teploty. Zkouška trvající 2 hodiny při standardní teplotě, může být provedena za 60 s při teplotě o 10 °C vyšší [44].

Pro určení HKT se používá oscilační zkouška na DSR. Stárnutím pojiva dochází k nárůstu tuhosti, a proto se za kritický stav považuje nezestárlé pojivo, u něhož se měří teplota, kdy je splněna podmínka G*/sin(δ) = 1,0 kPa. Následně je nezbytné ověřit podmínku G*/sin(δ) na zestárlém vzorku metodou RTFOT a únavové vlastnosti při střední zkušební teplotě (SZT). SZT se dopočítá jako (HKT+DKT)/2+4, např. pro PG 70-16 je SZT (70-16)/2+4 = 31 °C. Únavové vlastnosti se zatím porovnávají parametrem G*.sin(δ), ale uvažuje se o nahrazení zkouškou LAS. Limitní hodnoty asfaltových pojiv pro vymezení PG jsou přehledně zobrazeny v tabulce 1.

Tab. 1: *Limitní hodnoty pro stanovení PG*

Typ zkoušky	Limitní hodnoty	Zkušební podmínky	Měřená veličina
DSR	G*/sin(δ) > 1,0 kPa	nezestárlý (PP25)	HKT
	G*/sin(δ) > 2,2 kPa	RTFOT (PP25)	HKT
	G*.sin(δ) < 5000 (6000*) kPa	RTFOT+PAV (PP08)	SZT
BBR	S(t) < 300 MPa	RTFOT+PAV	DKT
	m(t) > 0,3 MPa	RTFOT+PAV	

*hodnota podle normy AASHTO M332 [141] pro stupeň zatížení H,V a E.

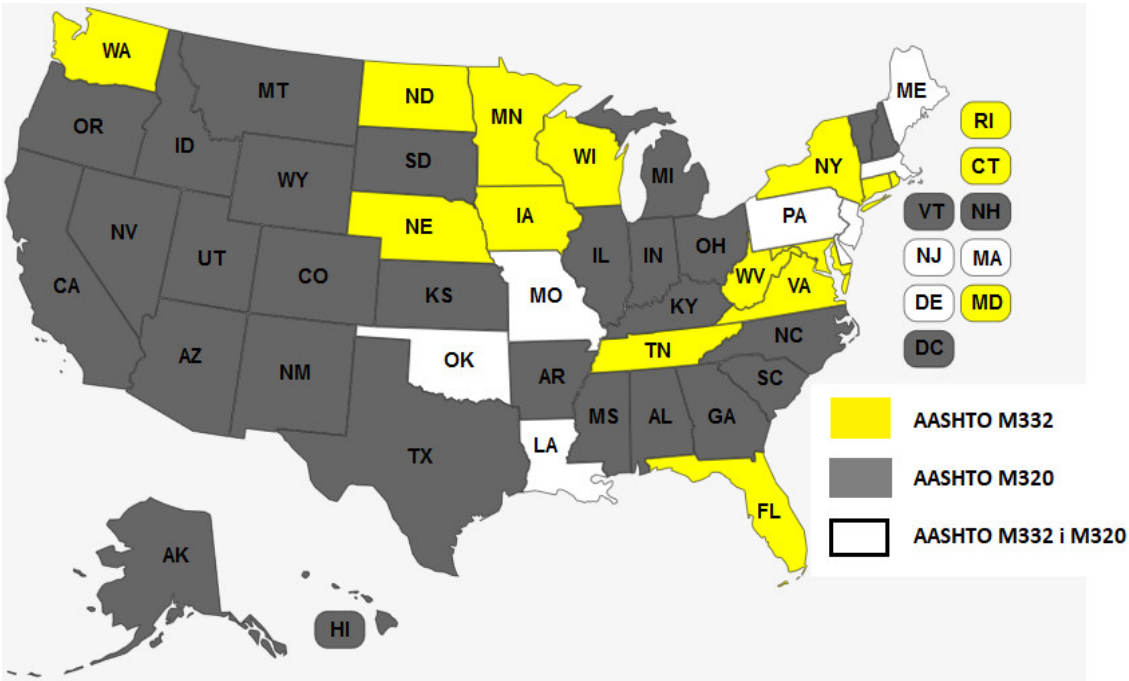
U asfaltových pojiv s označením PG 70-16 se předpokládá, že budou funkční při teplotě vozovky mezi 70 °C a -16 °C. Navíc se všechna pojiva s tímto označením považují za srovnatelná. Pokud je překročena horní nebo dolní hodnota PG, např. teplota vozovky klesne pod -16 °C, pojivo již nemusí být schopno absorbovat tepelné namáhání a může dojít ke vzniku

nízkoteplotních trhlin. V takovém případě je klima pro PG 70-16 příliš chladné a mělo by být použito asfaltové pojivo PG 70-22.

Platnost tříd PG je vhodná pro nízká dopravní zatížení a rychlosti vozidel nad 70 km/hod. V případě vyšších zatížení nebo při nižších rychlostech jsou požadavky na asfaltové pojivo stejné, ale dochází ke zvýšení třídy PG. Tento postup se jmenuje „Grade bumping".

Z důvodu užívání různě modifikovaných pojiv bylo nutné poupravit specifikace PG tak, aby adekvátně charakterizovaly vlastnosti asfaltových pojiv. Vznikla specifikace PG+ doplněná o další zkoušky – vratnou duktilitu, silovou duktilitu, zkoušku MSCR a nízkoteplotní zkoušky. Především zkouška vratné duktility je časově náročná a navíc se v jednotlivých státech USA využívají rozdílné metody měření. Proto se postupně přechází k nové normě stanovující třídu PG AASHTO M332 (Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test) [141].

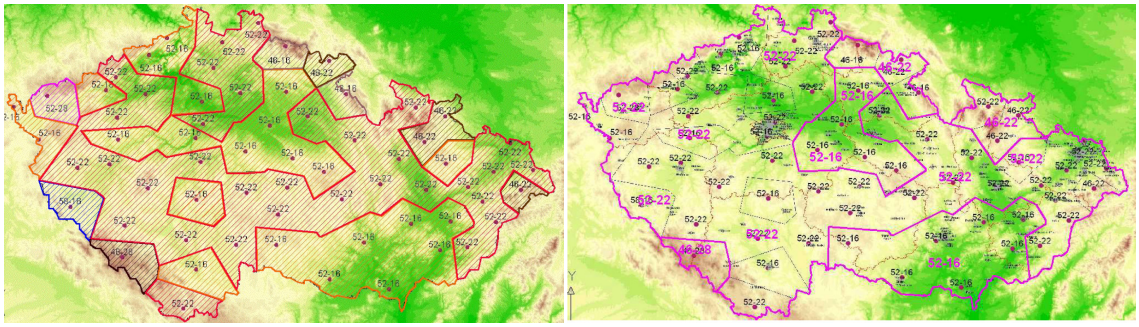
V normě AASHTO M332 [141] se kombinuje stávající zatřídění PG a navíc zkouška MSCR, na jejímž základě dochází k rozdělení pojiv do 4 stupňů (S, H, V, E). Označení stupně se připisuje za HKT (např. PG 70S-16). Limitní hodnoty parametru nevratné smykové poddajnosti (J_{nr}) pro zkoušku MSCR jsou uvedeny v tabulce 2. Ani v USA není zvolena minimální hodnota parametru elastického zotavení (%R). V normě AASHTO M332 [141] je pouze graf indikující elastickou odpověď (obr. 46). V návaznosti na zavedení klasifikace pomocí zkoušky MSCR došlo k odstranění „Grade bumping". Tato norma se zatím používá jen v některých státech USA (obr. 28).



Obr. 28: Používané normy pro klasifikaci asfaltových pojiv v USA [142]

Hlavním účelem tohoto způsobu klasifikace a výběru asfaltového pojiva je garantovat správné vlastnosti asfaltového pojiva pro daná prostředí. Systém PG je založen na zjišťování teploty, při které je dosažena kritická hodnota dané zkoušky. Naopak klasifikace asfaltových pojiv v EU se zakládá na určení hodnoty dané zkoušky při předem definované teplotě. V ČR se

zavedení klasifikace podobné PG systému projednávalo a vznikly i prvotní mapy s doporučenými třídami asfaltových pojiv – nejprve sedm tříd PG, jež byly redukovány na čtyři (obr. 29). K praktickému využití však nikdy nedošlo.



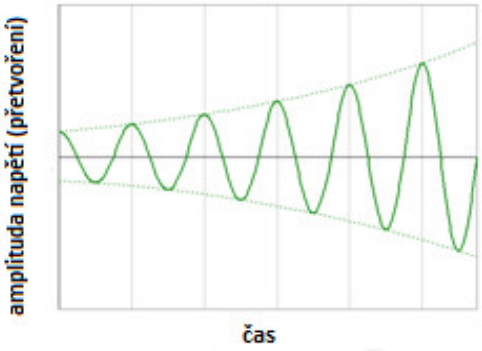
Obr. 29: PG mapa pro ČR základní (vlevo) a redukovaná (vpravo) z roku 2007 [201]

[30, 36, 66, 139, 143]

3.8 DYNAMICKÝ SMYKOVÝ REOMETR (DSR)

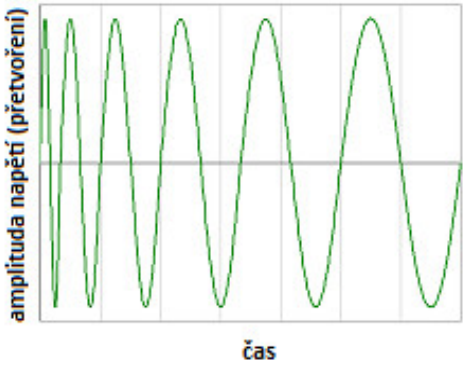
Dynamický smykový reometr (DSR – Dynamic Shear Rheometer) je moderní přístroj používaný k popisu reologických vlastností různých látek, například asfaltových pojiv. Jedná se o víceúčelový přístroj představený poprvé v roce 1993. Většinou pracuje ve třech režimech. Nastaví se smykové napětí a měří se smykové přetvoření (režim CS – controlled stress), nebo se zvolí smyková rychlost a měří se smykové napětí (režim CR – controlled rate), případně se definuje smykové přetvoření (režim CD – controlled deformation). U přístroje lze předvolit široký rozsah zkušebních frekvencí a teplot a zároveň umožňuje provádět tři hlavní způsoby měření:

- **Rotační viskozitu** pomocí geometrie kužel/deska v ustáleném smykovém modu. Metoda neslouží k hodnocení přetvárných vlastností, a proto není blíže popsána.
- **Smykové dotvarování** s geometrií deska/deska (zkoušky typu „creep“). Na materiál se aplikuje konstantní napětí a zjišťuje se jeho odezva (deformace) v čase. Zvolená napětí mohou být vysoká a mohou způsobovat nelineární reakci materiálu. Příkladem je zkouška MSCR, která je blíže popsána v kapitole 3.10. Tento mód je vhodný i k provádění zkoušky relaxace, kde je na rozdíl od zkoušek dotvarování výsledné přetvoření konstantní, ale mění se velikost napětí.
- **Oscilační měření** na geometrii deska/deska se dvěma základními typy měření:
    - Rostoucí amplituda napětí nebo přetvoření (obr. 30) – slouží k určení lineární viskoelastické oblasti LVR (oblast, kde nedochází k destrukci materiálu).



Obr. 30: Rostoucí amplituda napětí (přetvoření) [94]

- Rostoucí frekvence (obr. 31) – zkouší se při působení relativně malých přetvoření nebo napětí tak, aby byla zkouška v lineární viskoelastické oblasti. Příkladem je zkouška stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu, jež je blíže popsána v kapitole 3.9.



Obr. 31: Rostoucí frekvence [94]

Mezi důležitá pravidla práce na DSR patří přesné seřízení reometru, nastavení parametrů měření a v neposlední řadě preciznost měření teploty. Jak již bylo zmíněno, vlastnosti asfaltového pojiva jsou zásadně ovlivněny teplotou. Rozdíl teploty o 1 °C může způsobit změnu hodnoty konkrétní veličiny až o 20 % [96]. Je nutné věnovat intenzivní péči přípravě vzorku, zamezit nadměrnému zahřívání pojiva a zajistit odlití vzorku do čisté formy. Dále je podstatné eliminovat nepřesnou výšku pracovní mezery mezi horní a dolní destičkou a nedokonalé oříznutí vzorku v DSR, protože při výpočtu napětí je poloměr vzorku třetí mocninou (rovnice 22). V neposlední řadě je nezbytné znát rozsah měření přístroje (teplotu, frekvenci, napětí).

Vzorek asfaltového pojiva se vkládá mezi dvě kovové kruhové destičky. Spodní destička (stator) je ve fixní poloze a horní destička (rotor) působením točivého momentu osciluje nebo rotuje kolem své svislé osy. Horní destička je uchycena ve vzduchovém ložisku (starší přístroje používaly kuličková ložiska), které zajišťuje téměř nulové tření. Díky tomu mají přístroje DSR velkou citlivost a korektnost měření.

K temperaci teploty se využívá vodní lázeň (původní metoda preferovaná v SHRP) nebo vzduchová lázeň (v současné době nejběžnější). Ve vzduchové lázni dochází k ohřevu buď pouze spodní destičky, nebo u moderních reometrů spodní i horní destičky, což zajišťuje

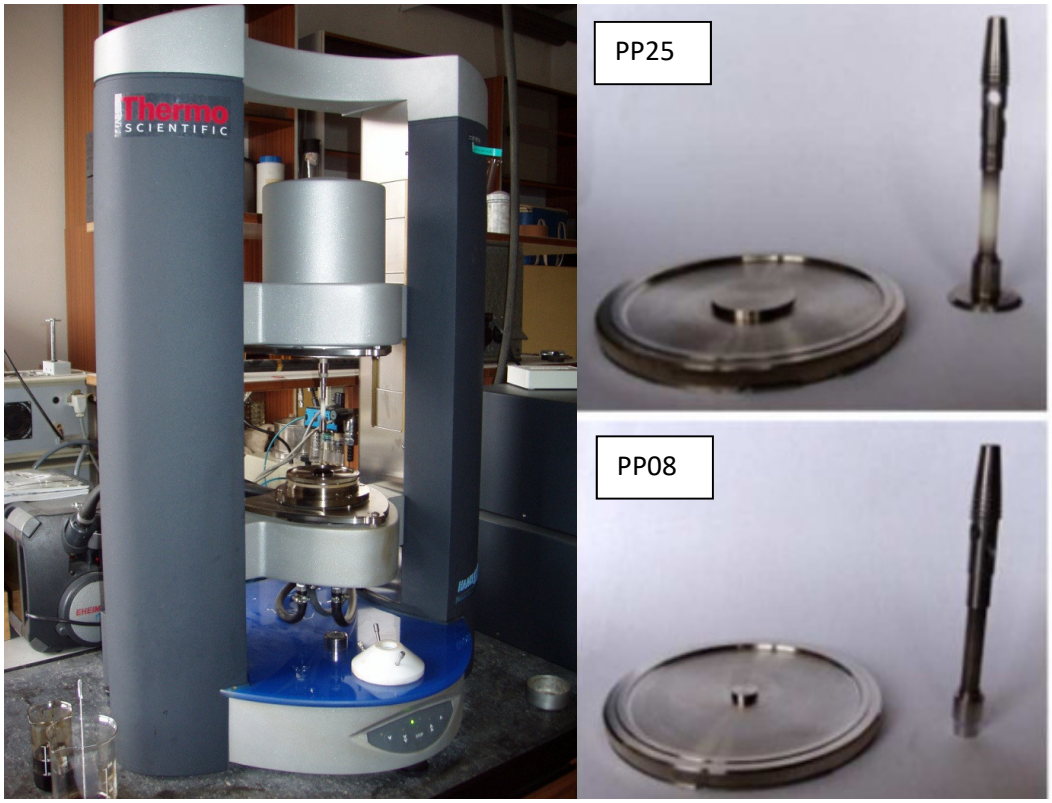
přesnější a rychlejší temperaci vzorku. Teplotu lze v závislosti na typu DSR regulovat od -100 °C do +500 °C. Při měření ve vodní lázni je teplotní interval určen vlastnostmi vody – od 0 °C do 100 °C, kde mezních teplot je téměř nemožné dosáhnout. Asfaltová pojiva se běžně zkouší v intervalu teplot 20-80 °C.

Nejčastěji se na DSR měří se třemi zkušebními geometriemi a volba geometrie je založena na provozních podmínkách:

- geometrie desek s průměrem 8 mm a tloušťkou vzorku (velikostí mezery) 2 mm (označovaná **PP08**) se obecně používá u asfaltových pojiv s vyšší tuhostí (více než 100 kPa) neboli při nízkých a středních teplotách (-5-30 °C) a u laboratorně zestárnutých vzorků;
- geometrie desek s průměrem 25 mm a tloušťkou vzorku nejčastěji 1 mm (označovaná **PP25**) se obvykle využívá při vyšších teplotách (30-90 °C);
- geometrie kužel/deska (označovaná **CP**) se uplatňuje pro měření dynamické viskozity.

Zkoušky založené na DSR mají následující výhody:

- malá velikost vzorku – na zkoušku stačí jen několik gramů pojiva;
- snadná manipulace se vzorkem;
- krátký čas provádění některých zkoušek – především díky krátké temperaci;
- automatizovaná měření.

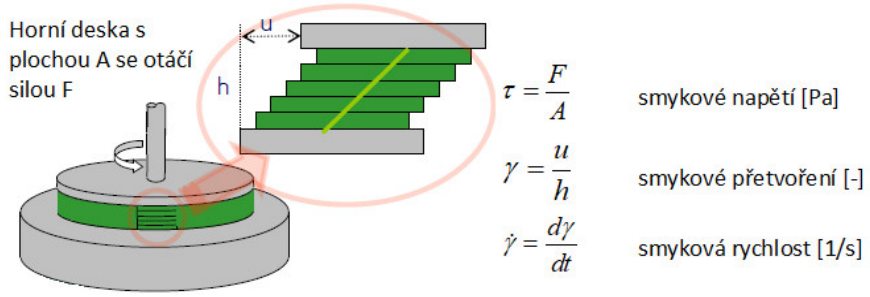


Obr. 32: Dynamický smykový reometr a základní dvě měřicí geometrie

[10, 16, 29, 94, 96, 102, 114, 118, 144, 145]

3.8.1 DYNAMICKO-MECHANICKÁ ANALÝZA MĚŘENÍ NA DSR

Základní princip měření na DSR vychází z podstaty reologie (kapitola 3.4.1.). Zde již bylo uvedeno, že smykové napětí je popsáno jako síla (F) vyvolaná motorem DSR, dělená plochou (A) měřicí geometrie (rovnice 1). Smykové přetvoření je velikost posunutí vzorku (u) dělená výškou vzorku (h) (rovnice 2) a smyková rychlost je změna deformace dělená změnou v čase (rovnice 3). Z těchto proměnných je možno měřit různé reologické vlastnosti asfaltového pojiva – smykovou viskozitu, smykový modul nebo nevratnou smykovou poddajnost. Je důležité si uvědomit, že všechny definice předpokládají dokonalý smykový profil. [94]

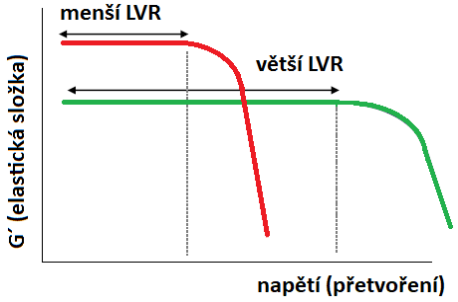


Obr. 33: Princip měření na DSR [94]

3.8.2 LINEÁRNÍ VISKOELASTICKÁ OBLAST

Lineární viskoelastická oblast (LVR-Linear Viscoelastic Region) je důležitá při měření viskoelastických charakteristik, které probíhají bez destruktivního ovlivnění materiálu. V LVR je aplikované napětí tak malé, že nepůsobí strukturální poruchu materiálu a tím je možné měřit mikrostrukturní vlastnosti materiálu. Při překročení mezního napětí se objeví nelinearita a měření již nelze korelovat s mikrostrukturními vlastnostmi.

Lineární viskoelastická oblast se stanovuje provedením oscilační zkoušky při konstantní teplotě a s rostoucím napětím nebo přetvořením. Napětí (přetvoření), při němž dochází k poklesu elastické složky komplexního smykového modulu G´, vymezuje oblast LVR (obrázek 34). Toto napětí (přetvoření) odpovídá hodnotě, kdy se G' stává závislým na vneseném napětí nebo přetvoření. Pokud se hodnota G´ nemění, jedná se o nedestruktivní zkoušku. Smluvní hodnotou je snížení G´ o 5 % z počáteční hodnoty. Charakteristika G´ se jeví jako nejvhodnější, neboť je nejcitlivější na změnu napětí (přetvoření) a popisuje míru pevnosti materiálu. Charakteristika G´´ je viskózní (tokovou) vlastností materiálu a materiál se začne pravděpodobněji roztékat, než že by došlo k jeho destrukci. Čím větší oblast LVR, tím je pojivo stabilnější. [92, 94]



Obr. 34: oblast lineární viskoelasticity [94]

3.9 STANOVENÍ KOMPLEXNÍHO SMYKOVÉHO MODULU A FÁZOVÉHO ÚHLU

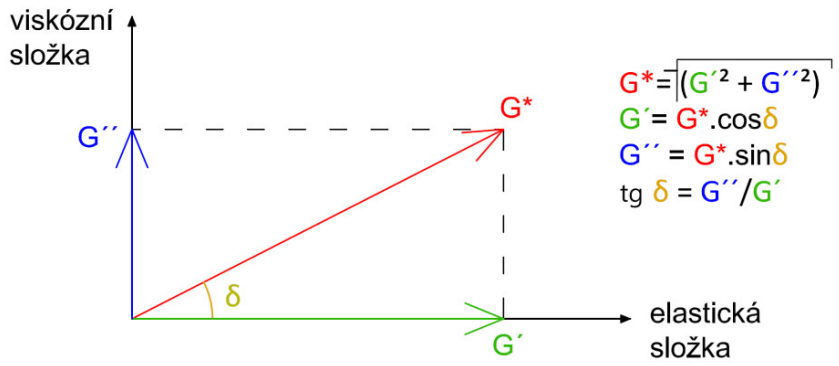
K určení komplexního smykového modulu G* a fázového úhlu δ se používá oscilační smyková zkouška s malou amplitudou. Donedávna byla oscilační zkouška nejběžnějším způsobem charakterizace reologických vlastností viskoelastických materiálů na DSR. Zkouška je nedestruktivní, protože měření probíhá v lineárně viskoelastické oblasti (LVR), kde hodnoty parametrů viskoelastického materiálu jsou nezávislé na aplikovaném namáhání nebo deformaci. Technická norma specifikující stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu je ČSN EN 14770 [123]. Pomocí měření dynamického smyku při různých frekvencích a teplotách lze zjistit i viskózní a elastické chování asfaltového pojiva, čímž se pokryje široká oblast možných podmínek, kterým je asfaltové pojivo vystaveno.

Charakteristika δ (phase angle) se označuje jako **fázový úhel** (úhel fázového posunutí) a popisuje rozdíl mezi smykovým napětím a přetvořením při harmonické oscilaci (smyku). Nazývá se rovněž ztrátový úhel a podává informaci o vztahu mezi elastickými a viskózními složkami. Fázový úhel je indikátorem pružnosti pojiva. Čím menší je fázový úhel, tím je materiál pružnější (chová se jako pevná látka) a naopak čím je δ větší, tím je víc viskózní (chová se jako tekutina).

Charakteristika G* (complex shear modulus) se označuje jako **komplexní smykový modul** a zobrazuje vztah mezi napětím a přetvořením při harmonické oscilaci. Tato veličina popisuje tuhost pojiva a odolnost proti přetvoření. Čím vyšší je hodnota G*, tím je pojivo tužší. Skládá se ze dvou složek tvořících komplexní číslo:

- **Elastická složka** G´ = G*.cos(δ) (storage modulus) označuje se jako reálná část komplexního smykového modulu a představuje ukládání potenciální energie do deformace a její vratné uvolňování. Jedná se tedy o vratnou složku.
- **Viskózní složka** G´´ = G*.sin(δ) (loss modulus) označuje se jako imaginární část komplexního smykového modulu, nazývá se též ztrátový modul a představuje nevratnou ztrátu energie disipací viskózním tokem a teplem. Jedná se tudíž o nevratnou složku.

Obě hodnoty G* i δ tvoří sdružené hodnoty, které jsou silně závislé na teplotě a frekvenci. Graficky je lze znázornit jako vektor nebo komplexní číslo s elastickou a viskózní složkou (obr. 35).



Obr. 35: Vektorový diagram složek komplexního smykového modulu a vztah mezi nimi

Vztah komplexních čísel je možné vyjádřit i formou rovnice 21:

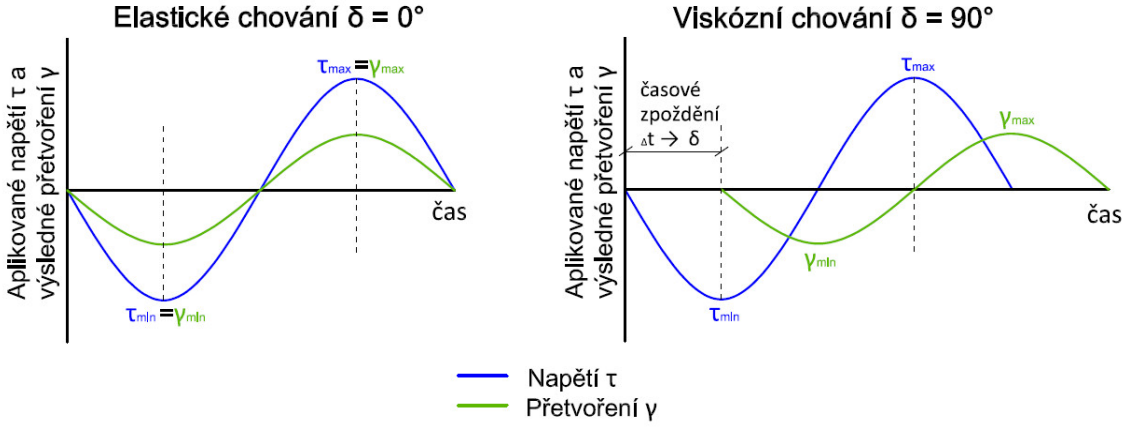
$$G^* = G' + iG'' \tag{21}$$

Z pohledu energie může být přetvoření buď rozptýleno teplem, nebo elasticky uloženo. Tyto reakce jsou zahrnuty ve fázovém úhlu jako ztrátový tangens – tg(δ), který je úměrný poměru energie rozptýlené k energii uložené za jeden cyklus.

Viskoelastická teplota přechodu T_{VET} (VET – viscoelastic transition temperature) je teplotní bod, kde se křivky G´ a G´´ kříží (G´ = G´´). V tomto bodě je fázový úhel 45° a odpovídá mu parametr G^*_{VET}. Při teplotě vyšší než T_{VET} převládá viskózní chování pojiva a pod touto teplotou elastické chování. Současně je T_{VET} považována za indikaci gelového (nebo solového) stavu [92]. Dle některých publikací souvisí s tvorbou trhlin v silničních vozovkách [145].

Jak již bylo uvedeno výše, chování viskoelastických látek je závislé na teplotě a době zatížení. V běžném teplotním intervalu mezi -30 °C a +70 °C se asfaltové pojivo chová jako viskoelastický materiál a fázový úhel se nachází v rozmezí 0° až 90° [96]. Teoreticky mohou nastat dvě extrémní možnosti chování asfaltového pojiva (obr. 36):

- Při nízkých teplotách nebo vysokých frekvencích se asfaltové pojivo chová podobně jako pevná látka. U této možnosti převládá elastická složka G´, G* je vyšší a δ se blíží 0°. Pro čistě elastický materiál vzniká maximální napětí při maximální deformaci a napětí s deformací jsou ve stejné fázi.
- Při vysokých teplotách nebo nízkých frekvencích se asfaltové pojivo chová přibližně jako viskózní kapalina. V tomto případě převládá viskózní složka G´´, komplexní smykový modul G* je malý a fázový úhel δ velký. Pro absolutní Newtonovskou kapalinu (viskózní materiál) je G* = 0 a δ = 90°. K maximálnímu napětí dochází, je-li rychlost deformace maximální a napětí s deformací jsou mimo fázi o 90° (čtvrtina cyklu).



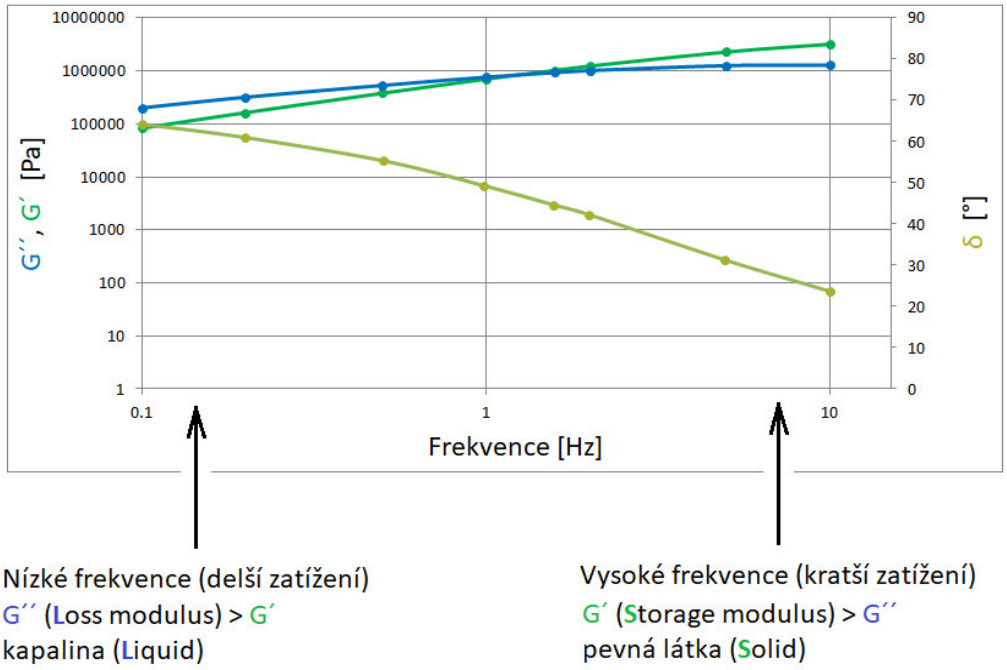
Obr. 36: Elastické a viskózní chování

Běžnou oscilační zkouškou, z které lze získat výše popsané charakteristiky je měření, prováděné při neměnném smykovém napětí (nebo neměnné deformaci). V rámci disertační práce se zkouška prováděla vždy s předem nastaveným napětím. Označuje se jako Frequency Sweep test (FS) a provádí se v intervalu vymezených frekvencí zatížení, při středních nebo vyšších teplotách (stěžejní teplotou je nejčastěji 60 °C). Před zahájením měření je nutné určit

lineárně viskoelastickou oblast asfaltového pojiva. Následně se oscilující osa zatíží definovaným napětím v LVR (respektive silou) a měří se přetvoření a zpoždění mezi zatížením a deformací (fázový posun). Většina přístrojů DSR umožňuje měřit i opačným způsobem, kdy se zvolí deformace a měří se potřebné napětí k jejímu vyvolání.

Z naměřených hodnot se vypočítá komplexní smykový modul G* a fázový úhel δ při daném napětí (deformaci) a teplotě. Zkouškou se zjišťuje chování asfaltového pojiva při různých teplotách a frekvencích, resp. délkách zatěžování simulujících různé skladby a rychlosti opakovaného dopravního zatížení. Metoda je vhodná pro pojiva nezestárlá, po krátkodobém i dlouhodobém stárnutí nebo zpětně získaná. Zkouška slouží k výpočtu nejen komplexního smykového modulu G*, fázového úhlu δ a obou složek komplexního smykového modulu G´ a G´´, ale i ke stanovení viskozity při nulovém smyku (ZSV) a ekviviskózní teploty (EVT) při malém oscilačním smyku, případně dalších parametrů, například pro určení kritických teplot.

Viskoelastické materiály vykazují časovou závislost a z tohoto důvodu nejsou G' a G" materiálové konstanty. V oscilačním testu lze časovou závislost hodnotit změnou frekvence, přičemž vysoké frekvence odpovídají krátkým časovým namáháním a naopak nízké frekvence delšímu zatížení. Při vysokých frekvencích je G' větší než G" (a fázový úhel je menší než 45°), a proto převládá chování podobné pevné látce, zatímco u nižších frekvencí je situace obrácena (G'' > G', δ > 45° a materiál se chová jako kapalina). Frekvence, při níž se G' a G" protínají (δ = 45°), je rovna 1/λ, kde λ je retardační čas. [92]



Obr. 37: Viskoelastické spektrum

V americké metodice SUPERPAVE byla zavedena měření charakteristik G* a δ při různých teplotách a frekvenci 1,59 Hz (10 rad/s), která přibližně odpovídá době zatížení 0,6 s. K získání přesnější představy o chování materiálu je výhodné provádět měření při více frekvencích, k čemuž se využívá zkouška FS. Nejčastěji volenou teplotou je 60 °C, jež by měla reflektovat teplotu vozovky v letních měsících. Viskózní vlastnosti asfaltových pojiv se projevují nejvíce při vyšších teplotách a způsobují primárně vyjíždění kolejí.

Viskózní složka tuhosti G´´ neboli G*.sin(δ), byla původně přijata jako specifikační parametr pro tvorbu trvalých deformací [37]. Korelace viskózní složky tuhosti s údaji o směsi ukázaly, že neposkytuje dostatečnou váhu pružné části odezvy a následně byla jako specifikační kritérium přijata ztrátová složka dotvarování 1/J" neboli G*/sin(δ). U ztrátové složky dotvarování se předpokládá, že trvalá deformace je řízena tuhostí a elasticitou asfaltového pojiva. Zatímco tuhost je zobrazena komplexním modulem, fázový úhel představuje elasticitu.

Pro vyšší odolnost vůči tvorbě trvalých deformací asfaltové směsi, by se pojivo nemělo příliš deformovat a mělo by být schopno se vrátit do původního tvaru po zatížení. Poměr G*/sin(δ) by proto měl být co možná největší. Čím vyšší je hodnota G*, tím je asfaltové pojivo tužší a čím nižší je hodnota δ, tím víc převládá elastická část komplexního smykového modulu. Kvůli tomu se doporučuje použít asfaltové pojivo s vysokou elastickou složkou komplexního smykového modulu a zároveň s nízkým fázovým úhlem.

Minimální požadovaná hodnota G*/sin(δ) pro asfaltová pojiva byla v rámci programu SHRP stanovena hodnotou 1,0 kPa pro nezestárlá asfaltová pojiva, respektive 2,0 kPa pro pojiva po krátkodobém stárnutí metodou RTFOT (v současnosti je minimální hodnota po RTFOT 2,2 kPa). Parametr G*/sin(δ) by měl předvídat odolnost asfaltových směsí vůči trvalým deformacím a v USA souběžně slouží jako klasifikační parametr pro horní oblast užitných teplot, při kterých jsou trvalé deformace nejčastější.

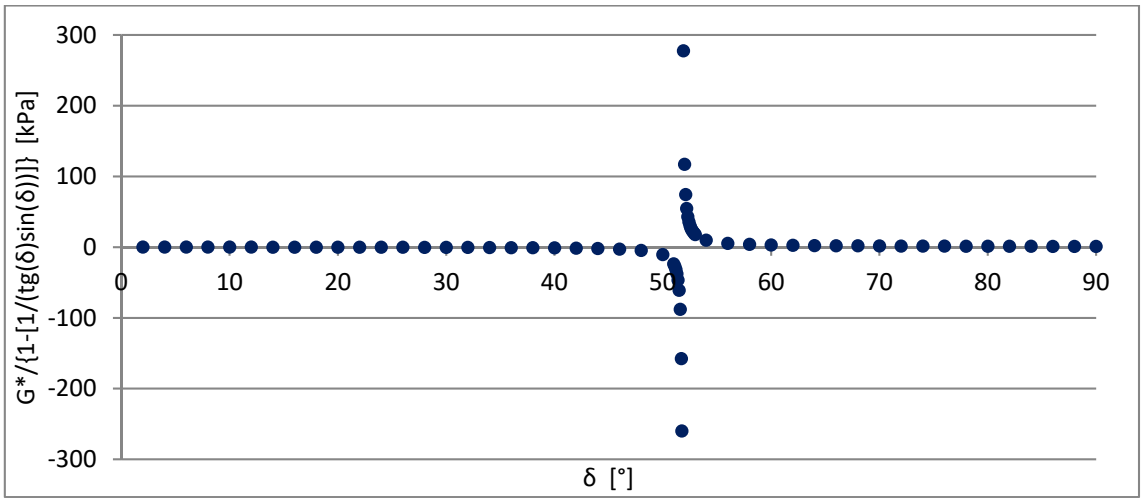
Od používání deformačního kritéria G*/sin(δ) se postupně ustupuje, neboť se ukázalo [16, 17, 31], že funguje spolehlivě pro běžné rychlosti a středně těžké intenzity dopravy, ale pro pozemní komunikace s pomalými rychlostmi a vysokými dopravními objemy vzniku trvalých deformací neodpovídá. Tato charakteristika je obzvlášť nedostatečná při predikci deformačních účinků u asfaltových směsí s modifikovanými pojivy [16-19, 146]. Oscilační zkouška vystihuje celkovou rozptýlenou energii v průběhu zatěžovacího cyklu, ale není schopna oddělit trvalou deformaci a zpožděnou elasticitu. Chování skutečných pojiv je složitější než je možné modelovat pomocí Maxwellova modelu, z něhož parametr G*/sin(δ) vychází.

Při hodnotách fázového úhlu vyšších než 60° není parametr G*/sin(δ) zásadně citlivý na hodnotě sin(δ). Fázové úhly modifikovaných asfaltových pojiv jsou výjimečně menší než 70° (v tomto případě je sin(δ) = 0,94), a proto hodnota sin(δ) jen slabě demonstruje účinek modifikace vztažené k elasticitě, která by měla být hlavním účelem této charakteristiky. Důvodem je skutečnost, že oscilační zkouška měřená za podmínek krátkodobého zatížení (1,59 Hz) neposkytuje informaci o zpožděném elastickém přetvoření, jež modifikovaná pojiva obecně mají [147].

Podle autorů Soenen a kol. [148] se zlepší korelace mezi tímto parametrem a zkouškou pojíždění kolem u modifikovaných pojiv v případě, že se výrazně sníží frekvence zatěžování. Některé studie zjistily [217, 218], že parametr G*/sin(δ) nekoreluje dobře s vyjetými kolejemi měřenými přímo na pojížděných vozovkách. V návaznosti na shledané nedostatky kritéria G*/sin(δ) byl navržen upravený parametr G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]}.

Tento parametr by měl lépe korespondovat s akumulací nevratné deformace (zejména u modifikovaných pojiv), protože je citlivější na změny fázového úhlu. Problém však nastává při hodnotách fázového úhlu nižších než 51,8°, kdy výsledné hodnoty parametru jsou záporné. S rezervou je nutné brát i hodnoty vypočítané s fázovým úhlem od 51,8° do přibližně 53°, kdy

vychází parametr s extrémně vysokými hodnotami. Na obrázku 38 je zobrazen vývoj výsledných hodnot upraveného parametru s jednotkovým komplexním smykovým modulem v závislosti na velikosti fázového úhlu. S nástupem používání zkoušky MSCR se již ani tento modifikovaný parametr příliš neuplatňuje.



Obr. 38: Vztah fázového úhlu a hodnoty upraveného parametru

Únavové chování se nejčastěji posuzuje parametrem G*.sin(δ) (respektive velikostí ztrátového modulu G´´), měřeným při středních teplotách. Pokud chceme omezit vznik únavových trhlin, je třeba použít asfaltové pojivo s nízkou viskózní složkou komplexního smykového modulu. Hodnota G*·sin(δ) by tedy měla být co nejmenší. Stárnutím materiálu dochází ke zvyšování tuhosti a zároveň k nárůstu hodnoty ztrátového modulu, proto se parametr únavové odolnosti určuje pro asfaltová pojiva po dlouhodobém stárnutí metodou RTFOT+PAV. Původní maximální hodnota stanovená programem SHRP byla 3 MPa, v současnosti je limitní hodnota navýšena na 5 MPa.

Při praktickém užívání těchto parametrů se zjistilo, že korelace se skutečným stavem asfaltových vozovek jsou poměrně nízké. Obě hlavní charakteristiky (G*·sin(δ) i G*/sin(δ)) se v současné době uplatňují především jako klasifikační nástroj v PG systému. Z tohoto důvodu je snahou nalézt charakteristiky, které by lépe předvídaly vznik jednotlivých poruch.

[3, 6, 10, 37, 92, 96, 98, 100, 102, 118, 123, 149]

3.9.1 PRINCIP OSCILAČNÍHO MĚŘENÍ

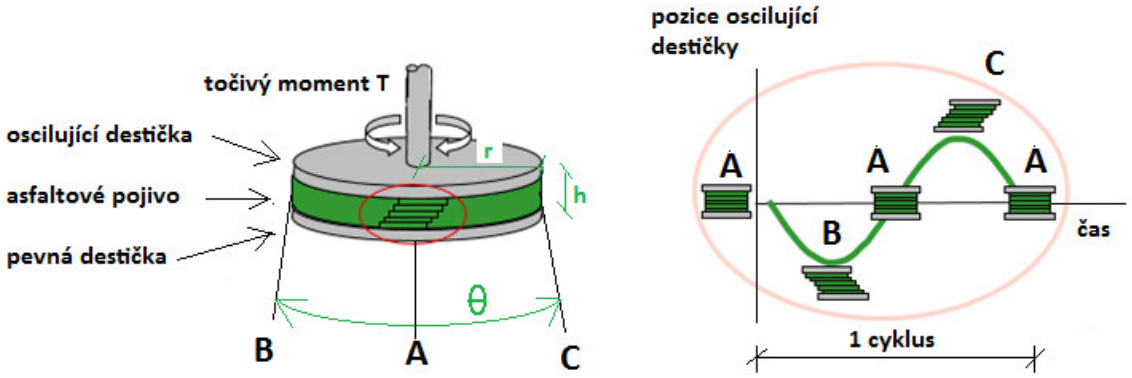
U oscilační zkoušky se geometrie DSR neotáčí pouze v jednom směru kolem své osy, ale osciluje a tím dochází k sinusovému smykovému přetvoření. Oscilační pohyb úzce souvisí s kruhovým pohybem, a proto lze oscilační cyklus považovat za ekvivalentní 360° [92]. Amplituda kmitání je rovna maximálnímu aplikovanému napětí nebo deformaci a frekvence představuje počet kmitů za sekundu.

Sinusové zatížení do značné míry simuluje zatížení, kterému je vystavena vozovka při pojíždění dopravními prostředky. Volbou frekvence je možno modelovat rychlá nebo pomalu jedoucí vozidla. Díky měření a výzkumu bylo zjištěno, že rychlost vozidel 60-80 km/h odpovídá sinusové frekvenci 6-8 Hz [96]. V programu SHRP byla stanovena jako směrná frekvence

10 rad/s ≅ 1,59 Hz odpovídající malým rychlostem, jež jsou z hlediska odolnosti asfaltových vrstev proti trvalým deformacím stěžejní. Pomalu jedoucí těžká doprava vyžaduje výrazně vyšší nároky na odolnost asfaltových vrstev proti trvalým deformacím i únavě.

V průběhu oscilační zkoušky zůstává spodní destička ve fixní poloze, naopak horní destička působením točivého momentu osciluje (obr. 39). Před zahájením zkoušky zůstává horní destička v pozici A. Při vnesení zatížení se horní destička posouvá do pozice B a pak zpět přes pozici A do bodu C a následně zpět do bodu A. Tento proces se nazývá jedním oscilačním cyklem s úhlem posunu θ. Celková rychlost nebo čas pro jednu úplnou oscilaci je určen zkušební frekvencí v cyklech za sekundu (Hz) nebo v radiánech za sekundu (rad/s). Při zkoušce s předem zvoleným napětím se na horní destičku aplikuje oscilační točivý moment T a měří se výsledný úhlový posun θ, ze kterého se kvantifikuje časově závislé smykové přetvoření $\gamma_{(t)}$ (rovnice 25).

Naopak při zkoušce s řízeným přetvořením se definuje úhlové posunutí a měří se točivý moment potřebný k dosažení tohoto posunu, z něhož lze vypočítat časově závislé smykové napětí $\tau_{(t)}$ (rovnice 24). Současně je možné zjistit časové zpoždění Δt mezi smykovým přetvořením a smykovým napětím (obr. 40), na jehož základě se vypočítá fázový úhel (rovnice 26). Výchozími veličinami pro stanovení komplexního smykového modulu G* jsou maximální smykové přetvoření γ_{max} (rovnice 23) a maximální smykové napětí τ_{max} (rovnice 22).



Obr. 39: Oscilační princip namáhání vzorku na DSR [92]

$$\tau_{max} = \frac{2T}{\pi r^3} \tag{22}$$

$$\gamma_{\max} = \frac{\theta r}{h} \tag{23}$$

Kde τ_{max}…amplituda smykového napětí [Pa]
γ_{max}…amplituda smykového přetvoření [-]
θ…maximální úhlový posun (pootočení) [rad]
T…točivý moment [Nm]
r…poloměr měřicí geometrie [m]
h…velikost mezery (výška zkušebního vzorku) [m]

Základní rovnice popisující viskoelastický materiál (asfaltové pojivo) v DSR jsou uvedeny níže. V případě, že je na vzorek aplikováno oscilační smykové napětí τ, jeho časově závislá rovnice je:

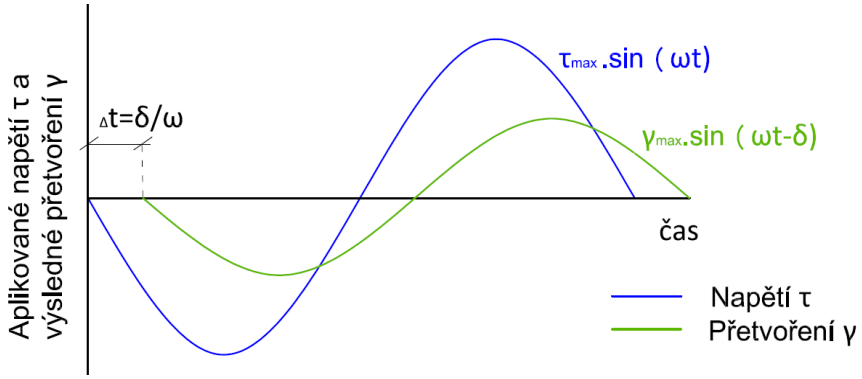
$$\tau_{(t)} = \tau_{max}.sin(\omega t) \tag{24}$$

Kde $\tau_{(t)}$...časově závislé smykové napětí [Pa]
τ_{max}...amplituda smykového napětí [Pa]
ω...úhlová frekvence [rad/s]
t...čas [s]

Při krátkém zatížení se napětí mění sinusově při frekvenci ω. Je-li viskoelastické chování lineární, přetvoření se rovněž střídá sinusově, ale je mimo fázi napětí. Časovou závislost přetvoření $\gamma_{(t)}$ lze proto zapsat jako:

$$\gamma_{(t)} = \gamma_{max}.sin(\omega t - \delta) \tag{25}$$

Kde $\gamma_{(t)}$...časově závislé smykové přetvoření
γ_{max}...amplituda smykového přetvoření [-]
ω...úhlová frekvence [rad/s]
t...čas [s]
δ...fázový úhel [rad]



Obr. 40: Sinusové napětí a přetvoření

Fázový úhel δ je závislý na časovém zpoždění Δt a je možné ho vypočítat z rovnice 26.

$$\delta = \frac{2\pi.\Delta t}{t} \tag{26}$$

Kde δ...fázový úhel [rad]
Δt...časové zpoždění mezi napětím a přetvořením [s]
t...čas [s]

Poměrem τ_{max} a γ_{max} se získá materiálová charakteristika komplexní smykový modul G*. Matematicky se G* vypočítá z rovnice 27 (dosazením rovnic 22 a 23).

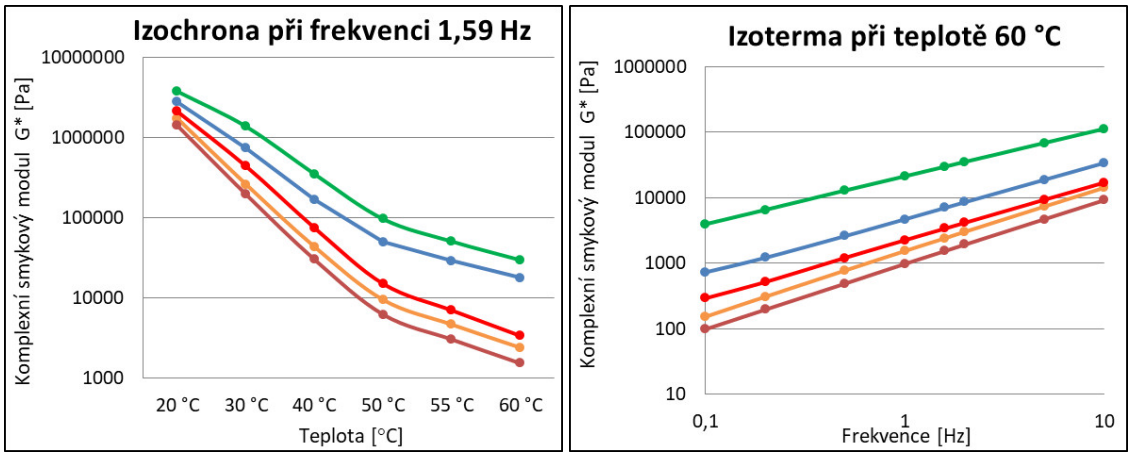
$$G^* = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}} = \frac{2Th}{\theta\pi r^4} \quad (27)$$

Kde G*…komplexní smykový modul [Pa]
τ_{max}…amplituda smykového napětí [Pa]
γ_{max}…amplituda smykového přetvoření [-]
θ…maximální úhlový posun (pootočení) [rad]
T…točivý moment [Nm]
r…poloměr měřicí geometrie [m]
h…velikost mezery (výška zkušebního vzorku) [m]

[30, 66, 85, 92, 96]

3.9.2 GRAFICKÁ INTERPRETACE VÝSLEDKŮ OSCILAČNÍ ZKOUŠKY

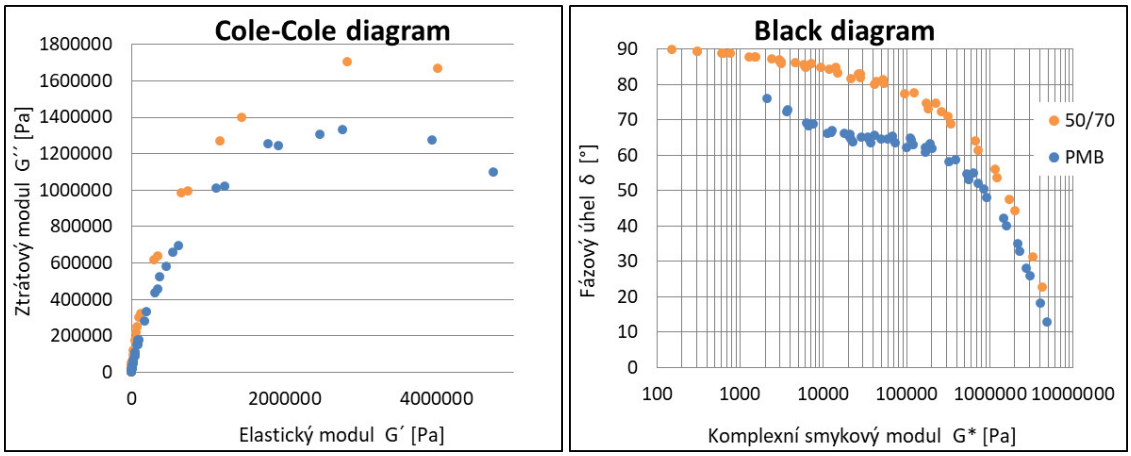
Vedle tabelárních hodnot je možné zobrazit výsledky graficky. Jedním z nejčastějších způsobů zobrazení výsledků oscilační zkoušky je použití **izochron** a **izoterm** komplexního smykového modulu G* nebo fázového úhlu δ. Izochrony popisují teplotní závislost při konstantní frekvenci a naopak izotermy znázorňují frekvenční závislost za konstantní teploty (obr. 41). Další možností je zobrazení izochron jednotlivých složek komplexního smykového modulu. Jejich průsečík určuje teplotu, kdy je fázový úhel δ = 45°. Tato teplota rozděluje teplotní interval s převládajícím elastickým chováním od intervalu s viskózním chováním. Přesto se nejedná o mezní charakteristiku asfaltového pojiva.



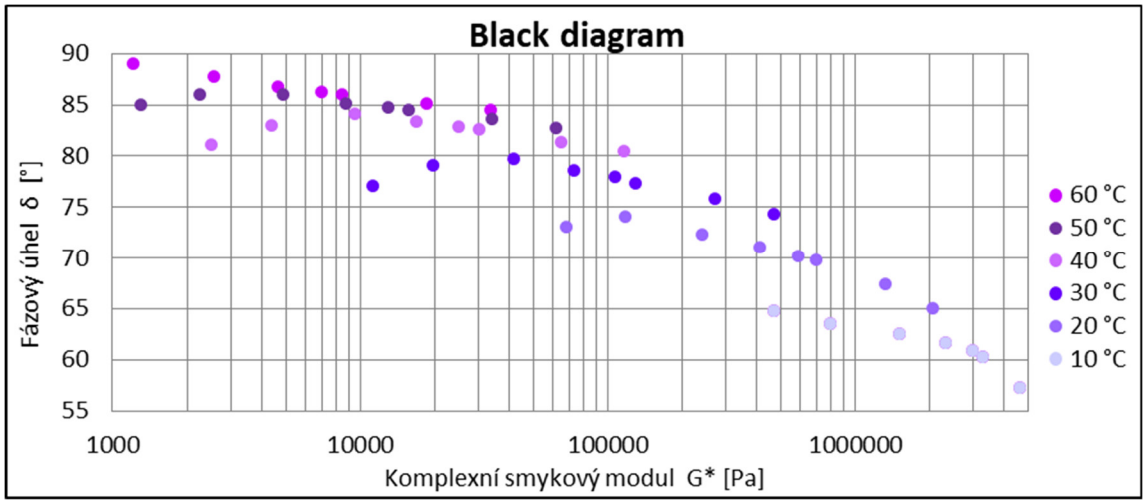
Obr. 41: Ukázka zobrazení výsledků oscilační zkoušky pomocí izochron a izoterm

Další způsob analýzy výsledků oscilační zkoušky bez manipulací s údaji je vykreslení závislosti viskózní a elastické složky komplexního smykového modulu v lineárním nebo dvojitém logaritmickém měřítku – tzv. **Cole-Cole diagram** (obr. 42) [150]. Vykreslením G´ a G´´ proti sobě v lineární stupnici se zdůrazní nízkoteplotní reologické chování. Cole-Cole diagram není příliš vhodný pro znázornění výsledků při vyšších teplotách a dlouhodobém zatížení [10].

Z tohoto důvodu se preferuje zobrazení fázového úhlu δ, versus komplexní smykový modul G* v semilogaritmickém měřítku. V literatuře se tento graf nejčastěji nazývá graf **van Gurp-Palmen** (vGP) [151, 152]. V oboru asfaltových vozovek se označuje jako **Black diagram** (obr. 42) [153]. V případě, že jsou vynesené křivky hladké, jedná se o termoreologicky jednoduché látky. Termoreologicky jednoduché látky jsou látky bez přeměny strukturálního charakteru v rámci změny teplotního rozsahu [155]. Příkladem jsou silniční asfalty s asymptotickým průběhem fázového úhlu přibližující se hodnotě 90°. Fázový úhel plynule roste s klesajícím komplexním smykovým modulem a tím se snižuje pružná odezva pojiva. Křivka Black diagramu polymerem modifikovaných pojiv je typická zvlněním, jež znamená, že je pojivo v určitém rozsahu výrazněji závislé na teplotách zatížení. PMB pojiva se stále řadí mezi termoreologicky jednoduché látky. Naopak příklad látky, která není termoreologicky jednoduchá, je zobrazen na obr. 43. Z Black diagramu je navíc možné zjistit modul skelného přechodu (sklovatění) G_g s použitím extrapolace komplexního smykového modulu pro δ = 0° [10].



Obr. 42: Ukázka zobrazení výsledků pomocí Cole-Cole diagramu a Black diagramu

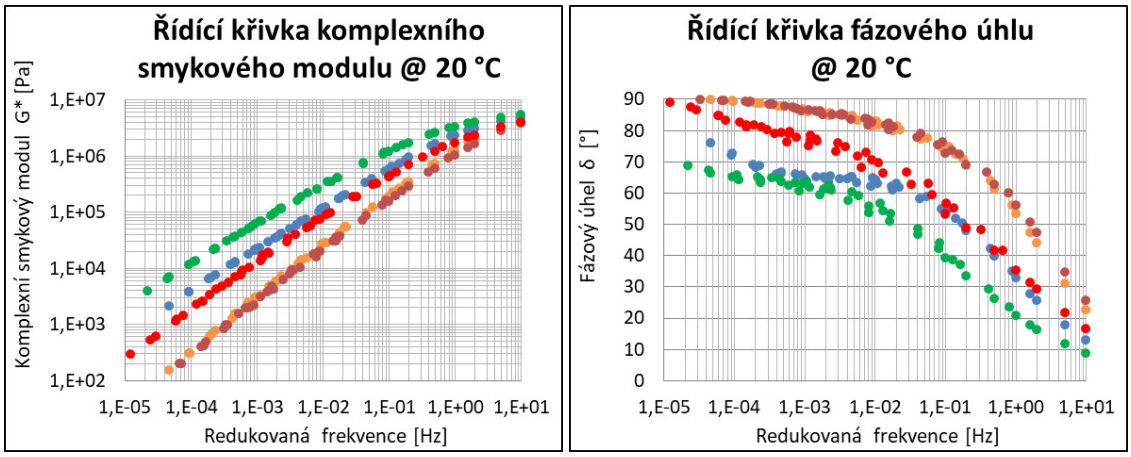


Obr. 43: Black diagram látky, která není termoreologicky jednoduchá

Za sofistikovanou možnost interpretace výsledků se považuje sestavení **řídících křivek** (MC – master curves neboli komplexní, hlavní či kmenové křivky) (obr. 44) zobrazující

komplexní smykový modul nebo fázový úhel v závislosti na redukované frekvenci. Praktickou výhodou řídících křivek je získání dynamických vlastností materiálů při frekvencích, jež jsou příliš nízké nebo vysoké na to, aby se získaly experimentálně, tzv. zobrazují i frekvence mimo funkční rozsah přístroje DSR. Kvůli omezení rozsahu DSR není možné charakterizovat izotermou reologické vlastnosti asfaltového pojiva simulující např. vysoké zatížení a vysoké teploty, jež jsou stěžejní pro tvorbu trvalých deformací. Proto se užívají řídící křivky, které prostřednictvím principu superpozice času a teploty (time-temperature superposition – TTS [154]) transformují naměřená data v jedinou komplexní křivku pro konkrétní zvolenou teplotu.

Jak již bylo popsáno dříve, chování asfaltového pojiva je závislé na teplotě i času zatížení a obě charakteristiky jsou vnitřně propojeny (viz obr. 22). V případě, že obě proměnné jsou v rozsahu, kde se asfaltové pojivo chová lineárně viskoelasticky a zároveň je pojivo termoreologicky jednoduché, lze efekt času nebo frekvence a teploty vystihnout parametry časově-teplotní superpozice. Zjednodušeně lze říci, že řídící křivky popisují závislost viskoelastického chování na teplotě a jsou užitečným nástrojem pro předpovídání chování asfaltových pojiv, protože interpretují rozdílné typy dopravního zatížení (pomalu jedoucí nebo zastavující těžkou dopravu i rychle jedoucí dopravu s většími intenzitami).



Obr. 44: Ukázka zobrazení výsledků pomocí řídící křivky

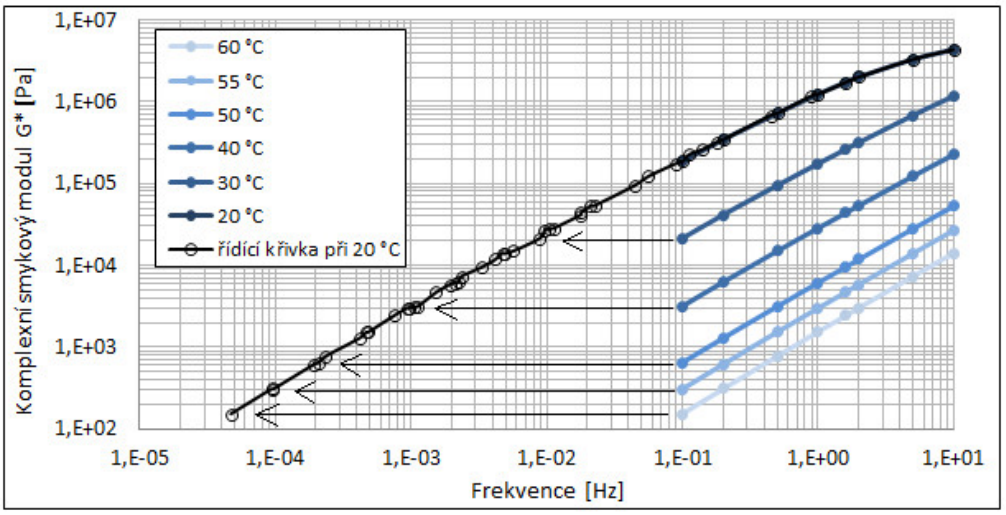
Při vytvoření hlavních křivek se izotermické křivky modulů nebo fázových úhlů zkoušené při různých teplotách, přetransformují za pomoci multiplikátoru a_T (faktoru posunutí) na ose s frekvencí (nebo časem). Faktor posunutí reprezentuje posuvnou vzdálenost podél vodorovné osy. Teplotní závislost posuvných faktorů je možné interpretovat různými modely. Jedna z klasických posuvných funkcí, obvykle používaných pro posun reologických dat, je rovnice autorů Williamse, Landela a Ferryho neboli WLF rovnice [156]. Tato rovnice se běžně využívá a je obecně považována za empirický vztah.

V důsledku často problematického posunu při nižších teplotách byla navržena mírná modifikace, provedená přidáním absolutní hodnoty teplotního rozdílu ve jmenovateli – Kaelbleova modifikace WLF rovnice [157] (rovnice 28), která se uplatňuje i v této práci. Výchozí teplota, u níž nedochází k posunu naměřených hodnot, se jmenuje referenční teplota s faktorem posunutí $a_T = 1$. Toto je pouze jednoduché vysvětlení základních principů sestavení řídících křivek, detailnější postup je komplikovanější. Ukázkový příklad konstrukce hlavní křivky je uveden na obrázku 45.

$$\log a_T = -\frac{c_1(T-T_d)}{c_2+|T-T_d|} \quad (28)$$

Kde a_T...horizontální faktor posunu, který je funkcí teploty T
c_1, c_2…WLF konstanta [-]
T…proměnná teplota [°C]
T_d…referenční teplota [°C]

Tímto postupem se propojují singulární izotermy komplexních smykových modulů (fázových úhlů) a vzniká hladká řídící křivka. Pomocí sklonu křivky lze odvodit teplotní citlivost asfaltového pojiva. U řídících křivek všeobecně platí, že čím je větší G* (křivka je v grafu výš), tím se z hlediska přetvárných vlastností asfaltové pojivo chová lépe a čím je křivka plošší, tím je vzorek méně citlivý na změny teplot. Nejvyšší frekvence odpovídají nejnižším teplotám zkoušení (krátkým dobám zatížení) a naopak malé frekvence odpovídají vysokým teplotám.



Obr. 45: Ukázka konstrukce řídící křivky

[6, 10, 30, 66, 85, 96, 158, 159]

3.9.3 MODELY PREDIKUJÍCÍ TUHOST ASFALTOVÝCH SMĚSÍ S VYUŽITÍM TUHOSTI POJIV

V minulosti bylo provedeno několik pokusů vyvinout regresní rovnice pro předpovědi komplexního modulu asfaltové směsi z vlastností použitého pojiva nebo samotné směsi. Tato podkapitola se zaměřuje pouze na modely využívající tuhost asfaltového pojiva.

Tuhost asfaltových směsí závisí na objemových vlastnostech směsi i na vlastnostech jednotlivých složek asfaltové směsi. Patří sem orientace a disperze kameniva ve skeletu směsi nebo mezerovitost směsi. Tyto vlastnosti zásadně ovlivňuje způsob zhutňování a teplota pokládky. Důležitým faktorem je rovněž samotná tuhost asfaltového pojiva. Vliv na tuhost asfaltové směsi má i vlastní míchací proces, teplota a čas míchání nebo souhrnný obsah vlhkosti. Odhad tuhosti směsí za daných okolností není snadný a přesnost regresních modelů bude vždy omezena. Z důvodu podstatných odchylek u prognóz tuhosti asfaltových směsí při vysokých teplotách se v případě potřeby přesných hodnot doporučuje měřit tuhost přímo.

Průměrná chyba z modelů predikujících tuhost se blíží 40 %, zatímco chyba laboratorního měření tuhosti je obvykle nižší než 20 % [149].

Jeden z prvních pokusů vyvinout regresní rovnice pro předvídání tuhosti asfaltové směsi pomocí tuhosti asfaltového pojiva, byla rovnice vyvinutá Heukelomem a Klompem v roce 1962 [160]. Jejich práce byla rozšířena v roce 1977 Bonnaurem et al. [161], kteří navrhli rovnice pro odhad komplexní tuhosti směsi (S_m) z tuhosti pojiva (S_b) získané z nomogramu Van der Poela [81]. Model byl kalibrován tak, aby předpovídal modul pružnosti směsi při nízkých a středních teplotách v rozmezí -15 až 30 °C.

Nejčastěji používaným modelem současnosti je **Witczakův model** [162], který byl několikrát revidován. Podstatný posun nastal v roce 1999, kdy byl zahrnut efekt modifikovaných pojiv. Následná zásadní revize přišla v roce 2006, při níž byla v modelu nahrazena viskozita asfaltového pojiva za smykovou tuhost asfaltového pojiva G* [163]. Další model využívající G* je **Hirschův model** [164]. Poprvé byl představen v roce 1969 pro modelování mechanického chování cementobetonu, pro predikci tuhosti asfaltových směsí začal sloužit až v roce 2003. Na základě Hirschova modelu Al-Khateeb a kol. představili v roce 2006 zjednodušený model (**Al-Khateeb model**) [165]. Rovnice těchto modelů jsou uvedeny v příloze A.

[149]

3.10 ZKOUŠKA MSCR

V současnosti se za nejvhodnější zkoušku pro posuzování odolnosti asfaltových pojiv proti trvalým deformacím označuje destruktivní zkouška Multiple Stress Creep and Recovery test (MSCR). Volně přeloženo do češtiny to je zkouška opakovaného zatěžování a odlehčení. Jedná se o poměrně novou funkční zkoušku představenou v USA po roce 2005, vyvinutou z důvodu nízké predikční schopnosti SHRP parametru G*/sin(δ). Zkouška se provádí měřením smykového dotvarování v oblasti pomalého toku (creep) při vyšších provozních teplotách a je vhodná zejména pro modifikovaná asfaltová pojiva. Metoda MSCR je jednou z nejčastěji měřených zkoušek na DSR, protože je poměrně jednoduchá a ve srovnání s mnoha jinými reologickými testy časově méně náročná. Zkouška je popsána v normě ČSN EN 16659 – Asfalty a asfaltová pojiva - Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) [166] platné v České republice od října 2016.

Zkouška MSCR je modifikací zkoušky Repeated Creep Recovery (RCR), jenž byla uvedena v roce 2001 Bahiem a kol. [16, 124]. Jednalo se o zcela novou zkušební metodu skládající se z opakujících cyklů zatížení a relaxace při stálém napětí. Délka fáze zatížení byla navržena na 1 sekundu a délka zotavení 9 sekund s doporučením realizovat 50 až 100 cyklů. Původní testovací postup RCR se prováděl při jedné úrovni napětí zvolené v lineárně viskoelastické oblasti (LVR) testovaných pojiv. K určení závislosti napětí asfaltového pojiva se metoda RCR později upravila pomocí jedenácti zvyšujících se úrovní napětí od 25 Pa do 25,6 kPa [27] a zkouška RCR se stala časově náročnou. Prokázalo se, že k ustálení výsledků deformace dochází u běžně modifikovaných pojiv výrazně dříve než po 50 cyklech [167]. Z důvodu snížení počtu vzorků a opakování nezbytných u každé hladiny napětí byl vyvinut test MSCR.

Podstatou metody MSCR je vícenásobné zatížení a relaxace vzorku, na základě kterého se stanoví procentuální hodnota **elastického zotavení (%R)** a **nevratná smyková poddajnost (J_{nr})** asfaltového pojiva v rámci předepsané úrovně napětí (0,1 kPa a 3,2 kPa). Jedná se o dva nejdůležitější parametry asfaltového pojiva vypočítané z naměřeného přetvoření při jednotlivých úrovních napětí:

- Charakteristika J_{nr} znázorňuje množství disipace energie viskózním tokem po několikanásobném zatížení a odtížení, vztaženou k množství vneseného napětí a je indikátorem citlivosti asfaltových pojiv k tvorbě trvalých deformací při opakovaném zatížení.
- Charakteristika %R vystihuje, do jaké míry se materiál poměrově vrací po zatížení do primárního stavu. Souvisí se zpožděnou pružností, tj. elastickou odezvou v pojivech a snadno rozlišuje polymerem modifikované asfalty od nemodifikovaných asfaltových pojiv.

Hodnota J_{nr} je v současné době v posouzení náchylnosti asfaltového pojiva odolávat trvalým deformacím vnímána jako nejvýstižnější reologický parametr. Nevratná smyková poddajnost závisí na mechanické historii zkoušky (délce intervalu zatížení a odlehčení, počtu zatěžovacích cyklů, velikosti smykového napětí a samozřejmě i na teplotě). Parametr J_{nr} je schopný rozlišit výkonnost asfaltových pojiv i v případě, že mají stejné hodnoty penetrace, bodu měknutí nebo parametru $G^*/\sin(\delta)$. Čím nižší je hodnota J_{nr}, tím je pojivo schopno absorbovat větší podíl napětí a má menší sklon k tvorbě plastických deformací. Redukce hodnoty J_{nr} na polovinu se projeví snížením hloubky vyjetých kolejí na vozovce zhruba o polovinu – zjišťováno jak zkouškami na asfaltových směsích v laboratoři (pojíždění kolem), tak měřeními in-situ (metoda ALF) [7, 168, 169].

Parametr %R slouží k nahrazení zkoušky vratné duktility (ČSN EN 13398 – Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů [170]), která rozpoznává přítomnost modifikátorů, ale neměří účinnost pojiva. Několik studií naznačilo, že existuje i poměrně dobrá korelace mezi %R a odolností proti únavě, ale na vztah mezi %R a odolností proti tvorbě trvalých deformací není jednotný pohled [29, 202]. Zkouška MSCR není časově náročná a k jejímu provedení postačuje výrazně méně materiálu než pro zkoušku vratné duktility.

Mimo zmíněných charakteristik lze vypočítat parametry citlivosti $J_{nr,diff}$ a R_{diff} porovnávající velikost J_{nr} (%R) mezi napětím 0,1 a 3,2 kPa. V Koseho práci [171] se uvádí, že určení úrovně napětí zkoušky není jednoduché a nelze jednoznačně zvolit jediné nejvhodnější napětí, jemuž je ve skutečné směsi pojivo vystaveno. Z tohoto důvodu byl navržen parametr citlivosti $J_{nr,diff}$. Parametr $J_{nr,diff}$ je důležitý zejména u vozovek, kde dochází k neočekávanému dopravnímu zatížení nebo jsou vystaveny extrémně vysokým teplotám.

Pokud je hodnota $J_{nr,diff}$ vyšší než 75 % (platné pro USA) je asfaltové pojivo klasifikováno jako velmi citlivý materiál na změnu napětí a nedoporučuje se použít při výstavbě pozemních komunikací [141]. Navíc tento parametr popisuje, jak dobře je pojivo modifikované. Čím kvalitnější je interakce polymeru s asfaltovým pojivem, tím nižší je parametr citlivosti. Nedostatečně smíchané polymery nesplňují toto kritérium, protože polymer v asfaltovém pojivu nepůsobí správně a poukazuje to na nutnost dodatečného míchání [7]. Jedná se tedy

i o parametr indikující, zda modifikace funguje korektně. Je to ale velmi diskutabilní parametr a jeho věrohodnost je často kritizována [172, 173] (více v kapitole 4.2.5).

Jednou z nejasností ohledně parametru citlivosti je, proč byla stanovena maximální hranice právě 75 %. V literatuře je možné najít korelace parametru J_{nr} s tvorbou trvalých deformací, ale pro parametr citlivosti, jenž je v současné době definován pomocí $J_{nr,diff}$, nejsou korelace určeny. Dalším problémem je mezilaboratorní shoda ve výsledcích, která je velmi nízká, ačkoli jednotlivé vstupní hodnoty mají uspokojivou reprodukovatelnost výsledků. V roce 2017 byl proto navržen nový parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ [172].

Navíc je možné u zkoušky MSCR změřit čas, kdy poklesne přetvoření na 50 % své maximální hodnoty. Jedná se o obdobu zkoušky relaxace prováděné u asfaltových směsí. Zkouška však slouží ke zjištění nízkoteplotních vlastností, a tudíž není v disertační práci blíže popsána.

Jedním z předpokladů zkoušky MSCR je, že napětí 0,1 kPa se nachází v lineární viskoelastické oblasti (LVR) a naopak napětí 3,2 kPa je v nelineární oblasti. Nežádoucí chování asfaltových pojiv vedoucí ke vzniku trvalých deformací je propojeno s nelineární viskoelastickou oblastí. Některé původní dynamické smykové reometry nebyly uzpůsobeny pro vyvolání vysokých napětí, a kvůli tomu byla jako nejvyšší možná hodnota napětí zvolena 3,2 kPa. Z řady výzkumů ale vyplývá, že za účelem chování pojiva v nelineární oblasti je nezbytné v závislosti na typu pojiva aplikovat vyšší napětí než 3,2 kPa [23, 174, 175].

Současná vysoce modifikovaná asfaltová pojiva mají oblast LVR až při vyšších hodnotách napětí [176]. Navíc podle určitých příspěvků [33, 174, 175] dochází u zkoušky MSCR s vyšším vneseným napětím ke zlepšení korelačního koeficientu se zkouškou odolnosti proti trvalým deformacím u směsí (French rutting test). Podle Mohseniho článku [180] je skutečné přetvoření pojiva v asfaltové směsi podstatně menší než v DSR, protože pohyby asfaltových částic jsou výrazně omezeny díky struktuře kameniva. Naopak podle práce Golalipoura [29] jsou napětí vyvolaná pohybující se dopravou v asfaltové směsi mnohem vyšší než napětí používaná při zkoušce MSCR.

Zkouška MSCR se provádí zpravidla na vzorcích krátkodobě zestárnutých metodou RTFOT. Hlavním důvodem je předpoklad, že asfaltové pojivo je nejnáchylnější k tvorbě trvalých deformací bezprostředně po pokládce asfaltové směsi. Další pozitivum zkoušky na pojivu po RTFOT je, že v porovnání s nezestárlým pojivem je dosaženo lepšího korelačního koeficientu s tvorbou trvalých deformací asfaltových směsí [177]. Problém nastává v případě mezilaboratorní reprodukovatelnosti. Reprodukovatelnost je pro zestárlá pojiva často horší [113], pravděpodobně z důvodu reprodukovatelnosti samotného krátkodobého stárnutí.

Předností zkoušky MSCR v komparaci s tradiční oscilační zkouškou FS je její rychlost (MSCR je přibližně 10x rychlejší v závislosti na počtu teplot, při kterých se měří zkouška FS). Na druhé straně reprodukovatelnost zkoušky MSCR je horší, zejména při testování vysoce modifikovaných pojiv. Podstatnou výhodou MSCR testu oproti FS je aplikování většího zatížení lépe vystihující reálné působení ve vozovce. Navíc oscilační zatížení není schopné odlišit zpožděnou elastickou odezvu od disipace energie viskózním tokem [20]. U kritéria $G^*/\sin(\delta)$ se hodnotí celková deformační energie obsahující i energii spotřebovanou na elastické přetvoření (okamžité i zpožděné), jak již bylo uvedeno v kapitole 3.9.

Oscilační zkouška se měří v LVR při relativně malých deformacích, u nichž je stěžejní elastické chování asfaltového pojiva. Trvalé deformace ale nejsou lineárně viskoelastickým jevem a vznikají v důsledku existence viskózní složky přetvoření, a proto charakteristika G*/sin(δ) dostatečně nekoreluje s trvalými deformacemi [23, 102, 178]. Problém je zjevný zejména při měření modifikovaných pojiv, která v porovnání s běžnými silničními pojivy obvykle obsahují výrazně větší pružnou komponentu. Kvůli tomu je nutné zaměřit pozornost na oblast nelineárního chování asfaltových pojiv a využít například parametr nevratné smykové poddajnosti J_{nr}, získaný při zkoušce MSCR.

Parametr J_{nr} má podle některých autorů [23, 31, 33, 169, 178, 179] výrazně lepší korelace s tvorbou trvalých deformací než běžná oscilační zkouška – FS. Současně podle příspěvku D´Angela [23] výsledky zkoušky MSCR dobře srovnávají pojiva v souvislosti s tvorbou trvalých deformací zjištěnou i na zkušebním úseku.

Zkoušce MSCR se začíná věnovat značná pozornost i v ČR. Metoda se pořád vyvíjí a upřesňuje se pro ni nejvhodnější konfigurace, stále ale existuje řada problémů při jejím provádění, vyhodnocování a interpretaci výsledků. Sporné otázky souvisí s počtem cyklů, velikostí vneseného smykového napětí, délkou odlehčení nebo teplotou provádění zkoušky. Snahou je, aby podmínky měření co možná nejvíce odpovídaly stavům na vozovce.

Běžné nastavení zkoušky vychází z normy ČSN EN 16659 [166] a udává dvě úrovně napětí (0,1 a 3,2 kPa), deset zatěžovacích cyklů při každé úrovni napětí a geometrii přístroje PP25 s mezerou 1 mm. Přesná teplota zkoušky v normě není definována a stejně tak v české ani v evropské normě nejsou vymezeny žádné limitní hodnoty. V USA se odolnost asfaltového pojiva proti trvalým deformacím dělí na 4 stupně (podle velikosti celkového dopravního zatížení a rychlosti pojezdů). Maximální hodnoty J_{nr} pro napětí 3,2 kPa ($J_{nr;3,2}$) a $J_{nr,diff}$ pro jednotlivé stupně jsou uvedeny v tabulce 2.

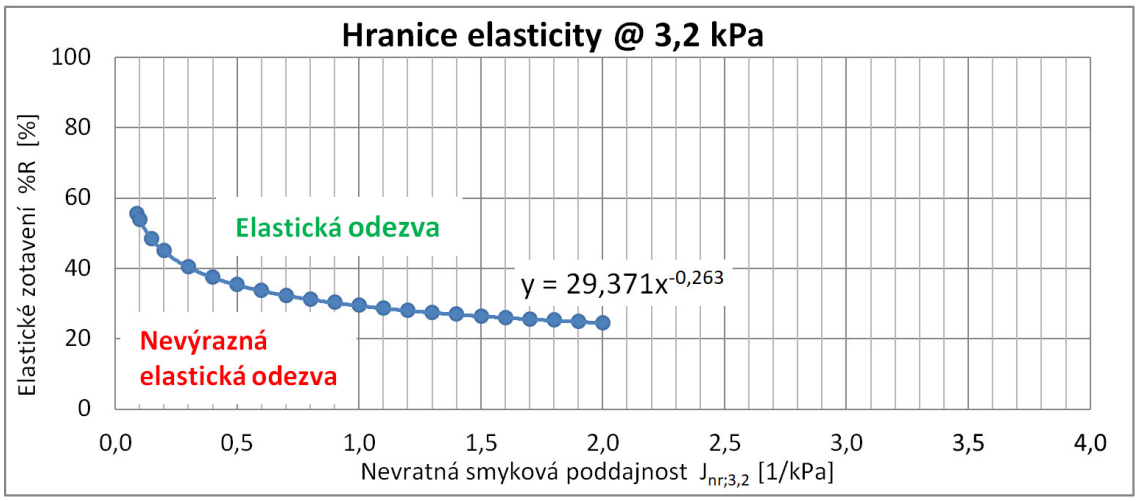
Tab. 2: *Požadované hodnoty $J_{nr;3,2}$ a $J_{nr,diff}$ pro jednotlivé stupně zatížení dle AASHTO M 332-14 [141]*

Typ dopravního zatížení	Stupeň	$J_{nr;3,2}$ [kPa^{-1}]	$J_{nr,diff}$
Standardní	S	< 4,5	< 75 %
Vysoký	H	< 2,0	< 75 %
Velmi vysoký	V	< 1,0	< 75 %
Extrémní/stojící doprava	E	< 0,5	< 75 %

Mezi Amerikou a Evropou jsou zcela zásadní odlišnosti při stanovení teploty měření. V USA se zkouška MSCR provádí při horní návrhové teplotě pro danou oblast. V Evropě se zkouška měří většinou při teplotě, za které se realizuje i zkouška pojíždění kolem (ČSN EN 12697-22 – Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 22: Zkouška pojíždění kolem [200]). V České republice teplota zkoušky MSCR není přesně předepsána, ale většinou se určuje při 60 °C, ačkoli zkouška pojíždění kolem se běžně uskutečňuje při 50 °C. Dalším problémem zkoušky je velká variabilita naměřených výsledků [29, 180].

V americké normě AASHTO T350-14 – Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR) [181] se nachází graf zobrazující J_{nr} versus %R (obr. 46). V grafu je zobrazena hranice elasticity při napětí

3,2 kPa. Hranice elasticity vychází z předpokladu, že čím vyšší je dopravní zatížení, tím větší je potřeba elastického zotavení. K zajištění dostatečné elasticity by výsledky měly být nad zobrazenou křivkou. Elastické zotavení pro J_{nr} > 2 kPa^{-1} není požadováno a podobně není potřeba zjišťovat hodnotu $J_{nr;3,2}$ při elastickém zotavení nad 55 %. V evropské normě, stejně jako v české normě ČSN EN 16659 [166] tento graf není, protože ani v USA není podáno přesné vysvětlení jeho účelu. Souvisí to s otázkou, zda se hodnota %R vztahuje k tvorbě trvalých deformací nebo ne. Z těchto důvodů se hranice spíš používá k identifikaci, zda měřené asfaltové pojivo je modifikováno přijatelným elastomerním polymerem.

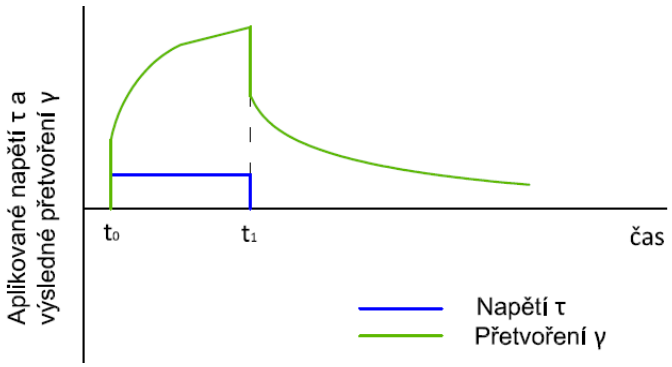


Obr. 46: Hranice elasticity

[6, 7, 10, 23, 28, 29, 31, 93, 102, 113, 143, 167, 176, 182-184]

3.10.1 STANDARDNÍ PRINCIP A VÝPOČET ZKOUŠKY MSCR

Na rozdíl od oscilační zkoušky se u zkoušky MSCR geometrie reometru pohybuje jen v jednom směru a měří se v režimu „creep“. Principem zkoušky je působení skokového zatížení po dobu jedné sekundy při konstantním napětí τ_0 (0,1 kPa a 3,2 kPa), následované okamžitým odtížením (při nulovém napětí) v délce devíti sekund. Postup se opakuje desetkrát pro každou úroveň napětí. Aplikace napětí a následné odtížení vyvolá přetvoření, které je schematicky zobrazeno na obrázku 47. Celková velikost přetvoření je závislá na modulu tuhosti asfaltového pojiva.



Obr. 47: Schéma průběhu zkoušky dotvarování

Hodnota smykového přetvoření (rovnice 29) se vypočítá stejně jako u oscilační zkoušky z úhlového pootočení. Běžně se pro smykové přetvoření používá symbol „γ“, ale jelikož ve všech normách věnujících se zkoušce MSCR se vyskytuje symbol „ε“, je toto označení zachováno i zde.

$$\varepsilon_t = \frac{\theta_t r}{h} \tag{29}$$

Kde ε_t …smykové přetvoření v čase t [-]
Θ_t …úhel pootočení v čase t [rad]
r …poloměr měřicí geometrie [m]
h …velikost mezery (výška zkušebního vzorku) [m]

Zkouška se zahajuje při nižší úrovni napětí a zvyšuje se na vyšší úroveň napětí na konci desátého cyklu. Mezi jednotlivými cykly není časové zpoždění. Metoda umožňuje vyhodnotit citlivost pojiva na zatížení při zvolené zkušební teplotě. Celkový čas zkoušky MSCR za standardních podmínek (dvě úrovně napětí) je 200 sekund plus doba temperace před samotnou zkouškou. Aplikované smykové napětí a výsledné smykové přetvoření se zaznamenávají při cyklu dotvarování nejméně jednou za 0,1 sekundy a nejméně každých 0,45 sekundy při zotavovacím cyklu.

Při výpočtu procentuálního elastického zotavení %R a nevratné smykové poddajnosti J_{nr}, se vychází z celkového přetvoření (ε_1) a nevratného přetvoření (ε_{10}) každého cyklu (rovnice 30 a 31). V normě ČSN EN 16659 [166] se proměnná ε_1 nazývá upravené přetvoření na konci dotvarování a proměnná ε_{10} se označuje jako upravené přetvoření na konci zotavení.

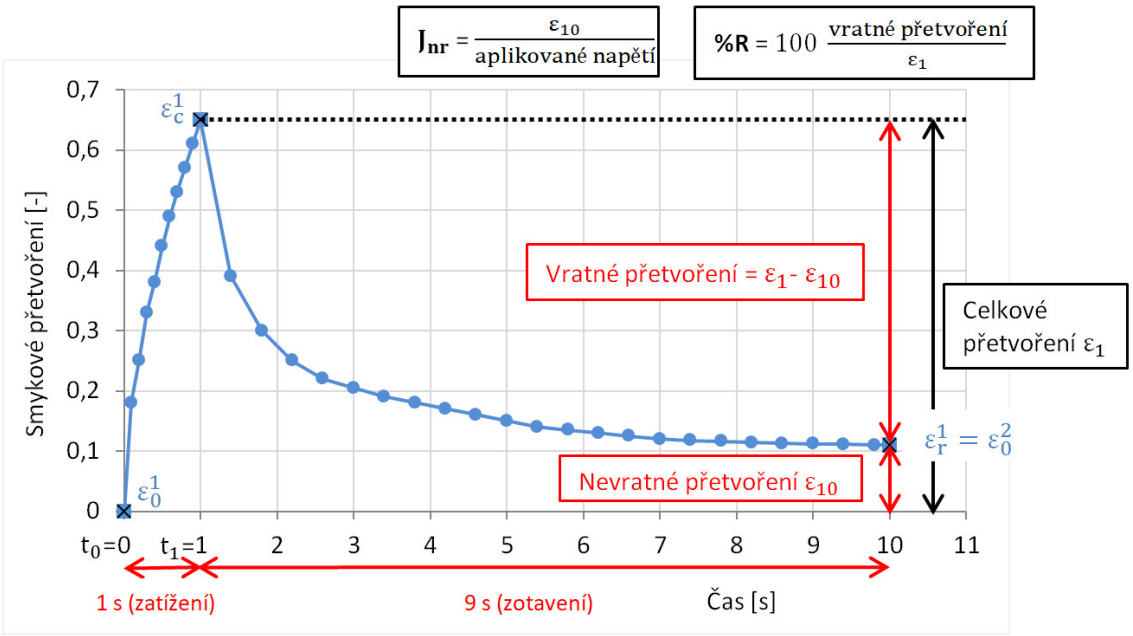
$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c - \varepsilon_0 \tag{30}$$

Kde ε_1 …celkové přetvoření [-]
ε_c …přetvoření na konci dotvarování [-]
ε_0 …počáteční přetvoření na začátku dotvarování [-]

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0 \tag{31}$$

Kde ε_{10} …nevratné přetvoření [-]
ε_r …přetvoření na konci zotavení [-]
ε_0 …počáteční přetvoření na začátku dotvarování [-]

Na obrázku 48 je názorně zobrazen průběh smykového přetvoření pro první cyklus zatížení a zotavení spolu s označením jednotlivých přetvoření a výpočtem dvou základních charakteristik.



Obr. 48: Typický první cyklus zatížení a zotavení

Procentuální zotavení pro každý cyklus zvlášť při napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa se vypočítá z rovnice 32 a 33. Horní index N určuje pořadové číslo cyklu (od 1 do 10).

$$\%R_{0,1}^N = 100\,\frac{\varepsilon_1^N - \varepsilon_{10}^N}{\varepsilon_1^N} \tag{32}$$

$$\%R_{3,2}^N = 100\,\frac{\varepsilon_1^N - \varepsilon_{10}^N}{\varepsilon_1^N} \tag{33}$$

Kde $\%R_{0,1}^N$ …procentuální zotavení N-tého cyklu při napětí 0,1 kPa [%]
$\%R_{3,2}^N$…procentuální zotavení N-tého cyklu při napětí 3,2 kPa [%]
ε_1^N…celkové přetvoření N-tého cyklu [-]
ε_{10}^N…nevratné přetvoření N-tého cyklu [-]

Výsledné procentuální zotavení asfaltových pojiv se vypočítá jako průměr elastických zotavení jednotlivých deseti cyklů pro napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa (rovnice 34 a 35):

$$\%R_{0,1} = \frac{1}{10}\,\Sigma_{N=1}^{10}\left(\%R_{0,1}^N\right) \tag{34}$$

$$\%R_{3,2} = \frac{1}{10}\,\Sigma_{N=1}^{10}\left(\%R_{3,2}^N\right) \tag{35}$$

Kde $\%R_{0,1}$ …procentuální zotavení při napětí 0,1 kPa [%]
$\%R_{3,2}$ …procentuální zotavení při napětí 3,2 kPa [%]
$\%R_{0,1}^N$ …procentuální zotavení N-tého cyklu při napětí 0,1 kPa [%]
$\%R_{3,2}^N$…procentuální zotavení N-tého cyklu při napětí 3,2 kPa [%]

Druhou důležitou charakteristikou zkoušky MSCR je nevratná smyková poddajnost J_{nr}. Porovnávat nevratná přetvoření při různých úrovních napětí je obtížné. Z tohoto důvodu se nevratné přetvoření podělí aplikovaným napětím, čímž se odezva normalizuje a získá se

nevratná smyková poddajnost. Velikost J_{nr} každého cyklu pro napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa se stanoví z rovnice 36 a 37. Horní index N určuje pořadové číslo cyklu (od 1 do 10).

$$J_{nr;0,1}^{N} = \frac{\varepsilon_{10}^{N}}{\tau_0} = \frac{\varepsilon_{10}^{N}}{0,1} \tag{36}$$

$$J_{nr;3,2}^{N} = \frac{\varepsilon_{10}^{N}}{\tau_0} = \frac{\varepsilon_{10}^{N}}{3,2} \tag{37}$$

Kde $J_{nr;0,1}^{N}$…nevratná smyková poddajnost N-tého cyklu při napětí 0,1 kPa [kPa^{-1}]
$J_{nr;3,2}^{N}$…nevratná smyková poddajnost N-tého cyklu při napětí 3,2 kPa [kPa^{-1}]
ε_{10}^{N}…nevratné přetvoření N-tého cyklu [-]
τ_0…aplikované napětí [kPa]

Hodnoty průměrné nevratné smykové poddajnosti J_{nr} pro napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa se vypočítají z rovnic 38 a 39:

$$J_{nr;0,1} = \frac{1}{10}\sum_{N=1}^{10}\left(J_{nr;0,1}^{N}\right) \tag{38}$$

$$J_{nr;3,2} = \frac{1}{10}\sum_{N=1}^{10}\left(J_{nr;3,2}^{N}\right) \tag{39}$$

Kde $J_{nr;0,1}$…nevratná smyková poddajnost při napětí 0,1 kPa [kPa^{-1}]
$J_{nr;3,2}$…nevratná smyková poddajnost při napětí 3,2 kPa [kPa^{-1}]
$J_{nr;0,1}^{N}$…nevratná smyková poddajnost N-tého cyklu při napětí 0,1 kPa [kPa^{-1}]
$J_{nr;3,2}^{N}$…nevratná smyková poddajnost N-tého cyklu při napětí 3,2 kPa [kPa^{-1}]

Další dvě zajímavé charakteristiky, které se dají ze zkoušky MSCR určit, jsou parametry citlivosti R_{diff} a $J_{nr,diff}$. Podstatou je porovnat velikost %R (J_{nr}) mezi napětím 0,1 kPa a 3,2 kPa (rovnice 40 a 41).

$$R_{diff} = 100\,\frac{(\%R_{0,1} - \%R_{3,2})}{\%R_{0,1}} \tag{40}$$

Kde R_{diff}…procentuální rozdíl zotavení mezi napětím 0,1 kPa a 3,2 kPa [%]
$\%R_{0,1}$…procentuální zotavení při napětí 0,1 kPa [%]
$\%R_{3,2}$…procentuální zotavení při napětí 3,2 kPa [%]

$$J_{nr,diff} = 100\,\frac{(J_{nr;3,2} - J_{nr;0,1})}{J_{nr;0,1}} \tag{41}$$

Kde $J_{nr,diff}$…procentuální rozdíl J_{nr} mezi napětím 0,1 kPa a 3,2 kPa [%]
$J_{nr;0,1}$…nevratná smyková poddajnost při napětí 0,1 kPa [kPa^{-1}]
$J_{nr;3,2}$…nevratná smyková poddajnost při napětí 3,2 kPa [kPa^{-1}]

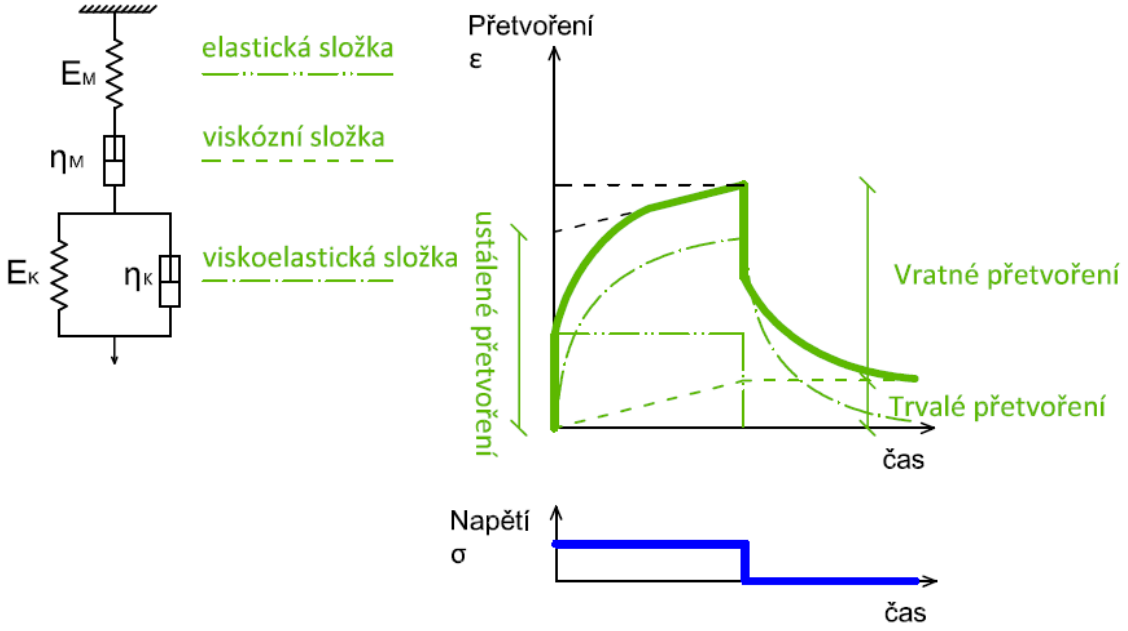
[6, 23, 102, 113, 166]

3.10.2 TEORETICKÝ MODEL ZKOUŠKY MSCR

Nejčastěji používaným reologickým modelem pro popis zkoušky MSCR je poměrně jednoduchý a přesný **Burgersův model** [185]. V tomto modelu je sériově zapojen model Kelvin-Voigtův a Maxwellův popisující pružné, viskózní i viskoelastické vlastnosti materiálu. Základní rovnice pro výpočet napětí a přetvoření jsou popsány v kapitole 3.4.3. Ve stejné kapitole je zobrazeno i schéma zapojení pružin a tlumičů v Burgersově modelu a graficky znázorněn průběh napětí a přetvoření (obr. 21).

Rozkreslení jednotlivých složek přetvoření Burgersova modelu, včetně výsledného přetvoření, je uvedeno na obr. 49. Nejprve se projeví počáteční elastická složka (okamžité přetvoření), za kterou je zodpovědný pružinový prvek Maxwellova článku E_M. Následuje viskoelastická složka (zpožděné elastické přetvoření), jenž generuje paralelně spřažený píst η_K a pružina E_K Kelvin-Voigtova článku. Zpožděné elastické přetvoření je schopno se plně regenerovat v případě dostatečně dlouhého času relaxace. Nakonec dojde k lineární odezvě způsobené viskózní složkou (trvalé přetvoření) zásluhou pístového prvku Maxwellova článku η_M. Gradient křivky přetvoření se rovná rychlosti deformace a může být využit i pro výpočet ZSV.

Pokud je ustálená lineární odezva extrapolována k počátku vneseného napětí, je přetvoření rovno ustálenému přetvoření a tato deformace je spojená jenom s pružnými prvky materiálu, tj. pružinami v modelu Burgers ($\sigma/E_M+\sigma/E_K$). Pouze elastická deformace je schopna se plně zotavit, naopak viskózní deformace je trvalá. Za předpokladu dostatečně dlouhého času odtížení se vratné přetvoření rovná ustálenému přetvoření. K přesnějšímu modelování reakcí reálných systémů při zkoušce tečení je vhodnější použít například více prvků Kelvin-Voigtova modelu.



Obr. 49: Složky přetvoření Burgersova modelu a základní grafy napětí a přetvoření v čase

[23, 29, 92, 102]

3.11 SOUČASNÉ FUNKČNÍ POŽADAVKY ASFALTOVÝCH POJIV

Funkční zkoušky nejsou v normách pro asfaltová pojiva zcela zohledněny. Jedním z pozitivních kroků ale je, že od léta 2017 dochází v některých tuzemských silničních laboratořích k dlouhodobému shromažďování dat z funkčních zkoušek asfaltových pojiv (zejména PMB). Většina výrobců a dovozců asfaltových pojiv v ČR byla vyzvána k anonymnímu zasílání naměřených hodnot funkčních zkoušek z DSR a BBR. Sběr dat je dobrovolný, ale jeho význam je velmi důležitý a očekává se, že na jeho základě bude možné současné podmínky norem asfaltových pojiv zpřesnit. Níže je uveden výčet aktuálně předepsaných funkčních zkoušek asfaltových pojiv:

- **Silniční asfalty (ČSN EN 12591) a multigrádové silniční asfalty (ČSN EN 13924-2**) – k normě ČSN EN 12591 nelze přiložit národní přílohu, z tohoto důvodu vznikla nová česká norma ČSN 65 7204 – Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční asfalty [186] doplněná o provedení zkoušky dynamické viskozity při 135 °C dle ČSN EN 13302 (bez požadavku na limitní hodnotu – dostačuje jen deklarovaná hodnota) a navíc je zde doporučení měřit i tyto funkční zkoušky:
  - Kritické teploty křehnutí na BBR (ČSN EN 14771 [133]) po stárnutí metodou RTFOT+PAV pro S = 300 MPa, respektive m = 0,3;
  - Teplotní citlivost na DSR (ČSN EN 14770 [123]) po stárnutí metodou RTFOT pomocí parametrů G* a δ při 1,59 Hz – stanovení teploty T1 pro G* = 5 MPa (geometrie DSR PP08), vč. hodnoty δ při T1, a teploty T2 pro G* = 50 kPa (geometrie PP25) a hodnoty δ při této teplotě.
- **Tvrdé silniční asfalty ČSN EN 13924-1 –** obdobně i zde platí norma ČSN 65 7204 [186], kde je předepsána dynamická viskozita při 135 °C dle ČSN EN 13302 (bez požadavku na limitní hodnotu – postačuje jen deklarovaná hodnota) a zrušen požadavek na provedení zkoušky viskozity při 60 °C. V příloze B lze vyhledat informativní vlastnosti, které by dodavatel měl deklarovat. Jedná se o:
  - Kritické teploty křehnutí na BBR (ČSN EN 14771 [133]) pro S = 300 MPa a m = 0,3;
  - Stanovení hodnoty G* při teplotě 15 °C a frekvenci 10 Hz (ČSN EN 14770 [123]);
  - Určení teploty, při které je G*/sin(δ) = 1 kPa při 10 Hz (ČSN EN 14770 [123]).
- **Polymerem modifikované asfalty (ČSN EN 14023 [112])** – k normě ČSN EN 14023 nelze přiložit národní přílohu, proto vznikla nová česká norma ČSN 65 7222-1 – Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční modifikované asfalty – Část 1: Polymerem modifikované asfalty [187] obsahující povinnost uvádět výsledky funkčních zkoušek pro výrobce a dovozce (zkoušky typu a během výroby):
  - Nevratnou smykovou poddajnost J_{nr} ze zkoušky MSCR podle ČSN EN 16659 [166] po stárnutí RTFOT při smykovém napětí 3,2 kPa a teplotě 60 °C;
  - Charakteristiky G*, δ (ČSN EN 14770 [123]) – stanovení teplot T1 a T2 za stejných podmínek jako u silničních asfaltů;

- Změnu viskoelastických vlastností po stárnutí RTFOT+PAV – určení teploty T3 pro G* = 5 MPa a T4 pro G* = 50 kPa zjištěných analogicky jako teploty T1 a T2;
- Nízkoteplotní vlastnosti po stárnutí RTFOT+PAV na přístroji BBR (ČSN EN 14771 [133]) – stanovení teploty T_k, při které je S = 300 MPa s uvedením m-hodnoty při této teplotě.

- **Asfalty modifikované pryžovým granulátem ČSN 65 7222-2** – vymezen rozsah pro dynamickou viskozitu při 150 °C / 175 °C (ČSN EN 13302). Dále se doporučuje uvádět informativní údaje k funkčním vlastnostem:
  - Hodnotu J_{nr} ze zkoušky MSCR (ČSN EN 16659 [166]) při napětí 3,2 kPa a teplotě 60 °C nebo 70 °C po stárnutí RTFOT
  - G* a δ po zkoušce RTFOT (ČSN EN 14770 [123]) s určením teplot T1 a T2 za stejných podmínek jako u silničních asfaltů, ale s výškou vzorku vždy 2 mm;
  - Kritické teploty na přístroji BBR (ČSN EN 14771 [133]) po stárnutí RTFOT+PAV pro S = 300 MPa a m-hodnoty při těchto teplotách.

[1, 186-188]

3.12 STÁRNUTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA

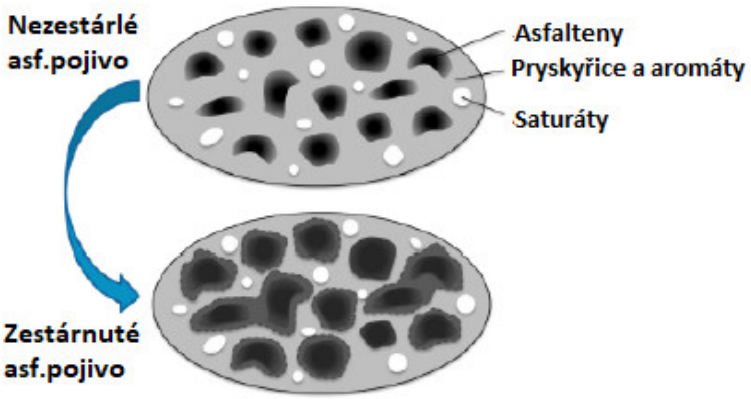
Dalším faktorem ovlivňujícím reologii a vlastnosti asfaltových pojiv je fenomén známý jako stárnutí. Stárnutí asfaltového pojiva je složitý, ale současně velmi zásadní proces. Disertační práce se mu věnuje jen okrajově, ale nepochybně by si zasloužil větší pozornost. Tato kapitola shrnuje pouze základy týkající se faktorů ovlivňujících stárnutí, princip stárnutí a metody simulace stárnutí v laboratoři. Řada zkoušek asfaltových pojiv (především funkčních) se provádí na laboratorně zestárnutých vzorcích, a proto je nezbytné znát základní princip stárnutí i laboratorní metody simulující stárnutí.

Asfaltové pojivo je organický materiál podléhající v průběhu životnosti a především během výroby a pokládky asfaltové směsi celé řadě komplexních změn, které obecně nazýváme stárnutí materiálu. Proces stárnutí asfaltového pojiva je přirozený, ale jen těžko popsatelný a předvídatelný zejména z důvodu složitých chemických dějů, proměnlivosti klimatických podmínek (kolísání teplot, difuzivitě kyslíku, vlhkosti, UV záření), vlastnostem hutněné směsi (mezerovitosti), podmínkám při výrobě a pokládce asfaltové směsi, přísadám atd. Stárnutím dochází k chemickým i strukturálním změnám, jež je možné zmenšit nebo zpomalit, nelze je však zcela odstranit.

Asfaltové pojivo stárne během výroby a pokládky (**krátkodobé stárnutí**), ale i po dobu vlastní životnosti (**dlouhodobé stárnutí**). Při krátkodobém stárnutí je pojivo vystaveno intenzivnímu působení tepla a vzduchu po relativně krátkou dobu. Výsledkem je přibližně dvojnásobné zvýšení modulu tuhosti [30]. Dlouhodobé stárnutí má simulovat stárnutí během provozu po jasně nespecifikované době (cca 5-10 let). V průběhu dlouhodobého stárnutí se tuhost pojiva dále zvyšuje, zatímco jeho schopnost odolávat napětí se snižuje.

Rychlost stárnutí asfaltových pojiv je ovlivněna faktory způsobenými převážně okolním prostředím, jsou to oxidace, vypařování, UV záření nebo opakované namáhání. **Oxidace** byla

identifikována jako nejvlivnější parametr degradačních procesů stárnutí, způsobené termooxidační reakcí. Průběh termooxidační degradace asfaltového pojiva je ovlivněn především teplotou a přístupem kyslíku k pojivu. Asfaltové pojivo je organická sloučenina reagující za určitých podmínek s kyslíkem, čímž dochází k oxidaci malténů. Rozptýlení maltenické části je doprovázeno změnou poměru mezi asfaltény a maltény ve prospěch vysokomolekulárních sloučenin (asfalténů a těžkých aromátů) (obr. 50).



Obr. 50: Mikromechanické modelování stárnutí asfaltového pojiva [189]

Působení **UV záření** urychluje absorpci kyslíku, která má za následek zrychlení oxidace. Další příčinou degradace asfaltového pojiva jsou vysoké teploty během výroby a pokládky asfaltové směsi. Mají významný vliv na olejové látky v asfaltovém pojivu, neboť se díky vysokým teplotám rychleji **odpařují**.

Celkově stárnutí asfaltových pojiv vede ke zvýšení tuhosti vyjádřené především nárůstem hodnoty ztrátového modulu a bodu měknutí a naopak snížením penetrace. Zvyšuje se tvrdost a křehkost asfaltového pojiva, jehož následkem je zvýšená náchylnost k tvorbě trhlin v důsledku opakujícího se dynamického zatížení způsobeného dopravou (únavové trhliny) a střídáním cyklů zmrazování a rozmrazování nebo výraznými teplotními změnami (nízkoteplotní trhliny). Naopak u zestárlých vozovek se vlivem zvýšené tuhosti omezuje vznik trvalých deformací (vyjíždění kolejí).

Stárnutí způsobuje změny funkčních vlastností nejen u asfaltového pojiva, ale nepřímo i asfaltové směsi. Z tohoto důvodu je nutné zkoušky asfaltových pojiv provádět na nezestárlých pojivech, ale i na laboratorně zestárlých vzorcích.

K simulaci stárnutí v laboratorních podmínkách se využívají metody založené na aplikaci vzduchu a tepla. Krátkodobé stárnutí simuluje odolnost asfaltového pojiva proti tvrdnutí během výroby, dopravy a pokládky asfaltové směsi. Používané laboratorní metody urychleného krátkodobého stárnutí jsou:

- **RTFOT** (Rolling Thin Film Oven Test; ČSN EN 12607-1 – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 1: Metoda RTFOT [190]) – nejčastěji prováděná metoda;
- **TFOT** (Thin Film Oven Test; ČSN EN 12607-2 – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 2: Metoda TFOT [191]);
- **RFT** (Rotating Flask Test; ČSN EN 12607-3 – Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 3: Metoda RFT [192]).

Simulace dlouhodobého stárnutí popisuje změny vlastností asfaltových pojiv během životnosti ve vozovce. Urychlené dlouhodobé stárnutí popisují následující laboratorní metody:

- **PAV** (Pressure Ageing Vessel; ČSN EN 14769 – Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV) [193]) – nejčastěji používaná metoda;
- **HiPAT** (High Pressure Ageing Test; BS EN 14769 – Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV) [194]) neboli **PAV85**;
- **RCAT** (Rotating Cylinder Ageing Test; ČSN EN 15323 – Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT) [195]);
- **Modifikovaná metoda RTFOT** – čas expozice je 3x prodloužen v porovnání se standardní zkouškou RTFOT.

Obr. 51: Nejčastěji používané metody stárnutí – RTFOT, TFOT a PAV [196,197]

[1, 30, 45, 85, 102, 110, 189, 198, 199]

4. VLASTNÍ EXPERIMENTÁLNÍ ČINNOST

V průběhu doktorského studia se prováděla měření na různých sadách asfaltových pojiv, z důvodu co možná nejširšího pokrytí odlišného chování jednotlivých skupin. Jednalo se o běžná silniční pojiva, polymerem modifikovaná pojiva (PMB – polymer modified bitumen), pojiva s mletou nebo drcenou pryží (CRMB – crumb rubber modified bitumen), případně extrahovaná pojiva. Pojiva byla často následně modifikována další přísadou, jako je chemický modifikátor kyseliny polyfosforečné (PPA), přísadami pro zlepšení přilnavosti, nízkoviskózními přísadami nebo přísadami zlepšujícími povrchovou aktivitu pojiva.

Část pojiv byla průmyslově vyrobena a dovezena k otestování, většina jich ale byla připravena přímo v laboratoři. U zvolených variant se mimo jiné porovnávalo množství přidávané přísady, vliv základního asfaltového pojiva nebo účinek stárnutí. Na vybraných asfaltových pojivech se zkoušky realizovaly na nezestárlých vzorcích, ale i vzorcích vystavených krátkodobému stárnutí (metody RTFOT a TFOT) i dlouhodobému stárnutí (metoda PAV, či vícenásobné TFOT/RTFOT nebo kombinace TFOT+PAV, eventuálně kombinace RTFOT+PAV). Nejběžnější metoda simulující krátkodobé stárnutí je RTFOT, ale silniční laboratoř ČVUT v Praze v době provádění experimentálních zkoušek disponovala přístrojem simulujícím stárnutí metodou TFOT a bylo tak možné rozšířit komparaci některých variant.

V případě dostatečného množství vzorku se nejprve stanovily základní empirické zkoušky a následně i vybrané funkční zkoušky. Konvenční fyzikální vlastnosti asfaltových pojiv se zjišťovaly pomocí zkoušky bodu měknutí, penetrace, vratné duktility nebo skladovací stability u CRMB pojiv. U většiny asfaltových pojiv se měřila i dynamická viskozita, která se řadí mezi funkční zkoušky. V této práci jsou její výsledky použity pouze k určení korelací s ostatními zkouškami.

V disertační práci se pozornost zaměřuje zejména na reologické zkoušky charakterizující deformační chování, prováděné na dynamickém smykovém reometru v intervalu středních a vyšších provozních teplot. K tomuto účelu byly vybrány dvě nejčastější zkušební metody. První je dynamická oscilační zkouška Frequency Sweep (zkráceně FS) ve zvoleném intervalu teplot (nejčastěji 20-60 °C) a frekvenčním rozpětí od 0,1-10 Hz a druhou je zkouška MSCR, která se v ČR standardně měří při teplotě 60 °C a napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa. Zkoušky jsou blíže popsány v kapitolách 3.9, respektive 3.10.

Během studia do roku 2017 jsem v silniční laboratoři ČVUT v Praze zkoušela více než 300 různých pojiv (převážně modifikovaných). Většinou se jednalo o měření standardních postupů, ale v řadě případů šlo o drobné modifikace obou zkoušek. Snahou bylo nejen ověřit vhodnost dosavadních nastavení obou metod, ale také zpřesnit nejednoznačné podmínky zkoušení a navrhnout limitní hodnoty měřených charakteristik. Pro splnění cílů práce bylo třeba vycházet z co možná nejširšího souboru asfaltových pojiv. Dále bylo důležité, aby měření byla prováděna na jednom přístroji, protože měření na různých reometrech může vést k rozdílným výsledkům. Z tohoto důvodu byla vlastní měření doplněna přibližně o 50 asfaltových pojiv zkoušených na stejném reometru, ale jinou osobou (kolegyní Ing. Kristýnou Miláčkovou).

Pro analýzu reologických charakteristik disertační práce se používal dynamický smykový reometr silniční laboratoře ČVUT v Praze od výrobce ThermoHaake s označením Mars II

zobrazený na obr. 32. Ohřívání vzorku u tohoto přístroje je pouze ze spodní strany. Pro zajištění vyšší přesnosti jsou prezentované výsledky z DSR u většiny asfaltových pojiv získané průměrem ze dvou měření.

První kapitola 4.1 se věnuje ověření podmínek a parametrů oscilační zkoušky FS a stanovení limitních hodnot základních charakteristik. Druhá kapitola 4.2 se zaměřuje na zkoušku MSCR – určení mezních hodnot vybraných veličin, nastavení zvolených parametrů (teplota, napětí, typ geometrie) a výpočet jednotlivých charakteristik. V další kapitole 4.3 jsou uvedeny vzájemné korelace s empirickými zkouškami, s důrazem na poukázání silných korelací. Poslední kapitola 4.4 uvádí výsledky zjištěné v rámci univerzitního grantového schématu Studentské grantové soutěže (SGS), jejímž cílem bylo nalezení vztahů mezi deformačními vlastnostmi asfaltových pojiv a směsí.

4.1 OSCILAČNÍ ZKOUŠKA FS

Měření byla prováděna v režimu předepsaného smykového napětí v lineárním rozložení (CS lin). Přístroj DSR zaznamenával vyvolanou deformaci, z níž se následně dopočítaly další vybrané hodnoty. Při měření oscilační zkoušky v režimu frekvenčních ramp (FS) je nutné, aby vnesené napětí bylo v lineární viskoelastické oblasti zkoušeného pojiva. Pro běžné silniční asfalty se zkouška tradičně provádí při napětí 2000 Pa, což je ověřená hodnota. V případě modifikovaných pojiv je ale vhodné stanovit lineární viskoelastickou oblast (LVR) pro každé pojivo zvlášť. Pro zjednodušení byla většina pojiv testována při napětí 2000 Pa, které je s jistotou i u modifikovaných pojiv v LVR.

Základní teplota měření byla dříve většinou 60 °C, ale nově se pro jednotlivé skupiny asfaltových pojiv určují teploty T1 a T2 (případně T3 a T4), jimž přísluší definované hodnoty komplexního smykového modulu G*. Pro sestavení řídících křivek (MC) je nezbytné mít široké teplotní okno. Z tohoto důvodu se zkouška prováděla většinou v rozpětí teplot 20-60 °C. Zkouška FS je zkratkou anglického názvu Frequency Sweep a její podstatou je měření při více frekvencích. Rozsah frekvencí byl vybrán v intervalu od 0,1 Hz po 10 Hz, včetně základní frekvence 1,59 Hz.

Standardně se metoda posuzuje u pojiv po krátkodobém stárnutí simulujícím vliv výroby a pokládky. Asfaltové vozovky jsou nejnáchylnější k tvorbě trvalých deformací právě po pokládce a při vysokých teplotách. Stárnutím dochází k tvrdnutí a odolnost vůči vyjíždění kolejí se zvyšuje. Náchylnost asfaltových pojiv k trvalým deformacím je možné zjistit i u nezestárlých (originálních) pojiv, a proto byly zkoušky realizovány nejčastěji na nich. Výběr měřicí geometrie byl volen dle konvenčních postupů, kdy základní geometrií byla PP25 s mezerou 1 mm. Výjimku tvořila pojiva modifikovaná pryžovým granulátem s průměrem zrn větším než 0,5 mm, zde se zkouška prováděla s mezerou 2 mm. Geometrie PP08 se využila jen v případě měření na dlouhodobě zestárlých pojivech.

Při hodnocení zkoušky FS se zjišťují dvě základní charakteristiky – komplexní smykový modul G* a fázový úhel δ. Pomocí těchto dvou charakteristik se následně vypočítávají parametry G*/sin(δ) a G*.sin(δ). Druhý jmenovaný parametr se používá ke stanovení únavových vlastností, a kvůli tomu mu není věnována bližší pozornost.

Složitější parametr, který by měl lépe odpovídat tvorbě trvalých deformací, je G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} a v následném textu je nazýván „upraveným parametrem". Při hodnocení asfaltových pojiv se s ním setkáváme jen velmi zřídka, a z tohoto důvodu pro něj nejsou navrženy žádné limitní hodnoty.

Z hlediska odolnosti vůči trvalým deformacím je žádoucí mít G* co možná největší a fázový úhel co nejmenší, je však nutné současně eliminovat příliš vysoké hodnoty, jež jsou buď nelogické, nebo mohou způsobit nízkou odolnost vůči nízkoteplotním trhlinám.

Další možností interpretace výsledků oscilační zkoušky je stanovení viskoelastické teploty přechodu T_{VET}. Jedná se o teplotu, při které jsou hodnoty obou složek komplexního smykového modulu G´ a G´´ stejné (G´ = G´´), takže δ = 45°. Při teplotě vyšší než T_{VET} převládá viskózní chování asfaltového pojiva a naopak pod touto teplotou převládá elastické chování. Na základě T_{VET} je možné určit parametr G^*_{VET}, odpovídající hodnotě komplexního smykového modulu při teplotě T_{VET}.

K zobrazení výsledků byla pojiva rozdělena do několika skupin podle použitého pojiva – silniční asfalty (SA), polymerem modifikované asfalty (PMB) a asfaltová pojiva modifikovaná pryžovým granulátem (CRMB). Další podskupiny se vytvořily na základě gradace základního asfaltu a v grafech jsou odděleny svislou tečkovanou šedou čarou. U CRMB pojiv je rozdělení nejen podle základního asfaltu (značeno jako báze), ale i dle množství pryžového granulátu. Vodorovnou čarou jsou na obrázcích znázorněny navržené limitní hodnoty, barva čáry odpovídá barvě příslušné charakteristiky. U všech skupin i podskupin byly vypočítány základní statistické údaje (aritmetický průměr, medián, směrodatná odchylka a 5% i 10% percentily) pro zvolené veličiny. Medián, na rozdíl od aritmetického průměru, je méně ovlivněn extrémními hodnotami.

Nerozlišovalo se, zda pojiva obsahují nebo neobsahují přísady (nízkoviskózní, přilnavostní atd.), protože většinou tyto přísady výrazně neovlivňovaly výsledné hodnoty. Všeobecně přidáním vosků spíše dochází ke snížení tuhosti (zejména u PMB pojiv). Jedinou výjimkou jsou přísady připravené Fischer Tropschovou syntézou (FT parafíny) neboť naopak značně zvyšují tuhost asfaltového pojiva, respektive hodnotu G*. V příloze B jsou uvedena data k jednotlivým skupinám pojiv, z nichž se vycházelo v následujících kapitolách. Limitní hodnoty byly stanoveny na základě statistického údaje horních nebo dolních 5% (10%) percentilů, vymezující hodnotu, kterou má vyšší nebo nižší 5 % (10%) zkoumaných vzorků.

Výše zmíněné charakteristiky jsou určeny pro konkrétní teplotu (60 °C) a frekvenci (1,59 Hz), jedná se tedy vždy o výslednou jednu hodnotu. Pouze při zjišťování T_{VET} (G^*_{VET}) se pracovalo s celým teplotním rozsahem, ale opět jen s frekvencí 1,59 Hz. Výhodou oscilační zkoušky FS je možnost porovnání diagramů zobrazujících vliv různých teplot i frekvencí zatížení, čímž je možné simulovat různé podmínky, jimž je asfaltové pojivo vystaveno. Nejjednodušší možností diagramu je vynesení izochron (různé teploty při jedné frekvenci) a izoterm (různé frekvence při jedné teplotě). Zajímavější možností jsou Cole-Cole diagramy nebo Blackovy diagramy, využívající data ze všech měřených teplot i frekvencí. Složitější, ale nejpřesnější možností interpretace jsou řídící křivky umožňující díky principu superpozice modelovat chování i pro frekvence mimo funkční rozsah přístroje.

K názornému zobrazení těchto diagramů byla z každé skupiny vybrána charakteristická pojiva tak, aby byl vidět jejich typický průběh. Za charakteristické pojivo byla zvolena pojiva, která se svými vlastnostmi přibližovala nejvíce průměrnému chování dané skupiny.

V poslední podkapitole (4.1.9) jsou shrnuty poznatky různých skupin asfaltových pojiv, popisující chování pojiv od různých výrobců, při odlišné velikosti napětí, modifikovaných nízkoviskózními přísadami nebo rozdílným množstvím pryžového granulátu se zaměřením na oscilační zkoušku FS.

4.1.1 SILNIČNÍ ASFALTY

Při hodnocení silničních asfaltů (zkráceně SA) byly zařazeny i silniční asfalty modifikované nízkoteplotními přísadami nebo přísadami zlepšujícími přilnavost. Díky tomu je k dispozici soubor 128 asfaltových pojiv. Základní statistické hodnoty komplexního smykového modulu G* a fázového úhlu δ jsou v tabulce 3, respektive tabulce 4. Tabulky jsou navíc doplněny o navržené mezní hodnoty.

Tab. 3: *Statistické údaje silničních asfaltů – G* (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa]	Medián [kPa]	Směrodat. odchylka [kPa]	5% percentil [kPa]	10% percentil [kPa]	Návrh min. hodnoty [kPa]
vše	128	7,7	4,3	8,5	1,6	2,0	-
20/30	22	22,0	21,4	10,6	6,6	8,9	**7,0**
50/70	75	5,2	3,9	3,7	2,0	2,2	**2,2**
70/100	31	3,6	3,6	2,2	1,0	1,5	**1,5**

Tab. 4: *Statistické údaje silničních asfaltů – δ (T = 60 °C)*

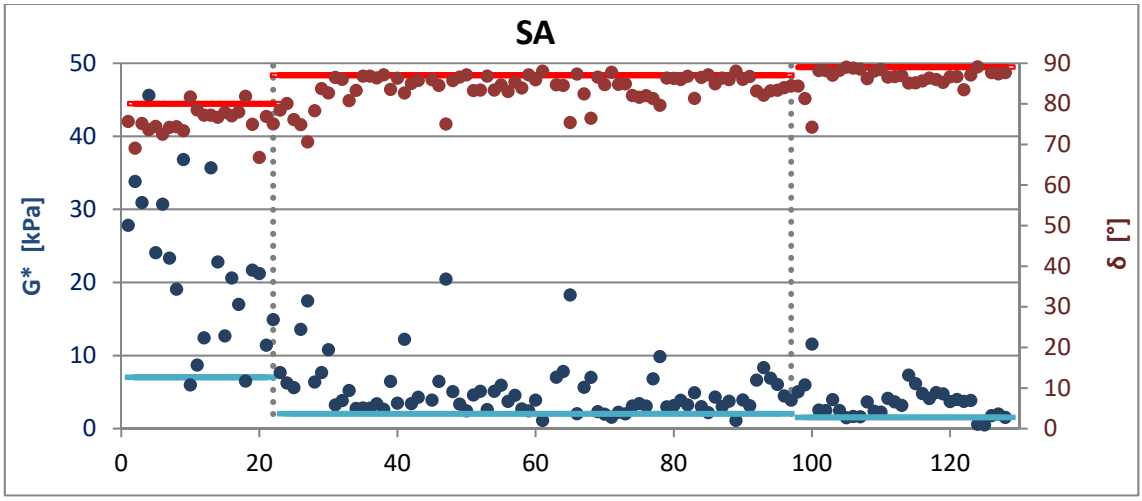
	Počet pojiv	Aritm. průměr [°]	Medián [°]	Směrodat. odchylka [°]	95% percentil [°]	90% percentil [°]	Návrh max. hodnoty [°]
vše	128	82,9	84,7	4,9	88,1	87,7	-
20/30	22	75,5	75,4	3,4	81,5	78,4	**80,0**
50/70	75	83,8	84,7	3,6	87,2	87,0	**87,0**
70/100	31	86,3	86,8	2,9	88,9	88,5	**89,0**

Z obrázku 52 je patrné, že nejvyšší hodnoty G* (hlavní osa) a nejnižší hodnoty δ (vedlejší osa) jsou zejména u prvních 22 asfaltových pojiv. Je to způsobeno tím, že jednotlivé vzorky jsou řazeny podle gradace silničního asfaltu, takže na začátku jsou pojiva nejtvrdší (20/30). Ve střední nejpočetnější části jsou silniční asfalty 50/70 a nejvíc vpravo jsou asfaltová pojiva 70/100. Jako minimální hodnota charakteristiky komplexního smykového modulu byla stanovena hodnota 7,0 kPa pro pojiva 20/30, 2,2 kPa pro pojiva 50/70 a 1,5 kPa pro silniční asfalty 70/100 (tab. 3). Vymezené limitní hodnoty charakteristiky G* pro jednotlivé skupiny silničních asfaltů jsou na obr. 52 zobrazeny vodorovnou modrou čarou. Z obr. 52 je také zjevné, že rozdíl mezi skupinou silničních asfaltů s gradací 50/70 a 70/100 není až tak výrazný, a proto i mezní hodnoty jsou dost podobné. Dle očekávání tuhost asfaltových pojiv (G*) klesá s vyšší penetrační třídou a naopak fázový úhel roste.

Na základě percentilů se rovněž určily maximální hodnoty pro fázový úhel. Fázové úhly zpravidla odpovídají velikosti G*, ale u některých asfaltových pojiv (zejména modifikovaných) může být výraznější elastická složka projevující se právě nižším fázovým úhlem. Pro pojiva 70/100 byla navržena maximální hodnota fázového úhlu 89,0°, což odpovídá pojivu s dominující viskózní složkou. Rozdíl ve srovnání se silničním asfaltem 50/70 není výrazný, a tudíž i limitní hodnota je nižší jen o 2,0° (odpovídá to i malému rozdílu mezi limitními hodnotami G*). Naopak u skupiny asfaltových pojiv 20/30 je doporučeno výraznější snížení maximální hodnoty fázového úhlu odpovídající hodnotě 80,0°. Zvolené mezní hodnoty charakteristiky δ jsou na obr. 52 znázorněny vodorovnou červenou čarou.

V případě silničních asfaltů 50/70 je porovnávaný soubor pojiv dostatečně rozsáhlý, ale u ostatních gradací by bylo vhodnější skupiny rozšířit o další vzorky. Zejména u skupiny asfaltových pojiv s penetrací 20/30, která mají poměrně velkou směrodatnou odchylku u hodnoty G* upozorňující na značně proměnlivé hodnoty.

Rozdíl mezi hodnotami aritmetického průměru a mediánu jsou poměrně malé, což poukazuje na změřené výsledky bez extrémních hodnot. Nejvyšší rozdíl mezi aritmetickým průměrem a mediánem je u skupiny silničních asfaltů 50/70, uvedené platí jak pro charakteristiku G*, tak pro δ.



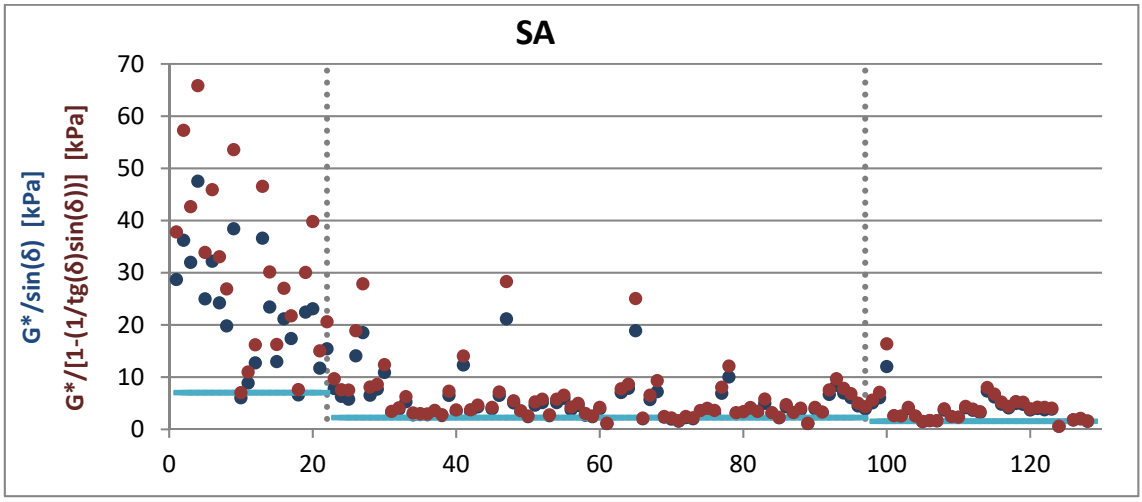
Obr. 52: Komplexní smykový modul a fázový úhel silničních asfaltů

Odolnost asfaltových pojiv proti tvorbě trvalých deformací se z oscilační zkoušky stanovuje nejčastěji pomocí parametru G*/sin(δ). Druhou možností je upravený parametr G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} používaný jen ojediněle. Tradiční parametr je zobrazen na obr. 53 modře a modifikovaný parametr červeně. Při porovnání obou parametrů je patrné, že modifikovaný parametr dosahuje vyšších hodnot, ale zároveň i vyšší směrodatné odchylky (tab. 5). Z pohledu 5% (10%) percentilu jsou hodnoty velmi podobné u obou metod. Pro silniční asfalty je možné určit minimální hodnoty parametru G*/sin(δ) 7,0 kPa, 2,2 kPa a 1,5 kPa pro jednotlivé skupiny pojiv s gradací 20/30, 50/70 a 70/100. Tyto limitní hodnoty jsou totožné s hodnotami navrženými pro G*. Jedná se o identické hodnoty z důvodu, že fázový úhel je většinou vyšší než 70,0° a tím ovlivňuje SHRP parametr jen velmi málo (sin 70,0° = 0,94).

V USA je definována mezní hodnota pro parametr G*/sin(δ) > 1,0 kPa. Ze 128 zkoumaných pojiv by této podmínce nevyhovělo pouze 1 pojivo. Je však nutné zdůraznit, že v USA se zkouška provádí při HKT, zatímco v ČR se zkouška provádí zpravidla při teplotě 60 °C.

Tab. 5: *Statistické údaje silničních asfaltů – G*/sin(δ) a G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} (T = 60 °C)*

		Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa]	Medián [kPa]	Směrodat. odchylka [kPa]	5% percentil [kPa]	10% percentil [kPa]	Návrh min. hodnoty [kPa]
$\frac{G^*}{\sin(\delta)}$	vše	128	8,0	4,3	8,9	1,6	2,1	-
	20/30	22	22,8	22,8	11,1	6,7	9,1	**7**
	50/70	75	5,2	3,9	3,9	2,1	2,4	**2,2**
	70/100	31	3,7	3,7	2,2	1,5	1,6	**1,5**
$\frac{G^*}{1-\left[\frac{1}{\mathrm{tg}(\delta)\sin(\delta)}\right]}$	vše	128	10,1	4,7	12,7	1,7	2,2	-
	20/30	22	31,2	30,1	16,3	7,8	11,4	-
	50/70	75	6,1	4,2	5,4	2,1	2,4	-
	70/100	31	4,1	3,9	2,9	1,5	1,6	-

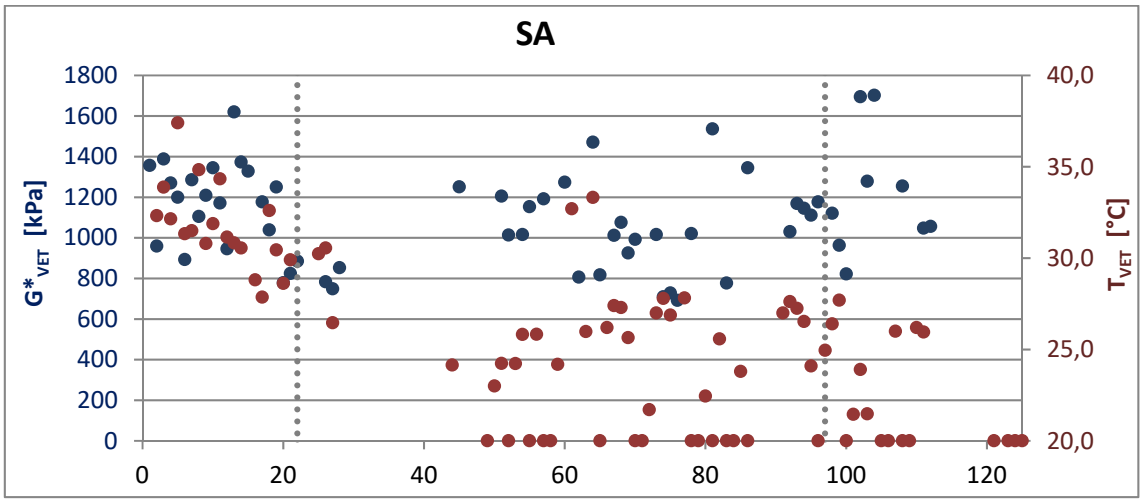


Obr. 53: Parametry indikující náchylnost k tvorbě trvalých deformací silničních asfaltů

Na obr. 54 je znázorněna viskoelastická teplota přechodu T_{VET} a tomu odpovídající komplexní smykový modul G^*_{VET}. U některých pojiv je T_{VET} nižší než 20 °C, ale měření byla prováděna v intervalu teplot 20-60 °C, a proto v těchto případech nebylo možné teplotu T_{VET} určit. Tato pojiva mají na obr. 54 T_{VET} = 20 °C. Jedná se o 14 pojiv ze skupiny silničních asfaltů 50/70 a 11 pojiv ze skupiny s gradací 70/100. U dalších 10 pojiv ze skupiny 70/100 se oscilační zkouška prováděla jen pro směrodatnou teplotu 60 °C, tudíž ani u těchto pojiv nelze stanovit T_{VET}. Pro tato pojiva nejsou na obr. 54 žádné hodnoty uvedeny. Stejné platí i pro 26 pojiv ze skupiny 50/70, díky čemuž je soubor porovnávaných pojiv výrazně oslaben. Statistické údaje jsou tedy relevantní pouze pro pojiva 20/30 (tab. 6). Všeobecně lze říci, že s vyšší gradací asfaltového pojiva klesá T_{VET}.

Tab. 6: *Statistické údaje silničních asfaltů – T_{VET} a G^*_{VET}*

		Počet pojiv	Aritm. průměr	Medián	Směrodat. odchylka
20/30	T_{VET} [°C]	21	31,7	31,5	2,2
	G^*_{VET} [kPa]	21	1162,1	1200,0	219,0



Obr. 54: Viskoelastická teplota přechodu a odpovídající komplexní smykový modul silničních asfaltů

4.1.2 POLYMEREM MODIFIKOVANÉ ASFALTY

V případě polymerem modifikovaných asfaltů (PMB) se jedná o skupinu se 40 vzorky. Nejvyšší hodnota G* byla naměřena u pojiva PMB 10/40-65, které je jediným zástupcem této gradace. Jedná se zároveň o nejtvrdší PMB a z toho logicky vyplývá i nejvyšší hodnota tuhosti. V následujících tabulkách není toto pojivo zařazeno, ale pro představu je doplněno v grafech (první vzorek). Zbylá PMB je možné rozdělit na dvě skupiny v závislosti na jejich penetraci. Symbol „X“ na konci názvu jednotlivých skupin značí různé hodnoty bodu měknutí. Ve skupině pojiv označených PMB 40/100-X jsou zahrnuta i pojiva s penetrací 40/80 nebo 45/80.

Druhá nejvyšší hodnota byla zjištěna u pojiva s nízkoviskózní přísadou FT parafínem první generace, jež je charakteristická tím, že zvyšuje tuhost. Je poněkud nečekané, že pojiva s nejvyšší hodnotou G* nemají zároveň nejnižší fázový úhel. Opět se potvrdilo, že pojiva s vyšší penetrací mají nižší tuhost, avšak překvapivě mají i průměrně nižší fázový úhel (tab. 7 a 8). Pravděpodobně je to způsobeno kolísavými hodnotami patrnými z vyšší směrodatné odchylky u pojiv PMB 40/100-X. Při porovnání percentilů fázových úhlů je již vidět nárůst hodnot s rostoucí gradací pojiv. Je nezbytné upozornit, že v případě skupiny PMB 40/100-X se jedná o soubor 10 vzorků, což je nedostatečně rozsáhlý statistický soubor.

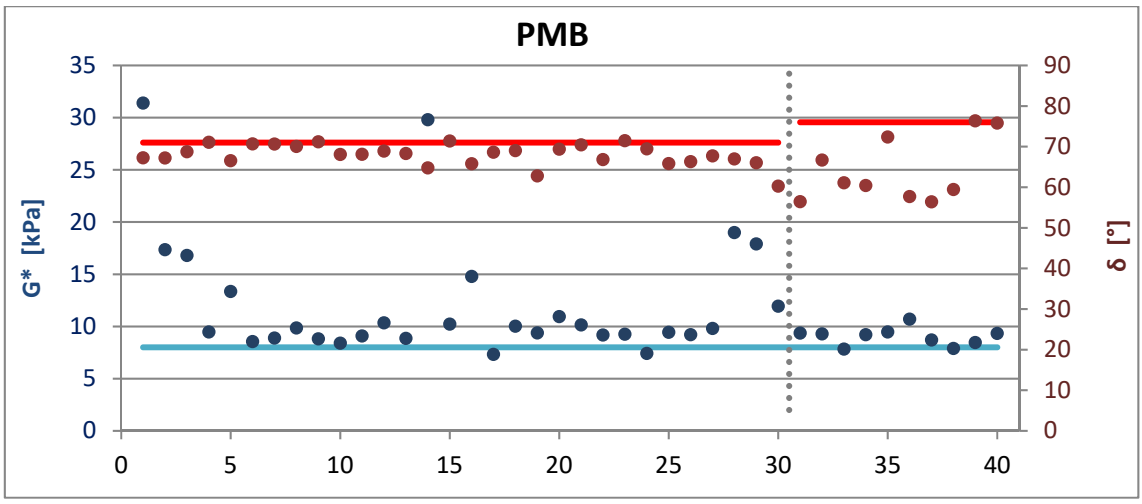
Rozdílné gradace PMB pojiv jsou v grafech odděleny svislou tečkovanou čarou – vlevo jsou PMB pojiva s penetrací 25/55 (první pojivo je ale s penetrací 10/40) a vpravo jsou PMB s penetrací v rozpětí 40/100. Na obr. 55 jsou zobrazeny obě základní charakteristiky včetně zvolených limitních hodnot. Je viditelné, že rozdíly mezi jednotlivými skupinami jsou nepatrné, a proto byla pro obě penetrační třídy navržena stejná minimální hodnota G* = 8,0 kPa. Naopak rozdíly u fázového úhlu jednotlivých skupin jsou výraznější a z tohoto důvodu byly stanoveny pro každou skupinu samostatné maximální hodnoty lišící se o 5,0°.

Tab. 7: *Statistické údaje pro PMB – G* (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa]	Medián [kPa]	Směrodat. odchylka [kPa]	5% percentil [kPa]	10% percentil [kPa]	Návrh min. hodnoty [kPa]
vše	39	10,9	9,4	4,2	7,8	8,3	-
PMB 25/55-X	29	11,6	9,8	4,7	7,8	8,5	**8,0**
PMB 40/100-X	10	9,0	9,3	0,8	7,9	7,9	**8,0**

Tab. 8: *Statistické údaje pro PMB – δ (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [°]	Medián [°]	Směrodat. odchylka [°]	95% percentil [°]	90% percentil [°]	Návrh max. hodnoty [°]
vše	39	67,1	68,1	4,8	72,7	71,4	-
PMB 25/55-X	29	68,0	68,3	2,6	71,3	71,1	**71,0**
PMB 40/100-X	10	64,3	60,8	7,9	76,1	75,9	**76,0**



Obr. 55: Komplexní smykový modul a fázový úhel PMB pojiv

Při porovnání dvou parametrů vypočítaných ze základních charakteristik G* a δ se znovu potvrdilo, že hodnoty upraveného parametru vycházejí vyšší (tab. 9). Jako limitní hodnota základního parametru G*/sin(δ) byla navržena hodnota 9,0 kPa, což je o 1,0 kPa více než v případě komplexního smykového modulu. Fázové úhly PMB pojiv jsou přibližně o 15° nižší než fázové úhly silničních asfaltů, díky čemuž více ovlivňují velikost parametru G*/sin(δ).

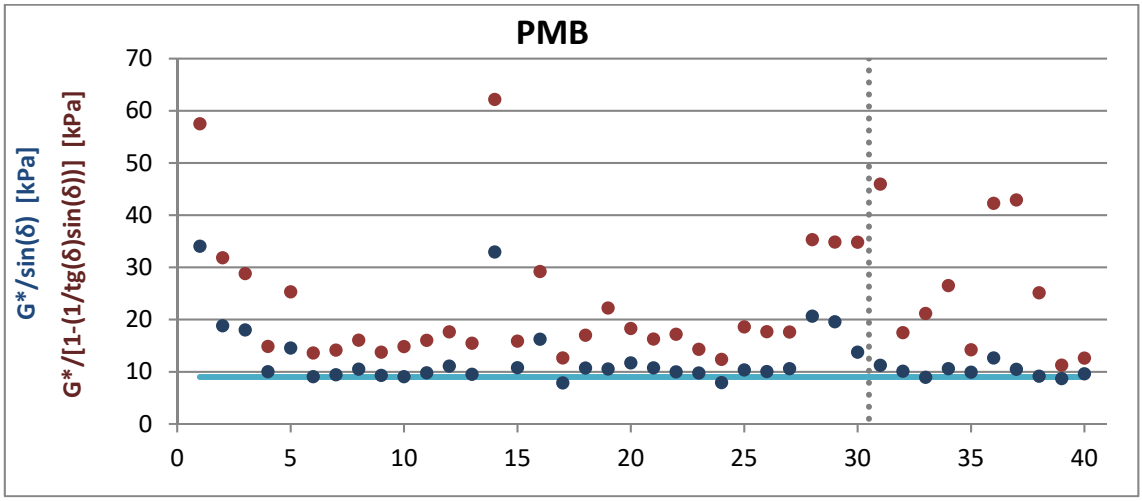
V USA platí pro nezestárlé silniční asfalty mezní hodnota 1,0 kPa, která se z našeho pohledu jeví jako velmi nízká hodnota, neboť ji všechna testovaná pojiva přesáhla s dostatečnou rezervou. Je nutné upozornit, že v USA se oscilační zkouška provádí při HKT a ta je u PMB pojiv většinou vyšší nebo rovna 64 °C. Vyšší zkušební teplota vede ke snížení modulu tuhosti i parametru G*/sin(δ).

Za zmínku stojí vyšší hodnoty modifikovaného parametru u pojiva s vyšší gradací způsobené nižším fázovým úhlem. Tímto příkladem se potvrzuje, že upravený parametr více zohledňuje hodnotu fázového úhlu než standardní parametr SHRP. U parametru SHRP vycházejí vyšší hodnoty pro pojiva s gradací 25/55, protože mají vyšší G*. Nejvyšší hodnoty

obou parametrů jsou u již zmiňovaných dvou pojiv s nejvyšší hodnotou komplexního smykového modulu. Na obr. 56 jsou graficky zobrazeny hodnoty obou parametrů pro všechna PMB pojiva a navržená minimální hodnota základního parametru G*/sin(δ).

Tab. 9: *Statistické údaje pro PMB – G*/sin(δ) a G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} (T = 60 °C)*

		Počet pojiv	Aritm. prům. [kPa]	Medián [kPa]	Směr. odch. [kPa]	5% percentil [kPa]	10% percentil [kPa]	Návrh min. hod. [kPa]
$\frac{G^*}{\sin(\delta)}$	vše	39	11,9	10,5	4,7	8,6	9,0	-
	PMB 25/55-X	29	12,5	10,5	5,3	8,4	8,9	**9**
	PMB 40/100-X	10	10,1	10,0	1,2	8,8	8,9	**9**
$\frac{G^*}{1-\left[\frac{1}{\mathrm{tg}(\delta)\sin(\delta)}\right]}$	vše	39	22,5	17,6	11,4	12,6	13,4	-
	PMB 25/55-X	29	21,3	17,2	12,4	13,0	13,7	-
	PMB 40/100-X	10	26,0	23,2	13,3	11,9	12,5	-

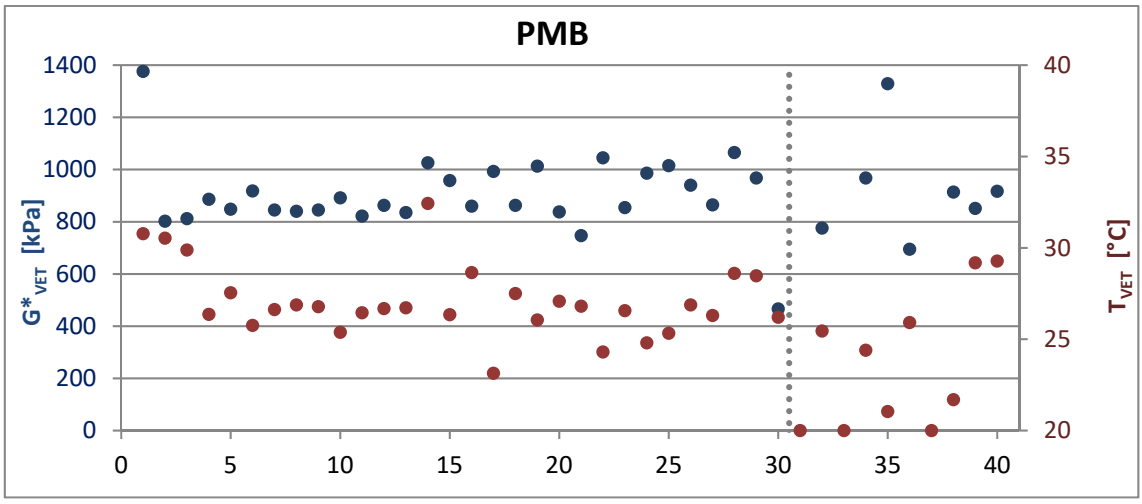


Obr. 56: Parametry indikující náchylnost k tvorbě trvalých deformací PMB pojiv

Při komparaci hodnot T_{VET} je opět patrné, že měkčí pojiva mají nižší T_{VET} (obr. 57). Ve třech případech skupiny pojiv PMB 40/100-X byla teplota T_{VET} nižší než 20 °C (na obr. 57 vyznačeno jako 20 °C). Z tohoto důvodu je z pohledu statistického hodnocení možné posoudit pouze pojiva PMB 25/55-X (tab. 10), u kterých měly všechny vzorky T_{VET} vyšší než 20 °C. Ve srovnání se silničními asfalty 20/30 mají tyto typy PMB pojiv teplotu T_{VET} nižší přibližně o 4 °C a zároveň i nižší hodnotu G^*_{VET} cca o 300 kPa. Je to způsobeno tím, že posuzované vzorky silničního asfaltu 20/30 mají při teplotě 60 °C dvojnásobně vyšší komplexní smykový modul tuhosti.

Tab. 10: *Statistické údaje pro PMB – T_{VET} a G^*_{VET}*

		Počet pojiv	Aritm. průměr	Medián	Směrodat. odchylka
PMB 25/55-X	T_{VET} [°C]	29	27,3	26,7	2,5
	G^*_{VET} [kPa]	29	886,6	863,0	115,6



Obr. 57: Viskoelastická teplota přechodu a odpovídající komplexní smykový modul PMB pojiv

4.1.3 ASFALTY MODIFIKOVANÉ PRYŽOVÝM GRANULÁTEM

Skupina pojiv CRMB je nejpočetnější a obsahuje 173 vzorků (obr. 58). Nejvyšších hodnot dosáhly vzorky měřené s mezerou 1 mm i přesto, že se jednalo o mletou pryž velikosti do 0,3 mm. Tato pojiva však jevila známky nehomogenity vedoucí k extrémním hodnotám empirických i zbylých funkčních zkoušek a z tohoto důvodu jsou vyřazena z porovnání. Další skupina pojiv s hodnotou G* větší než 100 kPa, jsou asfaltová pojiva se základním silničním asfaltem 20/30, který má sám o sobě vyšší tuhost. I tato skupinka se do stanovení limitních hodnot nezapočítává – jedná se pouze o 4 asfaltová pojiva. Z důvodu výrazného posunu nejvyšší hodnoty na svislé ose, nejsou zařazeny ani na následujících obrázcích (s výjimkou obr. 58 a 61).

Po odstranění výše popsaných vzorků se skupina CRMB skládá ze 162 pojiv. Základní statistické údaje uvedené v následujících tabulkách rozdělují pojiva s CRMB podle použitého základního asfaltového pojiva (50/70 nebo 70/100 označené jako báze) a dle množství pryžového granulátu (5-8 % hmotnosti asfaltového pojiva pojmenované < 10 % CR, 10-15 %-hm. asfaltového pojiva a 20-25 %-hm. asfaltového pojiva pojmenované > 15 % CR).

Tab. 11: *Statistické údaje CRMB pojiv – G* (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa]	Medián [kPa]	Směrodat. odchylka [kPa]	5% percentil [kPa]	10% percentil [kPa]	Návrh min. hodnoty [kPa]
vše	162	10,8	7,2	10,1	1,5	2,5	-
báze 50/70	121	12,0	8,7	11,1	1,4	2,5	**2,2**
báze 70/100	41	7,2	5,8	5,0	2,2	2,4	**2,2**
< 10 % CR	17	8,2	4,8	9,0	1,8	2,1	**2,0**
10-15 % CR	129	10,9	7,3	10,6	1,4	2,5	**2,0**
> 15 % CR	16	12,7	12,9	7,0	4,2	5,6	**5,0**

Tab. 12: *Statistické údaje CRMB pojiv – δ (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [°]	Medián [°]	Směrodat. odchylka [°]	95% percentil [°]	90% percentil [°]	Návrh max. hodnoty [°]
vše	162	74,8	76,8	8,8	86,3	84,9	-
báze 50/70	121	73,7	75,1	8,8	85,0	84,0	**86,0**
báze 70/100	41	78,0	79,5	8,1	86,8	86,3	**86,0**
< 10 % CR	17	79,8	82,0	7,1	87,8	86,1	**87,0**
10-15 % CR	129	74,6	76,0	8,5	85,7	84,3	**85,0**
> 15 % CR	16	71,3	71,2	10,7	85,2	82,6	**83,0**

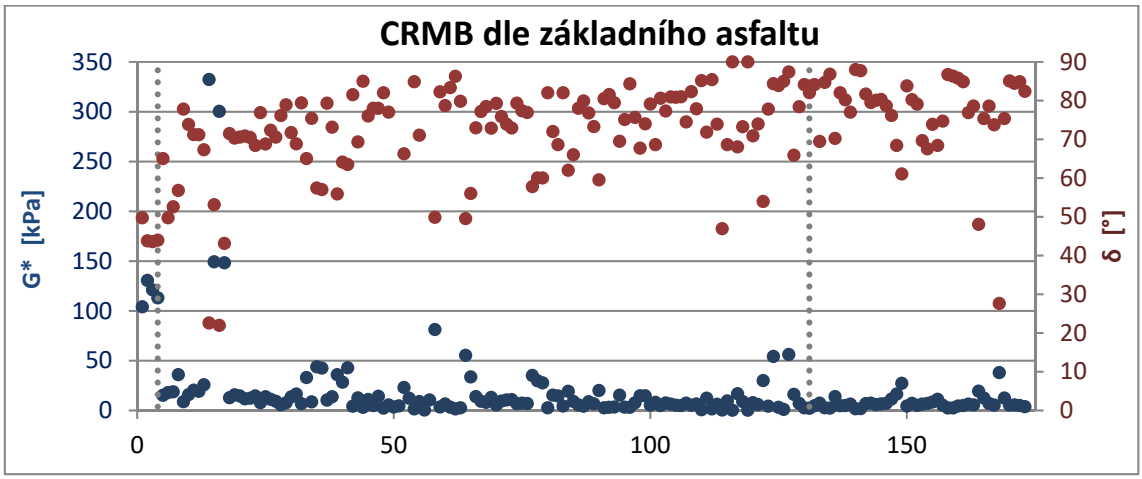
Z průměrných hodnot je opět zřejmé, že měkčí pojiva (báze 70/100) mají nižší hodnoty G* (tab. 11). Je zajímavé, že podle 5% percentilu tomu je přesně naopak. Pomocí 5-10 % percentilů je ale možné zvolit stejnou minimální hodnotu komplexního smykového modulu pro pojiva se základním asfaltem 50/70 i 70/100, pro které je vhodná hranice 2,2 kPa. Se zvyšujícím se množstvím pryžového granulátu dochází k nárůstu tuhosti. Z pohledu množství CR lze vymezit 2 limitní hodnoty. Pro CRMB s obsahem vyšším než 15 % CR je přiměřená hodnota G* > 5,0 kPa. Pro zbylé dvě podskupiny (do 10 % a 10-15 % CR) je možné navrhnout společnou minimální hodnotu 2,0 kPa.

Při porovnání fázových úhlů (tab. 12) je znovu vhodné navrhnout stejnou limitní hodnotu pro pojiva se základním asfaltovým pojivem 50/70 i 70/100 (δ < 86,0°). V případě rozdělení dle množství CR je nezbytné posuzovat každou skupinu zvlášť, protože jsou výrazněji závislé na dávkovaném množství pryžového granulátu. S vyšším obsahem CR klesá fázový úhel. Pro pojiva s nejnižším množstvím CR je stanovena maximální hodnota δ = 87,0°, pro střední dávkování (10-15 % CR) je limitní hodnota určena o 2,0° nižší a pro nejvyšší dávkování CR je nižší o další 2,0°.

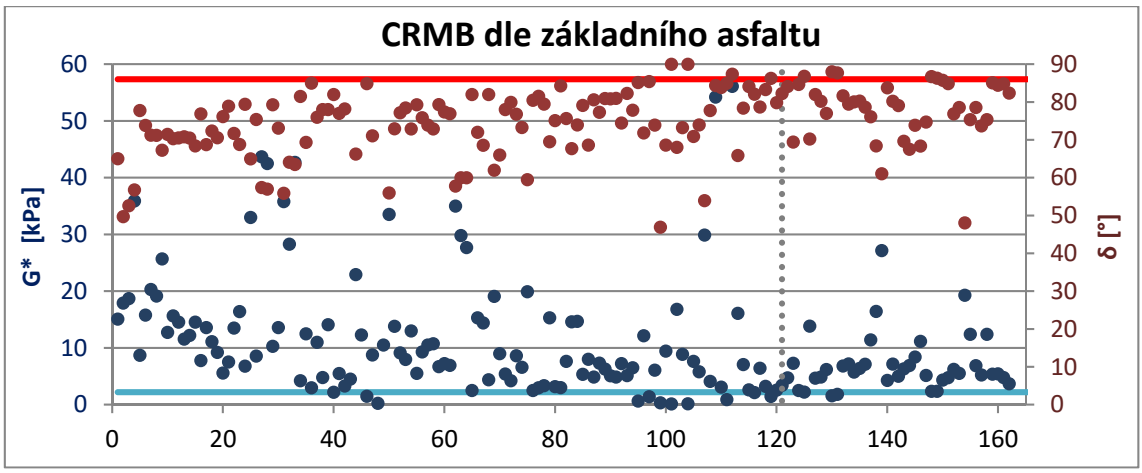
V případě rozdělení podle základního asfaltového pojiva obsahuje redukovaný graf 162 vzorků asfaltových pojiv (obr. 59) a zobrazuje limitní hodnotu charakteristiky G* (2,2 kPa) a maximální hodnotu fázového úhlu δ (86,0°). V grafu jsou svislou tečkovanou čarou odděleny vzorky s bází 50/70 a 70/100. Druhou možností je rozdělení pojiv v závislosti na množství dávkovaného pryžového granulátu (obr. 60), vlevo jsou pojiva s nejnižším množstvím CR a naopak vpravo s nejvyšším množstvím. Grafické zobrazení jednotlivých podskupin stejně jako navržené mezní hodnoty jsou znázorněny analogicky s rozdělením CRMB pojiv podle základního asfaltového pojiva.

Na základě německých (bavorských) technických předpisů pro standardizovaná pojiva typu RmB R (CRMB) [204] s penetrací 20/60 jsou stanoveny mezní požadavky na G* > 7,0 kPa a δ < 75,0° a pro varianty s penetrací 35/70 jsou mezní hodnoty G* > 12,0 kPa a δ < 65,0°. Jedná se o velmi přísná pravidla, neboť těmto limitním hodnotám odpovídají spíš průměrné hodnoty z našeho souboru sledovaných asfaltových pojiv. Fázový úhel nižší než 65,0 ° by splnila jen 1/7 vzorků. To je na druhé straně ale pochopitelné, protože CRMB pojiva testovaná na ČVUT v Praze vycházejí z víceleté optimalizace. Zkoušely se varianty s různou velikostí mleté pryže, ale i varianty s dalšími přísadami, které měly zajistit vylepšenou skladovací stabilitu výsledného CRMB.

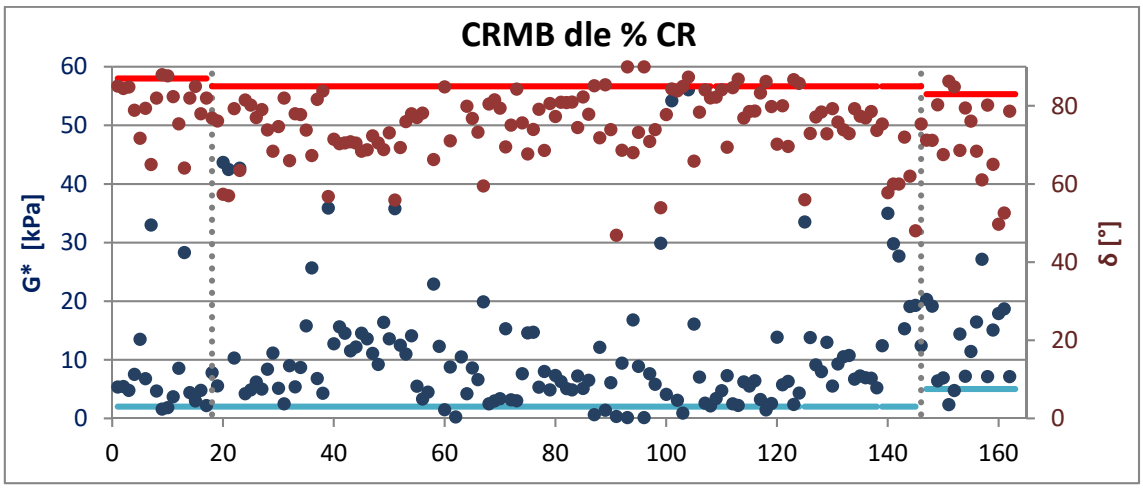
Z pohledu množství dávkovaného CR je vhodné zmínit, že soubor testovaných pojiv obsahuje dostatečně obsáhlou skupinu pouze v případě 10-15 % CR. Ostatní dvě skupiny jsou zastoupeny méně než 20 vzorky, což není dostatečně reprezentativní soubor dat k odvození limitních hodnot. Proto je nutné na navržené mezní hodnoty pohlížet s jistou mírou opatrnosti.



Obr. 58: Komplexní smykový modul a fázový úhel všech CRMB pojiv (rozdělen podle základního asfaltu)



Obr. 59: Hodnoty G a δ pro zredukovanou sadu CRMB pojiv (rozděleno podle základního asfaltu)*



Obr. 60: Hodnoty G a δ pro zredukovanou sadu CRMB pojiv (rozděleno podle množství CR)*

Na obr. 61 až 63 jsou graficky zobrazeny parametry odolnosti vůči vzniku trvalých deformací. Na hlavní ose je uveden tradiční parametr G*/sin(δ) – modře a na vedlejší ose je vyobrazen upravený parametr G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} – červeně. V předchozích kapitolách bylo možné tyto parametry vykreslit společně na hlavní ose, ale pro CRMB jsou hodnoty obou parametrů značně rozdílné. Na obr. 61 jsou znázorněny všechny hodnoty, stejně jako na obr. 58. Jak již bylo napsáno v kapitole 3.9, hodnoty upraveného parametru vychází záporné při fázovém úhlu nižším než 51,8°. Takto nízký fázový úhel byl naměřen u pojiv se základním asfaltem 20/30 a rovněž u asfaltových pojiv s extrémně vysokými hodnotami G*, jež byla vyřazena i z hodnocení v tab. 11 a 12.

Hodnoty upraveného parametru jsou extrémně vysoké v případě, že fázový úhel má velikost lehce nad 51,8° (do 53°). Na obr. 61 je vidět, že díky tomu má jedno pojivo hodnotu upraveného parametru přes 2000 kPa. I toto pojivo bylo vyřazeno z komparace. Na dalším grafu (obr. 62) jsou proto vyobrazeny jen pojiva, se kterými bylo počítáno v tab. 11 a 12, s vyloučením záporných hodnot. V tabulce 13 jsou zobrazeny statistické údaje obou parametrů (stejný soubor pojiv jako v tab. 11 a 12).

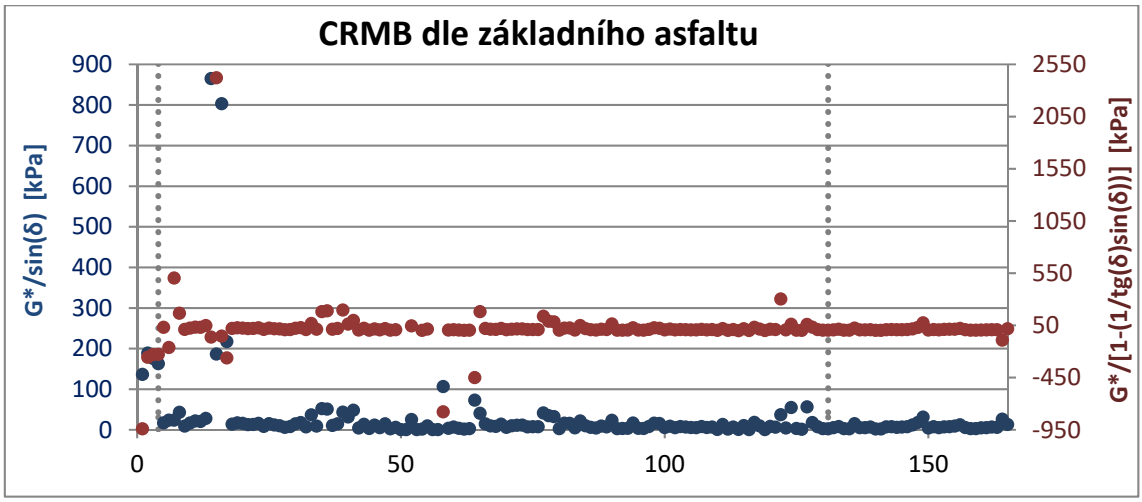
Hodnoty upraveného parametru jsou vždy vyšší než hodnoty parametru SHRP, ačkoli z obrázků 62 a 63 to tak nevypadá. Je to ale způsobeno jiným měřítkem svislých os. Potvrzují to i hodnoty mediánu a aritmetického průměru. Zatímco u aritmetického průměru jsou hodnoty parametru SHRP ve srovnání s upraveným parametrem přibližně poloviční, u mediánu již nejsou rozdíly tak velké. Zajímavé jsou především percentily u obou parametrů lišící se jen velmi málo. Pouze pro skupinu pojiv s více než 15 % CR je 5% percentil výrazně odlišný (dokonce záporný). Je to zapříčiněno jednou zápornou hodnotou a malým souborem porovnávaných pojiv, vedoucí ve výsledku k negativní hodnotě. Dále stojí za zmínku velké směrodatné odchylky u modifikovaného parametru.

Na základě 5% percentilu je možné stanovit limitní hodnoty pro parametr G*/sin(δ). Stejně jako pro charakteristiku G* lze určit jednotnou hodnotu pro obě penetrační třídy (báze 50/70 i 70/100). Jedná se o identickou hodnotu (2,2 kPa), jež byla vymezena i pro charakteristiku G*. V případě rozdělení CRMB podle množství použitého pryžového granulátu je možné opět zvolit shodné limitní hodnoty jako u charakteristiky G*, tzv. 2,0 kPa pro pojiva s maximálně 15 % CR a 5,0 kPa pro pojiva s množstvím CR vyšším než 15 %.

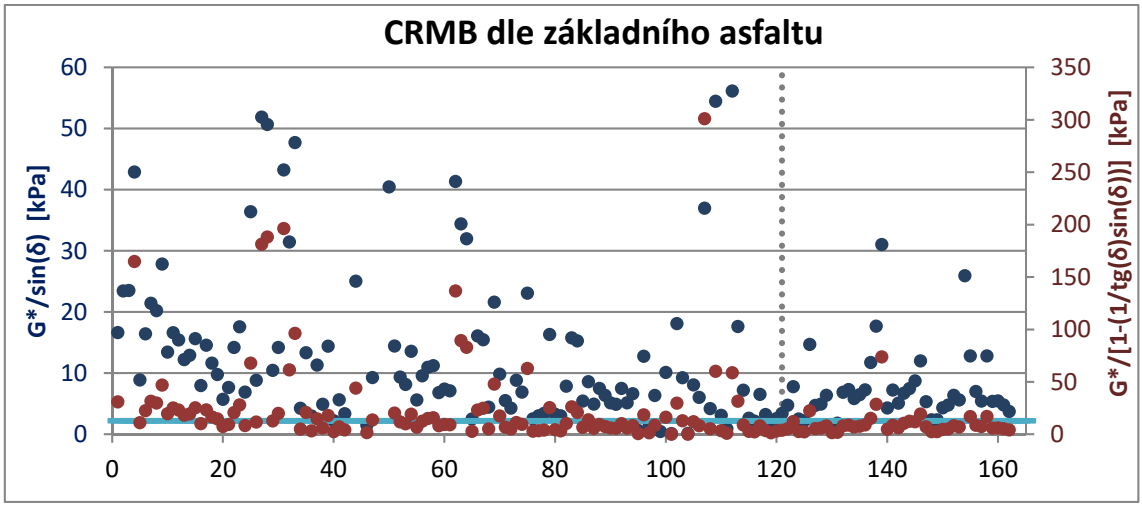
Tab. 13: *Statistické údaje CRMB pojiv – G*/sin(δ) a G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} (T = 60 °C)*

		Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa]	Medián [kPa]	Směr. odch. [kPa]	5% percentil [kPa]	10% percentil [kPa]	Návrh min. hodnoty [kPa]
$\frac{G^*}{\sin(\delta)}$	vše	162	11,8	7,5	11,6	1,6	2,5	-
	báze 50/70	121	13,3	8,9	12,7	1,5	2,6	**2,2**
	báze 70/100	41	7,6	5,9	6,0	2,2	2,4	**2,2**
	< 10 % CR	17	8,7	4,9	10,0	1,8	2,1	**2,0**
	10-15 % CR	129	12,0	7,8	12,2	1,5	2,5	**2,0**
	> 15 % CR	16	14,0	13,6	8,4	4,2	5,6	**5,0**

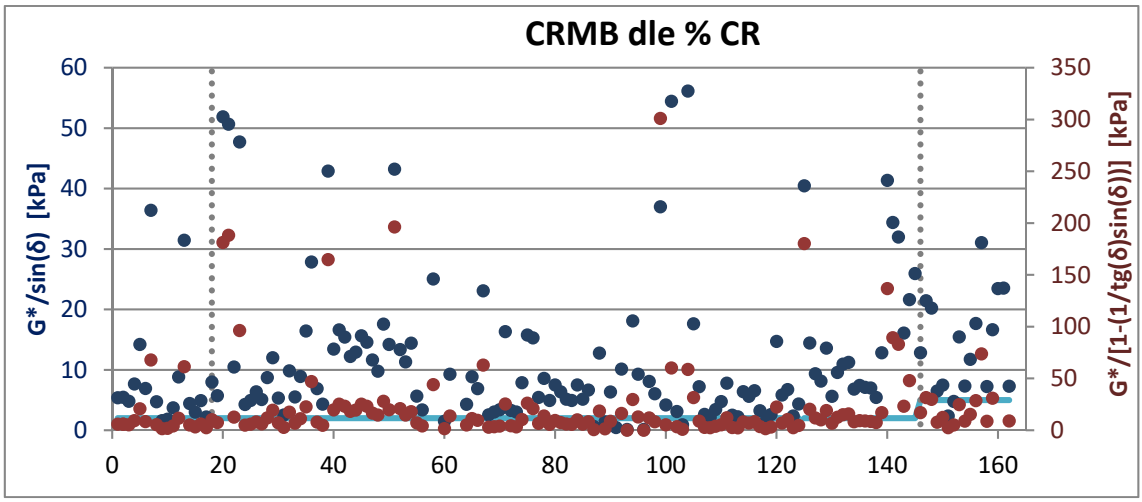
$\frac{G^*}{1-\left[\frac{1}{tg(\delta)\sin(\delta)}\right]}$								
	vše	162	23,5	9,4	58,0	1,6	2,6	-
	báze 50/70	121	29,1	11,8	65,6	1,4	2,9	-
	báze 70/100	41	7,7	7,2	19,8	1,9	2,5	-
	< 10 % CR	17	13,4	5,9	19,9	1,9	2,3	-
	10-15 % CR	129	24,1	10,2	46,9	1,5	2,8	-
	> 15 % CR	16	39,4	13,9	132,8	-38,7	3,9	-



Obr. 61: Parametry indikující náchylnost k tvorbě trvalých deformací všech CRMB pojiv



Obr. 62: Parametry indikující náchylnost k tvorbě trvalých deformací pro zredukovanou sadu CRMB pojiv (rozděleno podle základního asfaltu)



Obr. 63: Parametry indikující náchylnost k tvorbě trvalých deformací pro zredukovanou sadu CRMB pojiv (rozděleno podle množství CR)

Znovu se potvrdilo, že asfaltová pojiva se základním asfaltem 50/70 mají většinou T_{VET} vyšší než pojiva se základním asfaltem 70/100. Podstatná většina CRMB pojiv se základním asfaltem 50/70 má T_{VET} vyšší než 20 °C, ale u pojiv se základním asfaltem 70/100 je 12 vzorků, které mají T_{VET} nižší než 20 °C. Bohužel u řady asfaltových pojiv se základním asfaltem 50/70 nebyla zkouška prováděna od 20 °C výše, tudíž u všech vzorků není možné zjistit T_{VET}. Z tohoto důvodu zde žádná tabulka ani graf není uveden.

4.1.4 STÁRNUTÍ

Stárnutí asfaltových pojiv bylo provedeno na silničních asfaltech a polymerem modifikovaných pojivech. V tabulkách je rozděleno na krátkodobé stárnutí (metoda RTFOT nebo TFOT, případně extrahovaná pojiva) a dlouhodobé stárnutí (PAV, TFOT+PAV, RTFOT+PAV nebo 3xTFOT). Při měření na dlouhodobě zestárnutých vzorcích se použila geometrie DSR PP08. U zestárnutých pojiv se hodnotil pouze základní parametr SHRP G*/sin(δ) a ne upravený parametr G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]}.

4.1.4.1 SILNIČNÍ ASFALTY

K porovnání stárnutí silničních asfaltů je k dispozici 42 vzorků krátkodobě zestárnutých a 43 vzorků dlouhodobě zestárnutých. Většina silničních asfaltů je gradace 50/70 a ve dvou případech se jedná o gradaci 70/100. Krátkodobé stárnutí obsahuje i pojiva extrahovaná z vývrtů odebraných z vozovek starých přibližně 1 rok.

V tabulce 14 jsou základní statistické údaje charakteristiky G* a v tabulce 15 charakteristiky δ. Obě tabulky jsou doplněny o údaje pro nezestárlé silniční asfalty 50/70.

Tab. 14: *Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí – G* (T = 60 °C)*

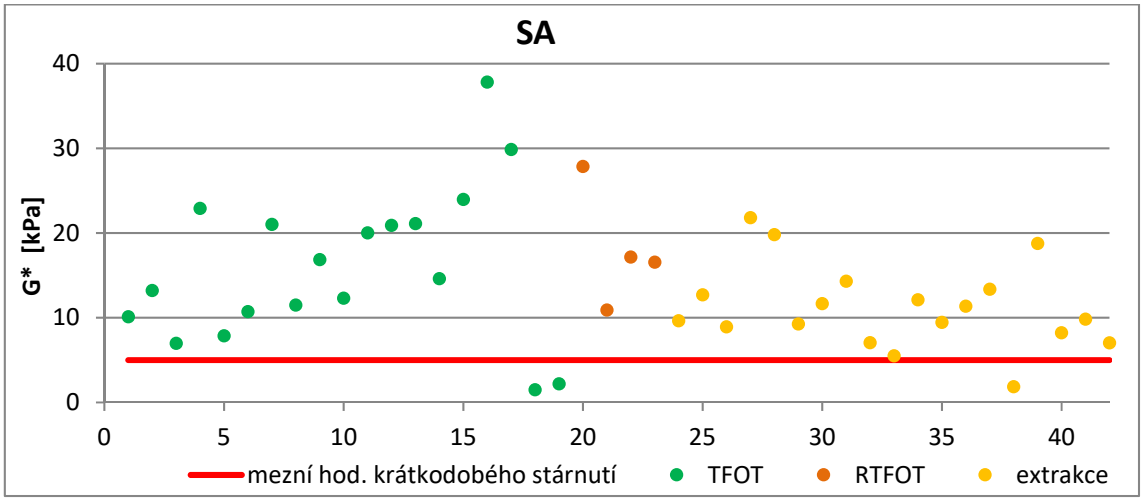
	Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa]	Medián [kPa]	Směrodat. odchylka [kPa]	5% percentil [kPa]	10% percentil [kPa]	Návrh min. hodnoty [kPa]
Nezestárlá 50/70	75	5,2	3,9	3,7	2,0	2,2	**2,2**
Krátkodobé stárnutí	42	14,1	12,2	7,7	2,4	7,0	**5,0**
Dlouhodobé stárnutí	43	86,9	74,1	50,4	32,8	36,0	**35,0**

Tab. 15: *Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí – δ (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [°]	Medián [°]	Směrodat. odchylka [°]	95% percentil [°]	90% percentil [°]	Návrh max. hodnoty [°]
Nezestárlá 50/70	75	83,8	84,7	3,6	87,2	87,0	**87,0**
Krátkodobé stárnutí	42	76,7	77,2	5,3	84,3	83,0	**84,0**
Dlouhodobé stárnutí	43	68,7	69,7	5,4	75,1	74,7	**75,0**

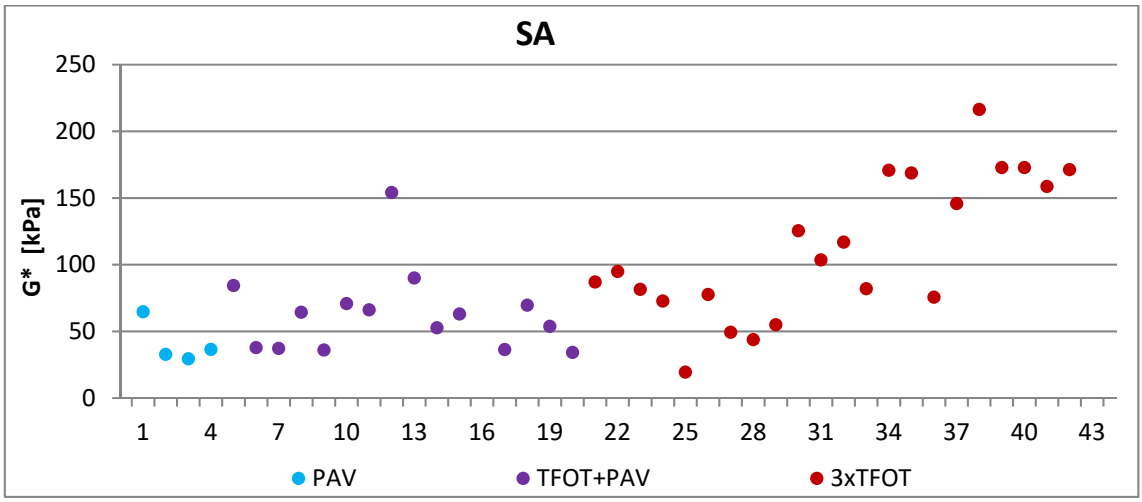
Na obr. 64 jsou zobrazeny hodnoty G* po krátkodobém stárnutí včetně navržené limitní hodnoty. Pro pojiva krátkodobě zestárnutá je možné navrhnout mezní hodnotu 5,0 kPa. Jedná se tedy o více než dvojnásobnou hodnotu v porovnání s nezestárlými asfaltovými pojivy. Hodnota 5,0 kPa se nachází mezi 5% a 10% percentilem. Po stárnutí metodou TFOT nevyhověly dva vzorky modifikované stejnou přísadou a lze usuzovat, že tato přísada způsobuje pokles tuhosti a tedy snižuje odolnost vůči vzniku trvalých deformací. Jejich hodnoty G* jsou tak nízké, že by nesplnily ani podmínku pro nezestárlá asfaltová pojiva 50/70. Pro dlouhodobé stárnutí není třeba stanovit limitní hodnoty, neboť dlouhodobé stárnutí nemá vliv na tvorbu trvalých deformací, a proto je zvolená mezní hodnota jen orientační, aby byl vidět rozdíl ve srovnání s nezestárlým vzorkem.

Dle očekávání došlo vlivem stárnutí ke snížení fázového úhlu, což úzce souvisí s nárůstem viskozity a křehkosti pojiva. U dlouhodobého stárnutí je snížení fázového úhlu ještě výraznější, průměrné hodnoty dlouhodobého stárnutí jsou cca o 8° nižší v konfrontaci s krátkodobým stárnutím (tab. 15). U dlouhodobého stárnutí jsou průměrné hodnoty G* dokonce vyšší než jejich fázové úhly.



Obr. 64: Komplexní smykový modul silničních asfaltů po krátkodobém stárnutí

Další graf (obr. 65) vykresluje naměřené hodnoty komplexního smykového modulu vzorků vystavených dlouhodobému stárnutí. Je patrné, že asfaltová pojiva vystavená laboratornímu stárnutí metodou 3xTFOT mají vyšší hodnoty G* než silniční asfalty zestárnuté metodou TFOT+PAV.



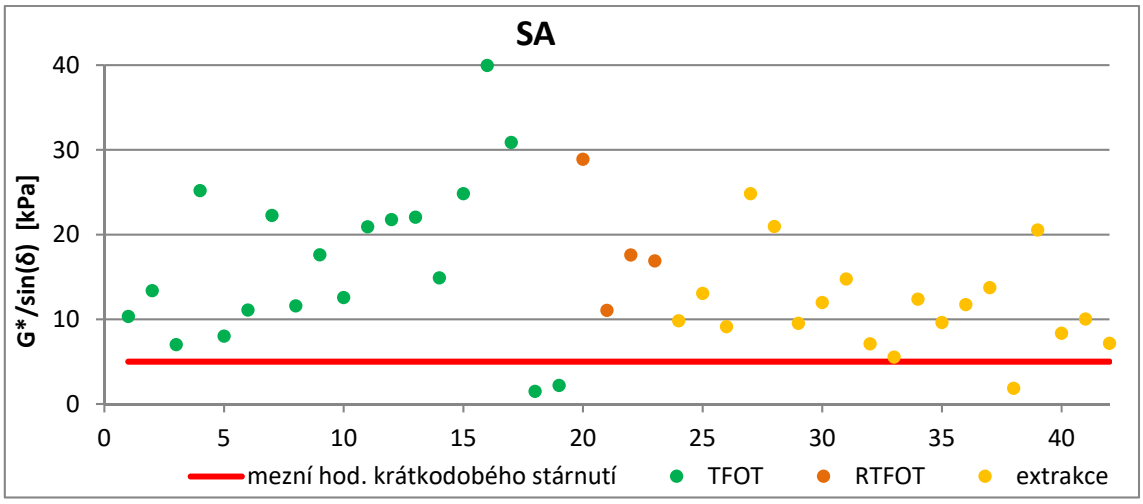
Obr. 65: Komplexní smykový modul silničních asfaltů po dlouhodobém stárnutí

Hodnoty parametru SHRP (tab. 16) jsou velmi podobné hodnotám G*. Stejně tak i percentilové výsledky, díky čemuž je možné ponechat limitní hodnoty stejné jako pro G*, tzv. $G^*/\sin(\delta) > 5{,}0$ kPa pro pojiva krátkodobě zestárnutá. Je to opět způsobeno tím, že fázový úhel je většinou větší než 70,0° a na základě toho je parametr SHRP jen velmi málo ovlivněn. Na obr. 66 jsou hodnoty parametru citlivosti silničních asfaltů po krátkodobém stárnutí spolu s navrženou mezní hodnotou. Při porovnání s obrázkem 64 je viditelné, že jsou téměř totožné a stanovenou podmínku nesplní stejná pojiva.

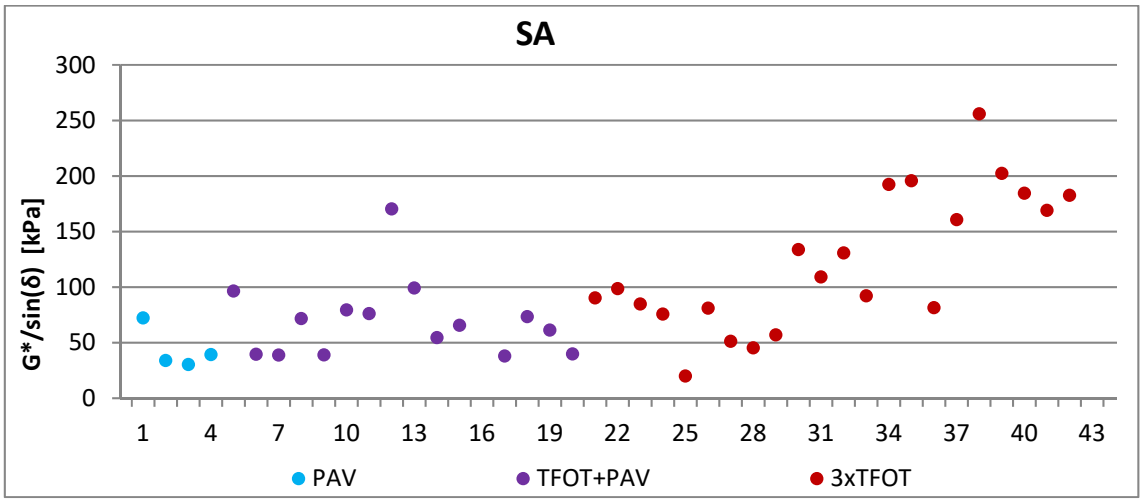
Na obr. 67 jsou hodnoty parametru citlivosti pro dlouhodobě zestárnuté vzorky. Znovu je možné konfrontovat obr. 67 s obr. 65, graficky jsou jednotlivé vzorky téměř identické, ale hodnoty parametrů citlivosti jsou nepatrně vyšší, neboť fázové úhly po dlouhodobém stárnutí jsou ve srovnání s krátkodobým stárnutím výrazněji nižší.

Tab. 16: *Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí – $G^*/\sin(\delta)$ (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa]	Medián [kPa]	Směrodat. odchylka [kPa]	5% percentil [kPa]	10% percentil [kPa]	Návrh min. hodnoty [kPa]
Nezestárlá 50/70	75	5,2	3,9	3,9	2,1	2,4	**2,2**
Krátkodobé stárnutí	42	14,6	12,5	8,2	2,4	7,0	**5,0**
Dlouhodobé stárnutí	43	95,1	80,2	57,6	34,1	38,7	**35,0**



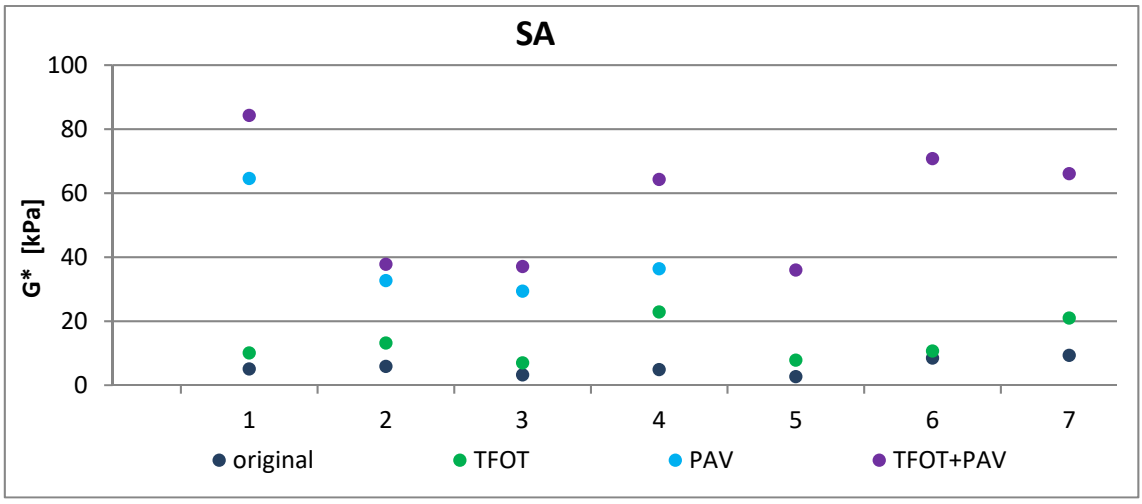
Obr. 66: Parametr citlivosti vzniku trvalých deformací silničních asfaltů po krátkodobém stárnutí



Obr. 67: Parametr citlivosti vzniku trvalých deformací silničních asfaltů po dlouhodobém stárnutí

Porovnání různých typů stárnutí je možné i na základě 7 silničních asfaltů gradace 50/70, na kterých byla provedena simulace stárnutí krátkodobým i dlouhodobým způsobem. Samostatně provedené stárnutí metodou PAV bylo provedeno na nezestárlých vzorcích jen u 4 pojiv. Hodnoty charakteristiky G* silničních asfaltů jsou znázorněny na obr. 68. Potvrzuje se, že laboratorním stárnutím se zvyšuje komplexní smykový modul. Krátkodobým stárnutím nedochází k až tak výraznému zvýšení hodnot G*, naopak dlouhodobým stárnutím je nárůst několikanásobný.

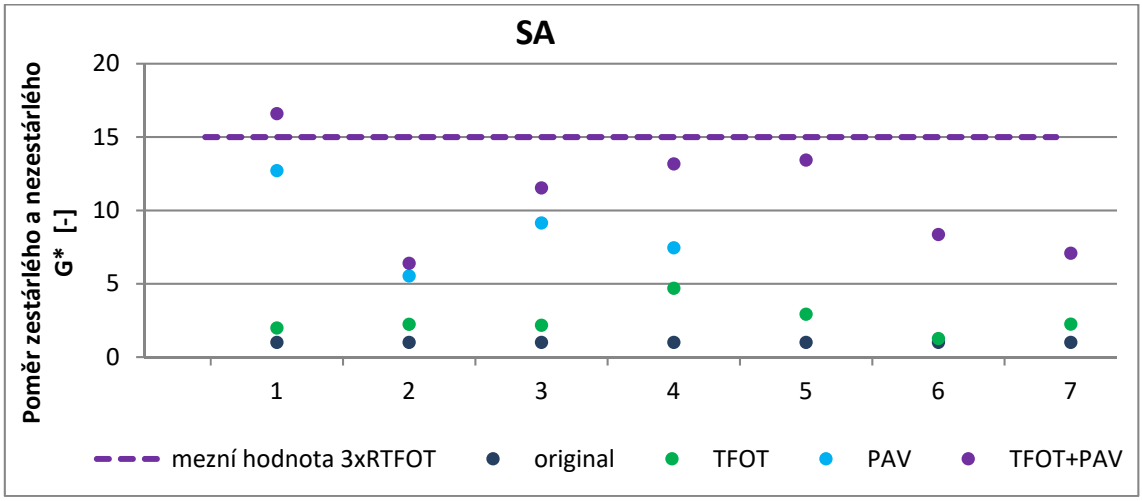
Lze si i povšimnout, že hodnoty dlouhodobého stárnutí metodou TFOT+PAV přibližně odpovídají hodnotám při sečtení samostatně provedené zkoušky PAV a krátkodobého stárnutí TFOT. Z tohoto pohledu by bylo možné urychlit proces zkoušení dlouhodobého stárnutí, kdy by bylo dostačující provést na nezestárlém vzorku stárnutí PAV a současně TFOT. Nemuselo by se čekat na simulaci stárnutí metodou TFOT, na níž se následovně simuluje stárnutí dlouhodobé metodou PAV. Je nezbytné upozornit, že se jedná o velmi malý počet vzorků a toto tvrzení by bylo potřeba dále ověřit.



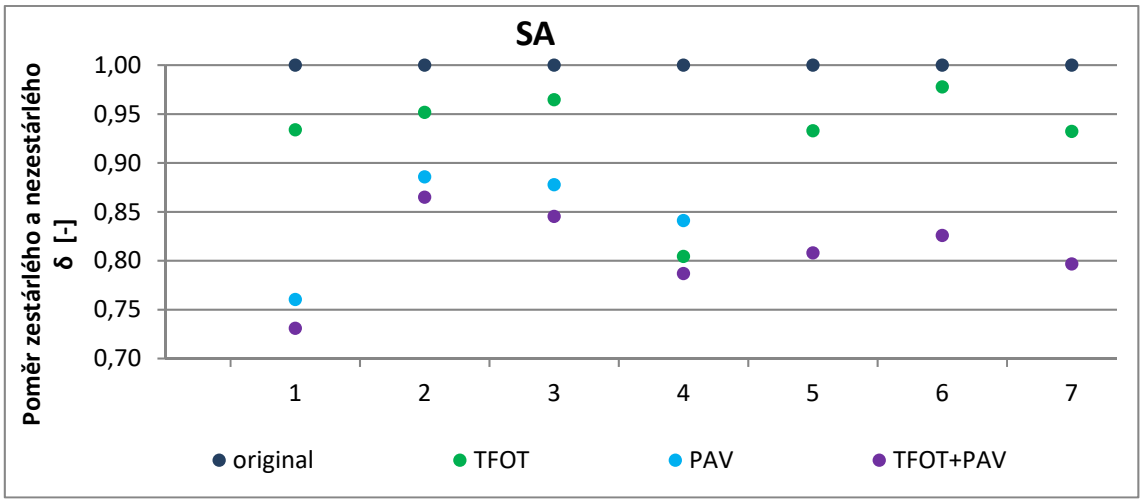
Obr. 68: Vliv stárnutí na komplexní smykový modul silničních asfaltů 50/70

Zajímavé porovnání je znázorněno na obr. 69 zobrazující poměr hodnot G* zestárlého vzorku k nezestárlému. Pro nezestárlé pojivo je ve všech případech hodnota poměru rovna 1. Podle návrhu certifikované Metodiky pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí [198], byla navržena jako mezní hodnota 15 násobek. Tato limitní hodnota dovoluje maximálně 15 násobné zvýšení komplexního smykového modulu po dlouhodobém stárnutí metodou 3xRTFOT. V našem případě dlouhodobé stárnutí reprezentuje metoda TFOT+PAV, pro kterou pouze jeden vzorek nevyhoví stanovenému kritériu. Zatímco u krátkodobého stárnutí je změna velmi nízká (s výjimkou pojiva č. 4), po dlouhodobém stárnutí je vliv výraznější. Pokud bychom chtěli viditelněji ilustrovat vliv krátkodobého stárnutí, bylo by vhodnější použít logaritmické měřítko.

Obdobně lze vykreslit hodnoty fázového úhlu (obr. 70). Všeobecně lze říci, že kopírují trend hodnot komplexního smykového modulu. Nejvyšší změna po simulaci dlouhodobého stárnutí je patrná u vzorku č. 1, což koresponduje se změnou G*. Výraznější rozdíl je u pojiva č. 4, kde došlo k výraznému snížení fázového úhlu již po krátkodobém stárnutí, ale i pro charakteristiku G* byl u tohoto vzorku rozdíl největší. Překvapivé je, že u asfaltového pojiva č. 4 byla při krátkodobém stárnutí změna větší než u dlouhodobého stárnutí metodou PAV.

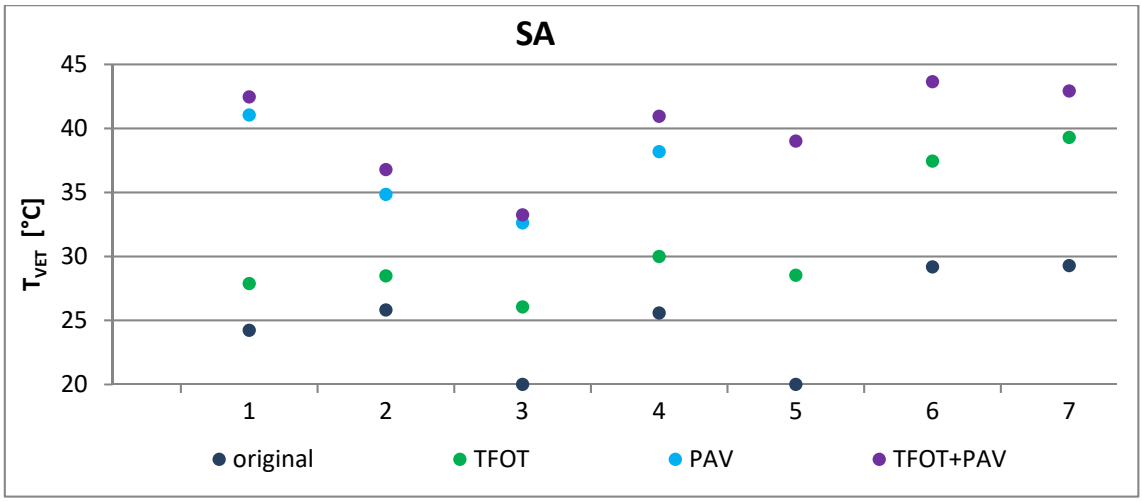


Obr. 69: Poměr G zestárlého k nezestárlému vzorku silničních asfaltů 50/70*



Obr. 70: Poměr δ zestárlého k nezestárlému vzorku silničních asfaltů 50/70

Pro těchto 7 silničních asfaltů je dále možné porovnat viskoelastickou teplotu přechodu (obr. 71). V případě nezestárlého vzorku číslo 3 a 5 byla T_{VET} nižší než 20 °C, a proto je v grafu zobrazena jako 20 °C. Z obr. 71 je zřejmé, že stárnutím dochází ke zvýšení viskoelastické teploty přechodu.



Obr. 71: Viskoelastická teplota přechodu zestárlých silničních asfaltů 50/70

4.1.4.2 POLYMEREM MODIFIKOVANÉ ASFALTY

K hodnocení PMB vystaveným laboratornímu stárnutí je k dispozici skupina 13 asfaltových pojiv, pro něž jsou k dispozici hodnoty krátkodobého i dlouhodobého stárnutí (s výjimkou třech pojiv, pro která nebyla zkouška provedena po dlouhodobém stárnutí při teplotě 60 °C). Pro první 4 pojiva byla samostatně provedena i zkouška PAV.

Vliv stárnutí na charakteristiku G* je patrný na obrázku 72. Jedná se o poměrně malý výběrový soubor, a proto jsou navržené hodnoty zcela orientační. Jako mezní hodnota byla určena tuhost 12,0 kPa pro krátkodobé stárnutí (metoda TFOT nebo RTFOT). Vycházelo se opět z hodnot 5-10% percentilů (tab. 17). V porovnání s nezestárlými hodnotami PMB pojiv došlo k očekávanému zvýšení tuhosti. Navýšení průměrných hodnot bylo přibližně dvojnásobné, ale limitní hodnota je zvýšena jen 1,5 násobně. V případě dlouhodobého stárnutí (laboratorní

metoda TFOT+PAV nebo RTFOT+PAV) se průměrné hodnoty G* i stanovené minimální hodnoty zvýšily o 2,5 násobek v komparaci s krátkodobým stárnutím. Dle očekávání dlouhodobé stárnutí vede ke snížení fázových úhlů (tab. 18), ale u krátkodobého stárnutí není rozdíl až tak výrazný.

Tab. 17: *Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí – G* (T = 60 °C)*

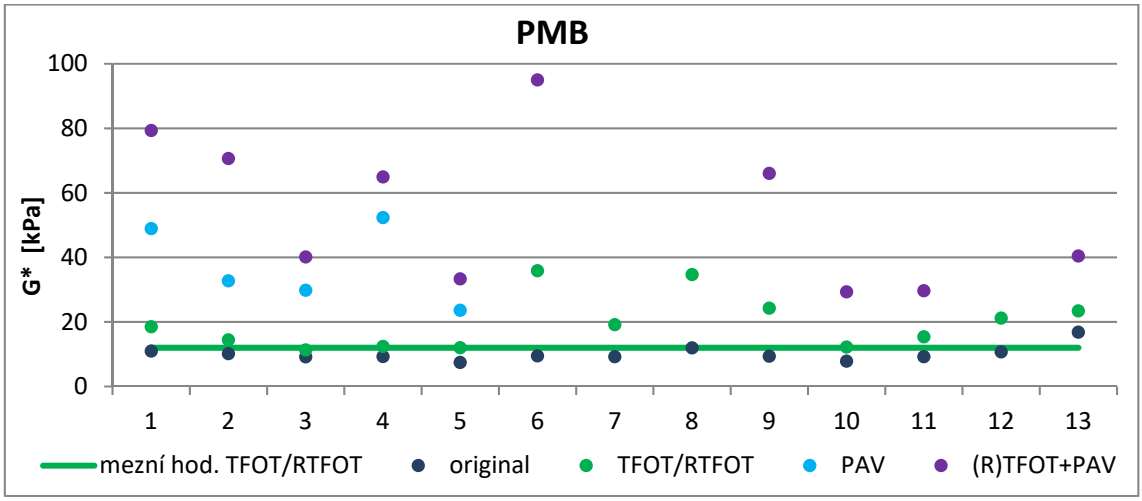
	Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa]	Medián [kPa]	Směrodat. odchylka [kPa]	5% percentil [kPa]	10% percentil [kPa]	Návrh min. hodnoty [kPa]
Nezestárlá	13	10,1	9,4	2,3	7,7	8,1	**8,0**
TFOT/RTFOT [(1)]	13	19,6	18,5	8,2	11,7	12,0	**12,0**
(R)TFOT+PAV [(2)]	10	54,9	52,7	23,2	29,5	29,6	**30,0**

[(1)]laboratorní stárnutí metodou TFOT nebo RTFOT
[(2)]laboratorní stárnutí metodou TFOT+PAV nebo RTFOT+PAV

Tab. 18: *Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí – δ (T = 60 °C)*

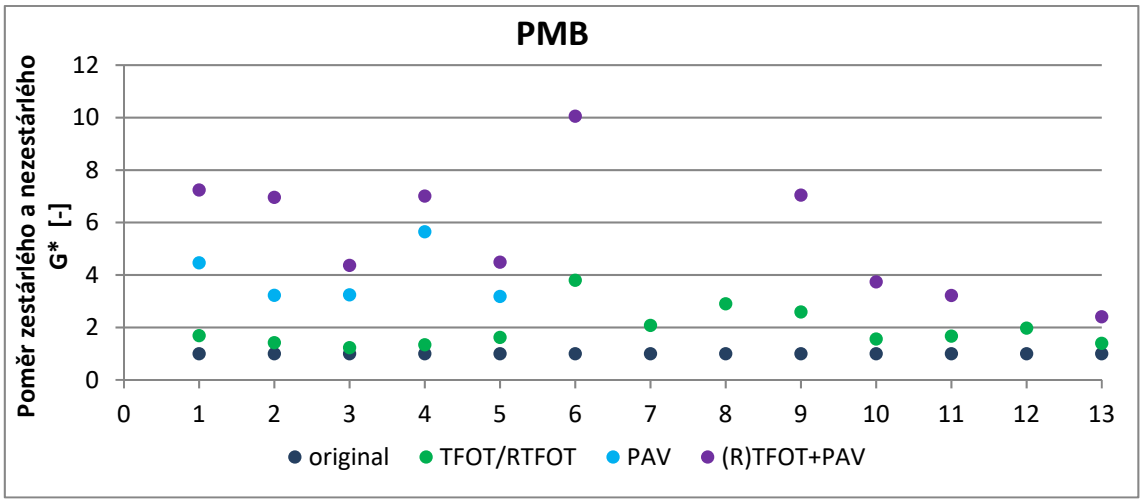
	Počet pojiv	Aritm. průměr [°]	Medián [°]	Směrodat. odchylka [°]	95% percentil [°]	90% percentil [°]	Návrh max. hodnoty [°]
Nezestárlá	13	65,0	66,3	5,1	70,9	70,3	**71,0 (76,0)** [(1)]
TFOT/RTFOT	13	63,2	65,4	5,2	69,9	69,4	**70,0**
(R)TFOT+PAV	10	60,2	59,2	3,4	65,8	64,0	**65,0**

[(1)]první uvedená hodnota je zvolena pro pojiva PMB 25/55-X a hodnota v závorce je navržena pro pojiva PMB 40/100-X



Obr. 72: Vliv stárnutí na komplexní smykový modul PMB pojiv

Na obr. 73 je znázorněn poměr hodnot komplexního smykového modulu zestárlých a nezestárlých pojiv. V certifikované metodice [198] není pro PMB pojiva definována žádná maximální hodnota, ale je zřetelně vidět, že ve srovnání se silničními asfalty je vliv stárnutí u PMB pojiv nižší (nižší hodnoty poměrů).

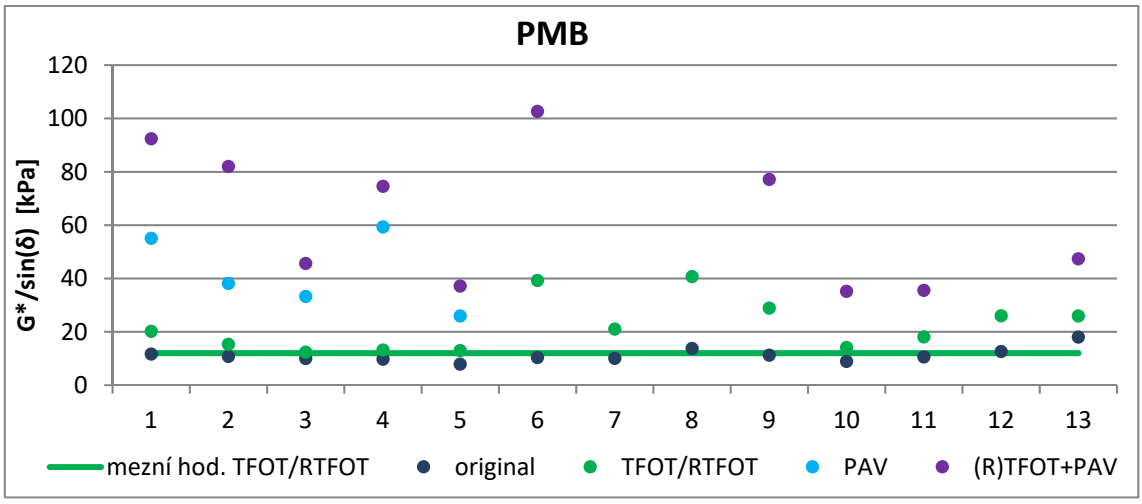


Obr. 73: Poměr G zestárlého k nezestárlému vzorku PMB pojiv*

Hodnoty parametru SHRP G*/sin(δ) (tab. 19) jsou jen o trochu vyšší než hodnoty G* (tab. 17). U krátkodobého stárnutí se jedná o rozdíl pouze 1,0 kPa z pohledu 5% a 10% percentilů. A z tohoto důvodu je limitní hodnota navýšena také jen o 1,0 kPa, na hodnotu 13,0 kPa. Navýšení parametru citlivosti PMB pojiv o 1,0 kPa je stejné jako v případě nezestárlých PMB pojiv. V USA se za limitní hodnotu přijímá 2,2 kPa, kterou všechna testovaná pojiva znovu přesáhla s dostatečnou rezervou. Hodnoty parametru SHRP po dlouhodobém stárnutí jsou uvedeny pouze pro ilustraci, ale z hlediska odolnosti vůči trvalým deformacím nemají podstatný význam. Na obr. 74 jsou zobrazeny hodnoty parametru G*/sin(δ) pro všechny stupně stárnutí PMB pojiv spolu s navrženou minimální hodnotou pro simulované krátkodobé stárnutí.

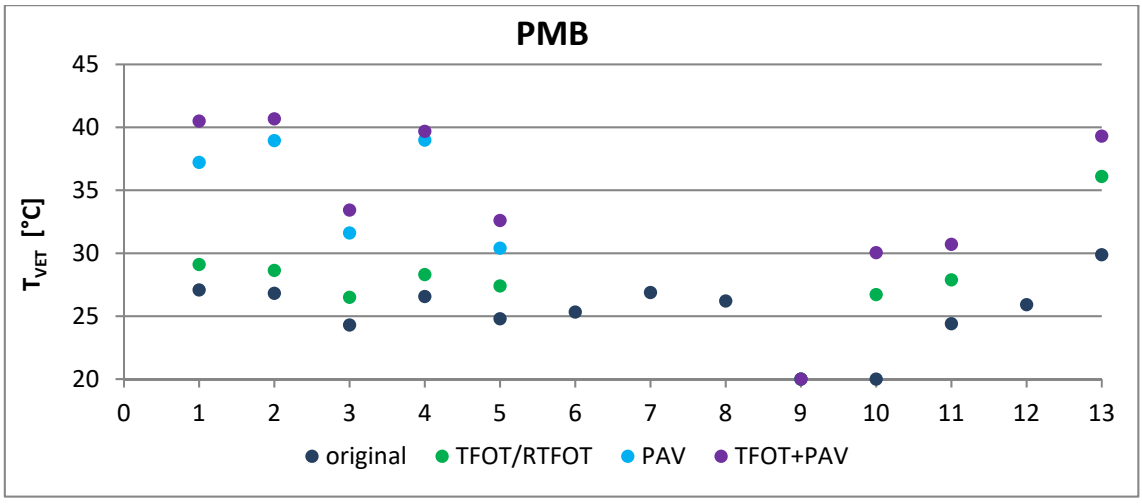
Tab. 19: *Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí – G*/sin(δ) (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa]	Medián [kPa]	Směrodat. odchylka [kPa]	5% percentil [kPa]	10% percentil [kPa]	Návrh min. hodnoty [kPa]
Nezestárlá	13	11,2	10,6	2,5	8,5	9,1	**9,0**
TFOT/RTFOT	13	22,2	20,2	9,6	12,7	13,0	**13,0**
(R)TFOT+PAV	10	63,0	61,0	25,5	35,4	35,5	**35,0**



Obr. 74: Hodnoty parametru citlivosti zestárlých PMB pojiv

Viskoelastická teplota přechodu se zvyšuje se stupněm stárnutí (obr. 75). Dále je evidentní, že dlouhodobé stárnutí má výraznější vliv. Bohužel pro všechna PMB pojiva se měření neprovádělo od 20 °C, a proto nebylo možné určit všechny T_{VET}. Navíc u některých pojiv je teplota T_{VET} nižší než 20 °C.

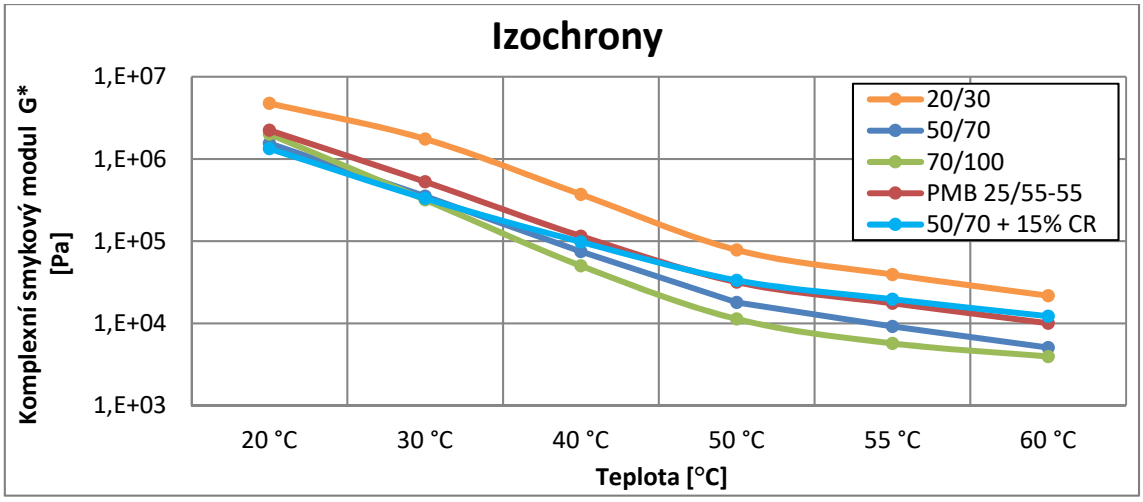


Obr. 75: Viskoelastická teplota přechodu zestárlých PMB pojiv

4.1.5 IZOCHRONY A IZOTERMY

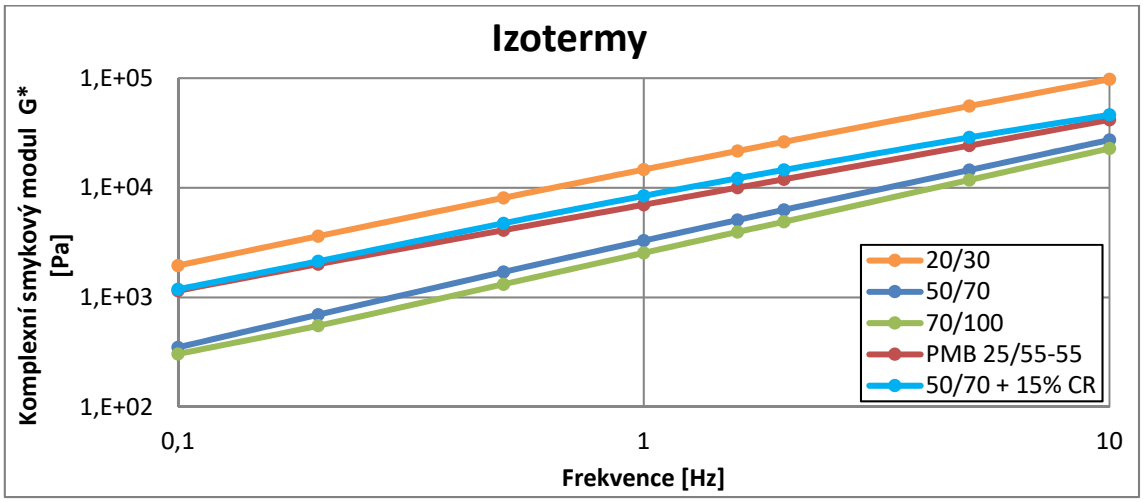
Nejjednodušším způsobem zobrazení výsledků oscilační zkoušky FS je použití izochron nebo izoterm. Podrobnější vysvětlení jednotlivých grafů je v kapitole 3.9.2. V obou diagramech je možné znázornit jak komplexní smykový modul, tak fázový úhel. Na obr. 76 jsou vyneseny hodnoty G* v závislosti na teplotě (izochrony) pro typická pojiva vybraná z jednotlivých skupin porovnávaných v předchozích kapitolách. Uvedené hodnoty jsou pro pojiva v nezestárlém stavu a frekvenci zatížení 1,59 Hz. Na grafu jsou zachyceny 3 silniční asfalty různé gradace, jeden polymerem modifikovaný asfalt a silniční asfalt modifikovaný 15 % pryžového granulátu. Právě pojivo s CR má nejmenší teplotní citlivost – izochrona je nejplošší. Nejtvrdší pojivo 20/30

má nejvyšší hodnoty G* v celém rozsahu teplot a naopak nejměkčí silniční asfalt 70/100 má při nejvyšší teplotě nejnižší hodnotu G*.



Obr. 76: Izochrony komplexního smykového modulu

Následující obrázek 77 zachycuje závislost komplexního smykového modulu na frekvenci zatížení (izotermy) při shodné teplotě 60 °C. Je možné si všimnout, že rozdíl mezi silničními pojivy gradace 50/70 a 70/100 není až tak výrazný, stejně jako u pojiva modifikovaného pryžovým granulátem a PMB. Opět má nejvyšší hodnoty G* silniční asfalt 20/30 v celém frekvenčním rozsahu.



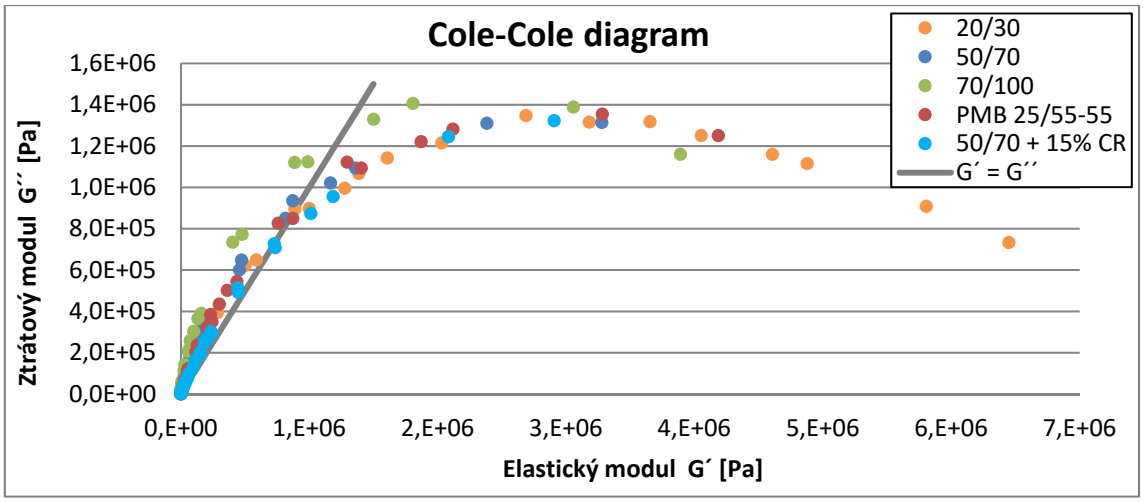
Obr. 77: Izotermy komplexního smykového modulu

4.1.6 COLE-COLE A BLACK DIAGRAM

Další možností zobrazení je Cole-Cole diagram (obr. 78), ve kterém se poměřuje viskózní a elastická složka komplexních smykových modulů. Za lepší pojivo lze považovat takové, jež dosahuje nižších hodnot ztrátového modulu (viskózní složka) a elastický modul (elastická složka) je pokud možno co největší. [205]

Na obr. 78 je vidět, že zpočátku dominuje viskózní část komplexního smykového modulu (měřeno při vyšší teplotě, kdy asfaltové pojivo více teče). Později již převládá složka elastického modulu odpovídající nižší teplotě zkoušky.

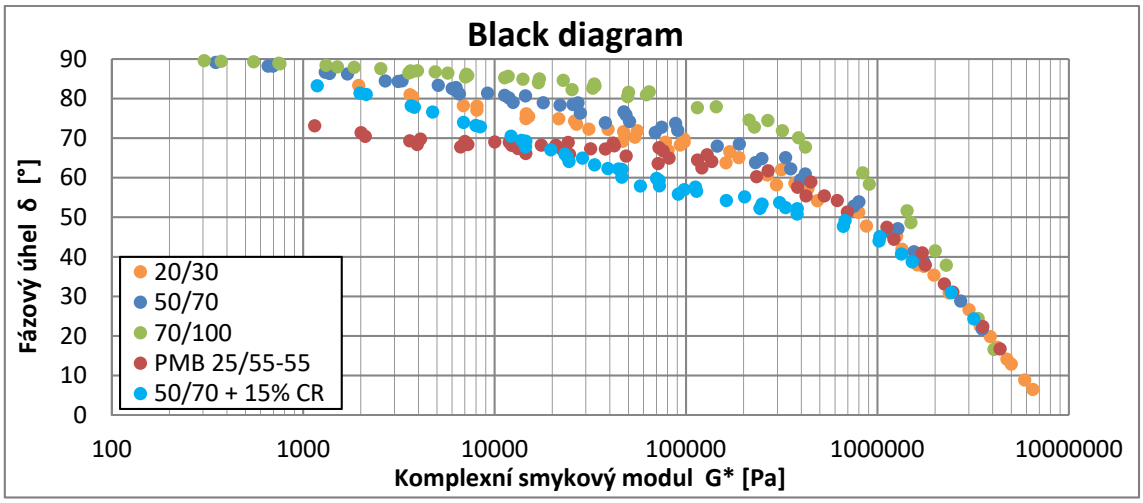
Opakovaně se potvrzuje, že nejlépe vychází silniční asfalt gradace 20/30. Je třeba upozornit, že ačkoli v oboru vyšších teplot se jeví toto pojivo jako nejlepší, v oboru nízkých teplot tomu bývá zpravidla naopak, a proto je potřeba najít kompromis. Z tohoto důvodu se jako nejvhodnější pojiva považují PMB, případně pojiva CRMB.



Obr. 78: Cole-Cole diagram

Data lze alternativně znázornit s využitím tzv. Black diagramu (obr. 79), kde se v semilogaritmickém měřítku vynáší závislost fázového úhlu a komplexního smykového modulu. V tomto případě je nejlepším průběhem takový, kdy získaná křivka má nižší hodnoty z hlediska proměnné na vodorovné ose a naopak na svislé ose jsou dosahovány vyšší hodnoty. [205]

Charakteristický průběh obou veličin v Black diagramu je, když s rostoucím komplexním smykovým modulem klesá hodnota fázového úhlu. Průběh křivky silničních asfaltů je typický tím, že se s rostoucí teplotou asymptoticky blíží hodnotě fázového úhlu 90° (asfaltové pojivo se chová jako viskózní kapalina). Dále stojí za povšimnutí průběh pojiva s pryžovým granulátem, příznačný nejnižšími hodnotami fázového úhlu při středních hodnotách G*, ale strmějším nárůstem δ při nižších hodnotách G*. Typický průběh mají i PMB pojiva, která se vyznačují nízkými hodnotami fázových úhlů (pružnější chování pojiva), jež se téměř nemění do dosažení G* přibližně 100 kPa, pak následuje strmý pokles hodnoty δ.



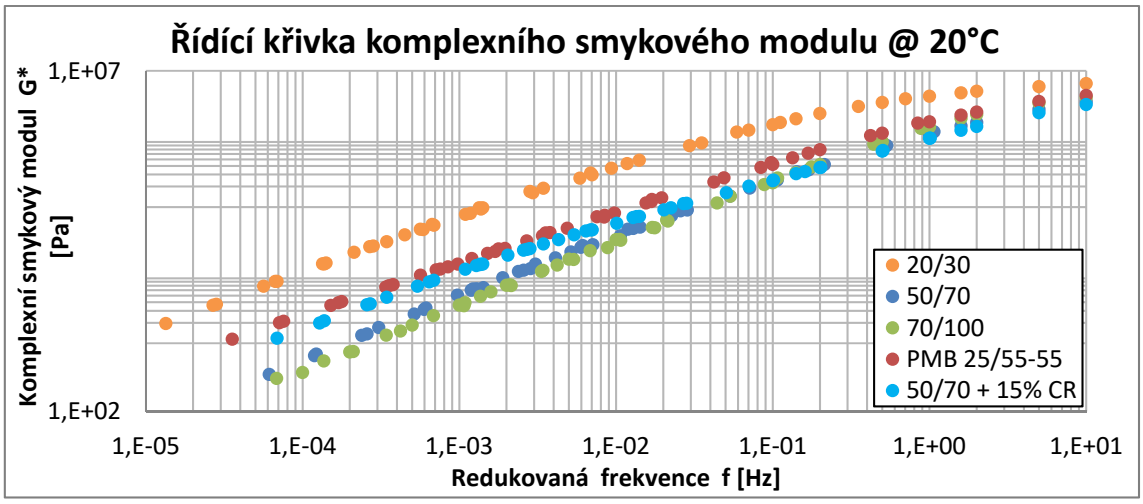
Obr. 79: Black diagram

4.1.7 ŘÍDÍCÍ KŘIVKY

Nejkomplexnější metodou zobrazení výsledků oscilační zkoušky frekvenční sweep je sestavení řídících křivek (komplexních smykových modulů nebo fázových úhlů). Jedná se o poměrně složité znázornění, ale poskytuje nejširší rozsah výsledků, neboť vystihuje chování asfaltových pojiv za hranice frekvenčního rozsahu zkušebního přístroje DSR. Nezbytné je měření v širším teplotním a frekvenčním intervalu, díky čemuž je možné aplikovat časově teplotní superpozici. Oscilační zkouška se standardně v silniční laboratoři ČVUT v Praze měří v teplotním spektru 60-20 °C, s teplotním skokem 5-10 °C. Za referenční teplotu pro sestavení řídících křivek se nejčastěji volí nejnižší teplota zkoušky, v našem případě 20 °C.

K sestavení řídících křivek byl použit software The Interactive Rheology Information Systems (IRIS Rheo-Hub, verze 2011) [206] fungující na principu modifikované WLF rovnice (rovnice 28). Teoretický princip je stručně vysvětlen v kapitole 3.9.2. V grafech řídících křivek se uvádí na vodorovné ose redukovaná frekvence, což je upravená frekvence v rámci superpozice času a teploty.

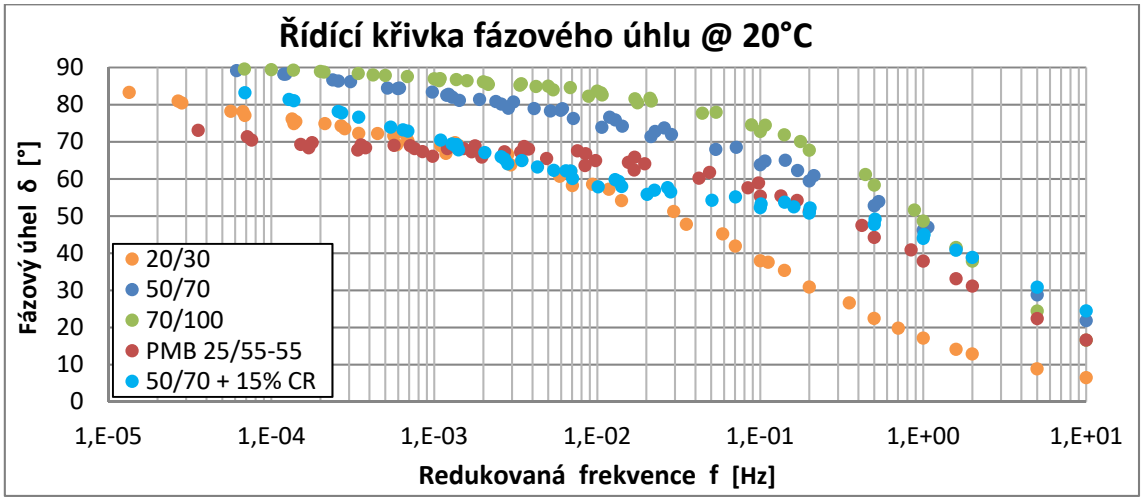
Na obr. 80 jsou zobrazeny řídící křivky komplexních smykových modulů jednotlivých asfaltových pojiv v závislosti na redukované frekvenci. Oscilační zkouška se měřila v intervalu frekvencí 0,1-10 Hz, ale v grafu jsou znázorněny frekvence od 0,00001 Hz. Nejnižší frekvence odpovídají nejvyšším teplotám. Z pohledu odolnosti vůči trvalým deformacím se upřednostňují vyšší hodnoty G*. Dle očekávání je zjevná silná vazba mezi G* a gradací asfaltového pojiva. Nejvyšší hodnoty v celém frekvenčním spektru má silniční asfalt gradace 20/30, následuje PMB pojivo spolu s pojivem modifikovaným CR. Při vysokých frekvencích zatěžování (nízké teploty) se hodnoty G* všech porovnávaných pojiv téměř srovnávají. Z toho vyplývá, že obě modifikovaná pojiva mají nejmenší teplotní citlivost, neboť jejich řídící křivky jsou nejplošší. Nízká teplotní citlivost indikuje širší obor plasticity.



Obr. 80: Řídící křivky komplexního smykového modulu

Výraznější rozdíly mezi jednotlivými pojivy jsou patrné z obr. 81, kde jsou na svislé ose hodnoty fázového úhlu. Při nízkých frekvencích převládá viskózní neboli nevratné chování. S rostoucí frekvencí se hodnoty fázových úhlů snižují a zvyšuje se elastické chování. Vztah mezi elastickou a viskózní složkou se u pojiv projevuje rozdílnou měrou, kterou prezentuje odlišné zakřivení individuálních křivek. Typické tvary jednotlivých skupin pojiv jsou podobné jako u Black diagramu (obr. 79). Pro silniční asfalty to je konkávní zaoblený tvar, pro PMB a CRMB pojiva esovitý tvar.

Nejvyšších hodnot dosahují silniční asfalty 70/100 a 50/70, jež se při nejnižších frekvencích blíží k 90°. Naopak nejnižší fázové úhly při nejnižších frekvencích má pojivo PMB, které má zároveň fázový úhel nižší než 70° v nejširším frekvenčním rozsahu. Nízký fázový úhel svědčí o vyšší pružnosti PMB pojiva související s přítomností polymerní přísady. Zajímavé je porovnání modifikovaných pojiv. PMB pojivo má nižší fázový úhel při nejnižších a zároveň při nejvyšších frekvencích zatěžování. Naopak CRMB pojivo má nižší fázový úhel při středních frekvencích. Výrazně nejnižší fázový úhel při frekvenci od 0,1 Hz má pojivo 20/30, ale s klesající frekvencí dochází k nárůstu fázového úhlu.



Obr. 81: Řídící křivky fázového úhlu

4.1.8 SHRNUTÍ OSCILAČNÍ ZKOUŠKY FS

Na základě výše popsaných poznatků je možné shrnout závěry týkající se oscilační zkoušky FS. Pro stanovení minimálních hodnot byl zvolen 5% (případně 10%) percentil vymezující 5 % (případně 10 %) nejnižších hodnot. Naopak pro určení maximálních hodnot se vycházelo z 95% (90%) percentilu ohraničujícího 5 % (10 %) nejvyšších hodnot. V následující tabulce 20 jsou sumarizovány navržené limitní hodnoty jednotlivých charakteristik pro všechny sledované skupiny, včetně stárnutí.

Je zbytečné definovat mezní hodnoty dlouhodobého stárnutí, neboť trvalé deformace se objevují zejména u nově vystavených vozovek. Navíc se dá předpokládat, že asfaltová pojiva, která nesplní minimální podmínku pro nezestárlá nebo krátkodobě zestárlá pojiva, nevyhoví ani v případě dlouhodobě zestárlých pojiv. Z tohoto důvodu jsou limitní hodnoty dlouhodobého stárnutí uvedeny v tabulce 20 pouze pro doplnění.

Tab. 20: *Návrh limitních hodnot oscilační zkoušky FS (T = 60 °C)*

		Minimální G* [kPa]	Maximální δ [°]	G*/sin(δ) (1) [kPa]	Minimální G*/sin(δ) [kPa]
Silniční asfalty	20/30	7,0	80,0	7,1	7,0
	50/70	2,2	87,0	2,2	2,2
	70/100	1,5	89,0	1,5	1,5
	Krátkodobé stárnutí	5,0	84,0	5,0	5,0
	Dlouhodobé stárnutí	35,0	70,0	37,2	35,0
PMB	25/55-X	8,0	71,0	8,5	9,0
	40/100-X	8,0	76,0	8,2	9,0
	Krátkodobé stárnutí	12,0	70,0	12,8	13,0
	Dlouhodobé stárnutí	30,0	65,0	33,1	35,0
CRMB	Báze 50/70	2,2	86,0	2,2	2,2
	Báze 70/100	2,2	86,0	2,2	2,2
	< 10 % CR	2,0	87,0	2,0	2,0
	10-15 % CR	2,0	85,0	2,0	2,0
	> 15 % CR	5,0	83,0	5,0	5,0

(1) Parametr G*/sin(δ) vypočítaný z navržené minimální hodnoty G* a ze zvolené maximální hodnoty δ

Porovnáme-li silniční asfalty, jež překročily vymezená kritéria (G*, δ, G*/sin(δ)) zjistíme, že se téměř vždy jedná o stejná pojiva. Nejinak tomu je po stárnutí. Bohužel u řady testovaných pojiv nebyla zkouška prováděna na zestárlých vzorcích, a proto v této práci není ověřeno, zda asfaltová pojiva, která přesáhnou limitní podmínku v nezestárlém stavu, zároveň nevyhoví i podmínkám zvoleným pro pojiva po krátkodobém stárnutí. Lze odhadnout, že ano, protože tomu odpovídají všechny vzorky silničních asfaltů, jež jsou k dispozici, ačkoli jich není mnoho. Zároveň se potvrdilo, že všechny vzorky silničních asfaltů, které vyhověly stanoveným hodnotám po krátkodobém stárnutí, splnily limitní hodnoty i v nezestárlém stavu.

U PMB pojiv se ale u jedné varianty ukázalo, že i když testovaný vzorek překročil minimální podmínku pro nezestárlý stav, vyhověl podmínce pro krátkodobé stárnutí. Nutno podotknout, že obě hodnoty (před stárnutím i po krátkodobém stárnutí) se blížily k limitním hodnotám. U dalšího vzorku PMB se objevila přesně opačná situace, kdy asfaltové pojivo

splnilo podmínku pro nezestárlý stav, ale přesáhlo mezní hodnotu pro krátkodobě zestárnuté pojivo (opět jen těsně).

Při porovnání limitních hodnot pro nezestárlá pojiva PMB je zajímavé, že všechna pojiva, která překročila minimální podmínku G*, vyhověla podmínce maximálního δ a stejně tak tomu bylo i naopak. Jelikož jsou hodnoty δ u PMB výrazně nižší než u silničních asfaltů, hodnota parametru SHRP je mnohdy viditelně vyšší než hodnota G*. Zatímco u silničních asfaltů většina vzorků přesáhla obě charakteristiky G* a δ současně, u pojiv PMB tomu je naopak. Zpravidla se jedná o pojiva tuhá (vysoké G*), ale současně málo elastická (vysoký δ) nebo naopak málo tuhá, ale s vysokou elastickou složkou. Proto se jeví jako vhodné použít parametr SHRP kombinující obě veličiny. Problém je však stále ve významu přisuzovaném tuhosti ve srovnání s elasticitou (fázovým úhlem). V situaci, kdy fázový úhel nesplní mezní hranici, často velikost komplexního smykového modulu v parametru SHRP stačí k překonání minimální hranice charakteristiky G*/sin(δ). V opačném případě tomu je jen výjimečně.

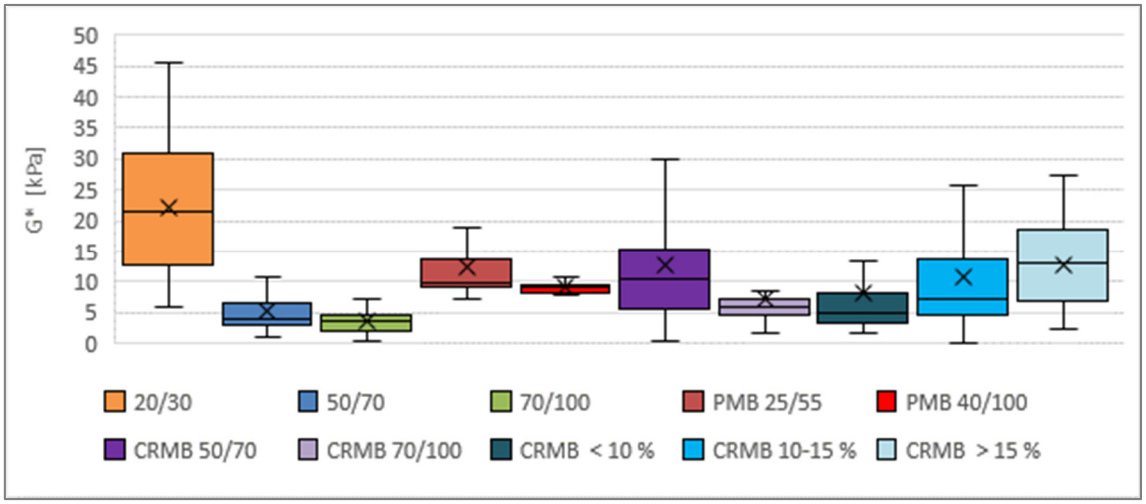
Z tab. 20 je patrné, že minimální hodnota parametru G*/sin(δ) celkem odpovídá přenásobení limitních hodnot obou charakteristik. Díky tomu většina zkoušených pojiv, jež přesáhla jednu z navržených podmínek, nevyhověla i ostatním stanoveným podmínkám. Rozdíl nastává, jen když pojivo sice překročí minimální podmínku pro smykový modul G*, ale splní podmínku pro parametr SHRP G*/sin(δ), protože hodnota parametru SHRP je logicky vždy vyšší (nebo rovna) hodnotě smykového modulu G*. U všech nezestárlých pojiv s výjimkou PMB pojiv jsou zvolené mezní hodnoty modulu G* a parametru G*/sin(δ) stejné.

Limitní hodnoty fázového úhlu jsou rovněž velmi důležité, neboť i když má asfaltové pojivo velký komplexní smykový modul, je zároveň nutné, aby mělo dostatečně velkou elastickou složku odpovídající nízkému fázovému úhlu. Z tohoto důvodu předpokládám, že je vhodnější porovnat obě základní veličiny (G* a δ) s určenými limitními hodnotami, než posuzovat samotný parametr SHRP G*/sin(δ). Tuto podmínku splní i některá pojiva s nízkou elastickou složkou, ale vysokou viskózní složkou, u kterých je vyšší dispozice k tvorbě trvalých deformací. Lze tedy tvrdit, že parametr SHRP je benevolentnější.

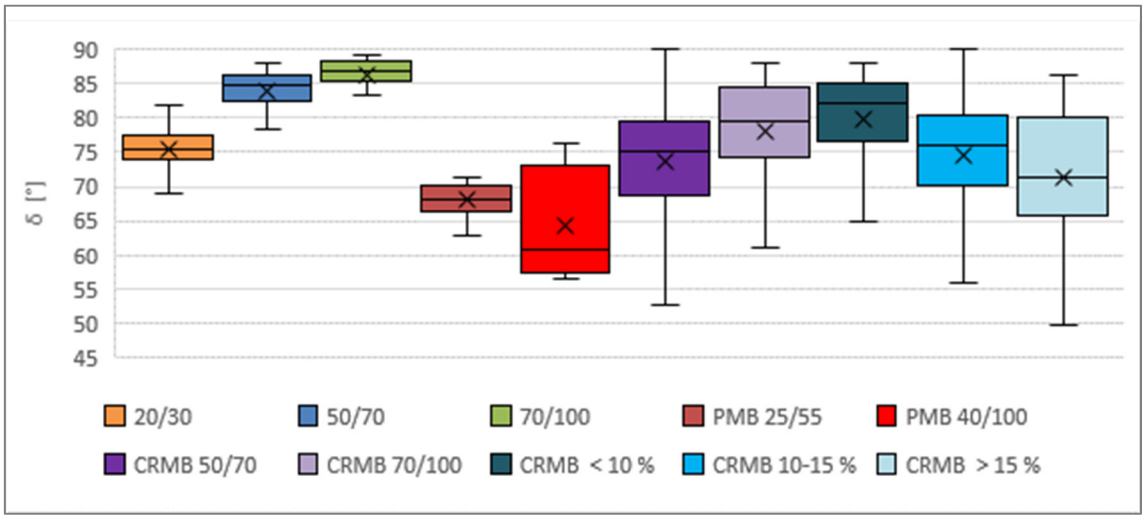
Upravený parametr G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} sice více zohledňuje vliv fázového úhlu, ale při δ < 52° jsou hodnoty záporné nebo extrémně vysoké a nemohou simulovat realitu. Proto se domnívám, že tento parametr není vhodný k aplikaci.

V případě pojiv CRMB se jeví jako důležitější množství přidávaného pryžového granulátu než použitý základní silniční asfalt. U asfaltových pojiv modifikovaných pryžovým granulátem (CRMB) se nesmí zaměřit pozornost pouze na zvýšení tuhosti, ale je nutné sledovat i skladovací stabilitu, aby výsledné pojivo bylo homogenní a zároveň nemělo příliš vysokou viskozitu.

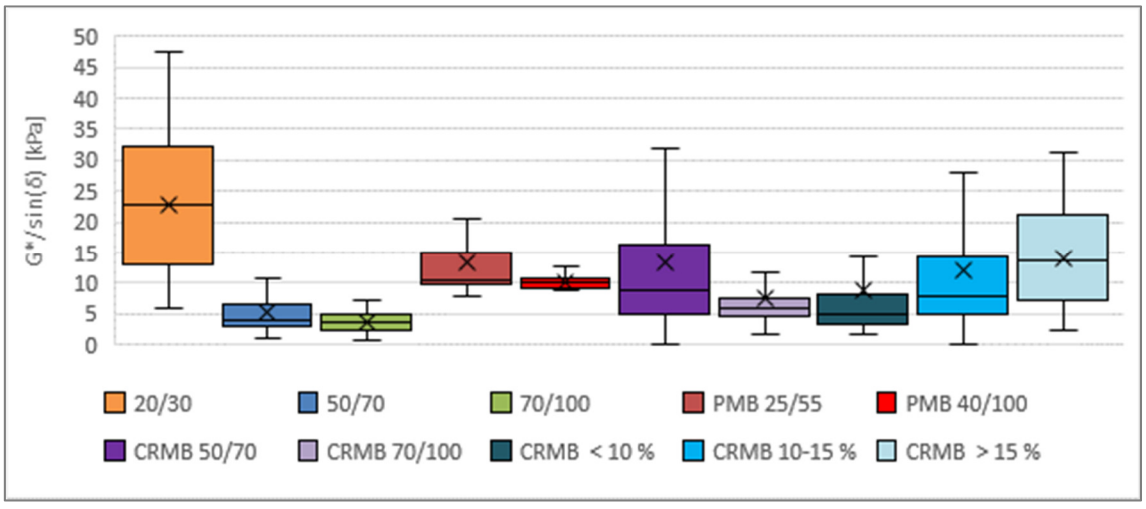
Zajímavou grafickou možností zobrazení základních statistických dat pro všechny skupiny porovnávaných pojiv jsou krabicové diagramy (obr. 82-84). Křížek označuje průměrnou hodnotu a vodorovná čára značí medián. Horní hrana vybarveného obdélníku vymezuje 75% percentil a spodní hrana 25% percentil. Barevný obdélník tedy obsahuje 50 % hodnot. Nejvyšší část krabicového grafu (připomínající písmeno „T“) označuje maximální zaznamenanou hodnotu a naopak nejnižší část grafu odpovídá minimální hodnotě. Krabicové grafy jsou vytvořeny pro nezestárlá pojiva.



*Obr. 82: Krabicový graf komplexního smykového modulu G**



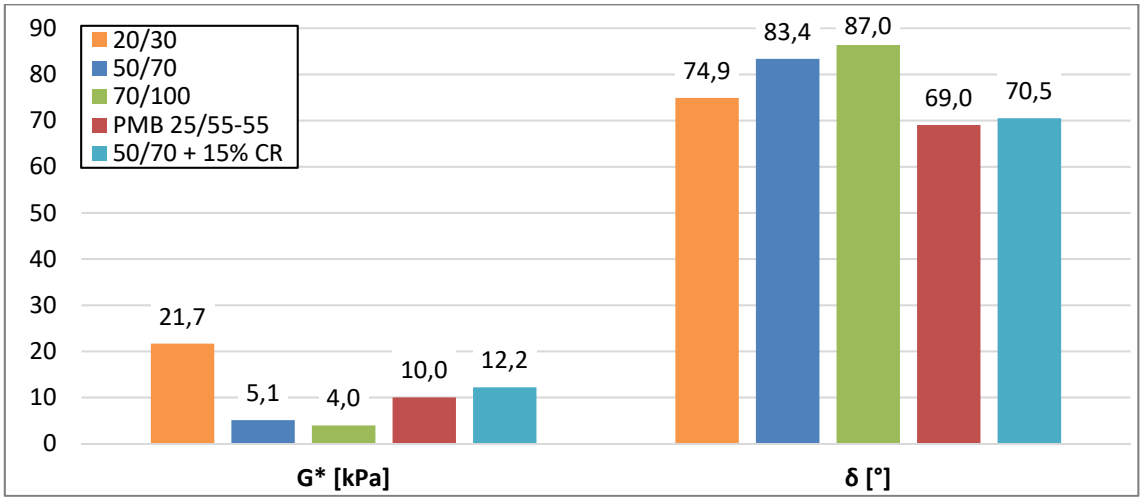
Obr. 83: Krabicový graf komplexního fázového úhlu δ



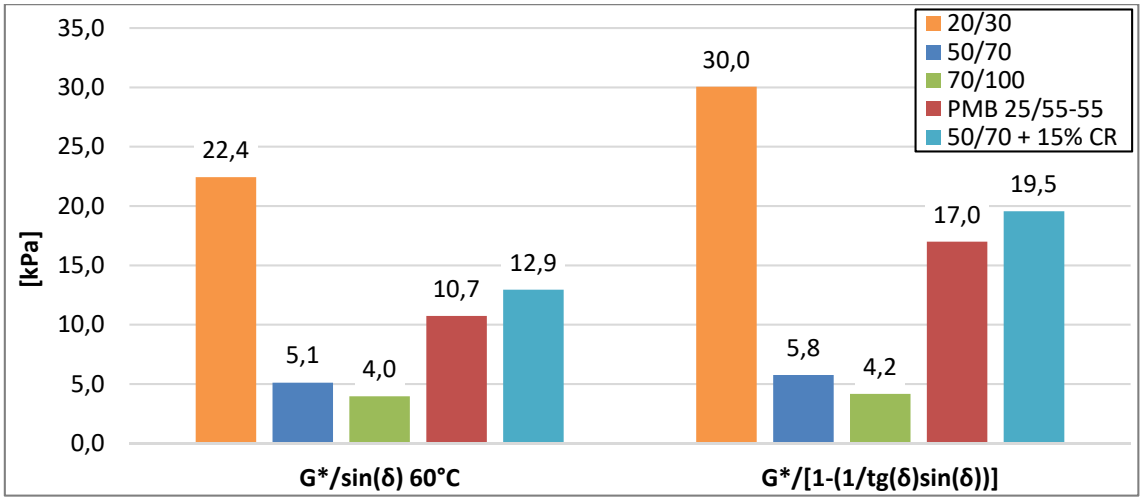
Obr. 84: Krabicový graf parametru G/sin(δ)*

Jednodušší a částečně i přehlednější znázornění výsledků je na obrázku 85, kde jsou zobrazeny hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu různých zástupců jednotlivých skupin posuzovaných pojiv. Stejným způsobem jsou na obr. 86 vyneseny hodnoty parametrů indikujících náchylnost k tvorbě trvalých deformací.

Znovu se potvrzuje, že nejvyšší komplexní smykový modul se vyskytuje u silničních asfaltů gradace 20/30, ale nemají nejnižší fázové úhly (pouze nejnižší ze skupiny hodnocených silničních asfaltů). Nejnižší fázové úhly byly zaznamenány u pojiv PMB a CRMB, která mají přibližně poloviční hodnotu G* v porovnání se silničními asfalty 20/30. Tento poznatek byl však s ohledem k znalosti výkonnosti jednotlivých druhů asfaltových pojiv očekáván.



Obr. 85: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu



Obr. 86: Hodnoty parametrů indikujících tvorbu trvalých deformací

4.1.9 VYBRANÉ ZAJÍMAVÉ SKUPINY

V této kapitole jsou posuzovány naměřené hodnoty oscilační zkoušky pro několik skupin asfaltových pojiv. První skupinu tvoří PMB 25/55-55 od různých výrobců, druhou skupinou jsou pojiva PMB měřená při rozdílných napětích. Třetí skupinu tvoří opět PMB pojiva, ale

modifikovaná rozdílnými přísadami. Čtvrtou popisovanou skupinou pojiv jsou vybraná CRMB, poslední skupina pojiv obsahuje pojiva modifikovaná nejen CR, ale i přírodním asfaltem.

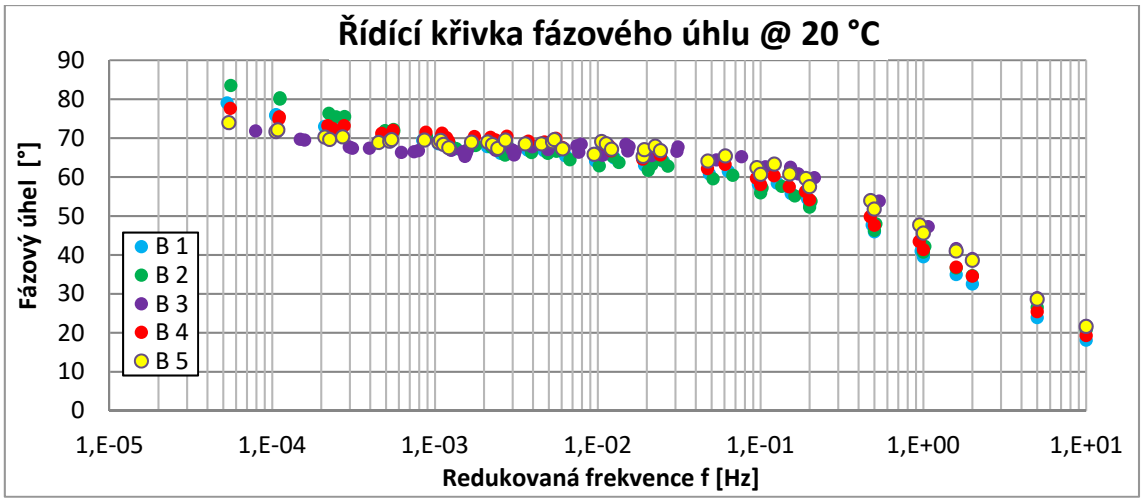
4.1.9.1 POROVNÁNÍ POJIV PMB 25/55-55 [207]

První skupinou jsou polymerem modifikovaná pojiva PMB 25/55-55 od pěti výrobců (označené B1-B5). Zkouška měření komplexního smykového modulu a fázového úhlu potvrdila, že ačkoli jsou komparovaná asfaltová pojiva stejného označení, hodnoty G* i δ se mohou výrazně lišit. Největší rozdíl je u pojiv B1 a B5. Vzorek B1 má nejvyšší hodnotu komplexního smykového modulu a zároveň nejvyšší parametr SHRP, zatímco pojivo B5 má tyto hodnoty o třetinu nižší (tab. 21). Zajímavé však je, že jejich fázový úhel je stejný.

Tab. 21: *Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep (T = 60 °C)*

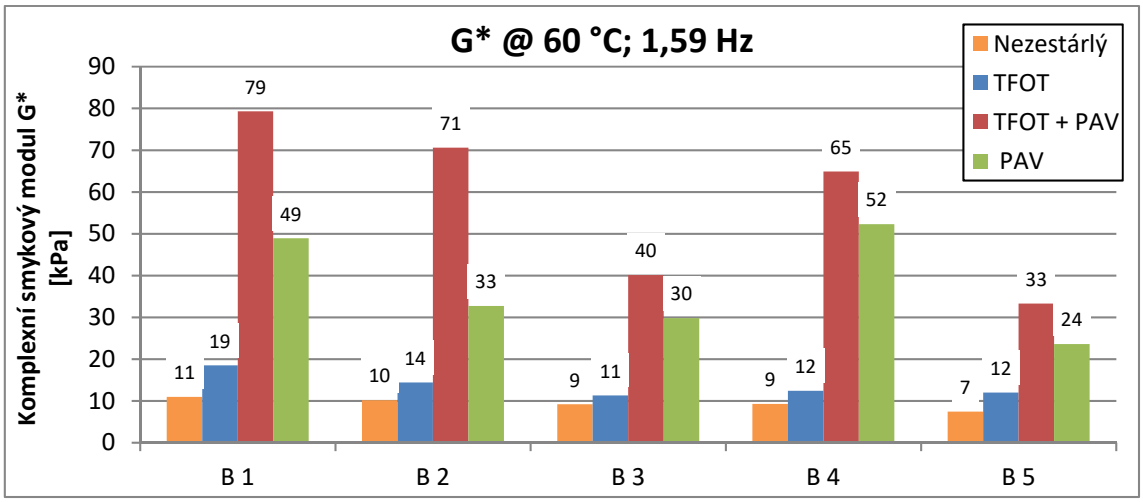
Označení vzorku	G´ [kPa]	G´´ [kPa]	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin(δ) [kPa]
B 1	3,9	10,3	11,0	69,4	11,7
B 2	3,4	9,6	10,1	70,5	10,8
B 3	3,6	8,4	9,2	66,8	10,0
B 4	2,9	8,8	9,3	71,5	9,8
B 5	2,6	6,9	7,4	69,4	7,9

Z řídící křivky fázového posunutí (obr. 87) je patrné odlišné chování pojiva B2, které při nejnižších frekvencích má nejvyšší fázový úhel, ale v intervalu frekvencí přibližně 10^{-2} až 10^{-1} Hz má z posuzovaných variant naopak nejnižší fázový úhel. Zcela opačný trend je zřejmý u asfaltového pojiva označeného B3.

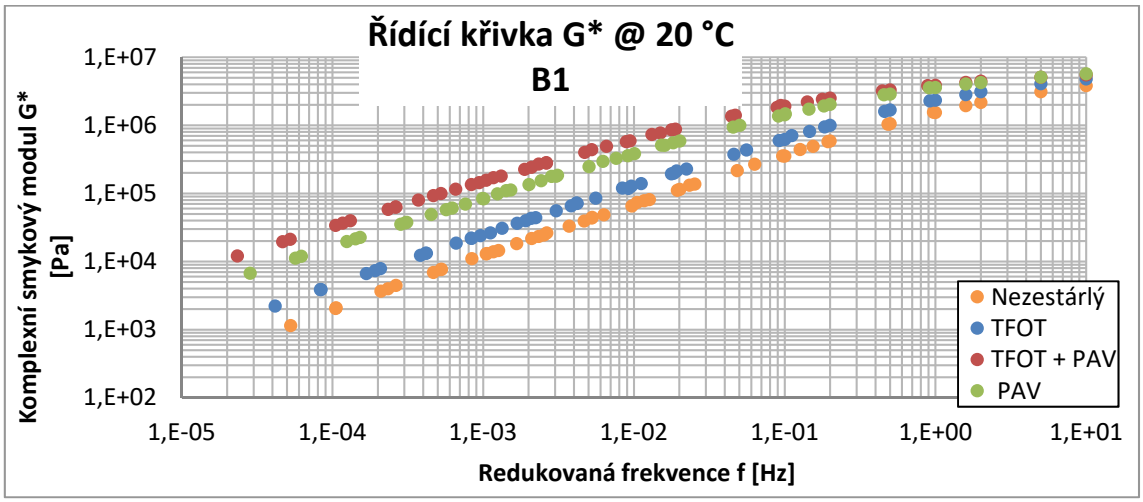


Obr. 87: Řídící křivka úhlu fázového posunutí při směrné teplotě 20 °C

Hodnoty zjištěné ze zkoušky Frequency Sweep na vzorcích po stárnutí jsou níže zobrazeny na dvou grafech. První znázorňuje komplexní smykový modul všech variant při teplotě 60 °C a různých typech stárnutí (obr. 88) a druhý graf zachycuje řídící křivky pojiva B1 po stárnutí (obr. 89). Z druhého grafu je patrné, že největší rozdíly komplexního smykového modulu jsou při nejnižších frekvencích. Obdobné výsledky vykazují i ostatní zestárlá asfaltová pojiva.



Obr. 88: Hodnoty komplexního smykového modulu po stárnutí



Obr. 89: Řídící křivka komplexního smykového modulu pojiva B1 po stárnutí

4.1.9.2 POROVNÁNÍ SILNIČNÍHO ASFALTU 50/70 A DVOU PMB POJIV

V rámci posouzení tří pojiv – silničního asfaltu 50/70 a dvou PMB byl hlavní důraz kladen na různé modifikace běžných postupů zkoušek na DSR, společně s posouzením několika typů stárnutí.

Při hodnocení zkoušky Frequency Sweep je nezbytné, aby vnesené napětí bylo v lineární viskoelastické oblasti zkoušeného pojiva. Pro běžné silniční asfalty se zkouška tradičně provádí při ověřené hodnotě napětí 2000 Pa. V případě PMB pojiv se nejprve provedla zkouška při konstantní teplotě a zvyšujícím se smykovém napětí, díky které lze určit LVR. Z této zkoušky bylo pro pojivo PMB 25/55-60 vybráno napětí 3000 Pa a pro PMB 40/100-65 napětí 4500 Pa. Následně se zkouška provedla i pro napětí standardní 2000 Pa a naměřené hodnoty se mezi sebou porovnaly. U pojiva PMB 25/55-60 jsou hodnoty modulů tuhosti při napětí 2000 Pa nižší o cca 25 % ve srovnání s napětím 3000 Pa (tab. 22). Naopak naměřené hodnoty pojiva PMB 40/100-65 jsou podobné při obou napětích.

Opačný trend je patrný z tabulky 23, kde jsou vypsány hodnoty po stárnutí laboratorní metodou RTFOT. Z naměřených dat pro ostatní typy stárnutí je u obou PMB pojiv výrazný

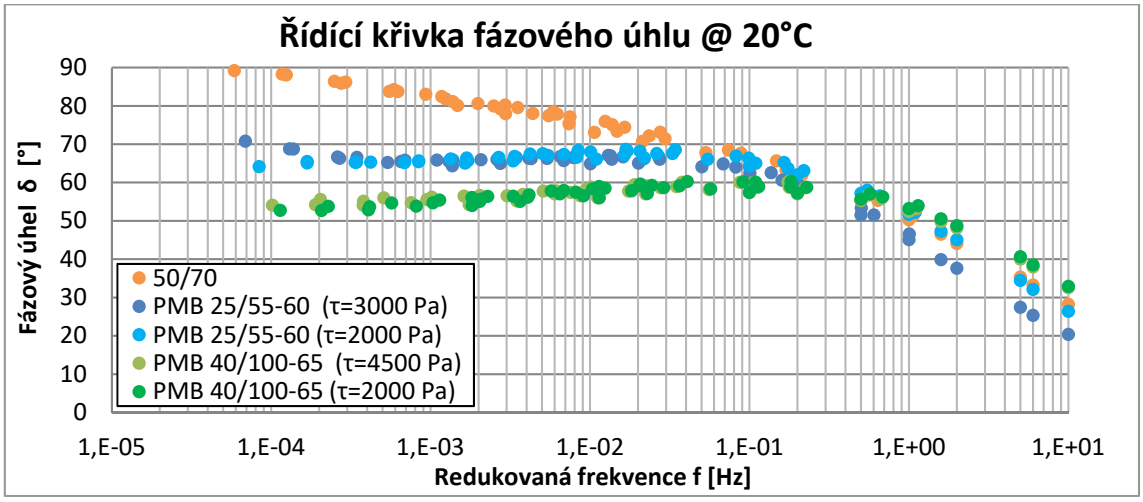
rozdíl naměřených hodnot při různých napětích. Tím se potvrzuje nutnost vždy ověřit a správně zvolit lineární oblast pro jednotlivá asfaltová pojiva, aby naměřené hodnoty byly odpovídající. Z obr. 90 zobrazujícího řídící křivky fázového úhlu nezestárlých pojiv je zřejmé, že pojivo PMB 40/100-65 má při nižších frekvencích výrazně nižší fázový úhel, který nepatrně roste až do frekvence 0,1 Hz a při vyšších frekvencích dochází k prudkému snížení hodnot fázového posunu. Opět je zjevné, že u tohoto pojiva jsou křivky při obou napětích téměř totožné.

Tab. 22: *Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep (T = 60 °C)*

Označení vzorku	G´ [kPa]	G´´ [kPa]	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin(δ) [kPa]
50/70	0,5	3,7	3,7	83,0	3,7
PMB 25/55-60 (τ=3000 Pa)	3,9	8,6	9,4	65,8	10,4
PMB 25/55-60 (τ=2000 Pa)	2,7	6,2	6,8	66,1	7,4
PMB 40/100-65 (τ=4500 Pa)	5,2	7,8	9,4	56,4	11,2
PMB 40/100-65 (τ=2000 Pa)	5,5	8,2	9,9	56,1	12,0

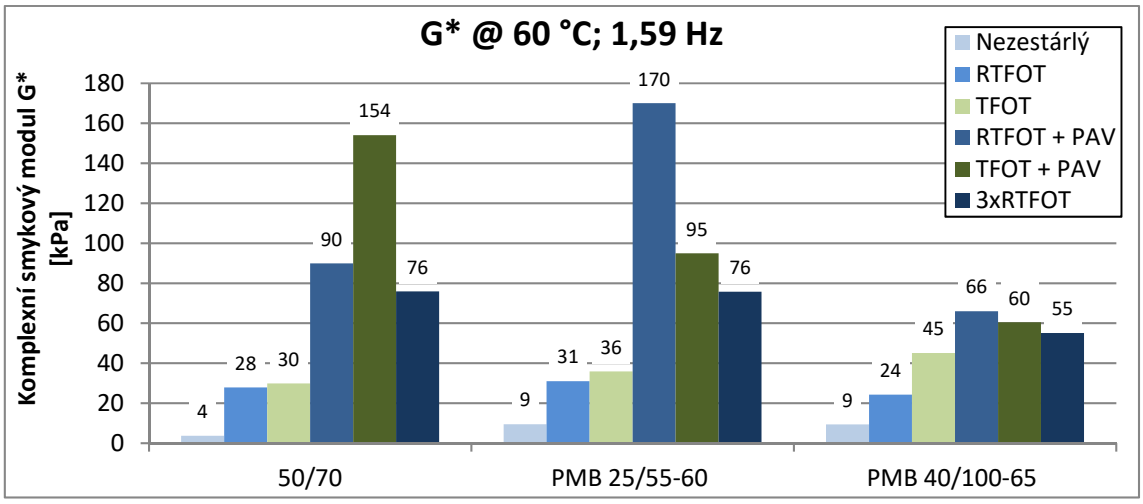
Tab. 23: *Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep po stárnutí metodou RTFOT (T = 60 °C)*

Označení vzorku	G´ [kPa]	G´´ [kPa]	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin(δ) [kPa]
50/70	7,4	26,9	27,9	74,5	28,9
PMB 25/55-60 (τ=3000 Pa)	12,9	28,2	31,0	65,3	34,1
PMB 25/55-60 (τ=2000 Pa)	12,2	27,1	29,8	65,7	32,6
PMB 40/100-65 (τ=4500 Pa)	13,2	20,3	24,3	57,0	28,9
PMB 40/100-65 (τ=2000 Pa)	17,0	24,2	29,6	54,9	36,1

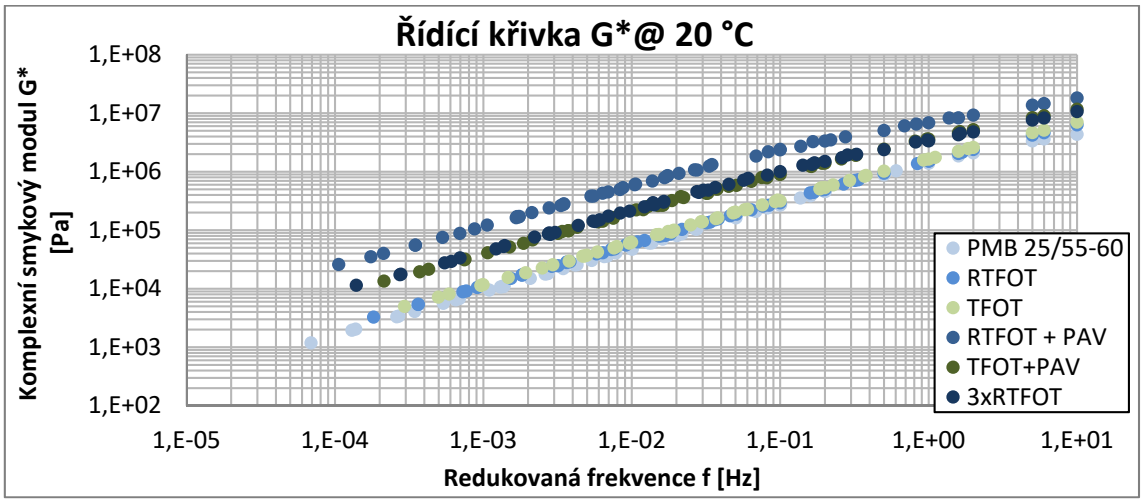


Obr. 90: Řídící křivka fázového úhlu

Hodnoty komplexního smykového modulu po stárnutí jsou značně rozdílné, ale znovu lze nalézt podobnost u metod simulovaného krátkodobého stárnutí a dlouhodobého stárnutí. Větší rozkolísanost naměřených hodnot je evidentní v případě metod dlouhodobého stárnutí, což potvrzují oba obrázky 91 i 92.



Obr. 91: Hodnoty komplexního smykového modulu po laboratorním stárnutí



Obr. 92: Řídící křivka komplexního smykového modulu pojiva PMB 25/55-60 po laboratorním stárnutí

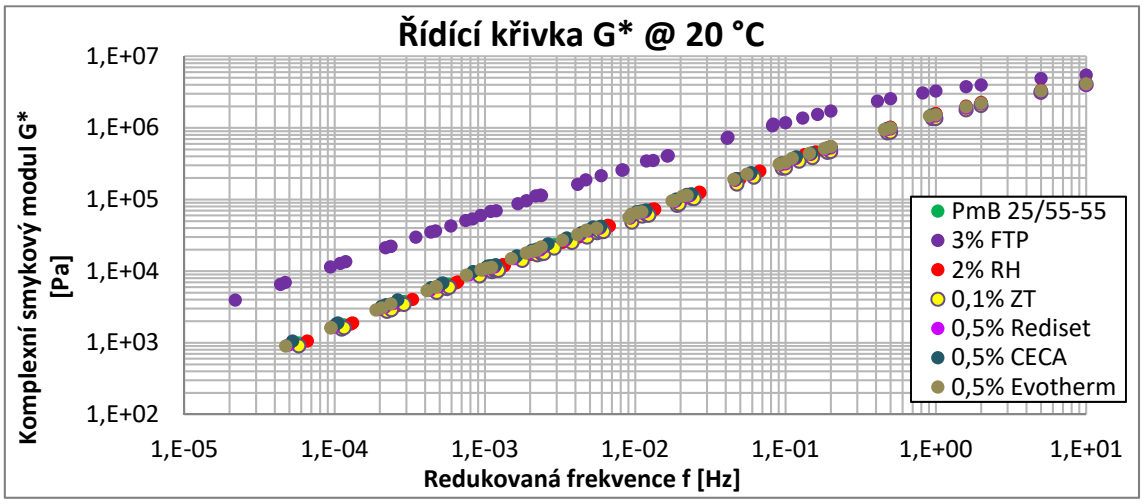
4.1.9.3 POROVNÁNÍ POJIV PMB S VYBRANÝMI PŘÍSADAMI [205]

V rámci posouzení účinku různých přísad či přístupů vhodných pro následnou výrobu nízkoteplotních asfaltových směsí, byly hodnoceny různé varianty s polymerem modifikovaným pojivem PMB 25/55-55. Zvolené přísady tvoří buď syntetické vosky (FT parafín, RH), nanochemické přísady na bázi organo-silanů (ZT) nebo povrchově aktivní látky na bázi amidů (Evotherm) či různých tensidických chemických skupin.

Výrazně vyšších hodnot komplexního smykového modulu G* dosahuje pojivo s přísadou FT parafínu (tab. 24) poukazující na vyšší tuhost pojiva a to v celém frekvenčním intervalu. Tento potenciál pojiva je patrný i z empirických zkoušek a řídící křivkou se potvrzuje jeho platnost (obr. 93). Z toho vyplývá nejlepší schopnost odolávat plastickým deformacím. Pokud bychom řídícími křivkami proložili směrnice a jejich sklon využili jako indikátor teplotní citlivosti, potom i zde varianta PMB s FT parafínem dosahuje mírně lepších výsledků. Ostatní pojiva s přísadami se od základního pojiva PMB 25/55-55 výrazněji neodlišují. Odpovídá tomu i základní charakteristika SHRP G*/sin(δ), která je nejvyšší u pojiva s FT parafínem a v ostatních případech se pohybuje okolo 10 kPa.

Tab. 24: *Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep (T = 60 °C)*

Označení vzorku	G´ [kPa]	G´´ [kPa]	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin(δ) [kPa]
PMB 25/55-55	3,1	9,0	9,5	71,1	10,0
3% FT parafín	12,7	26,9	29,8	64,8	32,9
2% RH	3,3	9,7	10,2	71,4	10,8
0,1% ZT	2,8	8,1	8,6	70,7	9,1
0,5% Rediset	2,9	8,4	8,9	70,6	9,4
0,5% CECA	3,4	9,3	9,9	70,0	10,5
0,5% Evotherm	2,8	8,3	8,8	71,2	9,3



Obr. 93: Řídící křivka komplexního smykového modulu

Z hlediska aplikovaných přísad pro snížení viskozity či zlepšení povrchové aktivity vyplývá, že pouze přísada FT parafínu má pozitivní vliv na funkční charakteristiky asfaltových pojiv. Ostatní přísady funkční charakteristiky pojiv zásadně neovlivňují.

4.1.9.4 POUŽITÍ PRYŽOVÉHO GRANULÁTU A AKTIVÁTORU [209]

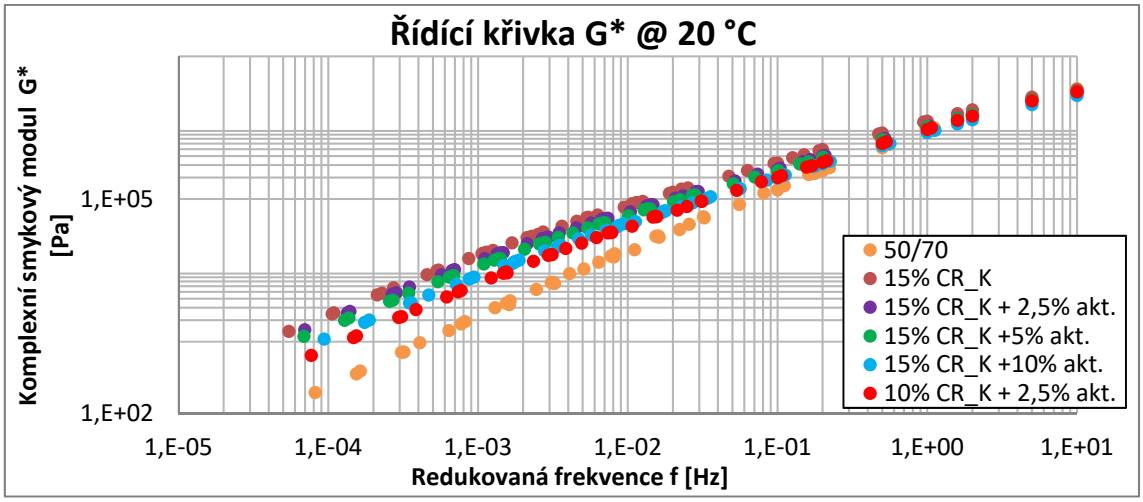
Pro výrobu této skupiny pojiv byla použita mechanicky aktivovaná jemně mletá pryž s maximální velikostí částic 0,8 mm (CR_k), stejně jako i nový typ aktivačního katalyzátoru na bázi benzothiazolu (AKH). Cílem bylo připravit složení CRMB pojiva, které by kromě vylepšených funkčních charakteristik vedlo i k docílení skladově stabilního (tedy homogenního) výrobku. Oba komponenty byly vmíchány do standardního silničního asfaltu 50/70.

Hodnocením základních charakteristik oscilační zkoušky lze potvrdit, že množství aktivované jemně mleté pryže má vliv jak na velikost komplexního smykového modulu, tak i na úhel fázového posunutí (tab. 25). Přísada aktivačního katalyzátoru s rostoucím podílem ve výsledném CRMB snižuje hodnotu komplexního smykového modulu, je zde tedy zjevný mírně negativní vliv na deformační charakteristiky.

Tab. 25: *Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep (T = 60 °C)*

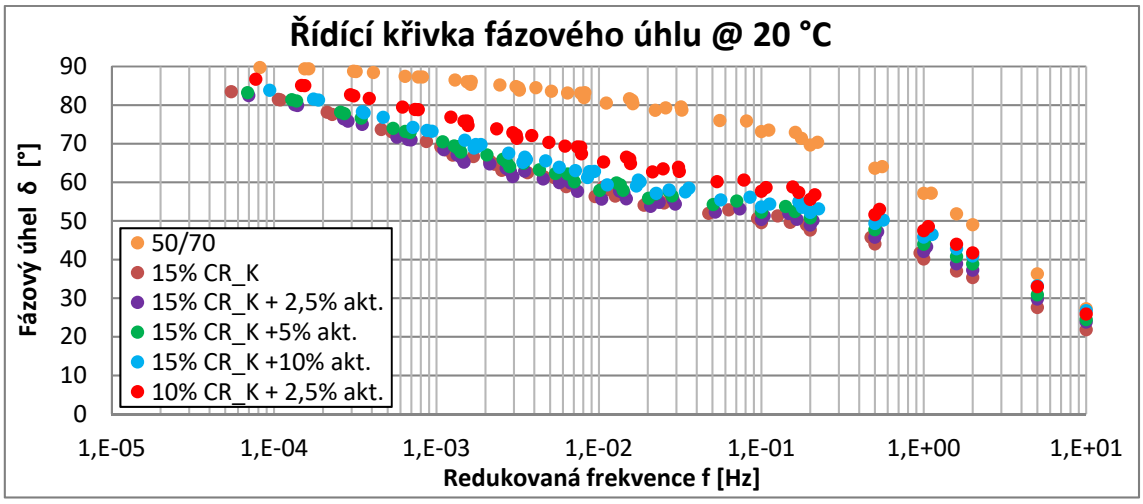
Označení vzorku	G´ [kPa]	G´´ [kPa]	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin(δ) [kPa]
50/70	0,2	3,0	3,0	86,5	3,0
15% CR_K	4,8	13,7	14,6	70,5	15,4
15% CR_K +10% AKH	3,8	11,0	11,6	70,8	12,2
15% CR_K +5% AKH	4,1	11,5	12,2	70,5	12,9
15% CR_K + 2,5% AKH	5,4	13,6	14,6	68,4	15,6
10% CR_K + 2,5% AKH	1,8	7,6	7,8	76,9	8,0

Z řídící křivky pro komplexní smykový modul (obr. 94) lze odečítat závislosti hodnoty této charakteristiky na frekvenci reprezentující různé typy účinků zatížení a tudíž i účinků působící dopravy. Zajímavější jsou nižší frekvence, kdy při frekvenci 10^{-4} Hz jsou velmi dobře patrné rozdíly mezi některými posuzovanými variantami. Nejlepších výsledků dosáhlo pojivo modifikované CR bez aktivátoru, které má současně nejmenší teplotní citlivost. Získaná informace může být následně důležitá z hlediska posouzení vlivu meziročních anebo celodenních výkyvů teplot ovzduší.



Obr. 94: Řídící křivka komplexního smykového modulu při směrné teplotě 20°C

Na obr. 95 je vidět výrazný přínos modifikace pryžovým granulátem. Hodnoty fázového úhlu jsou v celém frekvenčním rozsahu výrazně nižší v porovnání se základním silničním asfaltem 50/70. Je možné to explikovat vytvořením polymerní sítě s převahou pružného chování nad charakteristickou viskózní vlastností nemodifikovaného silničního asfaltu. Vyšší elasticita úzce souvisí s množstvím CR, kdy s vyšším obsahem pryžového granulátu má pojivo vyšší G* (je tužší) a má zároveň nižší δ (je pružnější).



Obr. 95: Řídící křivka úhlu fázového posunutí při směrné teplotě 20°C

4.1.9.5 POUŽITÍ PRYŽOVÉHO GRANULÁTU A PŘÍRODNÍHO ASFALTU [208]

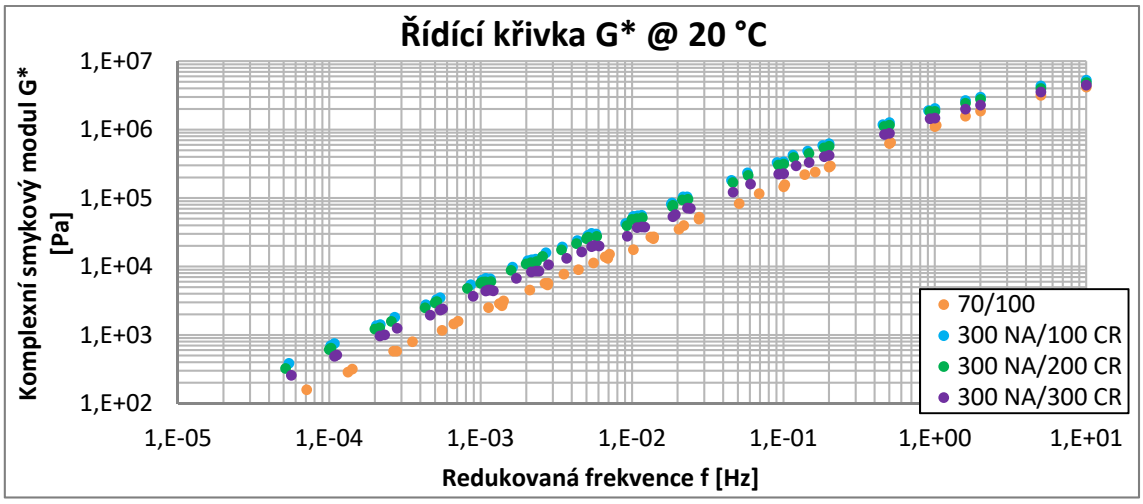
V rámci posouzení vybraných charakteristik CRMB pojiv byly hodnoceny tři kombinace přírodního asfaltu z regionu Selenica (NA) s pryžovým granulátem (CR). Vzájemný poměr obou aditiv je uveden v označení vzorku. Základním typem použitého asfaltového pojiva pro modifikaci byl silniční asfalt 70/100, ke kterému se přidával zvolený pryžový koncentrát v kombinaci s přírodním asfaltem v množství 10 %-hm. asfaltového pojiva. Přírodní asfalty se vyznačují vysokou tuhostí, ale zároveň i křehkostí.

Pro SHRP parametr je možné vyčíst jistý trend, kdy se zvyšujícím se podílem pryžového granulátu dochází ke snížení hodnoty G*/sin(δ), resp. se snižuje hodnota komplexního smykového modulu (tab. 26). Hodnota G* klesá zejména díky snižující se viskózní složce (elastická složka se vlivem vyššího množství CR téměř nemění). U hodnot fázového úhlu není konkrétní tendence zcela jednoznačná.

Tab. 26: *Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep (T = 60 °C)*

Označení vzorku	G´ [kPa]	G´´ [kPa]	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin(δ) [kPa]
70/100	0,1	2,5	2,5	88,1	2,5
300 NA/100 CR	0,5	5,4	5,4	84,5	5,5
300 NA/200 CR	0,4	4,8	4,8	84,8	4,8
300 NA/300 CR	0,5	3,7	3,7	82,4	3,7

Řídící křivky komplexního smykového modulu zobrazené na obr. 96 potvrzují výše popsaná zjištění. Pojivo označené 300 NA/300 CR se nejvíce blíží referenčnímu pojivu, což poukazuje na nejméně příznivý výsledek mezi posuzovanými variantami. Z hlediska odolnosti vůči trvalým deformacím však dochází u všech modifikovaných pojiv ke zlepšení ve srovnání s referenčním pojivem 70/100.



Obr. 96: Řídící křivka komplexního smykového modulu při směrné teplotě 20°C

4.2 ZKOUŠKA MSCR

Jednotlivé vzorky asfaltových pojiv byly hodnoceny pomocí MSCR testu, který je blíže popsán v kapitole 3.10. Cílem této části je přezkoumat možnosti modifikace současného zkušebního postupu MSCR a určit mezní hodnoty stanovených charakteristik.

Obdobně jako u oscilační zkoušky FS byly i pro zkoušku MSCR vypočítány statistické údaje pro jednotlivé skupiny (silniční asfalty, PMB a CRMB). Na jejich základě byly zvoleny mezní hodnoty jednotlivých charakteristik. Základní zkouška MSCR se prováděla při teplotě 60 °C a napětí 0,1 a 3,2 kPa. Použitá geometrie DSR i v případě dlouhodobě zestárnutých asfaltových pojiv byla PP25, s mezerou 1 mm (při měření CRMB pojiv byla u vzorků s pryžovým granulátem velikosti větší než 0,5 mm mezera zvýšena na 2 mm). U všech grafů jsou svislou tečkovanou čarou odděleny jednotlivé penetrační třídy, případně skupiny s rozdílným množstvím dávkovaného pryžového granulátu. Většina grafů je doplněna o navržené mezní hodnoty (vodorovná modrá nebo červená plná čára) a o limitní hodnoty platné v USA (čárkovaná čára).

V dalších podkapitolách jsou popsány modifikace základní zkoušky MSCR a vliv na výsledné charakteristiky vycházející z příspěvku na konferenci BESTInfra 2017 [184] a z příspěvku konference Asfaltové vozovky 2017 [28]. Snahou je upozornit na problémy s prováděním nebo výpočtem a navrhnout opatření k jejich nápravě pomocí revize základního zkušebního postupu zkoušky MSCR.

Pozornost je věnována vstupním parametrům nastavení zkoušky, které jsou nejvíce diskutabilní nebo nejednoznačně určené. Hlavním důvodem je, že zkouška MSCR je v ČR poměrně nově zavedená metoda a s jejím realizováním nejsou zatím velké zkušenosti. Obdobné problémy se objevují i jinde ve světě. Proto se posuzoval vliv různých vstupních parametrů nastavených na přístroji DSR – tři vybrané úrovně napětí, tři teploty provádění zkoušky a rozdílná geometrie měřicího přístroje (PP25 a PP08). Dále se tato část zabývá porovnáním výsledků pro rozdílný počet zatěžovacích cyklů.

Většina měřených vzorků byla nezestárlá, ačkoli se zkouška MSCR provádí zpravidla na vzorcích krátkodobě zestárlých simulujících stav po pokládce asfaltové vozovky. Jelikož cílem

práce je prozkoumat chování zkoušky MSCR, měření na nezestárlých vzorcích je dostačující. Navíc citlivost na trvalé deformace je největší u nezestárlých asfaltových pojiv (například u nízkoteplotních asfaltových směsí, asfaltové pojivo během výroby a pokládky směsi příliš nezestárne).

Nejdůležitější dvě charakteristiky u zkoušky MSCR jsou elastické zotavení (%R) a nevratná smyková poddajnost (J_{nr}). Pozitivní vliv na tvorbu trvalých deformací mají nízké hodnoty J_{nr}, a proto byly pro tuto charakteristiku při napětí 3,2 kPa navrženy maximální hodnoty. Naopak %R je vhodné mít co možná největší a nabízí se navrhnout minimální hodnoty. V této práci však stanoveny nejsou, protože nemají jednoznačně prokázaný vliv s ukazatelem odolnosti vůči vzniku trvalých deformací. Obě charakteristiky se měří při napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa, na jejichž základě je možné dopočítat parametry citlivosti R_{diff} a $J_{nr,diff}$ (rovnice 40 a 41).

Pro druhý jmenovaný parametr jsou v práci určeny maximální hodnoty. V kapitole 3.10 jsou naznačeny nejasnosti ohledně těchto dvou parametrů citlivosti. V návaznosti na to byl v roce 2017 doporučen nový parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ (rovnice 42). Rozdíl mezi parametry citlivosti $J_{nr,diff}$ a $J_{nr,slope}$ ve výpočtu je pouze ve jmenovateli. V případě klasického parametru $J_{nr,diff}$ se ve jmenovateli počítá s hodnotou $J_{nr;0,1}$, v modifikovaném parametru $J_{nr,slope}$ je hodnota ve jmenovateli konstanta 3,1, která vychází z rozdílu aplikovaných napětí (3,2 kPa a 0,1 kPa).

$$J_{nr,slope} = 100\,\frac{(J_{nr;3,2} - J_{nr;0,1})}{3,1} \tag{42}$$

Kde $J_{nr,slope}$…parametr citlivosti nevratné smykové poddajnosti [%]
$J_{nr;0,1}$…nevratná smyková poddajnost při napětí 0,1 kPa [kPa^{-1}]
$J_{nr;3,2}$…nevratná smyková poddajnost při napětí 3,2 kPa [kPa^{-1}]

V publikaci z roku 2018 [172] je pro jednotlivé třídy dopravního zatížení navržen předpis pro stanovení maximální hodnoty vycházející z limitních hodnot J_{nr} (rovnice 43).

$$J_{nr,slope}max = 1{,}1975\,(J_{nr;3,2})^2 + 11{,}797 J_{nr;3,2} + 3{,}3807 \tag{43}$$

Kde $J_{nr,slope}$,max…maximální hodnota parametru citlivosti $J_{nr,slope}$ [%]
$J_{nr;3,2}$…nevratná smyková poddajnost při napětí 3,2 kPa [kPa^{-1}]

Oba parametry citlivosti jsou v následujících kapitolách řešeny.

Hodnoty jednotlivých asfaltových pojiv naměřené při zkoušce MSCR jsou uvedeny v příloze C.

4.2.1 SILNIČNÍ ASFALTY

Skupina silničních asfaltů, na kterých byla prováděna zkouška MSCR, je složena ze 117 vzorků. Jednotlivé podskupiny jsou tvořeny silničními asfalty 20/30 (22 vzorků), 50/70 (64 vzorků) a 70/100 (31 vzorků). Rozdělení do podskupin je v grafech znázorněno svislou šedou čarou. Vybrané statistické údaje pro základní dvě charakteristiky zkoušky MSCR (J_{nr}

a %R) jsou v tabulce 27, respektive 28. Obě tabulky jsou doplněny o navržené limitní hodnoty pro napětí 3,2 kPa. Obr. 97 zobrazuje hodnoty J_{nr} a %R pro napětí 0,1 kPa a obr. 98 pro napětí 3,2 kPa.

Tab. 27: *Statistické údaje silničních asfaltů – J_{nr} (T = 60 °C)*

Napětí [kPa]		Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa^{-1}]	Medián [kPa^{-1}]	Směrodat. odchylka [kPa^{-1}]	95% percentil [kPa^{-1}]	90% percentil [kPa^{-1}]	Návrh max. hodnoty [kPa^{-1}]
0,1	vše	117	4,0	3,7	3,8	9,9	7,6	-
	20/30	22	0,5	0,4	0,7	0,9	0,7	-
	50/70	64	3,9	3,9	2,1	7,0	6,3	-
	70/100	31	6,6	5,7	5,5	17,2	10,1	-
3,2	vše	117	4,3	4,2	3,0	10,5	7,6	-
	20/30	22	0,6	0,4	0,4	1,1	1,0	**1,0**
	50/70	64	4,6	4,7	2,1	7,5	6,9	**7,0**
	70/100	31	6,3	6,3	3,2	11,9	10,9	**11,0**

Tab. 28: *Statistické údaje silničních asfaltů – %R (T = 60 °C)*

Napětí [kPa]		Počet pojiv	Aritm. průměr [%]	Medián [%]	Směrodat. odchylka [%]	5% percentil [%]	10% percentil [%]	Návrh min. hodnoty [%]
0,1	vše	117	8,2	3,1	13,5	0,5	0,7	-
	20/30	22	18,2	11,9	14,9	7,4	8,6	-
	50/70	64	6,6	2,3	14,1	0,4	0,5	-
	70/100	31	4,2	2,4	6,1	0,8	1,0	-
3,2	vše	117	1,7	0,3	3,3	0,0	0,0	-
	20/30	22	7,2	6,3	4,4	2,1	2,4	**2,2**
	50/70	66	0,4	0,2	0,6	0,0	0,0	**0,0**
	70/100	31	0,3	0,1	0,8	0,0	0,0	**0,0**

Směrodatné mezní hodnoty byly stanoveny pouze pro charakteristiku J_{nr} při napětí 3,2 kPa. Výsledky pro napětí 0,1 kPa nemají až tak velkou vypovídající hodnotu, protože napětí 0,1 kPa se nachází v lineární viskoelastické oblasti. Zvolené maximální hodnoty vychází z hodnot mezi 90%-95% percentilem. Pro silniční asfalty s gradací 20/30 byla určena mezní hodnota nevratné smykové poddajnosti 1,0 kPa^{-1}, pro asfaltová pojiva 50/70 hodnota 7,0 kPa^{-1} a pro nejměkčí zkoumané silniční asfalty 70/100 byla navržena hodnota 11,0 kPa^{-1}.

Na základě percentilů není problém vymezit minimální hodnoty pro elastické zotavení, ale v případě zkoušky MSCR je dostačující posuzovat pouze hodnotu nevratné smykové poddajnosti. Hodnoty %R zpravidla odpovídají velikosti J_{nr} a pojiva, která nevyhoví podmínce J_{nr} většinou ani nesplní podmínku %R. Z tohoto důvodu jsou doporučené minimální hodnoty elastického zotavení pouze informativní, aby byl vidět rozdíl mezi jednotlivými podskupinami silničních asfaltů. V tab. 28 jsou hodnoty 5% a 10% percentilů při napětí 3,2 kPa 0,0 % (s výjimkou nejtvrdšího asfaltového pojiva 20/30). Neznamená to nulové elastické zotavení, ale velmi malé zotavení v řádu setin.

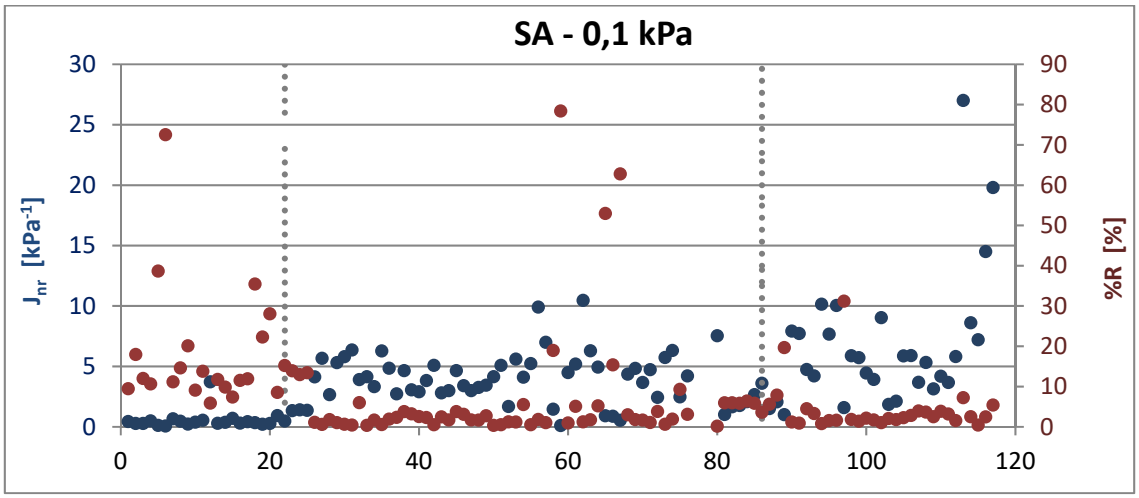
Nevratná smyková poddajnost stoupá s rostoucí penetrační třídou asfaltového pojiva a zároveň klesá elastické zotavení. S vyšším napětím logicky dochází ke snížení %R. Při napětí 3,2 kPa je hodnota %R v průměru pod 0,5 % a hodnota mediánu je ještě nižší (s výjimkou pojiv 20/30). J_{nr} by mělo s rostoucím napětím stoupat, ale u skupiny silničních asfaltů 70/100 je tomu naopak. Je to způsobeno tím, že u posledních 5 vzorků byla hodnota J_{nr} při napětí 0,1 kPa větší než při napětí 3,2 kPa. Jedná se o chybu vzniklou zaokrouhlením výsledků, neboť u těchto pojiv byla nastavena přesnost měření přetvoření na celé jednotky, díky čemuž při napětí 0,1 kPa vycházely vyšší hodnoty J_{nr}. U ostatních měření byla přesnost nastavena na tisícinu jednotky přetvoření.

Navíc je patrné, že při napětí 0,1 kPa jsou hodnoty více rozkolísané (směrodatná odchylka je větší) a to jak pro hodnoty %R, tak i u J_{nr}. Směrodatná odchylka nevratné smykové poddajnosti by měla být nižší, protože jsou zde naměřeny nižší hodnoty. Vysokých hodnot %R (přes 50 %) při napětí 0,1 kPa dosáhla asfaltová pojiva modifikovaná vybranými vosky. Za zmínku stojí rozdíl mezi hodnotami aritmetického průměru a mediánu. Zatímco pro charakteristiku J_{nr} jsou rozdíly mezi těmito dvěma statistickými průměry nepatrné, u charakteristiky %R je rozdíl výraznější (zejména při napětí 0,1 kPa).

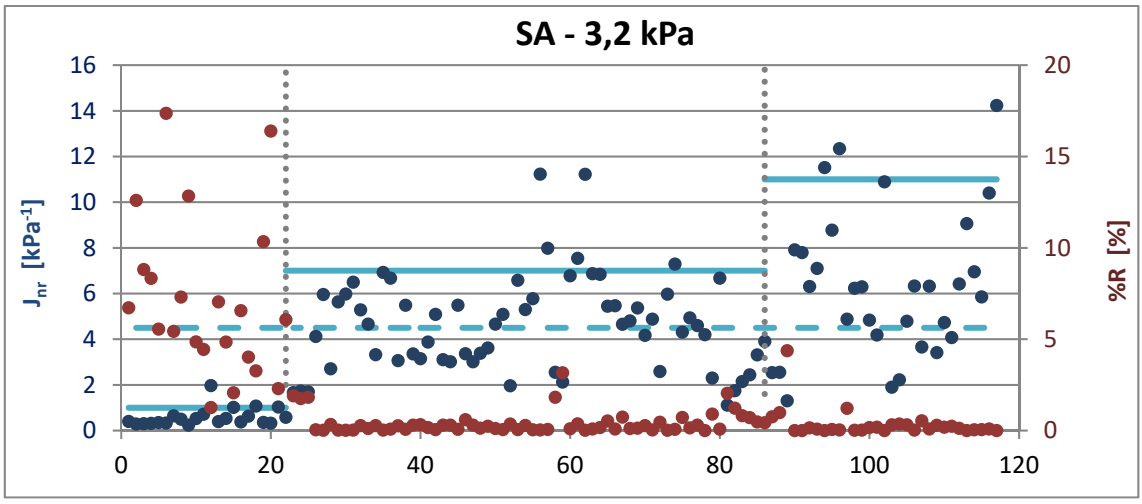
V určitých případech byl zaznamenán nárůst přetvoření i po odtížení. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že reometr není schopen uvolnit napětí tak rychle jak je požadováno. Díky tomu vycházely některé hodnoty %R záporné, ale v této situaci byla uvažována jako poslední hodnota zatížení první hodnota zaznamenaná při odtížení.

Na obr. 98 jsou zobrazeny navržené maximální hodnoty J_{nr} pro napětí 3,2 kPa. Čárkovanou čarou je znázorněna maximální hodnota platná v USA pro standardní třídu zatížení 4,5 kPa^{-1} (stupeň S, viz tab.2). Je nutné upozornit, že tato limitní hodnota platí pro pojiva po krátkodobém stárnutí a při zkušební teplotě dle zatřídění PG (pro nemodifikovaná pojiva se jedná nejčastěji o teplotu 58 °C), díky tomu se dá očekávat nižší hodnota J_{nr} než v našem případě. Je zřejmé, že maximální hodnotu by splnily všechny silniční asfalty 20/30, ale méně než 50 % asfaltových pojiv typu 50/70 a 70/100.

Opět je třeba poukázat na poměrně malý statistický soubor porovnávaných pojiv, zejména u skupiny silničních asfaltů 20/30.



Obr. 97: J_{nr} a %R silničních asfaltů při napětí 0,1 kPa



Obr. 98: J_{nr} a %R silničních asfaltů při napětí 3,2 kPa

Tab. 29: *Statistické údaje silničních asfaltů – parametry citlivosti (T = 60 °C)*

Parametr		Počet pojiv	Aritm. průměr [%]	Medián [%]	Směrodat. odchylka [%]	95% percentil [%]	90% percentil [%]	Návrh max. hodnoty [%]
R_{diff}	vše	117	83,6	90,5	19,0	99,5	98,3	-
	20/30	22	54,1	50,9	20,0	85,3	78,2	-
	50/70	64	89,3	91,8	10,8	98,3	98,0	-
	70/100	31	93,5	96,2	6,4	99,9	99,7	-
$J_{nr,diff}$	vše	117	55,4	11,5	209,4	222,2	76,2	-
	20/30	22	59,3	24,7	119,1	228,1	204,6	**200,0**
	50/70	64	75,0	11,0	274,6	497,6	51,2	**100,0**
	70/100	31	14,1	8,9	44,3	69,1	33,4	**50,0**

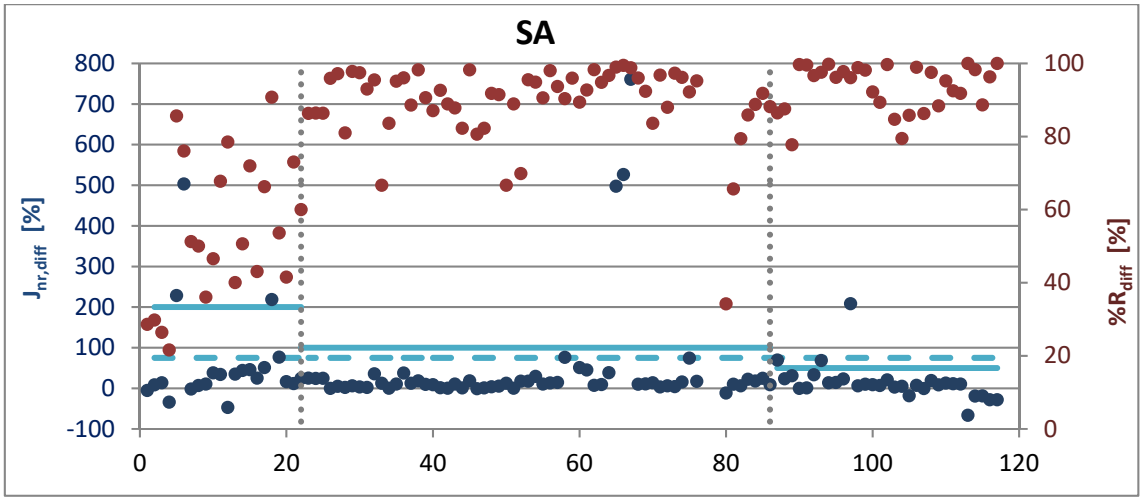
V tabulce 29 jsou základní statistické hodnoty parametrů citlivosti $J_{nr,diff}$ a R_{diff}, které se počítají z hodnot pro napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa. Je vhodné se zmínit, že hodnota $J_{nr,diff}$ nemá prokázanou spojitost s tvorbou trvalých deformací. Na obr. 99 je modrou čárkovanou čarou zobrazena maximální hodnota $J_{nr,diff}$ platná v USA a plnou čarou jsou navržené limitní hodnoty na základě dostupných měření. Americkou limitní hodnotu překročilo 9 vzorků (necelých 10 % testovaných pojiv). Při napětí 3,2 kPa je elastické zotavení u silničních asfaltů velmi nízké a tomu odpovídá vysoká hodnota R_{diff} (okolo 90 %). Jen pro asfaltová pojiva typu 20/30 se jedná v průměru o hodnotu okolo 50 %.

S hodnotou $J_{nr,diff}$ to je výrazně složitější. Někdy vycházel tento parametr záporný, což poukazuje na snížení hodnoty J_{nr} s vyšším napětím a to není úplně logické. Záporné hodnoty se objevily u již zmiňovaných posledních 5 vzorků a dvou vzorků 20/30. Naopak extrémně vysoké hodnoty byly u asfaltových pojiv skupiny 50/70 s jedním konkrétním nízkoteplotním voskem (3 vzorky), což poukazuje na jasné ovlivnění touto přísadou. Obdobný trend byl sledován i u pojiv skupiny 20/30 a 70/100, kdy hodnoty přesahující 100 % měly silniční asfalty s nízkoteplotním voskem (jiným, než v případě výše uvedeného asfaltového pojiva 50/70).

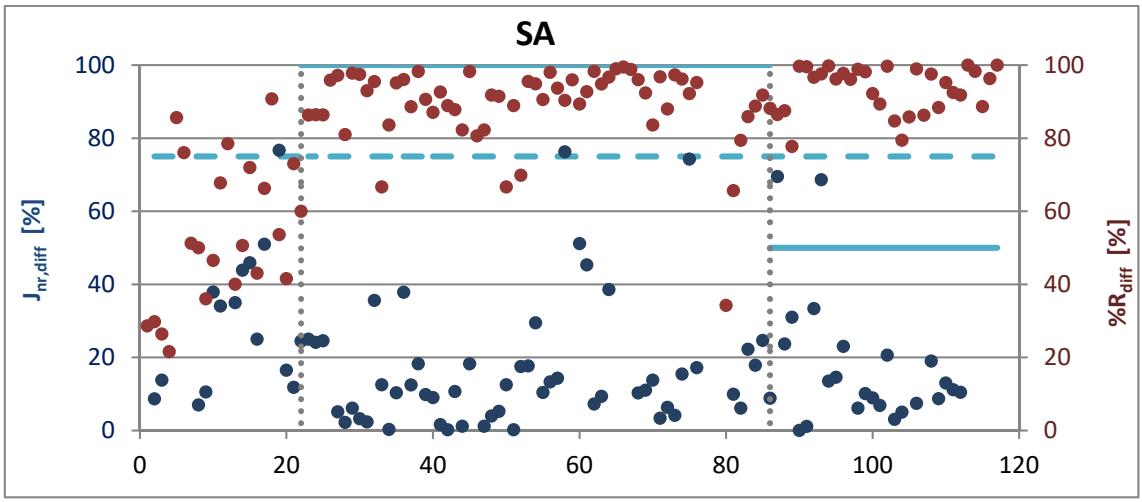
Po odstranění extrémně vysokých a záporných hodnot získáme přehlednější obrázek 100. Díky velmi rozkolísaným hodnotám (záporné nebo přesahující 500 %) jsou

i směrodatné odchylky velmi vysoké (tab. 29). Při pohledu na obr. 99 je zřejmé, že by bylo možné stanovit pro všechny porovnávané skupiny jednotnou hranici, kdy jako nejvhodnější se jeví 100 %. V tomto případě by u silničních asfaltů 20/30 došlo k zpřísnění podmínky, ale zároveň by nedošlo k vyloučení žádného dalšího vzorku. U asfaltových pojiv gradace 70/100 by došlo ke zmírnění podmínky, kterou by splnily další dva vzorky.

Je třeba poznamenat, že kritérium $J_{nr,diff}$ < 75 % bylo vyvinuto za předpokladu, že zkouška MSCR se provádí při teplotě PG a na krátkodobě zestárlých pojivech. Uvedené hodnoty jsou pro nezestárlá pojiva a při konkrétní teplotě 60 °C. Obě podmínky mohou ovlivnit citlivost na napětí.



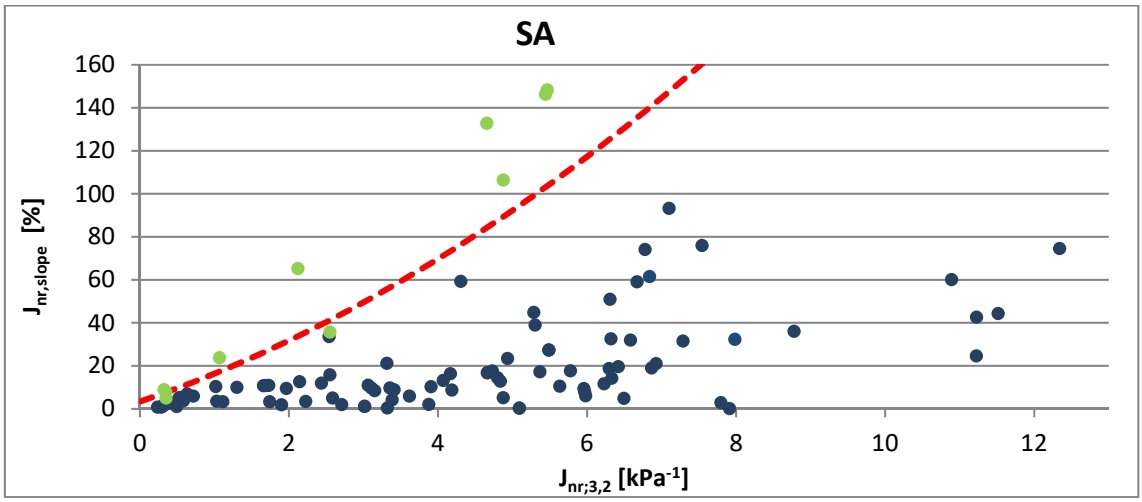
Obr. 99: Parametry citlivosti všech silničních asfaltů



Obr. 100: Parametry citlivosti silničních asfaltů zredukované o extrémní (i záporné) hodnoty

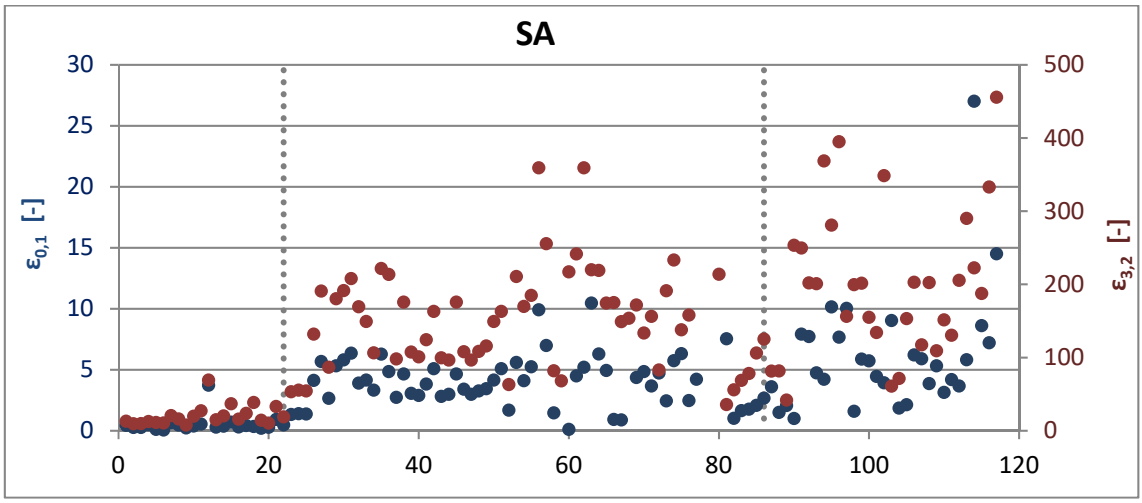
Novou alternativou pro určení nadměrně citlivých asfaltových pojiv je parametr $J_{nr,slope}$. Na obr. 101 jsou uvedeny pouze kladné hodnoty $J_{nr,slope}$ v závislosti na hodnotě nevratné smykové poddajnosti při napětí 3,2 kPa. Při porovnání rovnic obou parametrů citlivosti (rovnice 41 a 42) je logické, že záporné hodnoty vycházejí vždy i pro asfaltová pojiva se zápornými hodnotami $J_{nr,diff}$. Příčina záporných hodnot je vysvětlena výše a pro názornější zobrazení je vhodné uvažovat jen kladné hodnoty. Červenou čárkovanou čarou je znázorněna

limitní hodnota stanovená v práci [172] (rovnice 43). Podmínku pro parametr $J_{nr,slope}$ nesplnilo 8 pojiv s hodnotou $J_{nr,diff}$ vyšší než 200 %. Naopak dvě další pojiva, která překročila americkou podmínku $J_{nr,diff}$ < 75 %, vyhověla podmínce $J_{nr,slope}$. Obě pojiva měla $J_{nr,diff}$ nižší než 80 % a splnila by nově navrženou podmínku pro pojiva 50/70 a 20/30 (J_{nr} < 100 %, respektive J_{nr} < 200 %). Všechna asfaltová pojiva, jež přesáhnula americkou podmínku $J_{nr,diff}$, jsou na obr. 101 vykreslena zelenou barvou.



Obr. 101: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na J_{nr} při napětí 3,2 kPa pro silniční asfalty

Zajímavý graf na obr. 102 znázorňuje celkové přetvoření na konci 10. cyklu s napětím 0,1 kPa (hlavní svislá osa – modrá barva) a 3,2 kPa (vedlejší svislá osa – červená barva). Logicky je s vyšším napětím dosaženo většího přetvoření (v průměru 50 násobného). S rostoucí gradací asfaltových pojiv se zvyšuje i velikost přetvoření.



Obr. 102: Celkové přetvoření silničních asfaltů

4.2.2 POLYMEREM MODIFIKOVANÉ ASFALTY

Skupina asfaltových pojiv PMB je rozšířena o jedno pojivo v porovnání se skupinou, na které byla provedena oscilační zkouška FS (celkem se jedná o 41 pojiv). Nejtvrdší pojivo PMB 10/40-65 bylo zařazeno do skupiny PMB 25/55-X a v žádné charakteristice výrazně nevybočuje. U PMB pojiv není velký rozdíl ve vypočítaných charakteristikách J_{nr} a %R při napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa, a proto je možné zobrazit obě napětí na jedné ose a v jednom grafu (obr. 103 a 104). Základní statistické údaje hodnot J_{nr} a %R jsou v tabulce 30, respektive v tabulce 31.

Tab. 30: *Statistické údaje pro PMB – J_{nr} (T = 60 °C)*

Napětí [kPa]		Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa^{-1}]	Medián [kPa^{-1}]	Směrodat. odchylka [kPa^{-1}]	95% percentil [kPa^{-1}]	90% percentil [kPa^{-1}]	Navržená max. hod. [kPa^{-1}]
0,1	vše	41	0,4	0,3	0,2	0,7	0,6	-
	PMB 25/55-X	31	0,4	0,4	0,2	0,8	0,6	-
	PMB 40/100-X	10	0,3	0,2	0,2	0,6	0,6	-
3,2	vše	41	0,5	0,4	0,3	1,1	0,9	**1,0**
	PMB 25/55-X	31	0,5	0,4	0,3	1,0	0,8	**1,0**
	PMB 40/100-X	10	0,4	0,2	0,5	1,3	1,2	**1,0**

Tab. 31: *Statistické údaje pro PMB – %R (T = 60 °C)*

Napětí [kPa]		Počet pojiv	Aritm. průměr [%]	Medián [%]	Směrodat. odchylka [%]	5% percentil [%]	10% percentil [%]	Návrh min. hodnoty [%]
0,1	vše	41	54,1	54,2	22,8	25,0	27,0	-
	PMB 25/55-X	31	50,1	50,4	21,1	24,3	26,9	-
	PMB 40/100-X	10	66,3	79,9	25,8	0,3	0,3	-
3,2	vše	41	47,0	44,3	26,8	10,1	17,0	-
	PMB 25/55-X	31	41,9	41,1	22,1	16,4	17,6	**17,0**
	PMB 40/100-X	10	61,6	82,2	36,3	3,1	3,3	**3,2**

U PMB pojiv je možné navrhnout maximální hodnotu J_{nr} pro napětí 3,2 kPa stejnou pro obě penetrační třídy. Na základě percentilů by u měkčího pojiva PMB 40/100-X měla být limitní hodnota J_{nr} vyšší, ale při snížení na hodnotu 1,0 kPa^{-1} nedojde k vyloučení více vzorků (obr. 103). Je vhodné zmínit, že se jedná o nejméně početnou skupinu (pouze 10 vzorků), jejíž hodnocení není podloženo dostatkem dat. Zvolená maximální hodnota J_{nr} pro pojiva PMB je shodná jako pro silniční asfalty 20/30.

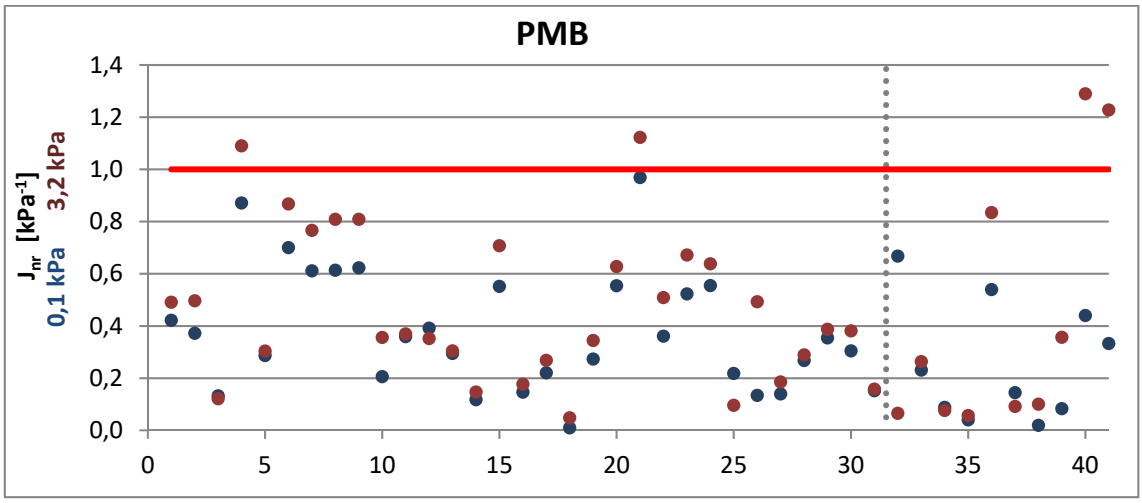
Podle mezních hodnot platných v USA, by všechna pojiva PMB splnila podmínku pro standardní třídu zatížení (stupeň S) i vysoké dopravní zatížení (stupeň H) s omezenou maximální hodnotou 2,0 kPa^{-1}. Většina měřených pojiv PMB by vyhověla i mezní hodnotě 1,0 kPa^{-1} pro velmi vysoké dopravní zatížení (stupeň V). Opět je ale třeba upozornit, že americké mezní hodnoty platí pro zestárlá asfaltová pojiva a teplotu zkoušky dle zatřídění PG.

V průměru je u měkčího pojiva PMB hodnota J_{nr} nižší a %R vyšší v porovnání s tvrdším PMB, což neodpovídá měřením pro silniční asfalty, u kterých s rostoucí gradací rostla i hodnota

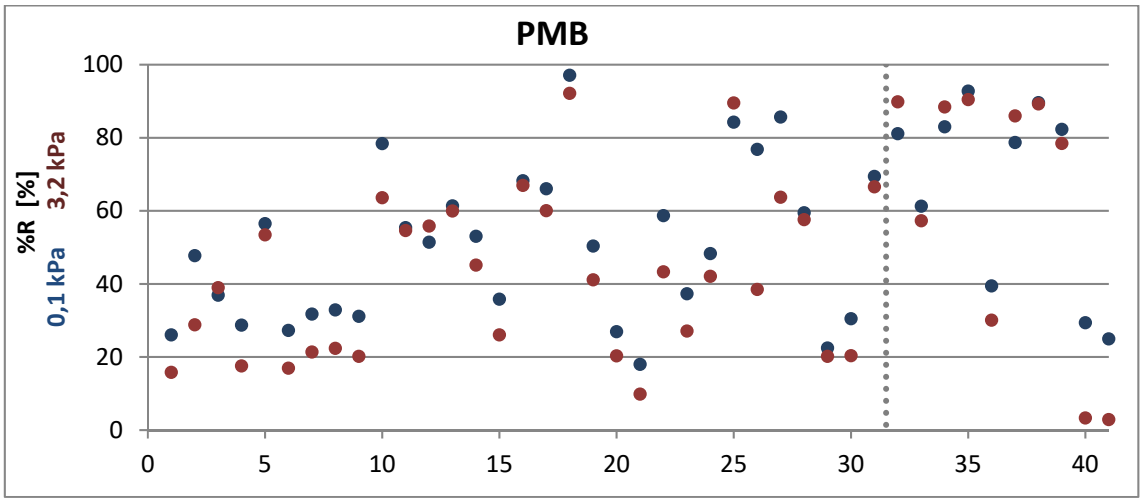
J_{nr}. Pojiva PMB 40/100-X ale mají vyšší směrodatné odchylky a navíc jich je jen 10, a to jistě vede k ovlivnění výsledků.

Dle očekávání je u pojiv PMB vysoká hodnota %R (obr. 104). S vyšším napětím se %R snižuje, ale rozdíl není výrazný. Největší rozdíl je u posledních dvou vzorků připravených laboratorně ze silničního asfaltu 50/70 a s přísadou amorfních poly-alfa-olefinů (PAO). Nejedná se tedy přímo o pojivo PMB, ale díky vlivu na empirické zkoušky i oscilační zkoušku je možné označit toto asfaltové pojivo jako pojivo plnící úlohu určitého mezistupně mezi standardním silničním asfaltem a PMB pojivem. Pojiva s touto přísadou mají vylepšené deformační charakteristiky a prokazují dobré parametry dynamické viskozity. Ve srovnání s běžnými PMB jsou jejich elastické vlastnosti velmi malé, ale výrazně lepší než u silničních asfaltů.

Za zmínku stojí i hodnocení směrodatných odchylek. Zatímco v případě silničních asfaltů byly větší směrodatné odchylky při napětí 0,1 kPa, u PMB pojiv tomu je přesně naopak.



Obr. 103: Nevratná smyková poddajnost PMB pojiv



Obr. 104: Elastické zotavení PMB pojiv

V tabulce 32 jsou uvedeny statistické hodnoty pro parametry citlivosti R_{diff} a $J_{nr,diff}$. Citlivost na změnu napětí je zobrazena na obr. 105 a 106.

Tab. 32: *Statistické údaje pro PMB – parametry citlivosti (T = 60 °C)*

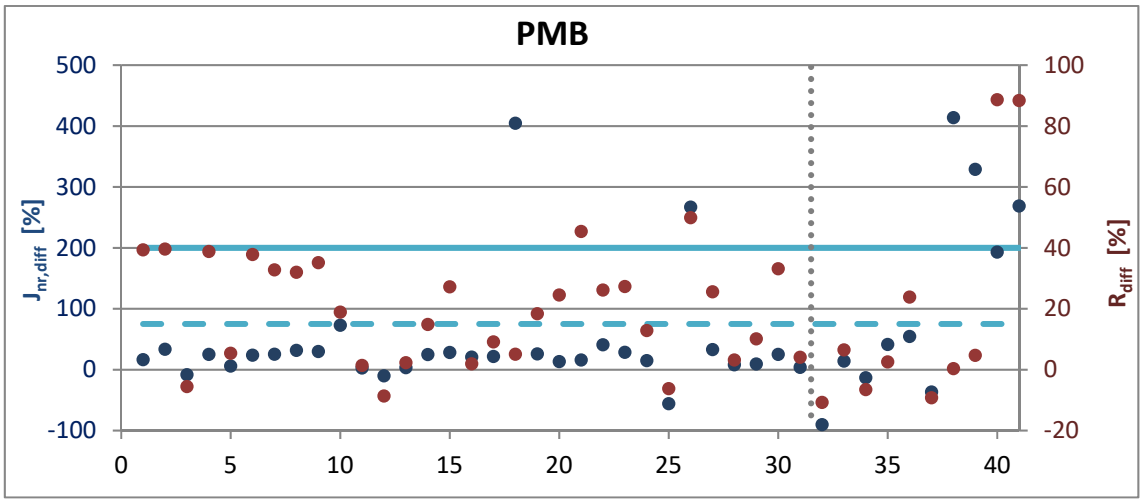
Parametr		Počet pojiv	Aritm. průměr [%]	Medián [%]	Směrodat. odchylka [%]	95% percentil [%]	90% percentil [%]	Návrh max. hodnoty [%]
R_{diff}	vše	41	19,3	14,8	23,1	49,9	39,6	-
	PMB 25/55-X	31	19,4	18,9	16,6	42,5	39,4	-
	PMB 40/100-X	10	18,8	3,6	38,0	88,6	22,5	-
$J_{nr,diff}$	vše	41	57,5	24,9	114,5	329,0	200,6	**200,0**
	PMB 25/55-X	31	-0,1	23,9	84,0	170,0	40,9	**200,0**
	PMB 40/100-X	10	117,5	48,1	171,7	375,7	337,5	**200,0**

Hodnoty R_{diff} jsou pro pojiva PMB výrazně nižší než u silničních asfaltů. Je to dáno podstatou PMB pojiv, která by měla být elastická i při vyšším zatížení. Zajímavostí jsou záporné hodnoty parametru R_{diff} ukazující na zvýšení elastického zotavení s vyšším napětím, což není logické. Při bližším prozkoumání bylo zjištěno, že se to objevuje u pojiv, jejichž elastické zotavení při napětí 0,1 kPa je při prvním cyklu výrazně nižší než zbylých 9 cyklů. Problematika je blíže popsána v kapitole 4.2.7. Pokud bychom eliminovali hodnoty prvního cyklu, R_{diff} by bylo kladné a vedlo by to i ke kladným hodnotám $J_{nr,diff}$ (obr. 106). Na obr. 106 jsou také vynechány hodnoty R_{diff} posledních dvou vzorků, jejichž citlivost na změnu %R odpovídá spíše silničním asfaltům. R_{diff} je u nich téměř 90 % a jedná se o již zmiňovaná pojiva modifikovaná PAO. Tabulka 32 kalkuluje se všemi původními hodnotami.

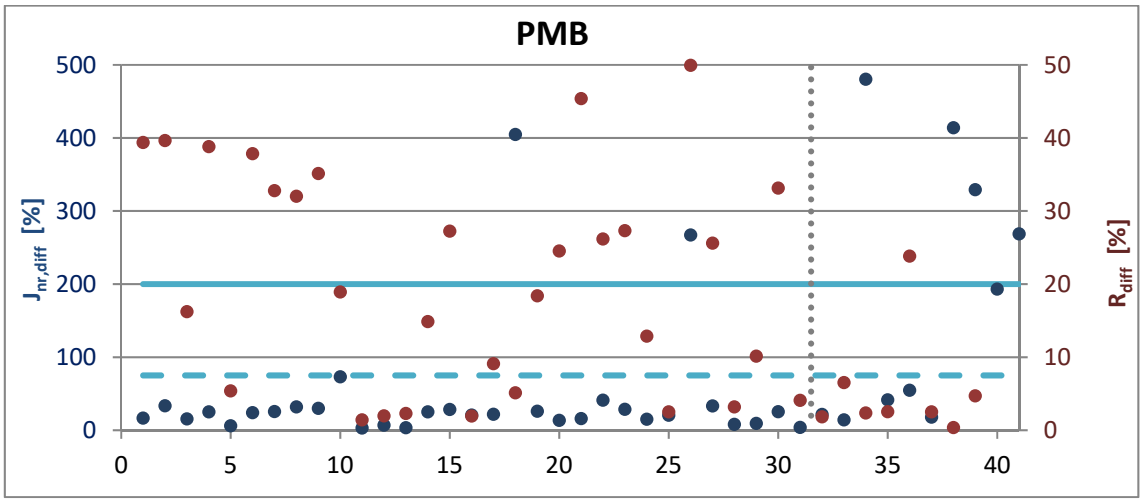
Aritmetické průměry hodnot $J_{nr,diff}$ jsou dost překvapivé. Zatímco u tvrdších PMB je hodnota záporná, u měkčích PMB je téměř 2,5 násobně vyšší než hodnota mediánu. Záporné hodnoty vznikly zásluhou zmiňovaného prvního odlišného cyklu při napětí 0,1 kPa. Naopak vysoké hodnoty u druhé skupiny PMB pojiv jsou díky vybočujícím hodnotám posledních dvou vzorků. Další vysoké hodnoty jsou u pojiv s extrémně nízkou charakteristikou J_{nr} při napětí 0,1 kPa (J_{nr} = 0,02 kPa^{-1}), na základě čehož jsou pak rozdíly v napětí výraznější. Rozkolísaným hodnotám odpovídají i vysoké směrodatné odchylky.

Navržené limitní hodnoty PMB pojiv u zkoušky FS i MSCR jsou identické pro obě penetrační třídy (s výjimkou fázového úhlu), a proto je vhodné zvolit i zde shodnou hodnotu. Nabízí se stanovit totožnou hodnotu jako pro silniční asfalty 20/30, které mají i stejnou hodnotu J_{nr} při napětí 3,2 kPa. Maximální hodnota $J_{nr,diff}$ = 200 % odpovídá i 90 % percentilu všech PMB. Za zvážení stojí i limitní hodnota 100 %, výrazným zpřísněním podmínky $J_{nr,diff}$ by nevyhovělo pouze jedno pojivo navíc (s přísadou PAO). Stejně tak limitní hodnotu 75 % platnou v USA výrazně překonalo 6 asfaltových pojiv (po eliminaci prvního cyklu by ji nesplnilo 7 pojiv).

Překročení limitní hodnoty parametru $J_{nr,diff}$ není důležité z hlediska tvorby trvalých deformací. Většina pojiv s vysokou citlivostí na změnu napětí mají při obou napětí hodnoty nevratné smykové poddajnosti velmi malé.

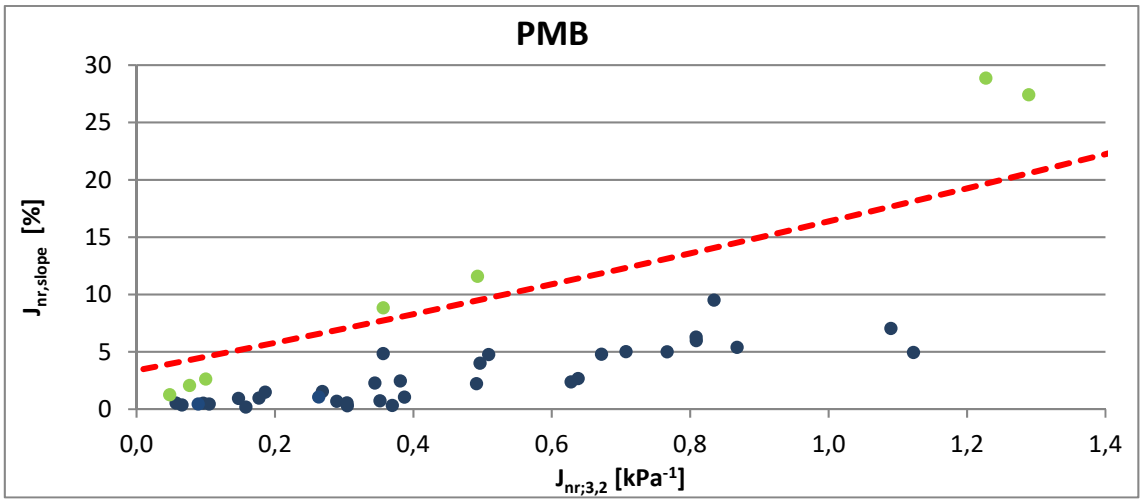


Obr. 105: Parametry citlivosti všech PMB pojiv



Obr. 106: Upravené a zredukované parametry citlivosti PMB pojiv

Na obrázku 107 je zobrazena závislost parametru $J_{nr,slope}$ a $J_{nr;3,2}$ s upravenými hodnotami (stejně jako v případě obr. 106). Opět jsou zelenou barvou označena pojiva, která nevyhověla americké podmínce $J_{nr,diff}$ < 75 %. Potvrzuje se přínos tohoto nového parametru, neboť tři pojiva s nízkým $J_{nr;3,2}$, u nichž se očekává velká odolnost vůči vzniku trvalých deformací, splní mírnější podmínku $J_{nr,slope}$ (na obrázku vykreslena červenou čárkovanou čarou), ačkoli americkou podmínku $J_{nr,diff}$ překročí. Všechna 3 pojiva měla $J_{nr,diff}$ mezi 400-500 %. Navržené maximální hodnotě $J_{nr,diff}$ = 200 % by vyhovělo ze zeleně označených asfaltových pojiv na obr. 107 jen pojivo s nejvyšší hodnotou $J_{nr;3,2}$.



Obr. 107: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na J_{nr} při napětí 3,2 kPa pro PMB pojiva

4.2.3 ASFALTY MODIFIKOVANÉ PRYŽOVÝM GRANULÁTEM

Skupina CRMB pojiv je nejpočetnější a skládá se ze 162 pojiv, která je možné následně rozdělit buď pomocí výchozího asfaltového pojiva (značeno jako báze 20/30, 50/70 a 70/100) nebo podle množství použitého pryžového granulátu (obsah do 10 % pryže v pojivu, 10-15 % pryže v pojivu a více než 15 % pryže v pojivu). V tabulkách 33 až 35 se základními statistickými údaji je vynechána podskupina se základním pojivem 20/30 obsahující jen čtyři pojiva, na základě nichž by bylo velmi zavádějící odvozovat statistické údaje. S těmito pojivy je ale počítáno v řádku porovnávajícím „vše“. Stejně tak jsou v této podkapitole pojiva s bází 20/30 zobrazena i na následujících grafech rozdělených dle základního asfaltového pojiva (uvedeny vždy jako první 4 vzorky).

U pojiv CRMB rovněž nebyl zaznamenán v případě vyššího napětí výrazný rozdíl naměřených hodnot, a proto je možné graficky znázornit identické veličiny při obou napětích v jednom grafu (obr. 108 až 111), stejně jako u PMB pojiv. V tabulce 33 jsou statistické hodnoty CRMB pojiv pro charakteristiku J_{nr} a v tabulce 34 pro charakteristiku %R.

Tab. 33: *Statistické údaje CRMB pojiv – J_{nr} (T = 60 °C)*

Napětí [kPa]		Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa^{-1}]	Medián [kPa^{-1}]	Směrodat. odchylka [kPa^{-1}]	95% percentil [kPa^{-1}]	90% percentil [kPa^{-1}]	Navržená max. hod. [kPa^{-1}]
0,1	vše	162	0,9	0,5	1,2	3,7	2,2	-
	báze 50/70	125	0,8	0,5	1,0	3,2	1,9	-
	báze 70/100	33	1,4	0,7	1,7	5,2	3,4	-
	< 10 % CR	8	1,9	1,9	1,1	3,6	3,0	-
	10-15 % CR	131	0,9	0,6	1,1	3,6	2,0	-
	> 15 % CR	19	0,7	0,3	1,6	2,7	1,2	-
3,2	vše	162	1,4	1,0	1,4	3,7	2,8	-
	báze 50/70	125	1,2	1,0	1,0	2,8	2,4	**2,5**
	báze 70/100	33	2,3	1,6	2,1	7,2	5,6	**6,0**
	< 10 % CR	8	3,1	3,1	1,3	5,0	4,7	**5,0**

	10-15 % CR	131	1,3	1,1	1,3	3,4	2,6	**3,0**
	> 15 % CR	19	1,1	0,6	1,7	3,3	1,9	**2,0**

Tab. 34: *Statistické údaje pro CRMB – %R (T = 60 °C)*

Napětí [kPa]		Počet pojiv	Aritm. průměr [%]	Medián [%]	Směrodat. odchylka [%]	5% percentil [%]	10% percentil [%]	Návrh min. hodnoty [%]
0,1	vše	162	48,6	39,3	28,7	14,1	17,3	-
	báze 50/70	125	50,0	39,1	29,3	16,4	18,6	-
	báze 70/100	33	39,7	37,6	24,3	4,9	7,9	-
	< 10 % CR	8	30,2	17,0	27,5	7,5	7,5	-
	10-15 % CR	131	48,7	38,4	29,0	16,4	18,5	-
	> 15 % CR	19	49,0	49,0	23,9	8,8	27,2	-
3,2	vše	162	13,5	7,8	19,6	0,6	1,4	-
	báze 50/70	125	12,8	7,3	18,9	1,4	1,9	**1,5**
	báze 70/100	33	9,1	8,4	9,1	0,3	0,4	**0,3**
	< 10 % CR	8	1,2	1,0	0,9	0,3	0,3	**0,3**
	10-15 % CR	131	11,1	7,2	15,6	1,0	1,7	**1,5**
	> 15 % CR	19	23,4	17,8	26,1	0,8	4,0	**2,0**

Při hodnocení naměřených hodnot zkoušky MSCR z pohledu použitého základního asfaltu lze říci, že podskupina s bází 70/100 má vyšší J_{nr} a nižší %R ve srovnání s podskupinou báze 50/70, uvedené odpovídá zjištěním u silničních asfaltů. U CRMB pojiv jsou hodnoty J_{nr} zhruba poloviční v konfrontaci se silničními asfalty, čemuž odpovídají i přibližně poloviční limitní hodnoty. Naopak %R je v porovnání se silničními asfalty několikanásobně vyšší, ale zdaleka nedosahuje hodnot shodných s PMB.

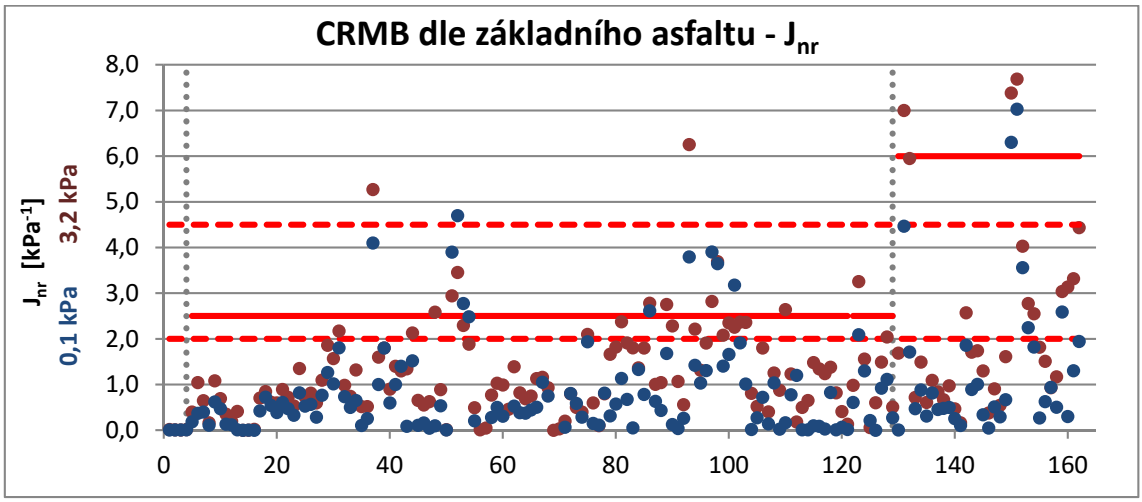
Z hlediska množství přidávaného pryžového granulátu je zjevné, že vyšší množství CR zvyšuje elasticitu (%R) a snižuje nevratnou smykovou poddajnost (J_{nr}), což je jedna z hlavních předností pojiv CRMB. Dávkování do 10 % CR má stále velmi malou elasticitu (zejména při napětí 3,2 kPa). Rozdíl naměřených hodnot zkoušky MSCR u pojiv CRMB podle základního asfaltu není velký, a proto se jeví určitě jako vhodnější rozdělení podle procentuálního zastoupení pryžového granulátu.

Na obr. 108 a 109 jsou čárkovanou čarou zobrazeny mezní hranice platné v USA – 4,5 kPa^{-1} pro standardní třídu zatížení (S) a 2,0 kPa^{-1} pro vysoké dopravní zatížení (H). Plnou čarou jsou znázorněny navržené limitní hodnoty, kterým nevyhoví maximálně 10 % vzorků. Vyšší množství dávkovaného CR by pravděpodobně vedlo k ještě lepším výsledkům. Je ale důležité upozornit, že s vyšším množstvím pryžového granulátu se výrazně zvyšuje viskozita (zhoršuje se zpracovatelnost) a problém nastává i se skladovací stabilitou. Z tohoto důvodu se jako nejvhodnější jeví dávkování v množství 10-15 % CR (maximálně 20 % CR).

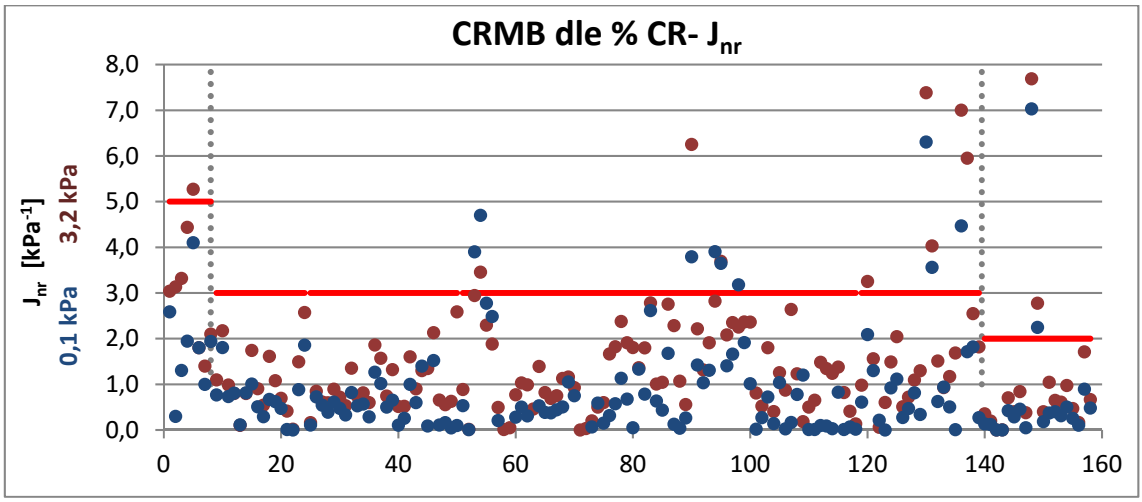
Nejvyšších hodnot J_{nr} při obou napětích dosáhly 2 varianty pojiv obsahující speciální pryžový granulát v rozdílném dávkování. Tyto varianty měly i jedny z nejnižších hodnot G* a z tohoto pohledu poukazují na nepříliš přínosný typ CR.

Grafická interpretace výsledků elastického zotavení je na obr. 110 a 111. Je evidentní, že hodnoty %R pro napětí 3,2 kPa se pohybují nejčastěji do 20 %. U jednoho vzorku bylo vypočítáno %R při napětí 0,1 kPa vyšší než 100 %, odpovídalo by to tomu, že po odtížení se

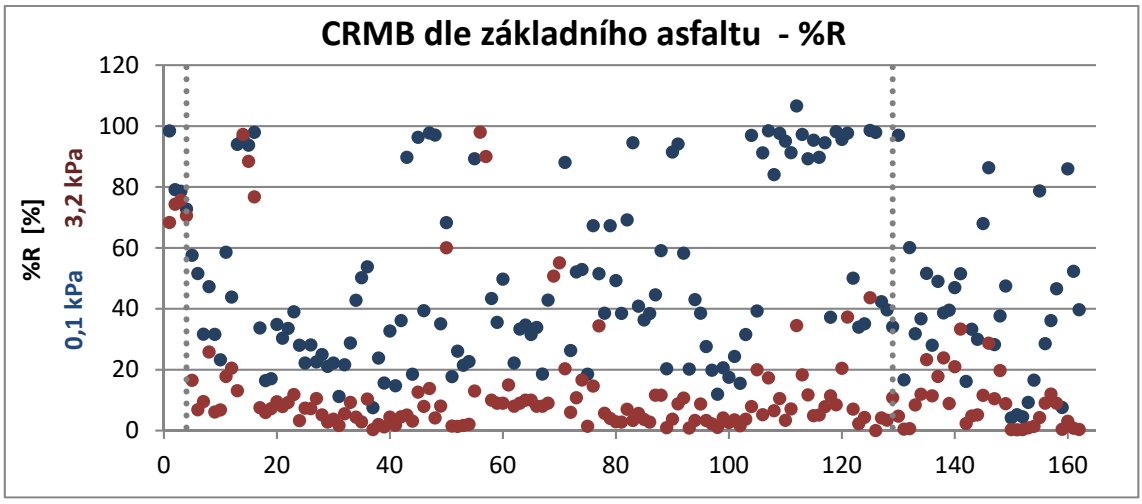
přetvoření vrátí nejen do stavu před zatížením, ale dojde ke snížení přetvoření ještě víc. To je ale nelogické, a proto bylo zapotřebí překontrolovat jednotlivé zatěžovací cykly. U tohoto pojiva byly hodnoty %R u prvních cyklů značně rozkolísané (v případě 2. cyklu bylo naměřeno %R 158 %). Opakovaně se potvrzuje, že by bylo vhodnější pro výpočet použít druhou polovinu cyklů, která má konzistentní výsledky. Blíže se této problematice věnuje kapitola 4.2.7.



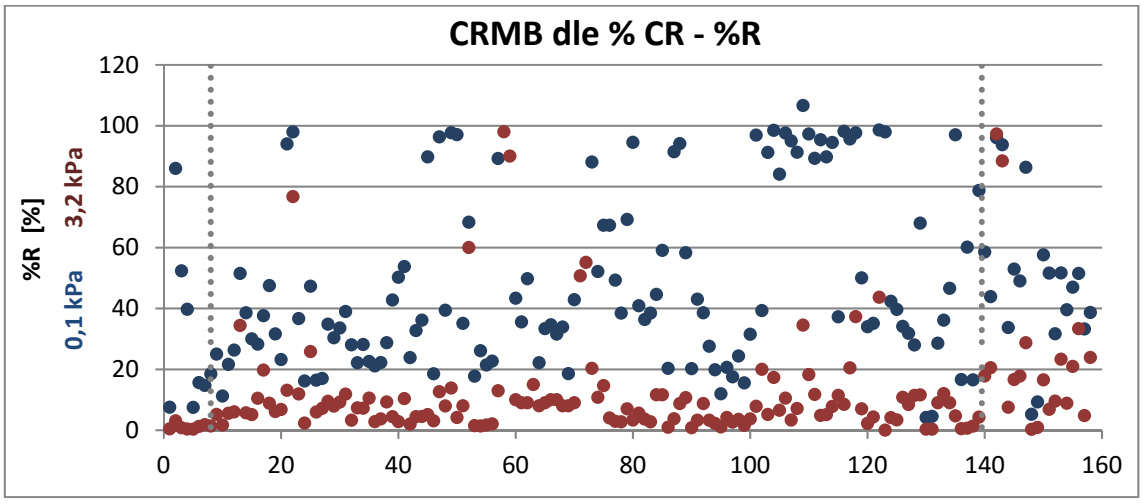
Obr. 108: Nevratná smyková poddajnost CRMB pojiv (rozdělení podle základního asfaltového pojiva)



Obr. 109: Nevratná smyková poddajnost CRMB pojiv (rozdělení podle množství pryžového granulátu)



Obr. 110: Elastické zotavení CRMB pojiv (rozdělení podle základního asfaltového pojiva)



Obr. 111: Elastické zotavení CRMB pojiv (rozdělení podle množství pryžového granulátu)

Tab. 35: *Statistické údaje pro CRMB – parametry citlivosti (T = 60 °C)*

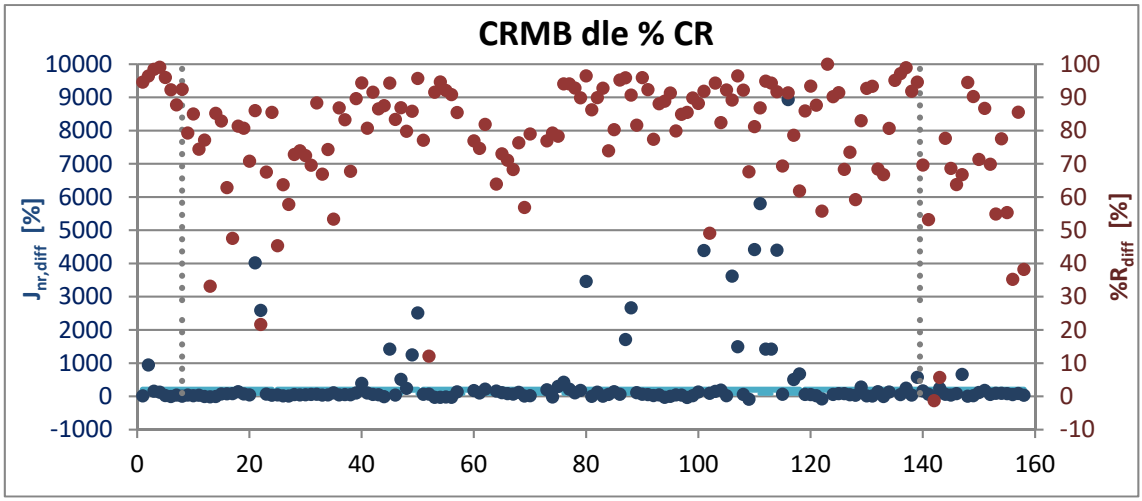
Parametr		Počet pojiv	Aritm. průměr [%]	Medián [%]	Směrodat. odchylka [%]	95% percentil [%]	90% percentil [%]	Navržená max. hod. [%]
R_{diff}	vše	162	77,1	83,0	20,8	96,1	94,6	-
	báze 50/70	125	79,1	85,0	17,9	95,7	94,3	-
	báze 70/100	33	78,0	82,9	18,3	98,7	97,0	-
	< 10 % CR	8	94,6	95,3	3,7	98,9	98,7	-
	10-15 % CR	131	80,5	85,0	15,0	95,9	94,5	-
	> 15 % CR	19	61,3	68,6	26,2	90,7	87,4	-
$J_{nr,diff}$	vše	162	634,2	66,3	2620,3	3501,0	1425,9	**200**
	báze 50/70	125	542,2	64,9	1344,1	3663,0	1540,5	**200**
	báze 70/100	33	1035,7	83,9	5133,9	778,1	516,5	**200**
	< 10 % CR	8	165,6	34,3	321,3	670,4	392,5	**200**
	10-15 % CR	131	761,8	66,7	2913,9	3939,9	1626,5	**200**
	> 15 % CR	19	113,3	83,9	147,6	284,1	193,2	**200**

Tabulka 35 obsahuje statistické údaje parametrů citlivosti pojiv CRMB. I v případě pojiv CRMB vycházely některé hodnoty $J_{nr,diff}$ záporné a bylo to znovu způsobeno ovlivněním výsledků hodnotou přetvoření z prvního cyklu. Naopak určitá pojiva mají hodnoty $J_{nr,diff}$ extrémně vysoké (obr. 112). Jeden vzorek dosáhl dokonce hodnoty přes 30 000 %, ale pro lepší přehlednost je na obr. 112 vynechán. V tabulce 35 je i s touto hodnotou počítáno. Extrémní hodnota ovlivní především aritmetický průměr, ale hodnotu mediánu téměř neovlivní. Z těchto důvodů je vhodnější posuzovat hodnoty mediánu, protože nejsou výrazně ovlivněny extrémními hodnotami.

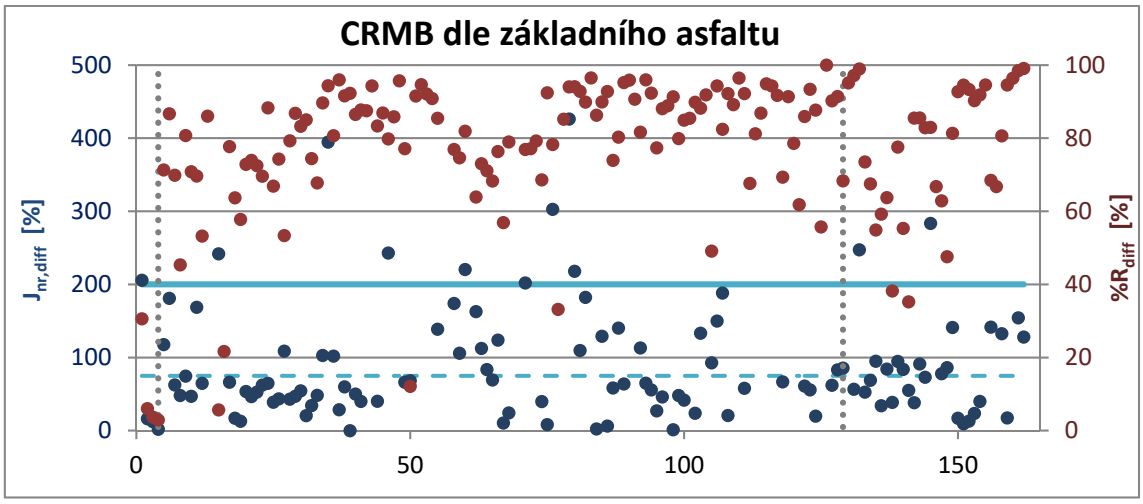
Při bližším prověření je možné shledat dvě zásadní příčiny vysokých hodnot. První jsou velmi malá přetvoření při napětí 0,1 kPa, jež se ve výpočtu hodnot J_{nr} blíží nule a při výpočtu parametru $J_{nr,diff}$ se hodnotou $J_{nr;0,1}$ dělí. Díky tomu je výsledná hodnota parametru citlivosti $J_{nr,diff}$ extrémně velká. Druhou příčinou jsou velmi rozkolísané hodnoty jednotlivých cyklů, zjištěné zejména u variant měřených s mezerou 1 mm, ačkoli byl použitý pryžový granulát velmi jemné zrnitosti. V těchto případech by bylo vhodnější měřit s větší mezerou (2 mm). Eliminací nerelevantních hodnot se získá obr. 113, případně obr. 114.

Navrhnout limitní hodnotu z 90 % nebo 95 % percentilu není u pojiv CRMB příliš vhodné. Jsou výrazně ovlivněny již zmiňovanými extrémními hodnotami, kterých je u jednotlivých podskupin okolo 10 %. Z tohoto důvodu byla stanovena limitní hodnota pro parametr $J_{nr,diff,}$ odpovídající spíš 80 % percentilu. Pouze pro pojiva s obsahem CR vyšším než 15 % odpovídá hodnotě 90 % percentilu. Hodnota $J_{nr,diff}$ = 200 % je shodná jak pro PMB pojiva, tak pro silniční asfalty gradace 20/30. Americká limitní hodnota parametru citlivosti se jeví jako velmi přísná pro pojiva CRMB, protože ji překročilo 44 % sledovaných pojiv.

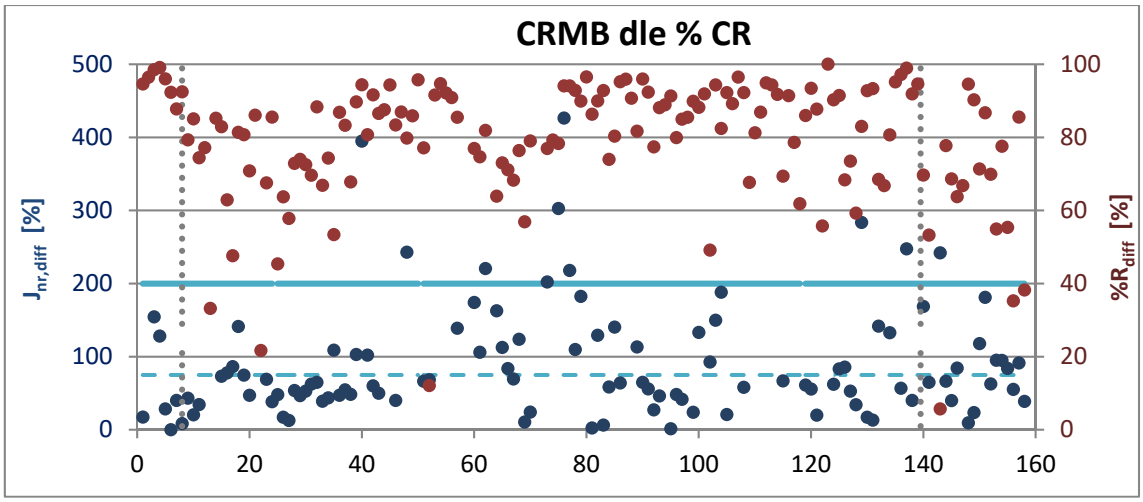
Hodnoty R_{diff} jsou u všech podskupin CRMB pojiv přibližně stejné (okolo 80 %), což se blíží hodnotám silničních asfaltů, u nichž se R_{diff} pohybuje okolo 90 %. Naopak u PMB pojiv je citlivost elastického zotavení na napětí do 20 %.



Obr. 112: Parametry citlivosti PMB pojiv (rozdělení podle množství pryžového granulátu)

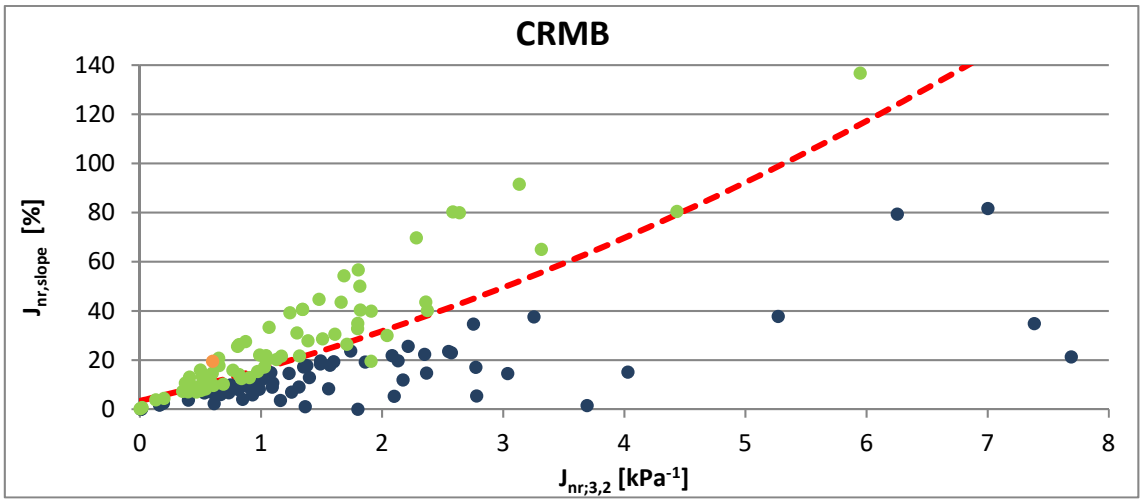


Obr. 113: Upravené a zredukované parametry citlivosti PMB pojiv (rozdělení podle základního asfaltového pojiva)



Obr. 114: Upravené a zredukované parametry citlivosti PMB pojiv (rozdělení podle množství CR)

Pojiva CRMB je možné označit za nejcitlivější na změnu napětí. 71 pojiv nevyhoví americké podmínce $J_{nr,diff}$ < 75 % a přesně 50 pojiv (necelá 1/3 pojiv CRMB) nesplní ani novější podmínku $J_{nr,slope}$ (obr. 115). Je zajímavé, že jedno pojivo překročilo podmínku $J_{nr,slope}$, ale vyhovělo americké podmínce $J_{nr,diff}$ (na obr. 117 je znázorněno oranžovou barvou). Navržená podmínka $J_{nr,diff}$ < 200 % je nejméně přísná a přesáhlo by ji 32 pojiv.



Obr. 115: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na J_{nr} při napětí 3,2 kPa pro CRMB pojiva

4.2.4 STÁRNUTÍ

Zkouška MSCR na vzorcích vystavených laboratornímu stárnutí byla provedena na PMB pojivech i na silničních asfaltech. Z hlediska tvorby trvalých deformací je stěžejní krátkodobé stárnutí, protože po dlouhodobém stárnutí hrozí spíše vznik mrazových (teplotně indukovaných) trhlin. Pro lepší představu vývoje chování asfaltového pojiva během jeho životnosti jsou zobrazeny výsledky obou typů stárnutí. Stanovení limitních hodnot má však význam pouze pro pojiva po krátkodobém stárnutí. Krátkodobé stárnutí bylo prováděno metodou RTFOT nebo TFOT a dlouhodobé stárnutí reprezentuje samostatně provedená metoda PAV, metoda kombinující stárnutí TFOT a PAV (značeno TFOT+PAV) nebo trojnásobná metoda RTFOT (značeno 3xRTFOT). Je vhodné, aby se jednotlivé charakteristiky s ohledem na stárnutí výrazně neměnily, naznačuje to stabilitu asfaltového pojiva a vozovky při provozních zatížení.

4.2.4.1 SILNIČNÍ ASFALTY

Všechny vzorky vystavené simulovanému stárnutí byla pojiva gradace 50/70. Krátkodobé stárnutí bylo prováděno metodou RTFOT nebo TFOT, současně byly do této skupiny pojiv přidány vzorky měřené na zpětně získaných asfaltových pojivech (extrahovaných). Mezi těmito vzorky jsou i extrahovaná PMB (posledních 9 vzorků), jež jsou v grafech oddělena svislou tečkovanou čarou. Ve statistických výpočtech (tabulky 36 až 38) s nimi není počítáno a jsou graficky znázorněny jen pro porovnání.

Dlouhodobé stárnutí reprezentuje metoda TFOT+PAV, 3xRTFOT nebo samostatně provedené stárnutí PAV na vzorku předem nezestárlém. Skupina silničních asfaltů po krátkodobém stárnutí nebo extrahovaných se skládá ze 41 vzorků (plus 9 extrahovaných PMB) a po dlouhodobém stárnutí z 22 vzorků (nejsou stejná jako u krátkodobého stárnutí). Statistické hodnoty i grafy jsou uvedeny pouze pro napětí 3,2 kPa, které je z obou měřených napětí podstatnější.

Tab. 36: *Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí při napětí 3,2 kPa – J_{nr} (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa^{-1}]	Medián [kPa^{-1}]	Směrodat. odchylka [kPa^{-1}]	95% percentil [kPa^{-1}]	90% percentil [kPa^{-1}]	Návrh max. hodnoty [kPa^{-1}]
Nezestárlá 50/70	64	4,6	4,7	2,1	7,5	6,9	**7,0**
Krátkodobé stárnutí	41	1,4	1,2	1,2	3,3	2,6	**3,0**
Dlouhodobé stárnutí	22	0,2	0,2	0,1	0,4	0,3	**0,3**

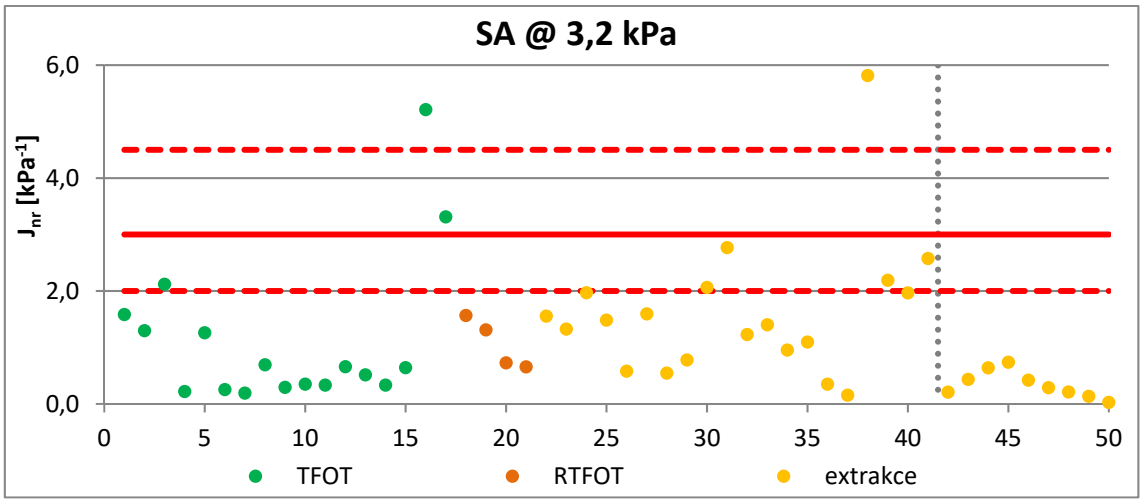
Tab. 37: *Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí při napětí 3,2 kPa – %R (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [%]	Medián [%]	Směrodat. odchylka [%]	5% percentil [%]	10% percentil [%]	Návrh min. hodnoty [%]
Nezestárlá 50/70	66	0,4	0,2	0,6	0,0	0,0	**0,0**
Krátkodobé stárnutí	41	4,9	2,0	6,3	0,1	0,3	**0,2**
Dlouhodobé stárnutí	22	14,9	13,3	7,8	5,8	6,8	**6,0**

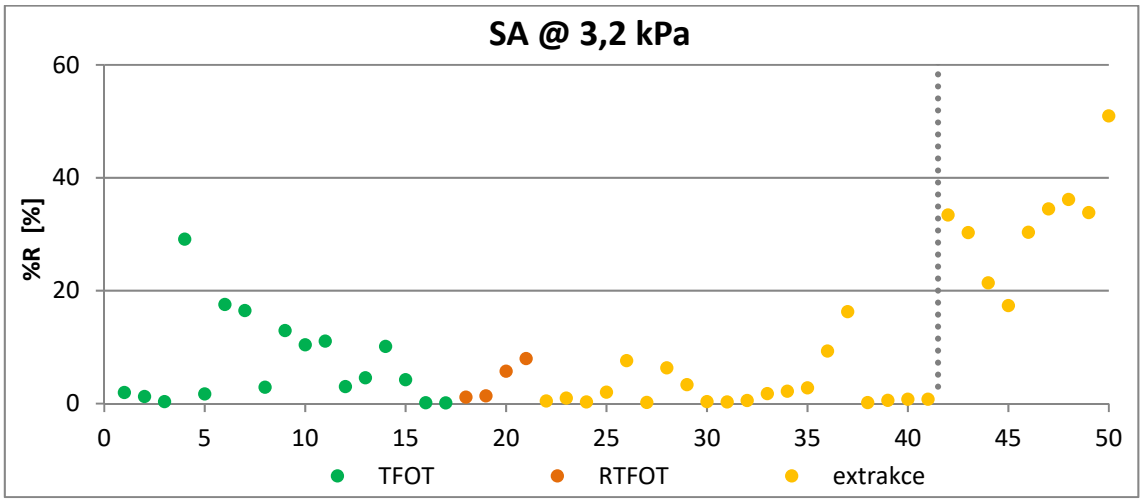
Dle očekávání se hodnoty nevratné smykové poddajnosti účinkem stárnutí snížily (došlo ke ztužení asfaltového pojiva). Vlivem krátkodobého stárnutí nastalo v porovnání s nezestárlými silničními asfalty 50/70 téměř čtyřnásobné snížení (posouzení hodnot mediánu – střední hodnoty). U dlouhodobého stárnutí je pokles hodnoty J_{nr} ještě větší. Podobné výsledky byly naměřeny i v případě elastického zotavení, kdy je naopak u dlouhodobého stárnutí elastické zotavení větší (dokonce 10x). Na základě percentilů byla navržena jako maximální mez J_{nr} při napětí 3,2 kPa po krátkodobém stárnutí hodnota 3,0 kPa^{-1}. Na obrázku 116 je tato limitní hodnota zobrazena plnou červenou čarou. Pro komparaci je na obrázku znázorněna i americká limitní hodnota určená pro pojiva krátkodobě zestárnutá. Pro standardní třídu zatížení (stupeň S) je to 4,5 kPa^{-1} a pro vysoké dopravní zatížení (stupeň H) je to 2,0 kPa^{-1}. Obě hranice jsou vykresleny čárkovanou červenou čarou. Stanovená mez se podle našich měření nachází mezi těmito dvěma hodnotami.

Z obr. 116 je dále vidět, že všechna pojiva PMB mají hodnoty J_{nr} velmi nízké. Splnila by dokonce i ještě přísnější podmínku platnou v USA – stupeň V pro velmi vysoké dopravní zatížení, pro který platí J_{nr} < 1,0 kPa^{-1}. Na dalším grafu (obr. 117) je přehledně vystihnut rozdíl mezi silničními asfalty a PMB. Hodnoty %R u PMB pojiv jsou výrazně větší, což koresponduje i s výsledky u nezestárlých vzorků.

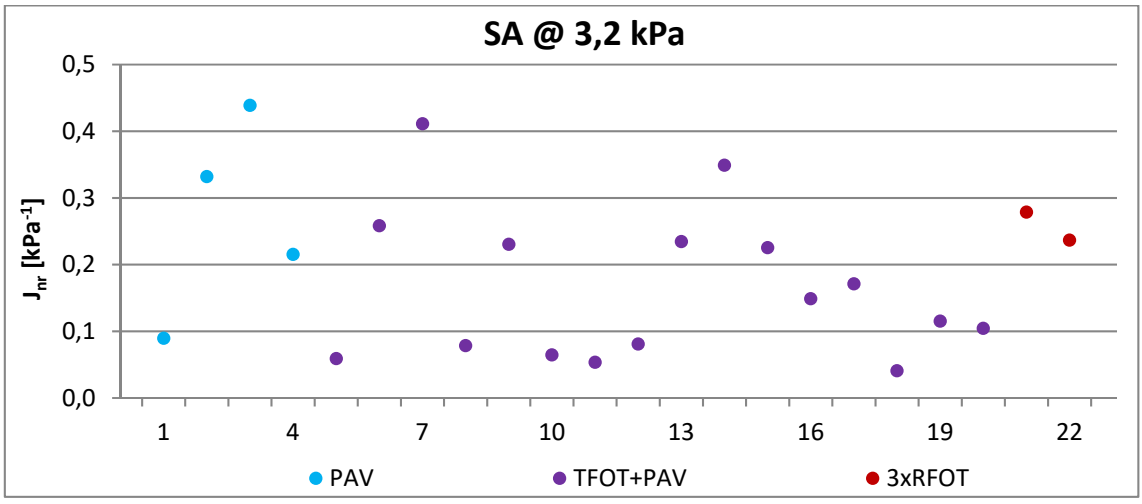
Na obr. 118 a 119 jsou hodnoty J_{nr} a %R pro pojiva po dlouhodobém stárnutí. Hodnoty J_{nr} se jeví jako rozkolísané, ale je třeba si všimnout, že maximální hodnota J_{nr} je necelých 0,5 kPa^{-1}, a to je velmi nízká hodnota.



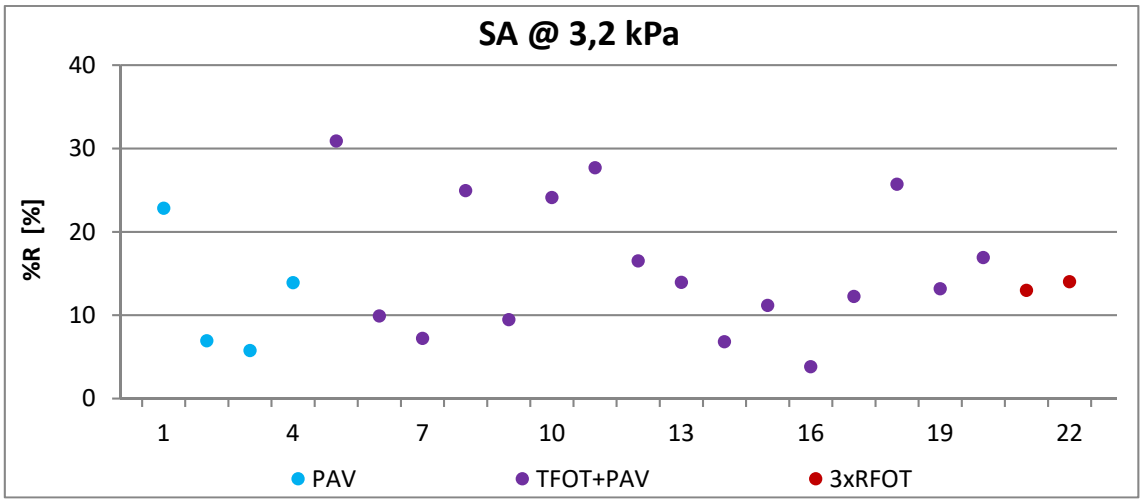
Obr. 116: Nevratná smyková poddajnost po krátkodobém stárnutí



Obr. 117: Elastické zotavení po krátkodobém stárnutí



Obr. 118: Nevratná smyková poddajnost silničních asfaltů po dlouhodobém stárnutí



Obr. 119: Elastické zotavení silničních asfaltů po dlouhodobém stárnutí

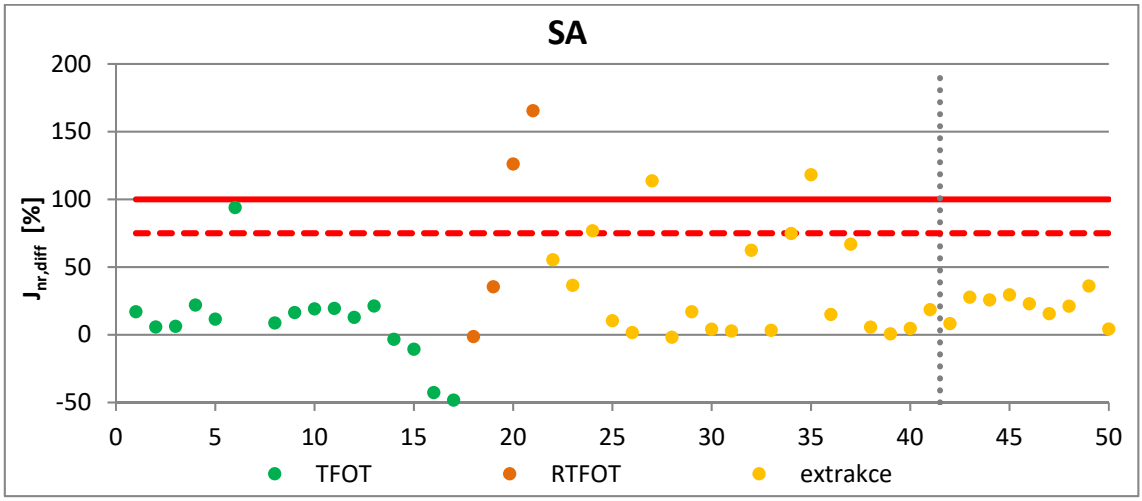
Tab. 38: *Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí – parametry citlivosti (T = 60 °C)*

Parametr		Počet pojiv	Aritm. průměr [%]	Medián [%]	Směrodat. odchylka [%]	95% percentil [%]	90% percentil [%]	Návrh max. hodnoty [%]
R_{diff}	Nezestárlá 50/70	64	89,3	91,8	10,8	98,3	98,0	-
	Krátkodobé stárnutí	41	62,1	65,0	24,3	91,2	87,0	-
	Dlouhodobé stárnutí	22	34,3	30,4	21,0	65,4	64,8	-
$J_{nr,diff}$	Nezestárlá 50/70	64	75,0	11,0	274,6	497,6	51,2	**100,0**
	Krátkodobé stárnutí	41	155,8	15,0	818,3	126,2	97,9	**100,0**
	Dlouhodobé stárnutí	22	19,8	5,9	43,7	68,1	66,4	-

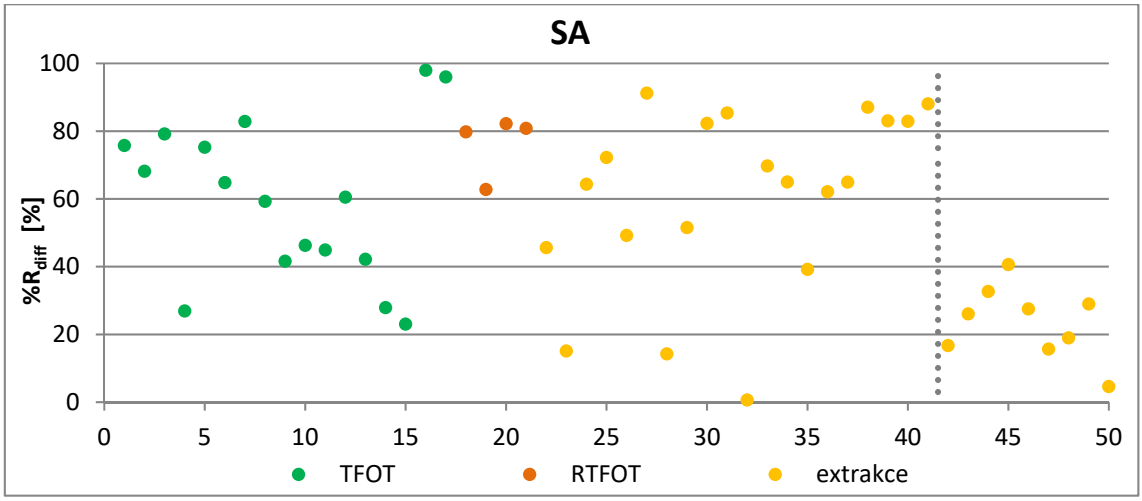
Po krátkodobém stárnutí je několik hodnot, jejichž parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ je záporný (obr. 120). Znovu se jedná o pojiva, u kterých byla hodnota prvního cyklu při napětí 0,1 kPa výrazně odlišná než zbylé hodnoty. Na obrázku 120 je zobrazena hranice 75 % (přerušovanou červenou čarou) platná v USA i stanovená hranice 100 % vycházející z percentilových údajů (tab. 38). Je zajímavé, že zvolená maximální hodnota J_{nr} je po krátkodobém stárnutí přibližně poloviční v porovnání s nezestárlou mezní hodnotou, ale limitní hodnota parametru citlivosti $J_{nr,diff}$ je navržena stejná před stárnutím i po krátkodobém stárnutí.

Nejvyšších hodnot $J_{nr,diff}$ po krátkodobém stárnutí dosáhla opakovaně pojiva s již zmiňovanou speciální přísadou PAO. Po stárnutí metodou TFOT byla v případě přísady PAO hodnota $J_{nr,diff}$ dokonce více než 5 000 %, z důvodu lepší přehlednosti není na obrázku 120 znázorněna (je s ní však počítáno v tab. 38). Díky tomu je průměrná hodnota $J_{nr,diff}$ 10x vyšší než hodnota mediánu a současně je vysoká i úzce související směrodatná odchylka. Definovanou maximální hranici překročila i dvě extrahovaná pojiva, naopak všechna PMB pojiva mají $J_{nr,diff}$ do 50 %.

Po simulovaném krátkodobém stárnutí je R_{diff} u PMB pojiv nižší než u silničních asfaltů (obr. 121). Je to dáno tím, že hodnoty %R jsou všeobecně vyšší a při napětí 3,2 kPa nedojde k výraznému snížení. Nejnižších hodnot R_{diff} u silničních asfaltů dosáhla tři extrahovaná pojiva.

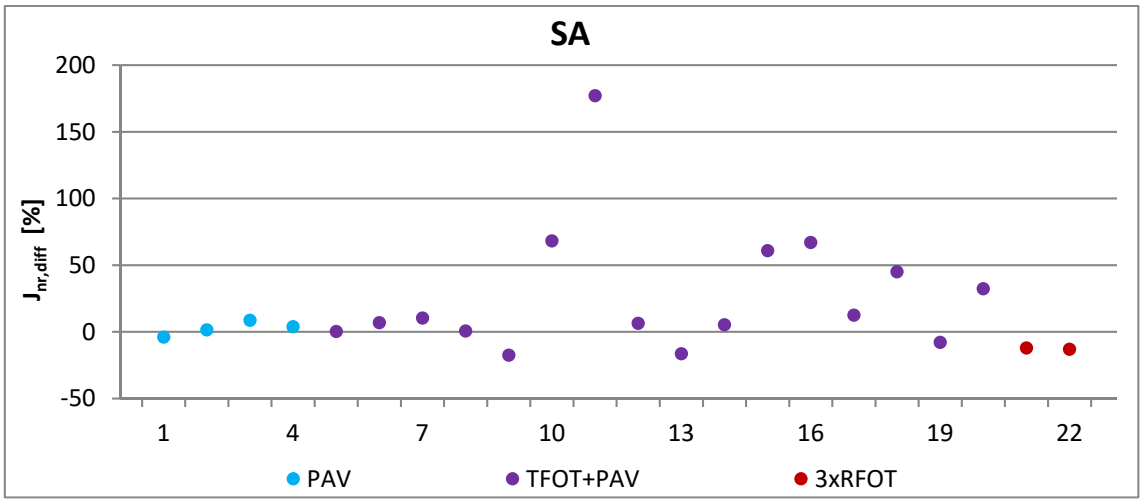


Obr. 120: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ u krátkodobě zestárnutých pojiv

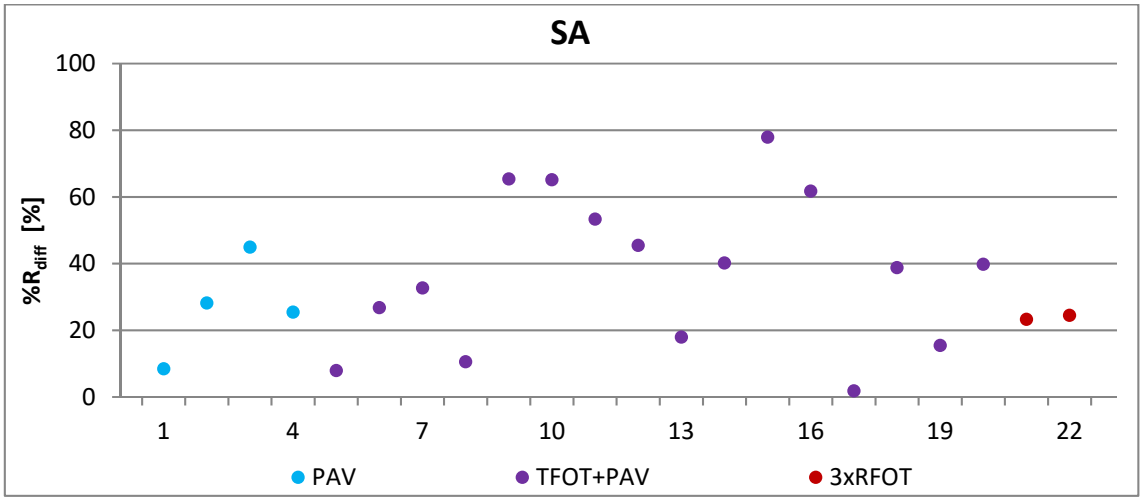


Obr. 121: Parametr citlivosti R_{diff} u krátkodobě zestárnutých pojiv

V porovnání s krátkodobým stárnutím došlo v případě dlouhodobého stárnutí u obou parametrů citlivosti ke snížení (tab. 38). Všeobecně lze říci, že stárnutím se snižuje citlivost asfaltových pojiv na změnu napětí. I u dlouhodobého stárnutí má nejvyšší citlivost pojivo s přísadou PAO (obr. 122). Na obr. 123 je znázorněn parametr citlivosti R_{diff} pro silniční asfalty po dlouhodobém stárnutí.

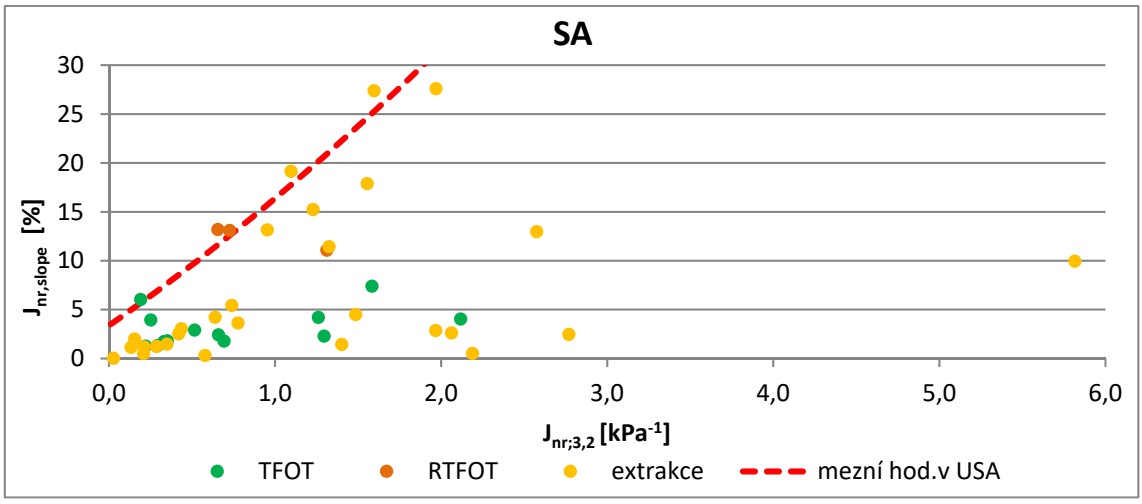


Obr. 122: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ silničních asfaltů u dlouhodobě zestárnutých pojiv

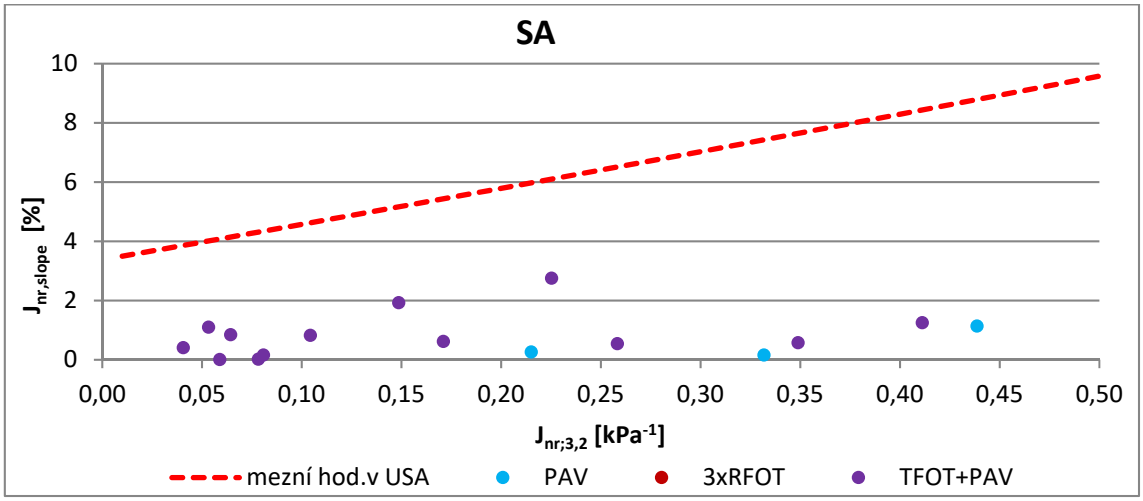


Obr. 123: Parametr citlivosti R_{diff} silničních asfaltů u dlouhodobě zestárnutých pojiv

Následující grafy s parametrem $J_{nr,slope}$ zobrazují jen kladné hodnoty parametru citlivosti. U pojiv po krátkodobém stárnutí (obr. 124) se opět potvrdilo, že podmínka $J_{nr,slope}$ je mírnější, protože jí nevyhovělo pouze 5 pojiv, zatímco americkou podmínku $J_{nr,diff}$ nesplnilo 7 pojiv. Nově navrženou podmínku $J_{nr,diff}$ < 100 % překročí jen 4 testovaná pojiva. U dlouhodobě zestárnutých pojiv vyhověla podmínce $J_{nr,slope}$ všechna pojiva s velkou rezervou (obr. 125). Obě pojiva zestárnutá metodou 3xRTFOT měla ale tuto hodnotu zápornou. Je vhodné upozornit, že podmínka $J_{nr,slope}$ je platná v USA pouze pro pojiva krátkodobě zestárnutá a v případě dlouhodobého stárnutí se jedná pouze o orientační hodnotu.



Obr. 124: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na J_{nr} při napětí 3,2 kPa pro krátkodobě zestárnutá pojiva



Obr. 125: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na $J_{nr;3,2}$ pro dlouhodobě zestárnutá pojiva

4.2.4.2 POLYMEREM MODIFIKOVANÉ ASFALTY

Skupina PMB pojiv, která byla vystavena stárnutí, obsahuje 21 vzorků. Jedná se o početnější skupinu než v případě oscilační zkoušky FS. Zkouška MSCR byla provedena u této skupiny ve všech stádiích stárnutí, a proto jsou následující tabulky i grafy doplněny o hodnoty pojiv nezestárlých. Limitní hodnoty pro nezestárlá pojiva jsou převzaty ze stanovených hodnot pro všechna PMB pojiva.

Tab. 39: *Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí při napětí 3,2 kPa – J_{nr} (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [kPa^{-1}]	Medián [kPa^{-1}]	Směrodat. odchylka [kPa^{-1}]	95% percentil [kPa^{-1}]	90% percentil [kPa^{-1}]	Návrh max. hodnoty [kPa^{-1}]
Nezestárlá	21	0,4	0,1	0,4	1,2	1,1	**1,0**
TFOT/RTFOT (1)	21	0,2	0,1	0,1	0,4	0,4	**0,4**
(R)TFOT+PAV (2)	21	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	**0,1**

(1)laboratorní stárnutí metodou TFOT nebo RTFOT

(2)laboratorní stárnutí metodou TFOT+PAV nebo RTFOT+PAV

Tab. 40: *Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí při napětí 3,2 kPa – %R (T = 60 °C)*

	Počet pojiv	Aritm. průměr [%]	Medián [%]	Směrodat. odchylka [%]	5% percentil [%]	10% percentil [%]	Návrh min. hodnoty [%]
Nezestárlá	21	61,5	86,0	33,7	3,3	9,8	**17,0 (3,2)** [(1)]
TFOT/RTFOT	21	60,6	72,1	26,9	16,5	17,5	**17,0**
(R)TFOT+PAV	21	66,1	64,4	19,3	27,7	41,5	**30,0**

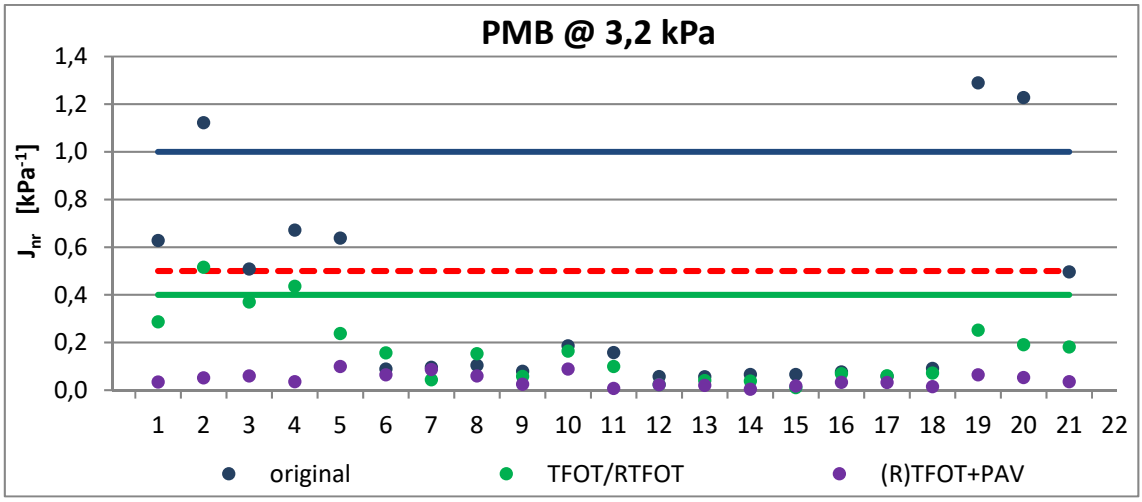
[(1)]první uvedená hodnota byla zvolena pro pojiva PMB 25/55-X a hodnota v závorce byla vybrána pro pojiva PMB 40/100-X

Opětovně se potvrdilo, že s vyšším stupněm stárnutí dochází ke snížení hodnoty J_{nr} (tab. 39). Překvapivě ale dochází i ke snížení mediánu hodnot %R (tab. 39). Naopak 5% a 10% percentily stoupají se stupněm stárnutí. U nevratné smykové poddajnosti jsou hodnoty tak malé, že rozdíl v desetinách není téměř patrný. Až na jedno PMB pojivo by všechny vzorky vyhověly nejpřísnější podmínce vymezené v USA, kdy jako maximální hodnota pro extrémní třídu zatížení je nastavena 0,5 kPa^{-1} (na obr. 126 je zobrazena přerušovanou červenou čarou). PMB pojiva jsou však v USA měřena většinou při teplotě 64 °C a lze očekávat, že hodnoty J_{nr} při této teplotě by byly vyšší.

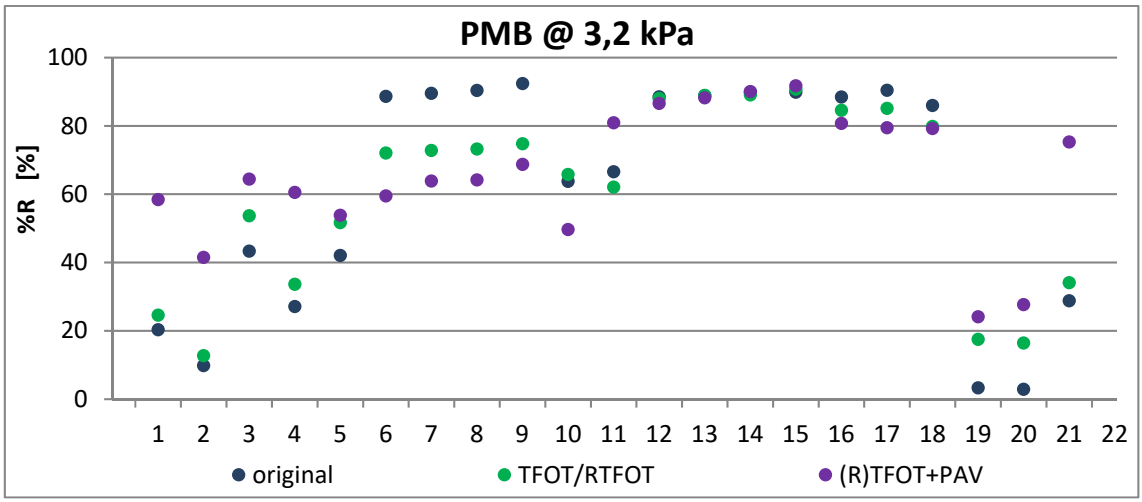
Maximální hodnota nevratné smykové poddajnosti vycházející z 90 % a 95 % percentilu je pro krátkodobé stárnutí navržena na 0,4 kPa^{-1}. Na obr. 126 jsou hodnoty nevratné smykové poddajnosti při napětí 3,2 kPa pro všechna stádia sledovaných PMB pojiv, včetně zvolených limitních hodnot, které barevně odpovídají stupni stárnutí.

Znovu je nutné upozornit, že pro zkoušku MSCR jsou hodnoty dlouhodobého stárnutí pouze informační, neboť po dlouhodobém stárnutí se trvalé deformace při vyšších teplotách již zpravidla neobjevují. Toto potvrzují i velmi nízké hodnoty J_{nr}.

Je překvapivé, že u některých PMB nedošlo po stárnutí téměř k žádnému rozdílu, ale u řady pojiv jsou rozdíly viditelně větší. Zejména z grafu s hodnotami %R (obr. 127) je zjevné, jak u určitých pojiv (prvních 5 a poslední 3) vznikl vlivem stárnutí nárůst elastického zotavení. U dvanáctého až patnáctého pojiva nenastala téměř žádná změna vlivem stárnutí a u zbylých pojiv vedlo stárnutí ke snížení elastického zotavení.



Obr. 126: Nevratná smyková poddajnost pro různá stádia stárnutí PMB pojiv



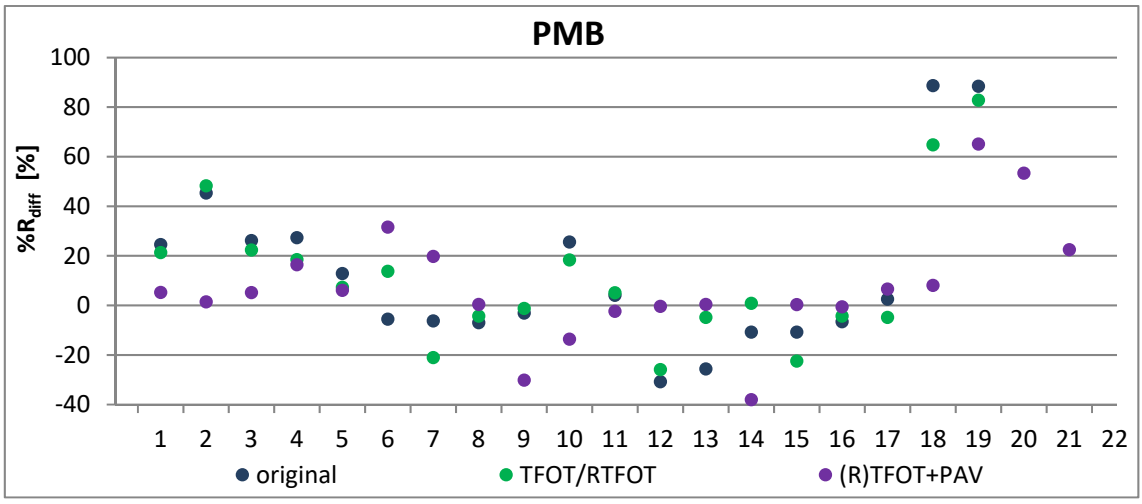
Obr. 127: Elastické zotavení pro různá stádia stárnutí PMB pojiv

Parametry citlivosti pro PMB pojiva po stárnutí se podobají měřením na nezestárlých vzorcích. U řady pojiv vycházejí parametry citlivosti záporné (obr. 128 a 129). Opět to je způsobeno hodnotami z prvních cyklů při napětí 0,1 kPa, které jsou zejména u PMB pojiv výrazně rozkolísané. Naopak dvě poslední PMB pojiva měla hodnotu $J_{nr,diff}$ extrémně vysokou (přes 5 000 %), neboť hodnota J_{nr} při napětí 0,1 kPa byla velmi malá (pod 0,02 kPa^{-1}). Tyto dvě hodnoty nebyly zahrnuty při výpočtu statistických údajů (tab. 41), protože výrazně vybočovaly. Z důvodu, že se jedná o poměrně malý soubor testovaných vzorků, obě hodnoty by výrazně ovlivnily všechny sledované statistické údaje, včetně 95% a 90% percentilů, jež by vycházely přibližně 5 000 %. Po vyloučení těchto hodnot vycházejí mezní hodnoty $J_{nr,diff}$ po krátkodobém stárnutí pro PMB pojiva stejně jako pro silniční asfalty (100 %).

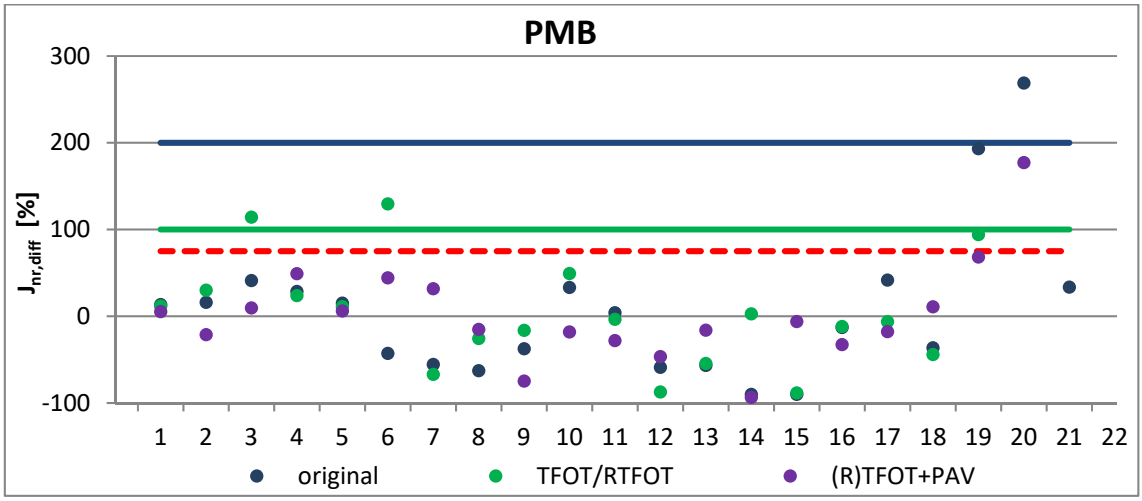
Průměrné hodnoty obou parametrů jsou ovlivněny rozkolísaností výsledků, kdy u obou typů stárnutí vychází jak kladné, tak záporné hodnoty. Tomu odpovídá i poměrně vysoká směrodatná odchylka. Obdobně po dlouhodobém stárnutí mají poslední dvě PMB nejvyšší $J_{nr,diff}$. Zatímco u jednoho je hodnota 177 %, která je ještě pochopitelná a akceptovatelná, v druhém případě je hodnota přes 14 tisíc %! Tato poslední hodnota není v tabulce 41 zařazena.

Tab. 41: *Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí – parametry citlivosti (T = 60 °C)*

Parametr		Počet pojiv	Aritm. průměr [%]	Medián [%]	Směrodat. odchylka [%]	95% percentil [%]	90% percentil [%]	Návrh max. hodnoty [%]
R_{diff}	Nezestárlá	21	12,8	2,5	32,3	88,4	45,4	-
	TFOT/RTFOT	21	12,6	5,1	30,1	65,7	64,8	-
	(R)TFOT+PAV	21	7,5	5,1	23,3	53,3	31,6	-
$J_{nr,diff}$	Nezestárlá	21	6,8	3,8	86,7	193,1	41,4	**200**
	TFOT/RTFOT	19	3,1	-3,7	61,7	115,5	98,0	**100**
	(R)TFOT+PAV	20	1,5	-10,8	57,0	73,6	50,8	-

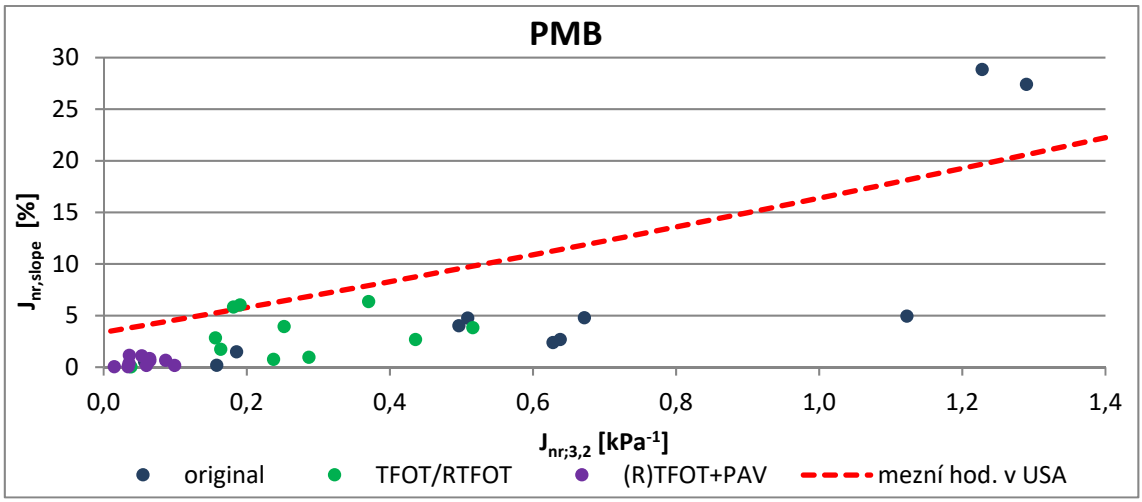


Obr. 128: Parametr citlivosti R_{diff} pro různá stádia stárnutí PMB pojiv



Obr. 129: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ pro různá stádia stárnutí PMB pojiv

Z porovnávaných PMB pojiv nevyhověla podmínce $J_{nr,slope}$ 4 pojiva (včetně pojiva s přísadou PAO, jež není elastomerem) (obr. 130). Tato 4 pojiva měla i nejvyšší hodnoty $J_{nr,diff}$ (mezi 193 % až 5 300 %). Po dlouhodobém stárnutí jsou hodnoty $J_{nr;3,2}$ i hodnoty $J_{nr,slope}$ nízké a všechna pojiva se nacházejí v blízkosti sebe. Je třeba upozornit, že v grafu nejsou zobrazeny záporné hodnoty, kterých je přibližně jedna polovina!



Obr. 130: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na $J_{nr;3,2}$ pro různá stádia stárnutí PMB pojiv

4.2.5 VLIV ZVOLENÉ TEPLOTY A ÚROVNĚ NAPĚTÍ [28]

V této kapitole se věnuje pozornost provádění zkoušky při použití třech teplot a aplikaci třech úrovní napětí. V české normě ČSN EN 16659 [166] není přesně určena teplota zkoušky. Norma udává, že by měla být vybrána vhodně v rozmezí 50-80 °C. Přesný předpis jedné teploty není ani navrhnut pro revidovanou normu ČSN EN 14023 [112] pro PMB pojiva. V USA se zkouška provádí při různých teplotách, v závislosti na zatřídění do PG tříd, zatímco v ČR se zkouška realizuje nejčastěji při teplotě 60 °C. Pro hodnocení byla zvolena různá pojiva PMB, která se využívají u vysoce zatížených vozovek a z tohoto důvodu u nich byla zkouška měřena i při vyšší teplotě (70 °C). Naopak u silničního asfaltu 50/70 se teplota zkoušky měřila při snížené teplotě 50 °C. V následujících tabulkách a grafech jsou úmyslně uvedeny názvy jednotlivých PMB pojiv bez označení „PMB“ kvůli zkrácení názvu. Na konci označení jednotlivých vzorků je připsána teplota, při níž bylo dané asfaltové pojivo měřeno.

Dalším parametrem, jenž lze stanovit při měření zkoušky MSCR, je volba různých úrovní napětí. V normě ČSN EN 16659 [166] jsou předepsána dvě napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa. Podle Masada a kol. [216] je úroveň napětí, jemuž je asfaltové pojivo ve směsích vystaveno, větší než se předpokládalo. Navíc, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.10, při měření s vyšším napětím jsou zjištěny lepší korelace s trvalými deformacemi asfaltových směsí.

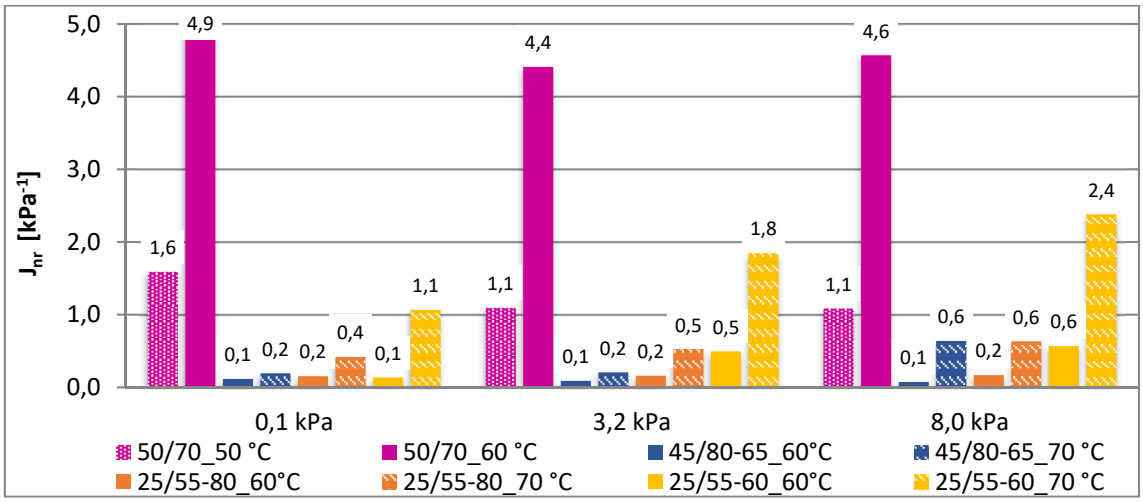
U některých pojiv může docházet k výraznému nárůstu J_{nr} až při aplikaci vyššího napětí, neboť napětí 3,2 kPa je pro určitá pojiva v lineárně viskoelastické oblasti (LVR). Pokud se tedy hodnoty J_{nr} při obou úrovních napětí neliší, měřené vzorky jsou v této oblasti. Problematické chování pojiv vedoucí ke vzniku plastických deformací je však spojeno s nelineární viskoelastickou oblastí. Vysoce modifikovaná pojiva mají hranici LVR posunutou do vyšších hodnot napětí a z tohoto důvodu byla měření doplněna o napětí 8,0 kPa. [28, 102]

V následující tabulce 42 jsou zobrazeny vypočítané hodnoty elastického zotavení %R, nevratné smykové poddajnosti J_{nr} a charakteristiky citlivosti na změnu napětí R_{diff} a $J_{nr,diff}$ pro všechna tři sledovaná napětí.

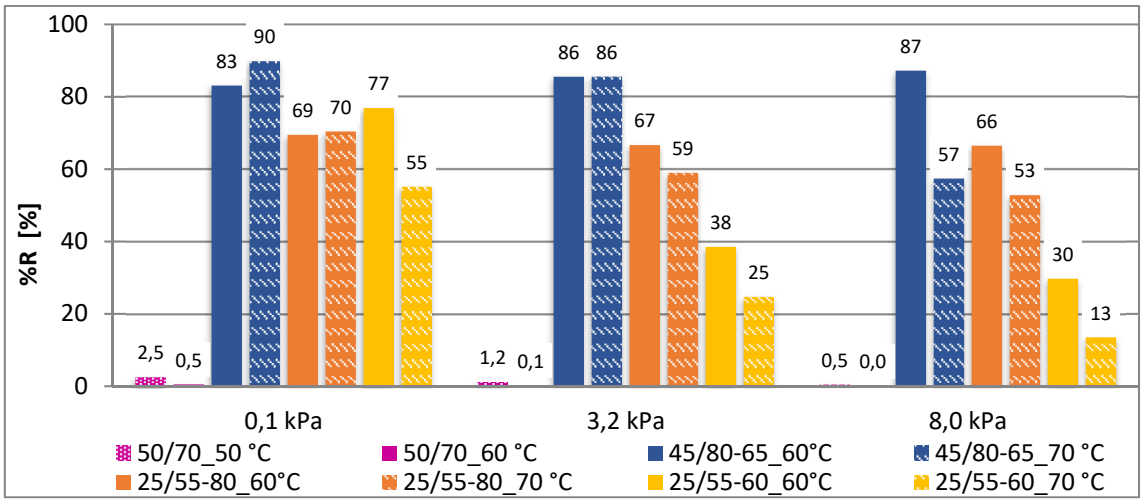
Tab. 42: *Vypočítané hodnoty %R, J_{nr} a charakteristiky citlivosti*

Asfaltové pojivo	0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa		0,1-3,2 kPa		3,2-8,0 kPa		0,1-8,0 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]
50/70_50 °C	2,5	1,59	1,2	1,09	0,5	1,08	53,7	-31,2	60,1	-0,9	81,5	-31,8
50/70_60 °C	0,5	4,93	0,1	4,41	0,0	4,57	87,3	-10,7	60,3	3,7	95,0	-7,4
45/80-65_60°C	83,1	0,12	85,5	0,09	87,2	0,07	-2,9	-23,3	-2,0	-17,1	-5,0	-36,4
45/80-65_70 °C	89,8	0,19	85,6	0,20	57,4	0,64	4,7	6,0	32,9	213,3	36,1	232,2
25/55-80_60°C	69,4	0,15	66,6	0,16	66,4	0,17	4,1	3,8	0,3	5,1	4,3	9,1
25/55-80_70 °C	70,4	0,42	58,9	0,52	52,8	0,63	16,3	25,4	10,4	20,9	25,0	51,7
25/55-60_60°C	76,8	0,13	38,5	0,49	29,7	0,57	49,9	267,0	22,9	14,7	61,4	320,8
25/55-60_70 °C	55,1	1,06	24,7	1,85	13,5	2,38	55,2	73,6	45,3	28,8	75,5	123,6

PMB pojiva mají velmi nízkou nevratnou smykovou poddajnost (obr. 131) a naopak vysokou hodnotu elastického zotavení (obr. 132). Silniční asfalt 50/70 se vyznačuje přesně opačným trendem (vysoká hodnota J_{nr} a nízká hodnota %R). Při vyšší teplotě dochází ke zvýšení smykového přetvoření, které souvisí se zvýšením hodnoty J_{nr}. Vyšší náchylnost ke vzniku trvalých deformací je logicky při vyšších teplotách (vyšší hodnoty J_{nr}). S tím souvisí snížení elastického zotavení, ale překvapivě při napětí 0,1 kPa došlo u dvou pojiv PMB k mírnému zvýšení elastického zotavení. Toto zvýšení je způsobeno díky proměnlivosti naměřených hodnot (blíže popsáno v kapitole 4.2.7). V ostatních případech dochází s rostoucí teplotou ke snížení elastického zotavení. Výraznější rozdíl je při vyšším napětí.



Obr. 131: Nevratná smyková poddajnost



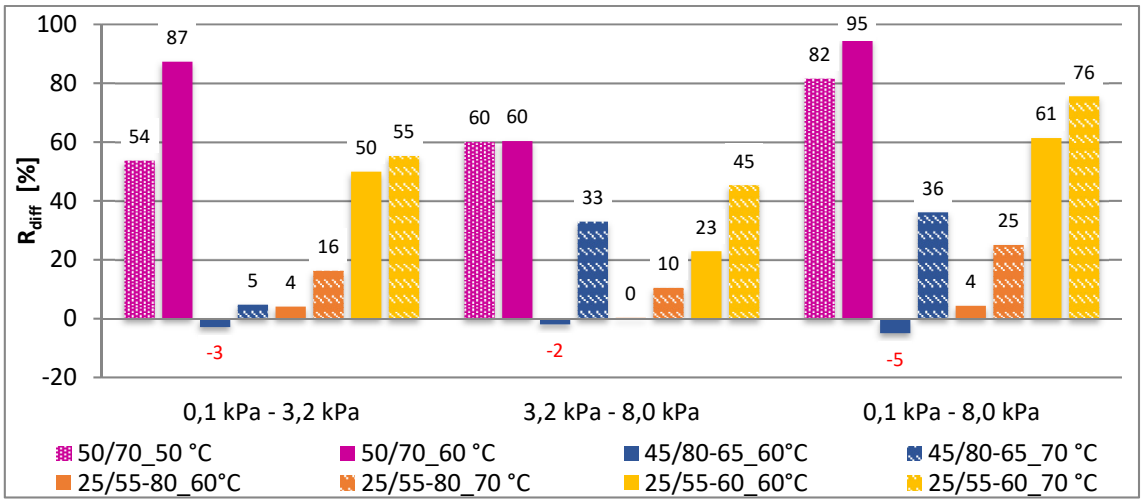
Obr. 132: Elastické zotavení

U nemodifikovaného pojiva (silniční asfalt 50/70) je vysoká citlivost na vnesené napětí R_{diff} (obrázek 133) způsobená velmi nízkými hodnotami elastického zotavení (obr. 132). U tohoto pojiva také došlo při vyšší teplotě zkoušky k nejvýraznějšímu snížení elastického zotavení.

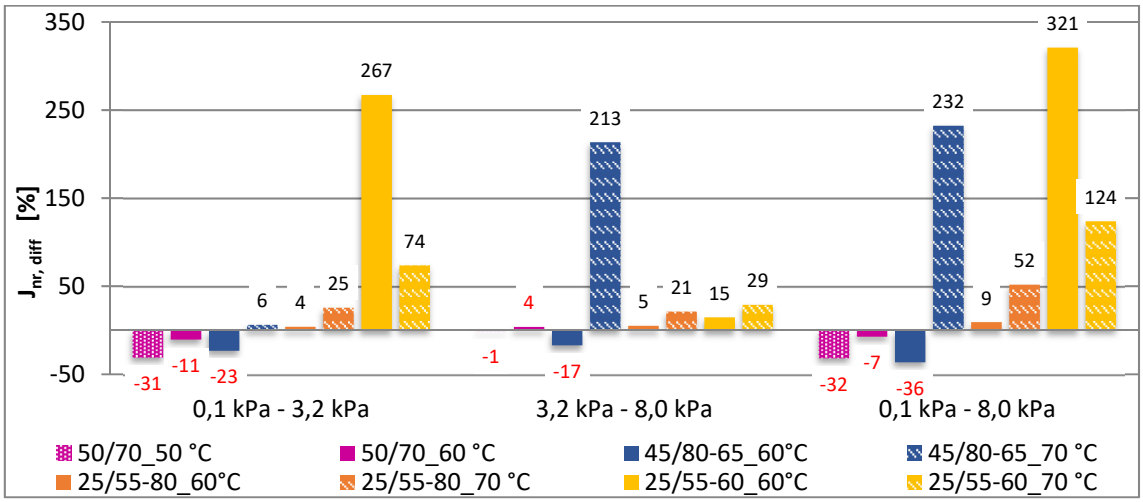
Při zvýšení teploty zkoušky u PMB pojiv nastala nejvýraznější změna J_{nr} u pojiva PMB 25/55-60. Lze tedy předpokládat, že při teplotě 70 °C se pojivo již nenachází v lineární viskoelastické oblasti. Z obrázku 133 je patrné, že pojivo PMB 25/55-60 má vysokou citlivost R_{diff} (při obou teplotách) a na obrázku 134 je vidět extrémně vysoká citlivost parametru $J_{nr,diff}$ tohoto pojiva při teplotě 60 °C. Neobvyklý nárůst je způsoben tím, že při napětí 3,2 kPa došlo k výraznému zvýšení J_{nr} (v porovnání s napětím 0,1 kPa) vedoucí k vysoké hodnotě parametru $J_{nr,diff}$. Pojivo by jako jediné nesplnilo americkou podmínku ($J_{nr,diff}$ < 75 % při napětích 0,1 kPa a 3,2 kPa). Rozdíl mezi napětím 3,2 a 8,0 kPa již u tohoto pojiva není výrazný. Stejné pojivo při teplotě 70 °C má nižší $J_{nr,diff}$ (0,1-3,2 kPa) z důvodu, že už při napětí 0,1 kPa má hodnotu J_{nr} poměrně vysokou.

Naopak u pojiva PMB 45/80-65 zkoušeného při teplotě 60 °C nebyl zjištěn rozdíl v nevratné smykové poddajnosti pro napětí 0,1, 3,2 ani 8,0 kPa. Hodnoty J_{nr} pro všechna napětí jsou velmi nízká (do 0,12 kPa^{-1}), přičemž nejvyšší hodnotu má při nejnižším napětí. Díky tomu jsou pak hodnoty $J_{nr,diff}$ záporné. Pojivo je tedy v tomto oboru napětí lineárně viskoelastické. Bylo by proto vhodné působící napětí ještě zvýšit, případně zvýšit teplotu měření. U tohoto pojiva při teplotě zkoušky 70 °C došlo k výrazné změně naměřených hodnot až mezi napětím 3,2 a 8,0 kPa (obr. 131). A díky tomu lze tuto hranici označit pro chování pojiva PMB 45/80-65 za mezní v nelineární oblasti.

Ostatní pojiva je možné charakterizovat jako málo citlivá na změnu napětí. Všeobecně lze vyvodit, že s rostoucí teplotou se zvyšuje přetvoření, snižuje elastické zotavení a zvyšuje se nevratná smyková poddajnost (u napětí 0,1 kPa ne vždy). S tím souvisí i nižší odolnost proti tvorbě trvalých deformací. S vyšším napětím je změna výraznější. Teplota má značný vliv na citlivost elastického zotavení (obr. 133), ve všech případech došlo s vyšší teplotou k vyšší citlivosti. Naopak pro $J_{nr,diff}$ (obr. 134) tento trend není vždy potvrzen.



Obr. 133: Parametr citlivosti R_{diff}



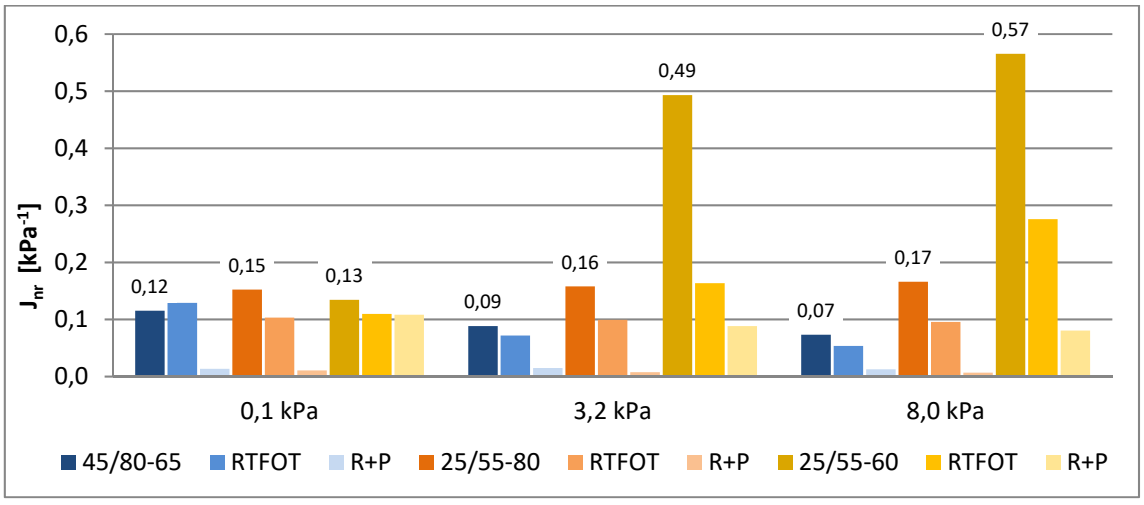
Obr. 134: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$

U PMB pojiv byl dále zjišťován vliv stárnutí na změnu výše napětí. Simulované krátkodobé stárnutí je reprezentováno metodou RTFOT a dlouhodobé stárnutí kombinovanou metodou RTFOT+PAV (v následující tabulce a obrázcích je označeno zkratkou „R+P“). K porovnání byla zvolena pouze zkušební teplota 60 °C. Hodnoty základních charakteristik jsou uvedeny v tabulce 43. Na následujících obrázcích jsou jednotlivá PMB pojiva zobrazena shodnými barvami jako na obr. 131-134. Jednotlivé typy stárnutí jsou odlišeny barevným odstínem.

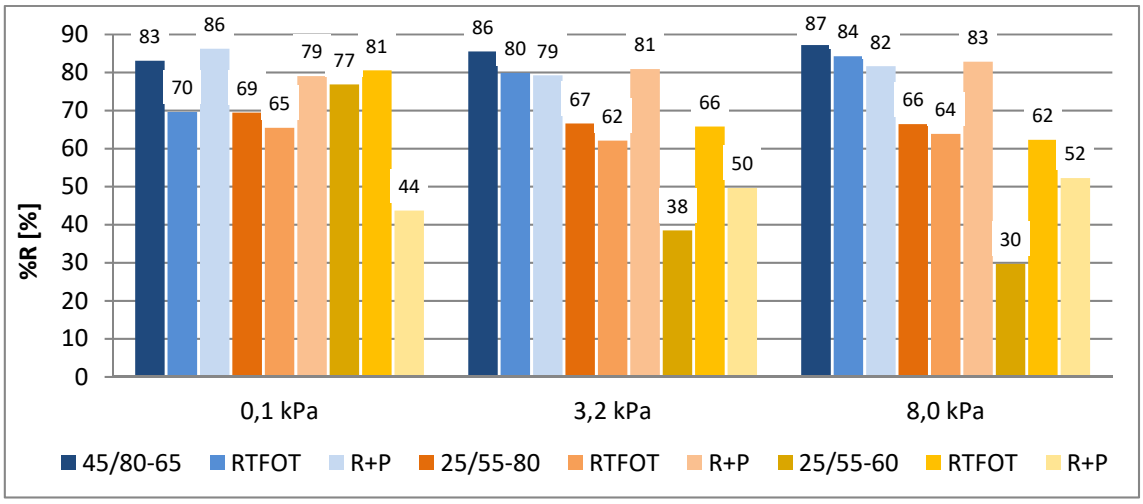
Tab. 43: *Vypočítané hodnoty %R, J_{nr} a charakteristiky citlivosti (T = 60 °C)*

Asfaltové pojivo	0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa		0,1-3,2 kPa		3,2-8,0 kPa		0,1-8,0 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]
45/80-65	83,1	0,12	85,5	0,09	87,2	0,07	-2,9	-23,3	-2,0	-17,1	-5,0	-36,4
45/80-65_RTFOT	69,6	0,13	79,9	0,07	84,3	0,05	-14,7	-44,2	-5,5	-25,5	-21,0	-58,5
45/80-65_R+P	86,2	0,01	79,2	0,01	81,6	0,01	8,1	10,7	-3,0	-15,4	5,3	-6,3
25/55-80	69,4	0,15	66,6	0,16	66,4	0,17	4,1	3,8	0,3	5,1	4,3	9,1
25/55-80_RTFOT	65,4	0,10	62,1	0,10	63,9	0,10	5,1	-3,7	-2,8	-3,7	2,4	-7,2
25/55-80_R+P	79,0	0,01	80,9	0,01	82,8	0,01	-2,4	-28,2	-2,4	-12,9	-4,8	-37,5
25/55-60	76,8	0,13	38,5	0,49	29,7	0,57	49,9	267,0	22,9	14,7	61,4	320,8
25/55-60_RTFOT	80,6	0,11	65,8	0,16	62,3	0,28	18,3	49,1	5,3	68,5	22,7	151,4
25/55-60_R+P	43,7	0,11	49,6	0,09	52,2	0,08	-13,6	-18,3	-5,2	-9,0	-19,6	-25,7

Obecně platí, že stárnutím dochází ke snížení hodnoty J_{nr} a naopak se zvyšujícím se napětím k nárůstu J_{nr} (obr. 135). Druhý předpoklad není vždy dodržen, čemuž odpovídají záporné hodnoty parametru citlivosti $J_{nr,diff}$. Je vhodné upozornit na velmi nízké hodnoty J_{nr} (nižší než 0,1 kPa^{-1}) které mohou být problematické z důvodu přesnosti měření. U pojiva PMB 45/80-65 je zajímavé, že při všech stádiích stárnutí dochází s vyšším napětím ke snížení hodnoty J_{nr}. Dále stojí za povšimnutí, že ačkoli je u nezestárlého pojiva PMB 25/55-60 hranice LVR mezi napětím 0,1 kPa a 3,2 kPa, v případě zestárnutých vzorků není zřejmý nápadný nárůst hodnoty J_{nr} mezi žádným z napětí. Z pohledu elastického zotavení se každé PMB chová odlišně. Výrazný rozdíl je ale pouze u nezestárlého pojiva PMB 25/55-60, kdy při napětí 3,2 kPa je hodnota %R ve srovnání s napětím 0,1 kPa poloviční. Rozdíl odpovídá skokové změně hodnoty J_{nr}.

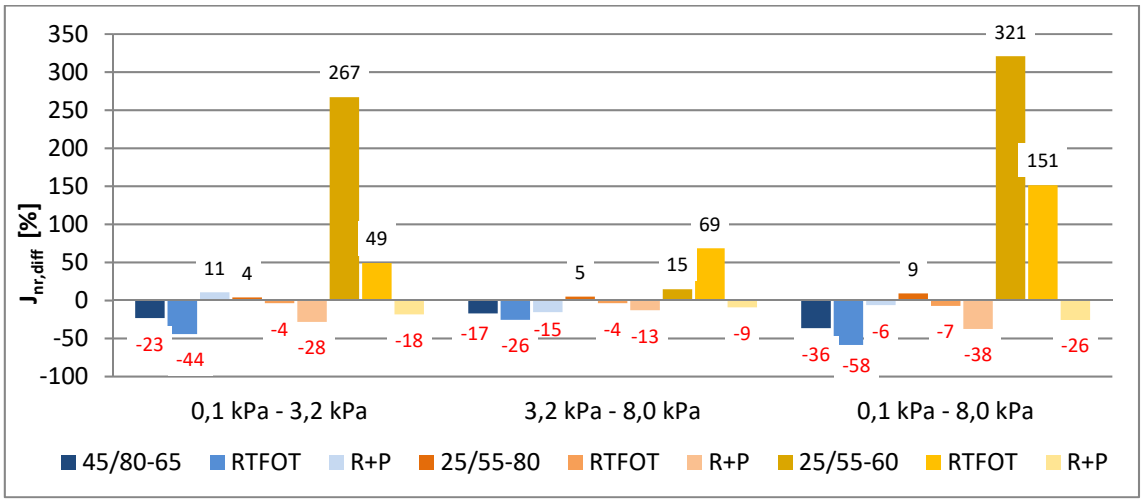


Obr. 135: Nevratná smyková poddajnost

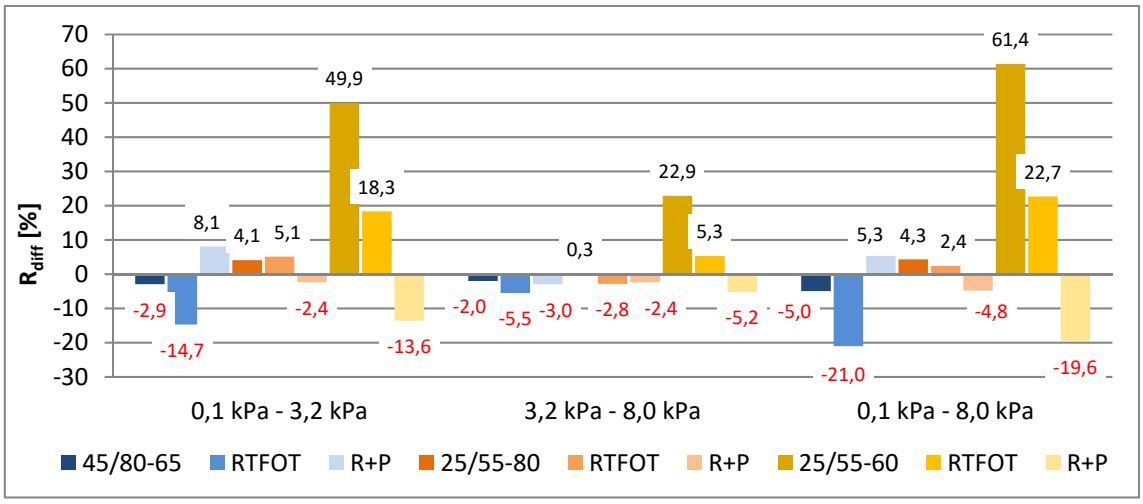


Obr. 136: Elastické zotavení

Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ je u sledovaných asfaltových pojiv většinou záporný (obr. 137), jedná se však o poměrně nízké hodnoty. Nejvyšší hodnoty jsou logicky mezi napětím 0,1 kPa a 8,0 kPa, ale i v tomto případě jsou do 60 %. Nejvyšší kladnou hodnotu parametru $J_{nr,diff}$ má opět pojivo PMB 25/55-60. Obdobné výsledky jsou na obr. 138 zobrazující parametr citlivosti R_{diff}.



Obr. 137: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$



Obr. 138: Parametr citlivosti R_{diff}

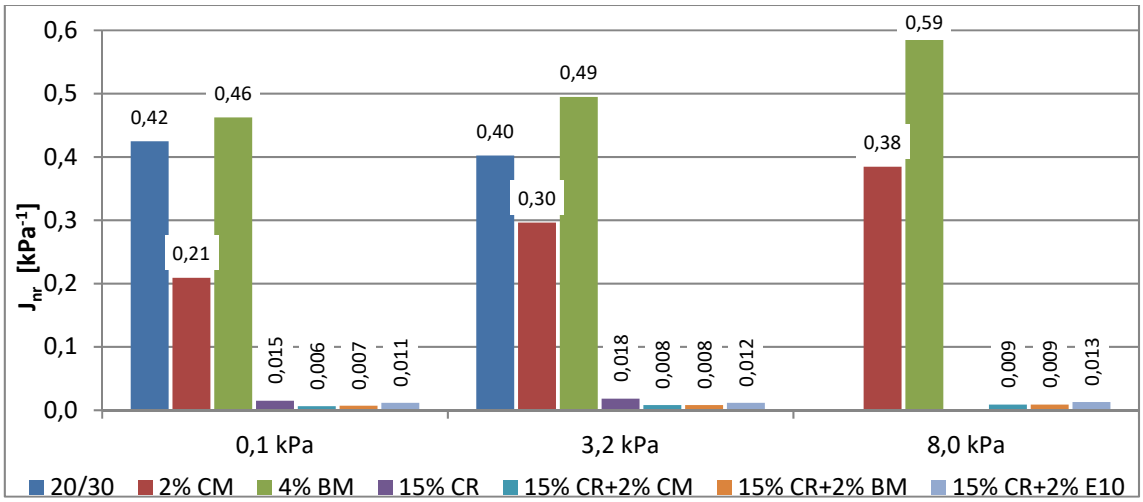
Druhou skupinou, u které se zkouška MSCR prováděla i při vyšším napětí 8,0 kPa, jsou varianty se základním silničním asfaltem 20/30. K němu se přimíchaly nízkoviskózní vosky v množství 2 % hmotnosti nebo 4 % hmotnosti asfaltového pojiva nebo kombinace pryžového granulátu CR (vždy 15 % hmotnosti pojiva) s nízkoviskózními vosky. Teplota zkoušky byla 60 °C a vyšší napětí 8,0 kPa bylo měřeno jen pro vybrané varianty.

Tab. 44: *Vypočítané hodnoty %R, J_{nr} a charakteristiky citlivosti (T = 60 °C)*

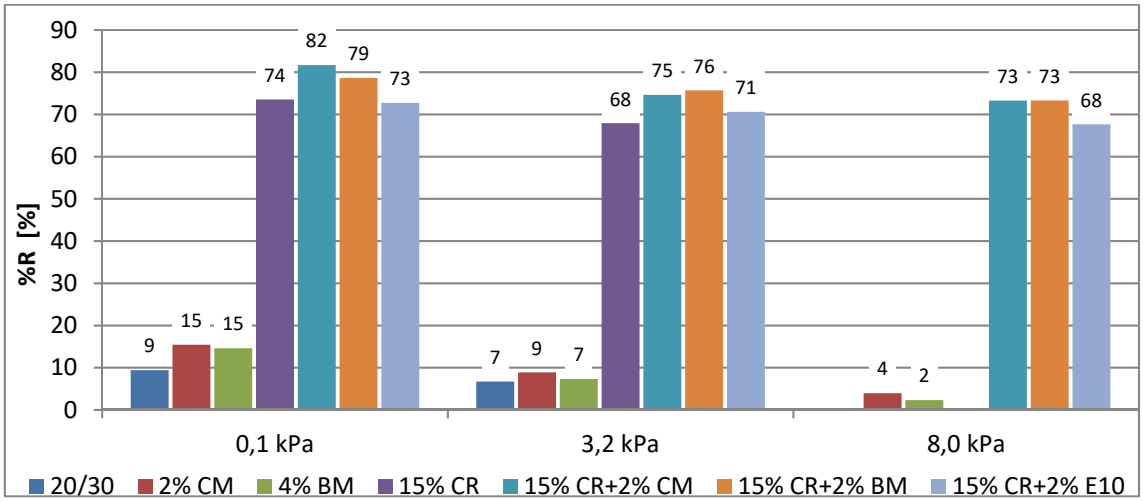
Asfaltové pojivo	0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa		0,1-3,2 kPa		3,2-8,0 kPa		0,1-8,0 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]
20/30	9,4	0,43	6,7	0,40	-	-	28,6	-5,3	-	-	-	-
2% CM	15,4	0,21	8,9	0,30	4,0	0,39	42,6	41,7	55,4	29,9	74,4	84,0
4% BM	14,6	0,46	7,3	0,50	2,3	0,59	50,0	7,0	68,4	19,2	84,2	27,5
15% CR	73,5	0,02	67,9	0,02	-	-	7,6	20,9	-	-	-	-
15% CR+2% CM	81,7	0,01	74,6	0,01	73,3	0,01	8,7	31,8	1,8	6,3	10,3	40,2
15% CR+2% BM	78,6	0,01	75,7	0,01	73,3	0,01	3,7	12,5	3,2	11,4	6,8	25,3
15% CR+2% E10	72,7	0,01	70,6	0,01	67,6	0,01	2,9	1,8	4,2	9,1	7,0	11,1

V tabulce 44 jsou základní hodnoty vypočítané ze zkoušky MSCR při jednotné teplotě 60 °C. Modifikace pryžovým granulátem má za následek výrazné zvýšení elastického zotavení a snížení nevratné smykové poddajnosti v porovnání se silničním asfaltem 20/30 (obr. 139 a 140). Aplikací nízkoviskózních přísad nedochází k zásadnímu ovlivnění hodnot %R ani J_{nr}. V případě jejich použití se základním pojivem 20/30 jsou hodnoty %R velmi nízké a naopak J_{nr} poměrně vysoké, což vede logicky k vyšším hodnotám charakteristiky citlivosti R_{diff} (obr. 141). Naopak u pojiv s pryžovým granulátem, jež mají vysoké hodnoty elastického zotavení, se při všech napětích R_{diff} pohybuje do 10 %, a to poukazuje na dobré elastické vlastnosti i při napětí 8,0 kPa.

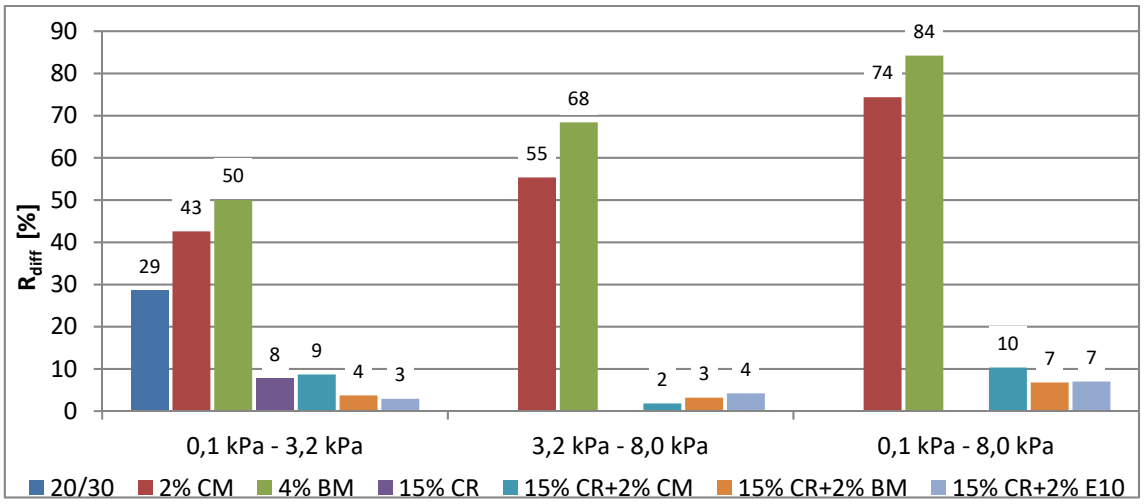
Při hodnocení charakteristiky citlivosti $J_{nr,diff}$ (obr. 142) je zřejmé, že podmínku stanovenou v USA pro napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa ($J_{nr,diff}$ < 75 %) by splnila všechna pojiva. Z obrázku 142 je dále vidět, že pojivo s 2% CM je nejvíce citlivé na změnu napětí a při posouzení nejnižšího napětí (0,1 kPa) a nejvyššího napětí (8,0 kPa) má rozdíl J_{nr} nejvyšší (84 %). Hodnoty J_{nr} pro pojiva s pryžovým granulátem jsou při všech napětích extrémně nízké (na hraně měřitelnosti) a z tohoto důvodu by bylo určitě vhodnější provádět zkoušku při vyšší teplotě.



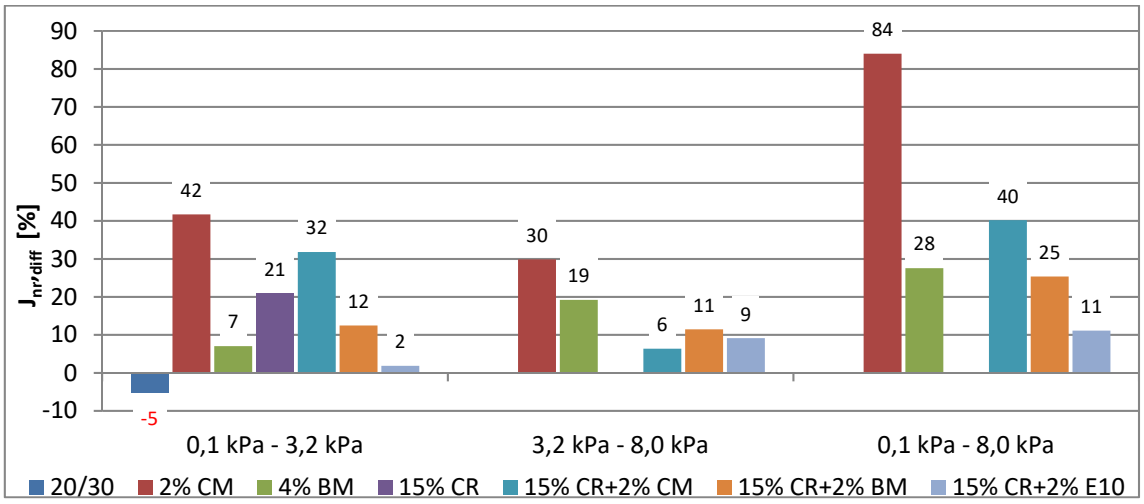
Obr. 139: Nevratná smyková poddajnost



Obr. 140: Elastické zotavení



Obr. 141: Parametr citlivosti R_{diff}



Obr. 142: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$

Poslední hodnocenou skupinou, u které byla měření provedena při třech úrovních napětí, jsou pojiva se základním silničním asfaltem 50/70 modifikovaná 15 % pryžového granulátu (dvou typů „a“ a „b“) a nebo nízkoviskózními přísadami. Pro porovnání jsou zařazena i dvě PMB 25/55-55 od různých výrobců (označena PMB_a a PMB_b). Hodnoty základních charakteristik zkoušky MSCR jsou shrnuty v tabulce 45. Zkouška se měřila při jednotné teplotě 60 °C.

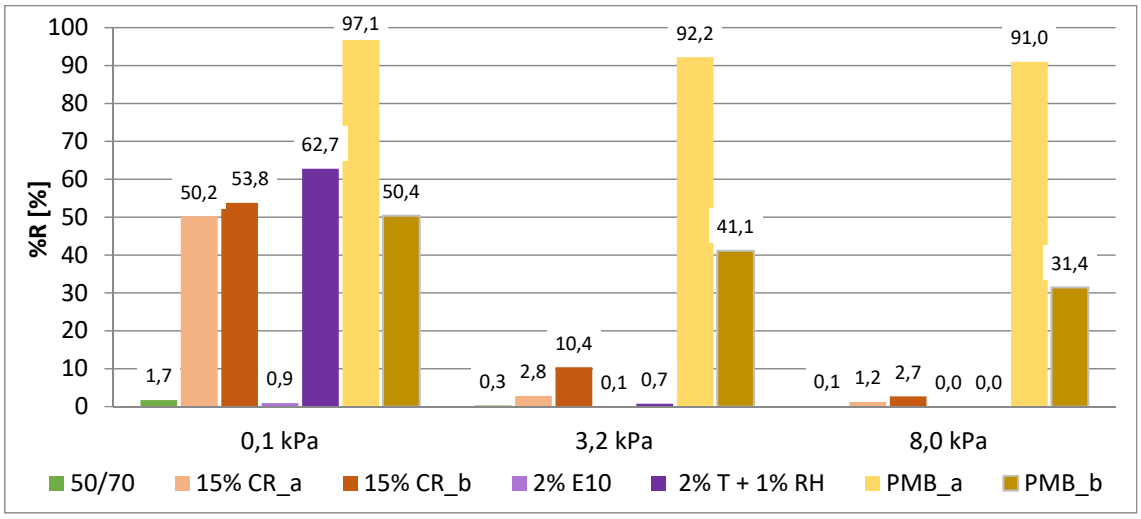
Tab. 45: *Vypočítané hodnoty %R, J_{nr} a charakteristiky citlivosti (T = 60 °C)*

Asfaltové pojivo	0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa		0,1-3,2 kPa		3,2-8,0 kPa		0,1-8,0 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]
50/70	1,7	3,0	0,3	3,0	0,1	3,2	82,3	1,2	63,2	5,5	93,5	6,7
15% CR_a	50,2	0,1	2,8	0,5	1,2	0,6	94,4	394,8	57,2	11,6	97,6	452,1
15% CR_b	53,8	0,3	10,4	0,5	2,7	0,8	80,7	102,0	74,0	56,6	95,0	216,5
2% E10	0,9	4,5	0,1	6,8	0,0	7,6	89,4	51,2	67,9	11,6	96,6	68,7

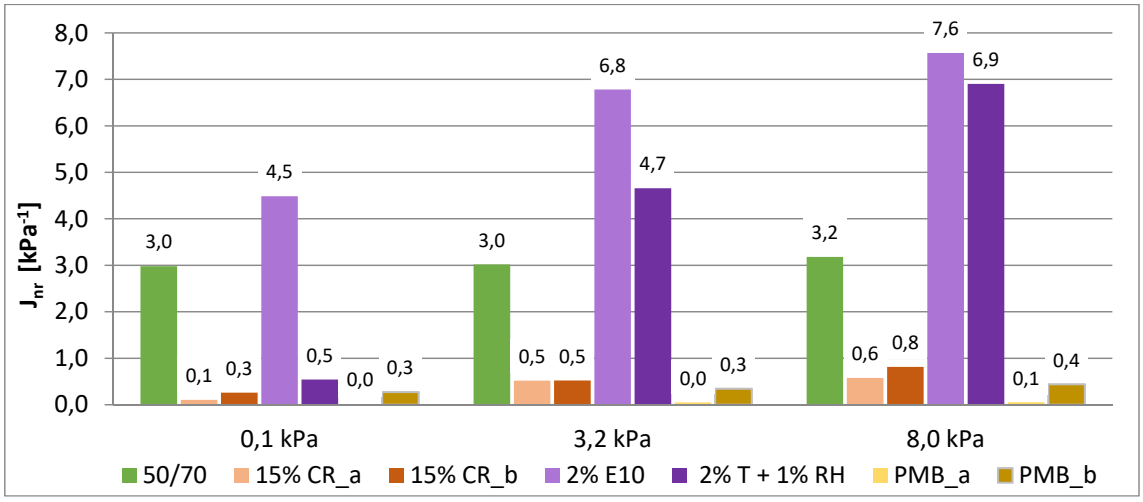
2% T + 1% RH	62,7	0,5	0,7	4,7	0,0	6,9	98,8	761,1	94,0	48,2	99,9	1176,3
PMB_a	97,1	0,0	92,2	0,0	91,0	0,1	5,1	404,6	1,3	8,2	6,3	446,0
PMB_b	50,4	0,3	41,1	0,3	31,4	0,4	18,4	25,9	23,6	27,5	37,6	60,5

Na obrázku 143 jsou zobrazeny hodnoty elastického zotavení. U všech pojiv se potvrdilo snižování %R s rostoucím napětím. Nejvyšší napětí mají pojiva PMB, u nichž dochází k nejmenšímu snížení s rostoucím napětím. Vysoké hodnoty elastického zotavení mají i pojiva modifikovaná pryžovým granulátem, ale jen při napětí 0,1 kPa. Při vyšším napětí dochází k výraznému poklesu. Překvapivě vysokou hodnotu %R (62,7 %) při napětí 0,1 kPa má asfaltové pojivo kombinující dvě nízkoviskózní přísady (pojivo označené 2% T + 1% RH). Při napětí 3,2 kPa ale má %R nižší než 1,0 %.

Z pohledu nevratné smykové poddajnosti (obr. 144) hodnoty rostou s vyšším napětím. Potvrzuje se, že nejnižší hodnoty při všech stupních napětí mají pojiva PMB a následně pojiva s CR, poukazuje to na nejlepší schopnost odolávat trvalým deformacím. Naopak ke zvýšení hodnoty J_{nr} v porovnání se základním silničním asfaltem 50/70 došlo v případě modifikace nízkoviskózními vosky.



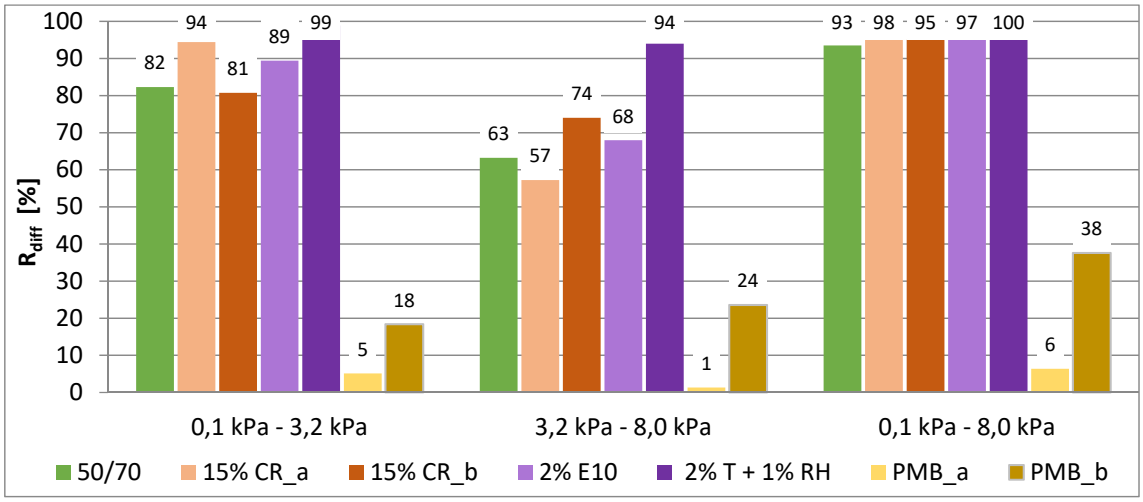
Obr. 143: Elastické zotavení



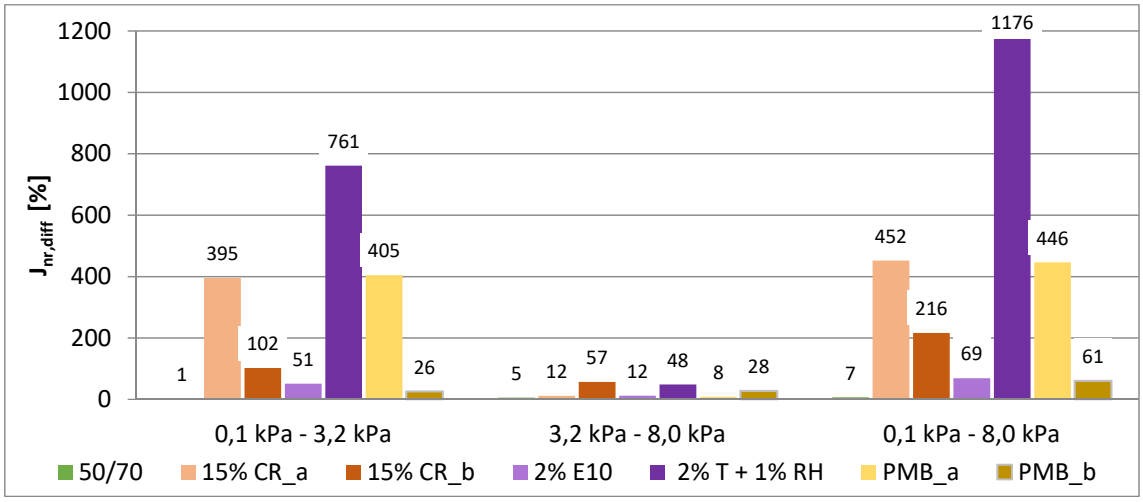
Obr. 144: Nevratná smyková poddajnost

Výše popsané potvrzují i parametry citlivosti. Nejnižší R_{diff} je u PMB pojiv (obr. 145). U ostatních pojiv je parametr citlivosti při dvou nejnižších napětích přes 80 %. Nejvyšší hodnotu R_{diff} při všech rozdílech napětí vykazuje pojivo modifikované kombinací 2 vosků. Zajímavých hodnot je dosaženo mezi nejnižším a nejvyšším napětím, kdy pro všechna modifikovaná pojiva 50/70 jsou hodnoty velmi podobné, blížící se 100 %.

Nejvyšší $J_{nr,diff}$ má opět pojivo se 2 vosky. Jedná se o nejvíce citlivé pojivo na změnu napětí. Druhou nejvyšší hodnotu $J_{nr,diff}$ pro základní napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa a současně i nejnižší hodnoty J_{nr} má pojivo označené PMB_a. Z tohoto hlediska se jedná o pojivo, jež by mělo nejlépe odolávat tvorbě trvalých deformací, ačkoli má vysokou hodnotu $J_{nr,diff}$. Vysoká hodnota je způsobena velmi nízkými hodnotami J_{nr} při napětí 0,1 kPa, které pak v porovnání mezi napětími mohou vést k zdánlivě vysoké citlivosti na změnu napětí, protože hodnotou $J_{nr;0,1}$ se rozdíl napětí dělí. U pojiv modifikovaných CR je situace podobná. Pojivo označené CR_a má nižší hodnoty J_{nr}, ale vyšší parametr citlivosti mezi dvěma základními napětími.

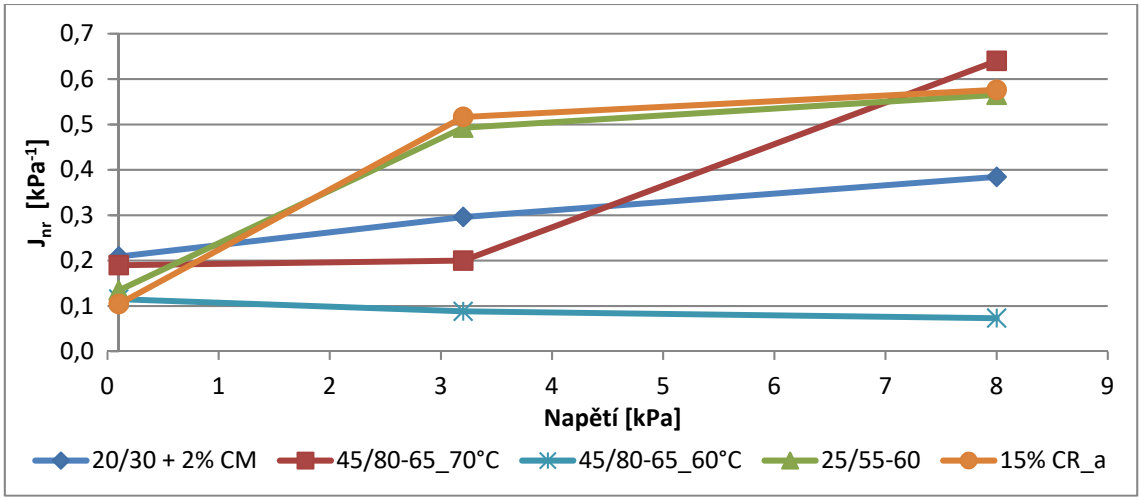


Obr. 145: Parametr citlivosti R_{diff}



Obr. 146: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$

Na obr. 147 je zobrazen vliv velikosti napětí na hodnotu nevratné smykové poddajnosti. Je zde přehledně znázorněno, zda se napětí nachází v lineární viskoelastické oblasti nebo v nelineární viskoelastické oblasti. U pojiv 20/30+2% CM a PMB 45/80-65_60 °C se hodnoty J_{nr} téměř nemění. Z toho lze usuzovat, že všechna tři napětí jsou v LVR a bylo by proto vhodné zvýšit aplikované napětí, eventuálně teplotu. Po zvýšení zkušební teploty u pojiva PMB 45/80-65_70 °C dochází k nárůstu hodnoty J_{nr} mezi napětím 3,2 kPa a 8,0 kPa, což svědčí o překročení oblasti LVR. V oboru napětí 0,1 kPa až 3,2 kPa se ale pojivo chová lineárně viskoelasticky. V případě pojiv 15% CR_a a PMB 25/55-60 je nejstrmější nárůst hodnoty J_{nr}, indikující přechod mezi lineárním a nelineárním chováním, mezi napětím 0,1 kPa a 3,2 kPa. Je tedy zřejmé, že zlom při teplotě 60 °C nastává při napětí vyšším než 3,2 kPa a to zejména u pojiv modifikovaných nebo s nižší gradací.



Obr. 147: Závislost velikosti napětí na hodnotě nevratné smykové poddajnosti

4.2.6 VLIV ZVOLENÉ GEOMETRIE MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE [28]

Nejčastěji se na DSR používají dvě geometrie, jmenovitě 8 mm průměr desky s mezerou mezi dolní a horní deskou 2 mm (označeno PP08) nebo 25 mm průměr desky s 1 mm mezerou (PP25). Volba geometrie testovacího zařízení se určuje na základě provozních podmínek. Geometrie PP08 se u zkoušky Frequency Sweep (FS) obvykle vybírá na pojiva s vyšší tuhostí. Vyšší tuhosti je docíleno zpravidla při teplotách pod 30 °C nebo u dlouhodobě zestárlých vzorků. Geometrie PP25 se běžně volí pro měření při vyšších teplotách (nad 30 °C) a je tedy vybrána jako základní pro provádění zkoušky MSCR.

Rozdílná geometrie se porovnávala u dvou skupin asfaltových pojiv. První skupinu tvořila dvě PMB pojiva a silniční asfalt 50/70 po laboratorním stárnutí (tab. 46) a druhou skupinu tvořil jeden vzorek CRMB, jeden PMB a silniční asfalt 20/30 (tab. 47). Označení „(2)“ na obrázcích značí geometrii PP08 a bez dodatečného značení je klasická geometrie PP25. V tab. 46 a v grafech pro první skupinu jsou asfaltová pojiva PMB označena záměrně zkráceně bez písmenné zkratky „PMB“.

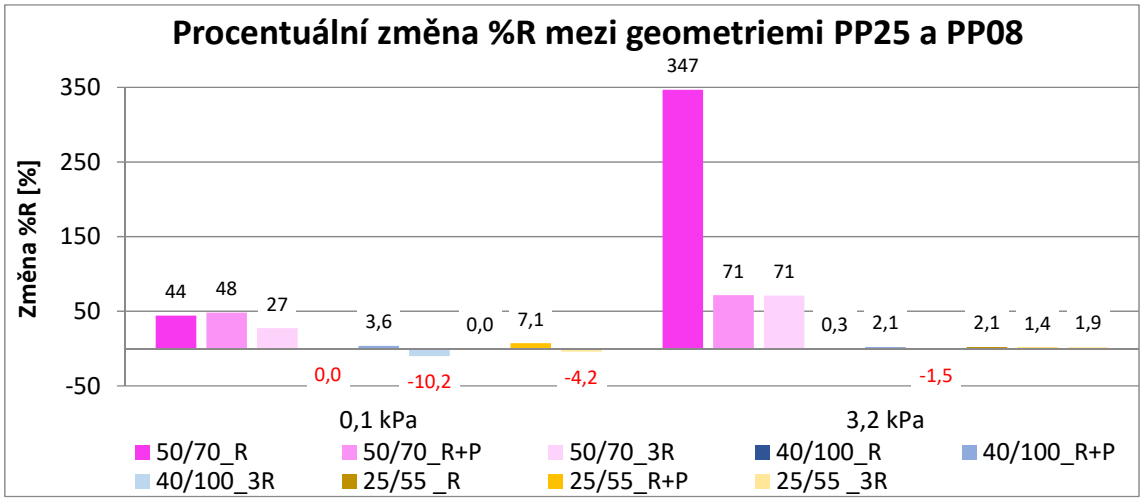
Tab. 46: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} (T = 60 °C)*

Asfaltové pojivo	PP25				PP08			
	0,1 kPa		3,2 kPa		0,1 kPa		3,2 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [1/kPa]	%R [%]	J_{nr} [1/kPa]	%R [%]	J_{nr} [1/kPa]	%R [%]	J_{nr} [1/kPa]
50/70_R	5,6	1,59	1,1	1,57	8,1	0,54	5,1	0,58
50/70_R+P	17,0	0,28	14,0	0,23	25,2	0,06	23,9	0,06
50/70_3R	16,9	0,32	13,0	0,28	21,5	0,11	22,2	0,08
40/100_R	84,8	0,09	88,9	0,04	84,8	0,03	89,2	0,02
40/100_R+P	88,6	0,02	88,2	0,02	91,7	0,01	90,1	0,01
40/100_3R	92,1	0,02	91,8	0,02	82,7	0,02	90,4	0,01
25/55_R	73,9	0,16	73,2	0,15	73,9	0,07	74,8	0,06
25/55 _R+P	64,5	0,07	64,2	0,06	69,0	0,02	65,1	0,03
25/55 _3R	70,0	0,07	65,6	0,09	67,0	0,05	66,9	0,04

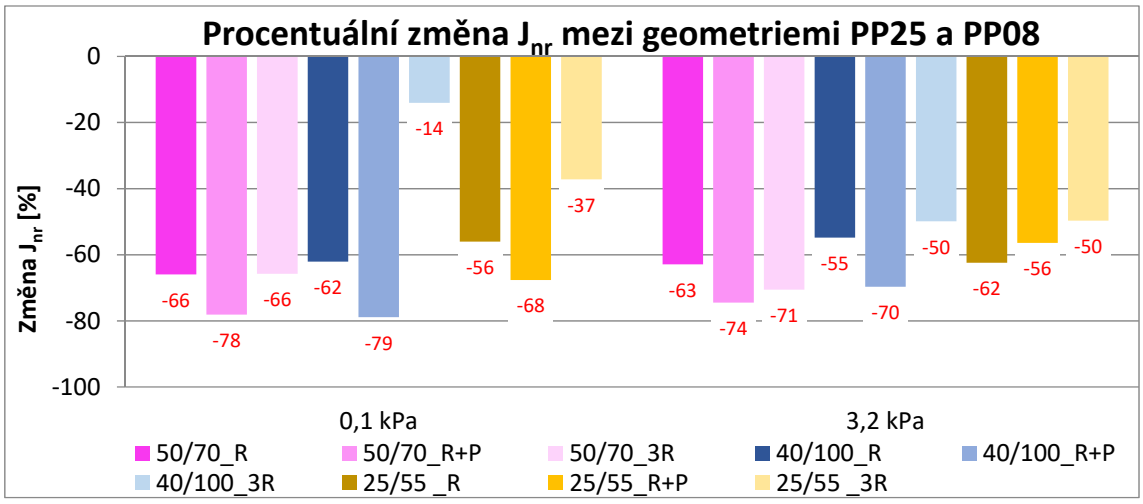
Pozn.: zkratka R znamená stárnutí metodou RTFOT; R+P znamená stárnutí RTFOT+PAV a 3R znamená 3xRTFOT

Zkouška s oběma geometriemi byla u první hodnocené skupiny provedena na třech pojivech po stárnutí. Krátkodobé stárnutí se volí jako základní pro zkoušku MSCR a je zastoupeno nejčastěji využívanou metodou RTFOT (zkráceně „R“). Dlouhodobé stárnutí není z pohledu tvorby trvalých deformací podstatné, ale reprezentují ho zde dvě metody: kombinace RTFOT s PAV (R+P) a trojnásobná metoda RTFOT (3R).

Na obr. 148 je vidět rozdíl vypočítaných hodnot elastického zotavení mezi oběma geometriemi, který je u PMB pojiv poměrně nízký. Procentuálně se jedná o rozdíl do 10 %. U silničního asfaltu 50/70 je procentuální změna výraznější z důvodu, že má velmi malé hodnoty %R. Procentuální rozdíl obou geometrií pro hodnotu J_{nr} je znázorněn na obrázku 149. Hodnota J_{nr} je v případě použití geometrie PP08 vždy nižší (záporné hodnoty), u většiny variant dokonce více než o polovinu.

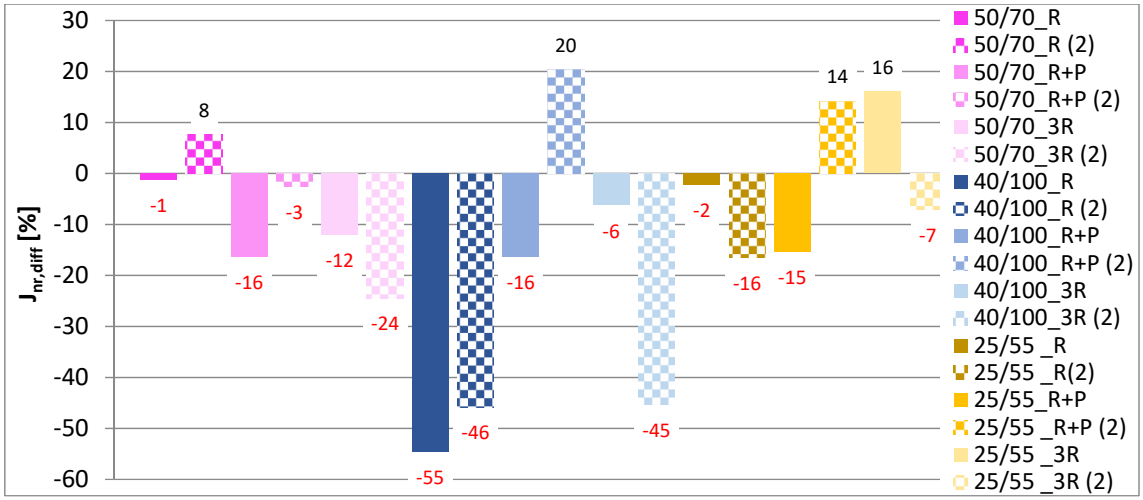


Obr. 148: Procentuální změna %R mezi geometrií PP25 a PP08



Obr. 149: Procentuální změna J_{nr} mezi geometrií PP25 a PP08

Obr. 150 zobrazuje hodnoty parametru citlivosti $J_{nr,diff}$ pro obě zvolené geometrie. Je zřejmé, že se hodnoty $J_{nr,diff}$ pro rozdílné geometrie většinou liší a nelze najít konkrétní tendenci. Hlavním důvodem jsou všeobecně nízké hodnoty J_{nr} pro zestárlá pojiva, zejména u PMB pojiv. Druhá příčina je, že hodnoty $J_{nr,diff}$ mají velkou variabilitu výsledků.



Obr. 150: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$

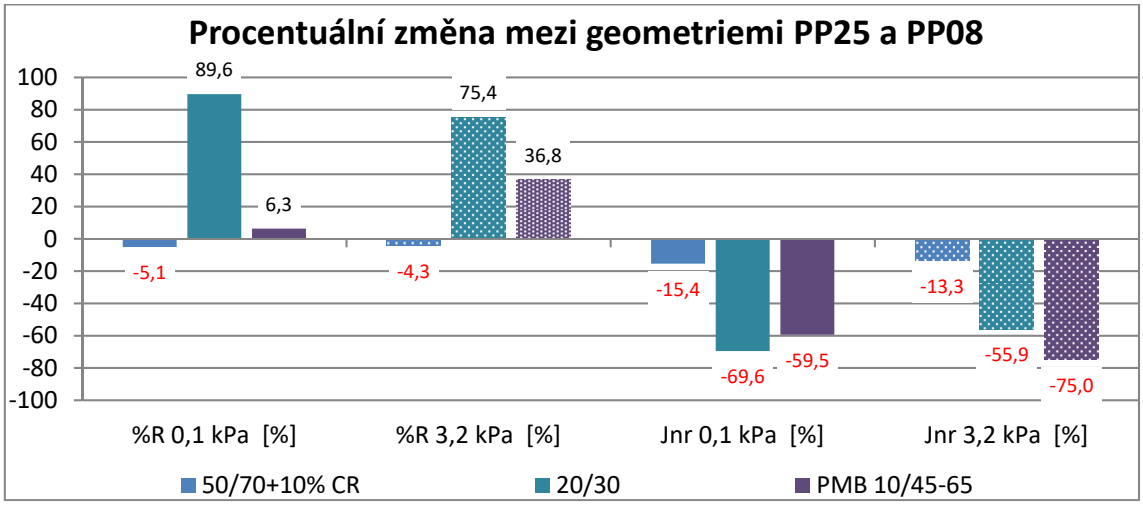
Druhá skupina porovnávaných pojiv obsahuje 3 zásadně odlišná pojiva, takže je zde zjevný rozdíl mezi jednotlivými typy asfaltových pojiv (tab. 47).

Tab. 47: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} (T = 60 °C)*

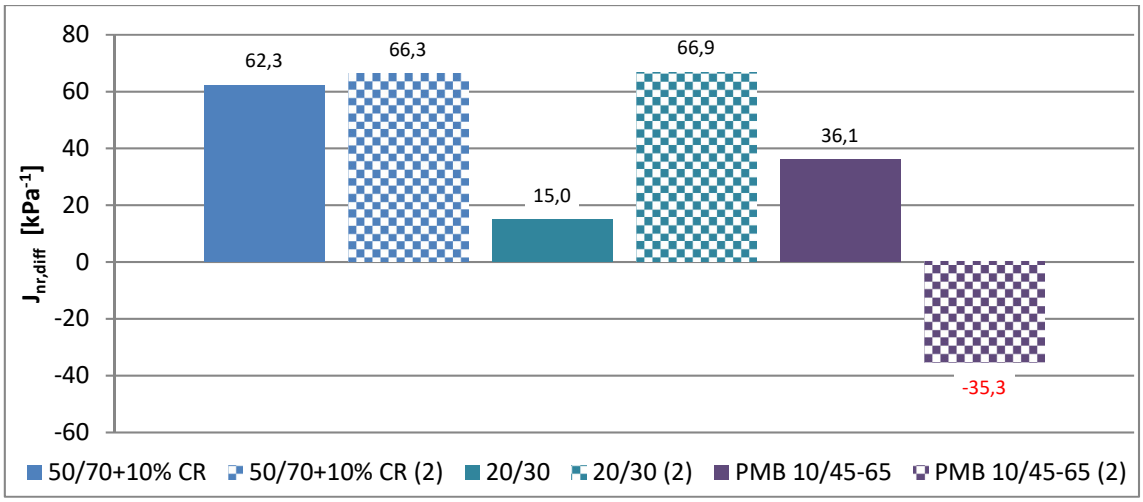
Asfaltové pojivo	PP25				PP08			
	0,1 kPa		3,2 kPa		0,1 kPa		3,2 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [1/kPa]	%R [%]	J_{nr} [1/kPa]	%R [%]	J_{nr} [1/kPa]	%R [%]	J_{nr} [1/kPa]
50/70+10% CR	35,5	0,50	7,8	0,81	33,7	0,42	7,5	0,70
20/30	24,5	0,30	9,3	0,35	46,4	0,09	16,3	0,15
PMB 10/45-65	42,1	0,12	35,3	0,12	44,7	0,05	48,3	0,03

Potvrzuje se, že u nemodifikovaných pojiv je nejvýraznější vliv na hodnotu %R při volbě geometrie (obr. 151). Naopak nejmenší vliv geometrie na všechny sledované charakteristiky je patrný u pojiva modifikovaného pryžovým granulátem (50/70 + 10% CR). Znovu se prokázaly menší hodnoty J_{nr} při použití geometrie PP08. U silničního asfaltu 20/30 a PMB 10/45-65 došlo ke snížení o více než polovinu u obou napětí.

Vliv výběru geometrie na parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ (obr. 152) není ani u této skupiny jasně prokazatelný. U dvou pojiv došlo s geometrií PP08 k nárůstu, ale v případě pojiva PMB byla hodnota $J_{nr,diff}$ pro geometrii PP08 dokonce záporná.



Obr. 151: Procentuální změna J_{nr} a %R mezi geometrií PP25 a PP08



Obr. 152: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$

4.2.7 VLIV POČTU CYKLŮ NA VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH CHARAKTERISTIK [28]

Výpočet jednotlivých charakteristik z průměru všech 10 cyklů, jak je vyžadováno podle standardního postupu MSCR zkoušky, může být zavádějící, protože jednotlivá měření se u některých asfaltových pojiv výrazně mění s počtem cyklů. K podobným zjištěním došel např. Motamed a kol. [219]. V nové americké normě AASHTO T 350-14 [181] se proto

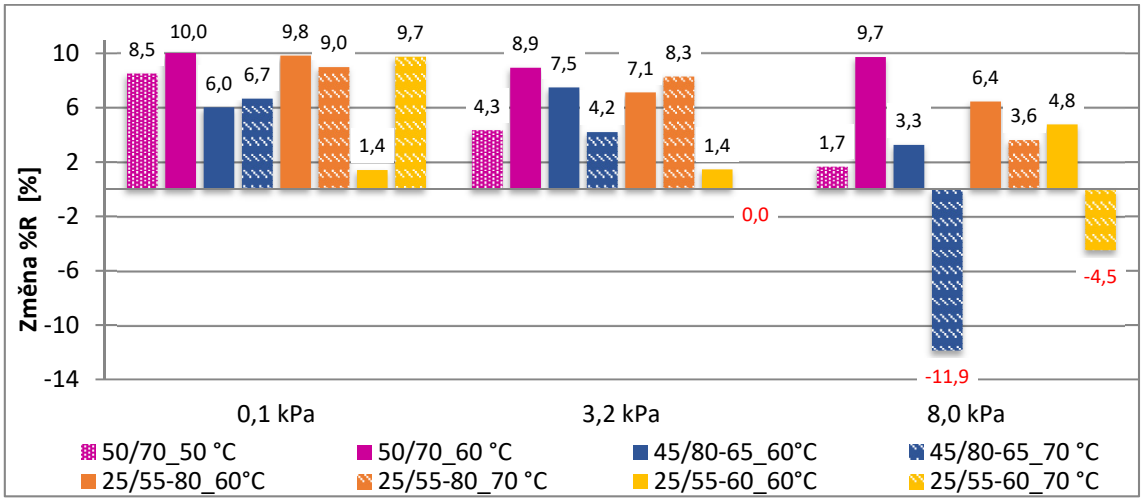
předepisuje provést prvních 10 cyklů při napětí 0,1 kPa jako inicializační, z kterých se nepočítají výsledné hodnoty.

Následující tabulky jsou rozděleny na dvě základní části. V první části jsou uvedeny hlavní charakteristiky zkoušky MSCR vypočítané pouze z posledních 5 cyklů. V druhé části tabulky je procentuální rozdíl mezi standardním výpočtem ze všech 10 cyklů a výpočtem z posledních 5 cyklů. Právě tyto procentuální rozdíly hodnot J_{nr} a %R jsou znázorněny i graficky pro jednotlivé skupiny popsané v předchozích podkapitolách. Pro vybraná pojiva jsou zobrazeny i hodnoty jednotlivých cyklů.

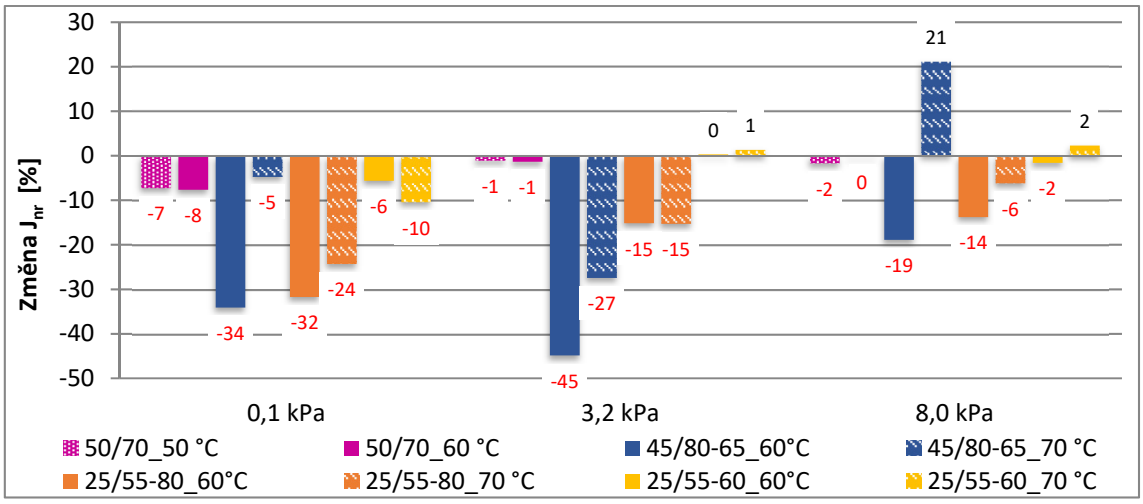
Tab. 48: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly*

Asfaltové pojivo	Posledních 5 cyklů						Pokles/nárůst v porovnání s 10 cykly					
	0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa		0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [%]	%R [%]	J_{nr} [%]	%R [%]	J_{nr} [%]
50/70_50 °C	2,7	1,47	1,2	1,08	0,5	1,06	8,51	-7,28	4,34	-1,13	1,65	-1,72
50/70_60 °C	0,6	4,55	0,1	4,35	0,0	4,56	10,0	-7,66	8,94	-1,34	9,72	-0,23
45/80-65_60°C	88,1	0,08	91,9	0,05	90,0	0,06	6,02	-34,13	7,49	-44,88	3,25	-18,91
45/80-65_70 °C	95,8	0,18	89,1	0,15	50,6	0,77	6,66	-4,72	4,19	-27,43	-11,9	21,11
25/55-80_60°C	76,3	0,10	71,3	0,13	70,7	0,14	9,83	-31,73	7,12	-15,17	6,44	-13,80
25/55-80_70 °C	76,7	0,32	63,8	0,44	54,7	0,59	8,99	-24,32	8,29	-15,32	3,61	-6,23
25/55-60_60°C	77,9	0,13	39,0	0,49	31,1	0,56	1,40	-5,65	1,45	0,30	4,77	-1,62
25/55-60_70 °C	60,5	0,95	24,7	1,87	12,9	2,43	9,75	-10,46	0,00	1,30	-4,49	2,28

V tabulce 48 jsou vypočítané hodnoty pro skupinu pojiv, u níž se zkouška prováděla při dvou teplotách. Obrázky 153 a 154 zobrazují rozdíly výsledných hodnot průměru všech 10 cyklů v porovnání s posledními 5 cykly. Rozdíl elastického zotavení se pohybuje do 12 %, ale pro hodnotu J_{nr} jsou u některých asfaltových pojiv rozdíly znatelně vyšší (do 45 %). V případě hodnot %R jsou většinou první cykly nižší, a proto je procentuální rozdíl zpravidla kladný. Naopak u hodnot J_{nr} dochází s přibývajícími cykly k poklesu, takže je rozdíl záporný. Všeobecně jsou největší hodnoty u nejnižšího napětí 0,1 kPa. Nízké rozdíly u elastického zotavení však nemusí nutně znamenat, že všechny hodnoty jednotlivých cyklů jsou podobné.

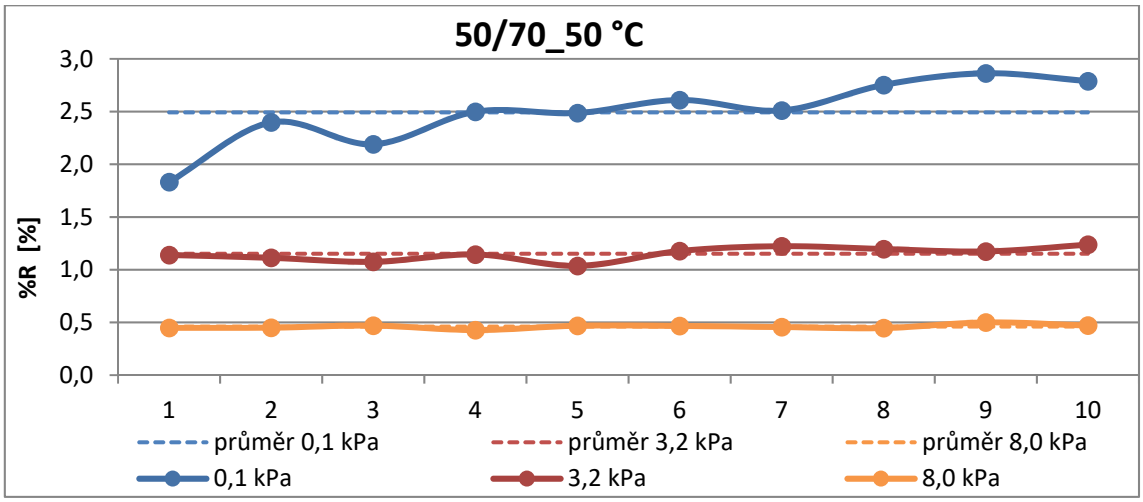


Obr. 153: Procentuální změna R při výpočtu z posledních 5 cyklů

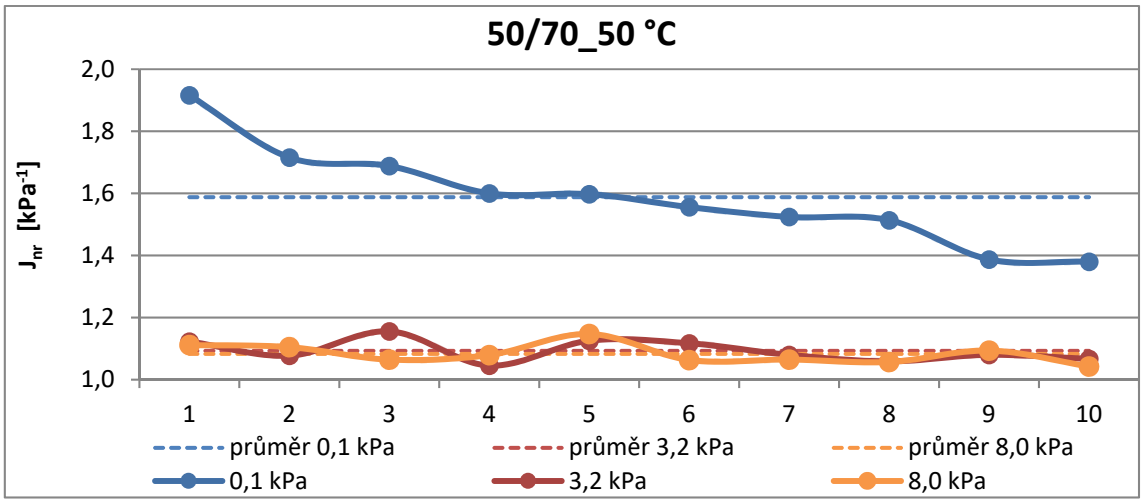


Obr. 154: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů

Z obr. 155 a 156 se ukazuje, že při působení vyšší úrovně napětí dochází ke snížení variability výsledků v rámci zkoušky. Čárkovaná čára v grafech znázorňuje průměrnou hodnotu všech 10 cyklů. Jednotlivé hodnoty mají větší výkyvy při nejnižší úrovni napětí, zatímco vyšší míra napětí přispívá k lepší opakovatelnosti výsledků. Při pohledu na průměrné hodnoty J_{nr} je možné vyvodit, že napětí 0,1 kPa je pro toto pojivo v LVR. Výrazná změna je u napětí 3,2 kPa, které tedy bude již mimo LVR.

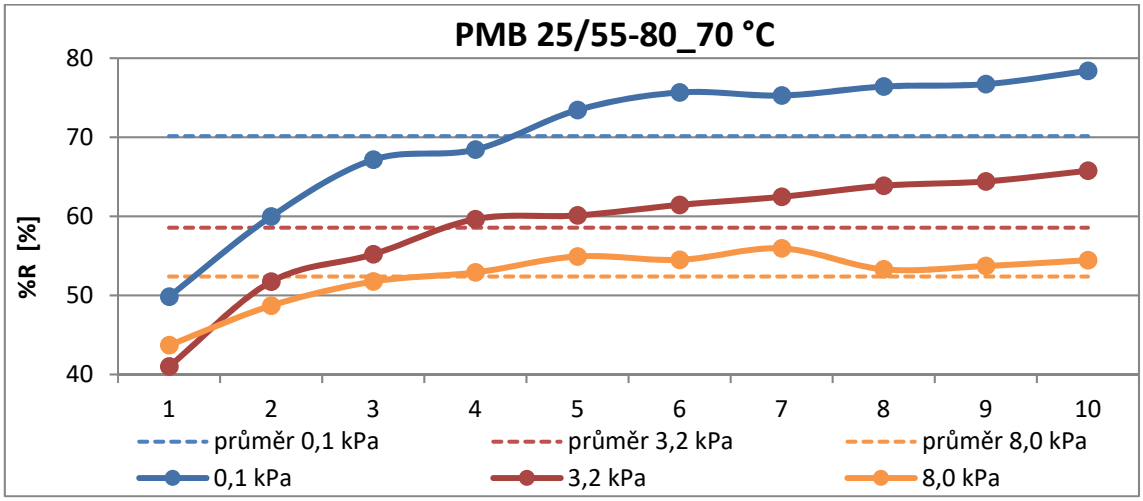


Obr. 155: Hodnoty %R pro každý cyklus

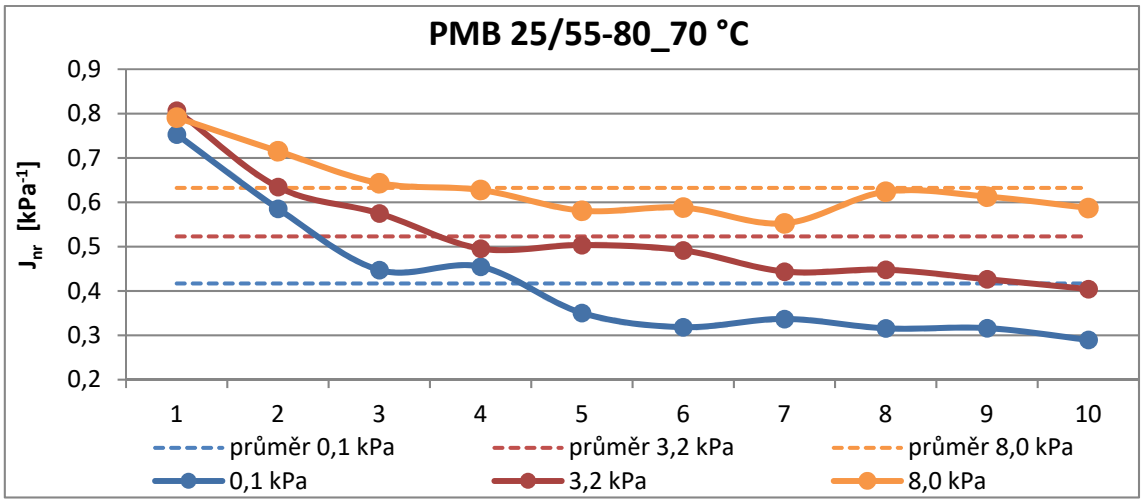


Obr. 156: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus

U všech PMB byl podobný trend zřejmý z obrázku 157. Elastické zotavení u prvních 3-4 cyklů postupně narůstalo a až u následujících cyklů došlo k ustálení hodnot. Uvedený průběh je patrný především u napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa. Tento druh chování naznačuje, že obnovení přetvoření není dokončeno v časovém horizontu 9 s, čímž se zvyšuje relativní množství zotavení během následujících cyklů. Z důvodu poměrně vysokých hodnot %R se proto jeví procentuální nárůst změny velmi nízký. Naopak při posouzení způsobu výpočtu J_{nr} (obr. 158) s nízkými hodnotami je procentuální rozdíl vypočítaný z 10 cyklů v porovnání s 5 cykly následně výrazný. Čím nižší je procentuální rozdíl mezi 5 a 10 cykly, tím nižší je rozdíl mezi prvními cykly.

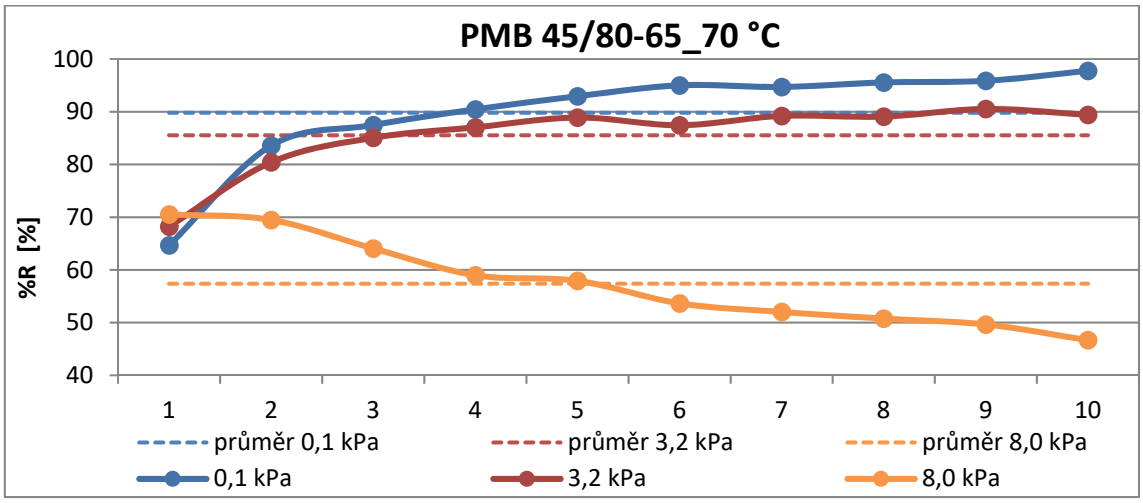


Obr. 157: Hodnoty %R pro každý cyklus

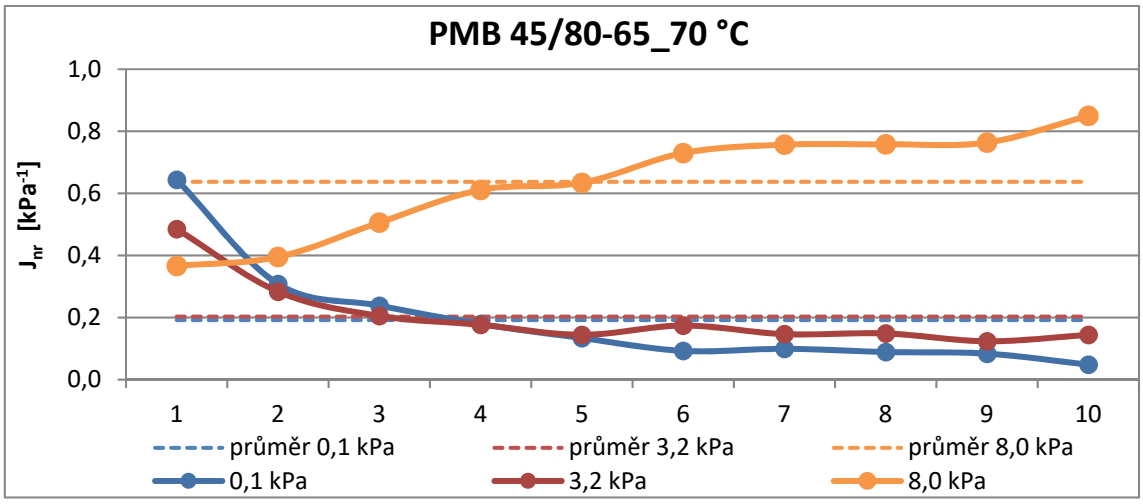


Obr. 158: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus

Podstatná změna nastala u pojiva PMB 45/80-65 při teplotě 70 °C (obr. 159 a 160), kdy při napětí 8,0 kPa je opačný trend než u ostatních napětí a v jednotlivých cyklech dochází k nárůstu J_{nr} a poklesu %R. Tento průběh pravděpodobně poukazuje na únavu materiálu, která se může objevit v nelineární viskoelastické oblasti. V případě pojiva PMB 25/55-60 měřeného při 70 °C, vychází při napětí 8,0 kPa rozdíl pro posledních 5 cyklů %R také záporný (obr. 153) a J_{nr} kladný (obr. 154). Díky vyrovnanosti hodnot při každém cyklu se ale jedná o zanedbatelné rozdíly.



Obr. 159: Hodnoty %R pro každý cyklus



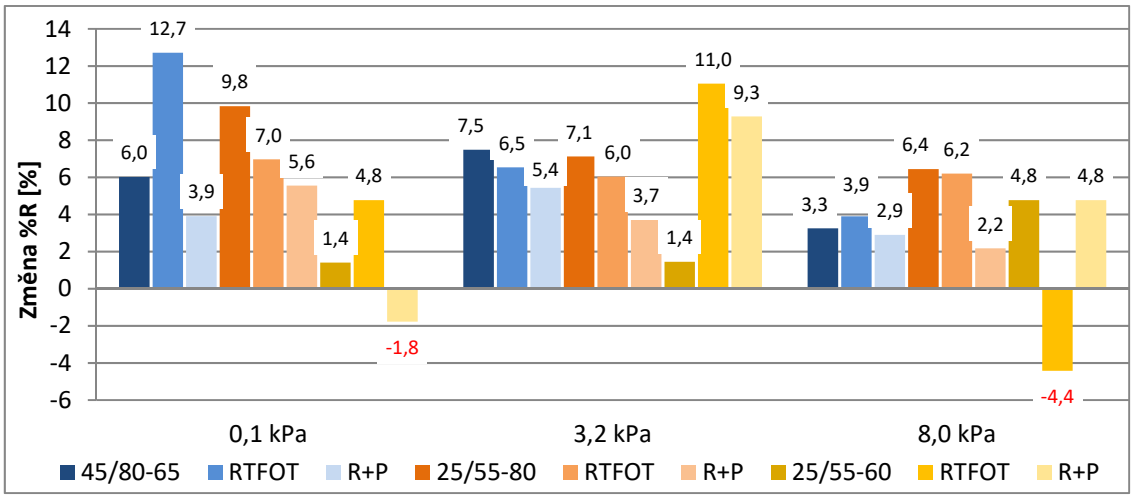
Obr. 160: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus

V následující tabulce 49 jsou zobrazeny hodnoty pro PMB pojiva měřená při teplotě 60 °C a vystavená laboratornímu stárnutí metodou RTFOT (značeno „R“) a metodu kombinující RTFOT a PAV (značeno „R+P“).

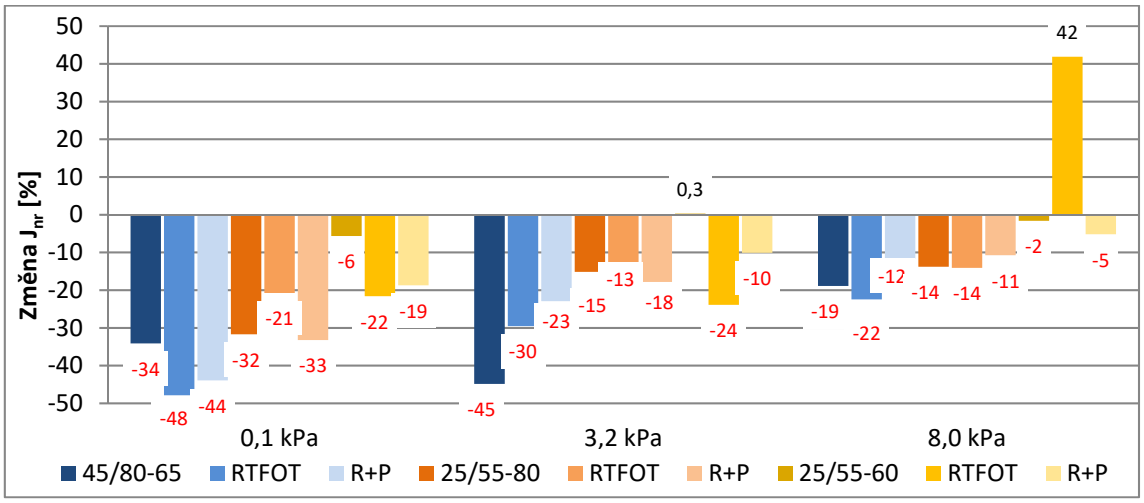
Tab. 49: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly*

Asfaltové pojivo	Posledních 5 cyklů						Pokles/nárůst v porovnání s 10 cykly					
	0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa		0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [%]	%R [%]	J_{nr} [%]	%R [%]	J_{nr} [%]
45/80-65	88,1	0,08	91,9	0,05	90,0	0,06	6,02	-34,1	7,49	-44,9	3,25	-18,9
45/80-65_R	78,5	0,07	85,1	0,05	87,5	0,04	12,7	-47,9	6,54	-29,6	3,90	-22,5
45/80-65_R+P	89,6	0,01	83,6	0,01	84,0	0,01	3,91	-43,9	5,43	-22,9	2,89	-11,6
25/55-80	76,3	0,10	71,3	0,13	70,7	0,14	9,83	-31,7	7,12	-15,2	6,44	-13,8
25/55-80_R	70,0	0,08	65,9	0,09	67,8	0,08	6,96	-20,8	6,04	-12,6	6,20	-14,1
25/55-80_R+P	83,4	0,01	83,9	0,01	84,6	0,01	5,56	-33,2	3,70	-17,8	2,17	-10,7
25/55-60	77,9	0,13	39,0	0,49	31,1	0,56	1,40	-5,65	1,45	0,30	4,77	-1,62
25/55-60_R	84,4	0,09	73,1	0,12	59,6	0,39	4,77	-21,6	11,1	-23,9	-4,43	41,9
25/55-60_R+P	42,9	0,09	54,3	0,08	54,7	0,08	-1,77	-18,7	9,28	-10,1	4,77	-5,17

Z obrázku 161 je zřejmé, že rozdíl ve výpočtu pro posledních 5 cyklů je v případě všech PMB pojiv znovu poměrně nevýznamný (do 13 %), neboť průměrné hodnoty %R jsou vysoké. Stárnutím dochází většinou ke snížení procentuálního rozdílu. Rozdíl hodnot J_{nr} (obr. 162) je opětovně větší (do 50 %) díky průměrně velmi malým hodnotám J_{nr}.



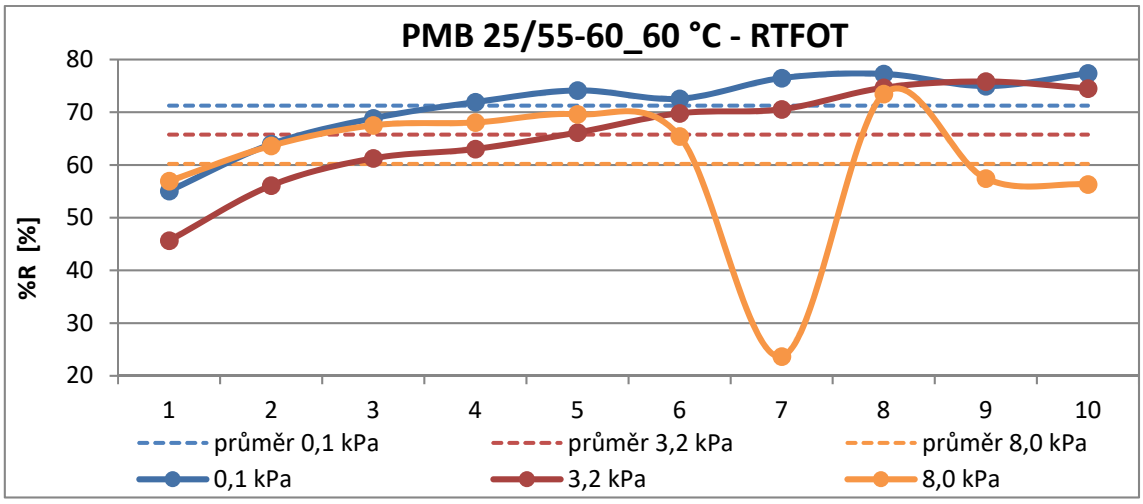
Obr. 161: Procentuální změna R při výpočtu z posledních 5 cyklů



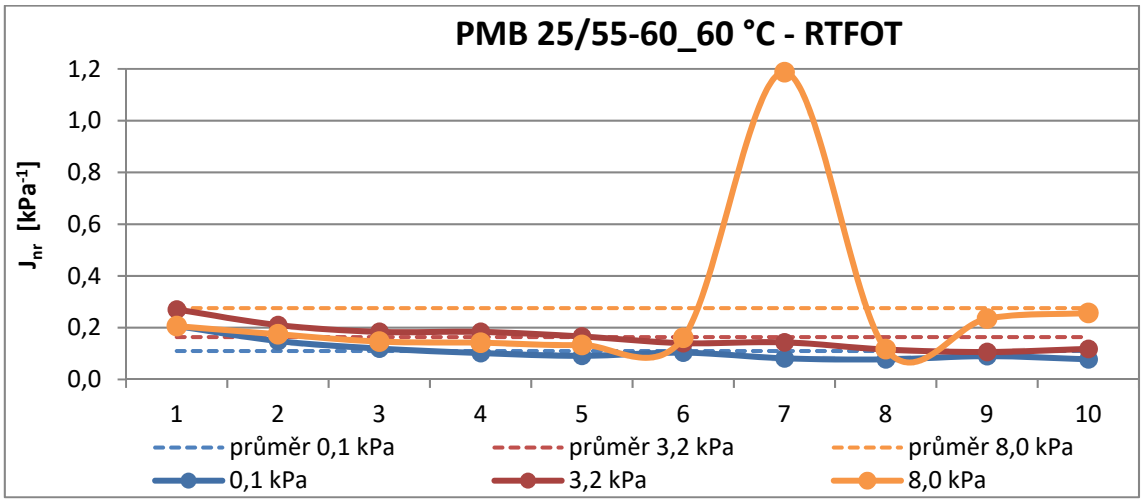
Obr. 162: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů

U pojiva PMB 25/55-60_RTFOT došlo při napětí 8,0 kPa k překvapivě velkému navýšení hodnoty J_{nr} vypočítané z posledních 5 cyklů, což by mohlo znamenat únavu materiálu. Při bližším prozkoumání jednotlivých cyklů je však patrné (obr. 164), že nedochází k postupnému nárůstu, ale ke skokovému nárůstu v 7. cyklu. Tato hodnota by proto do průměru neměla být započítána! Stejné zjištění platí pro hodnoty elastického zotavení (obr. 163), kde v 7. cyklu je nelogicky skokově nižší hodnota %R. Dále je na obr. 163 vidět, že zase u prvních 3 cyklů dochází k poměrně velkému nárůstu hodnot %R charakteristickému zejména pro PMB pojiva.

Je zajímavé, že ke skokové změně přetvoření, která má za následek výrazně odlišné hodnoty %R a J_{nr} v porovnání s průměrnými hodnotami, došlo i u pojiva označeného PMB 25/55-60_R+P. U pojiva nastal nelogický nárůst přetvoření při napětí 0,1 kPa u 6. cyklu. Výsledkem je pro toto asfaltové pojivo na obr. 161 záporná hodnota %R. Je tedy nutné kontrolovat, zda hodnoty každého cyklu nejsou výrazně vzdáleny od průměrné hodnoty pro dané napětí.

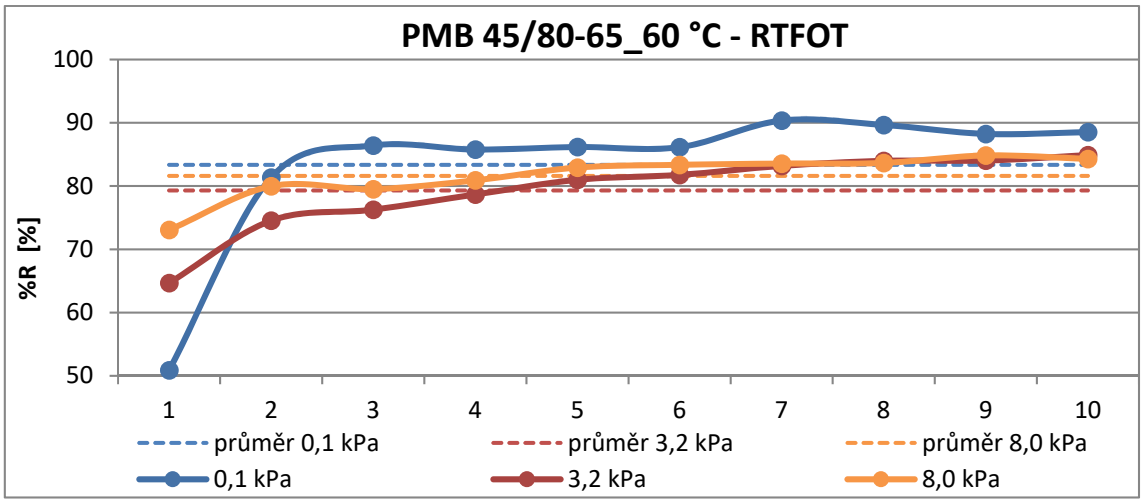


Obr. 163: Hodnoty %R pro každý cyklus

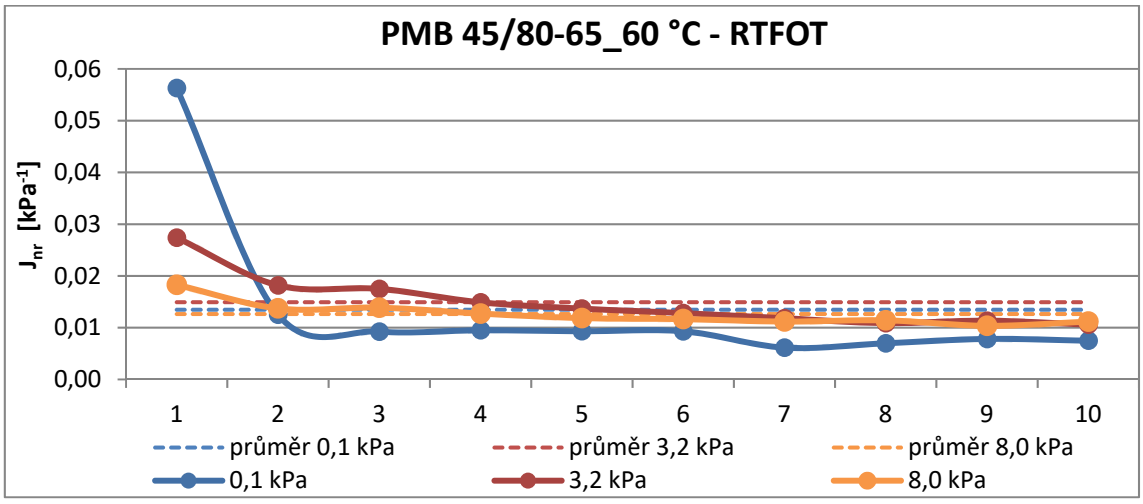


Obr. 164: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus

Na obr. 165 a 166 jsou zobrazeny hodnoty jednotlivých cyklů pojiva PMB 45/80-65 po stárnutí metodou RTFOT a za povšimnutí stojí zajímavé hodnoty prvního cyklu. U prvního cyklu je nejnižší hodnota %R při napětí 0,1 kPa, ačkoli v průměru všech 10 cyklů je elastické zotavení nejvyšší. Naopak hodnota J_{nr} prvního cyklu při napětí 0,1 kPa je nejvyšší ve srovnání s ostatními napětími. Potvrzuje to zjištění, že v případě PMB pojiv dochází u prvních cyklů měření k dosažení rozkolísaných hodnot.



Obr. 165: Hodnoty %R pro každý cyklus



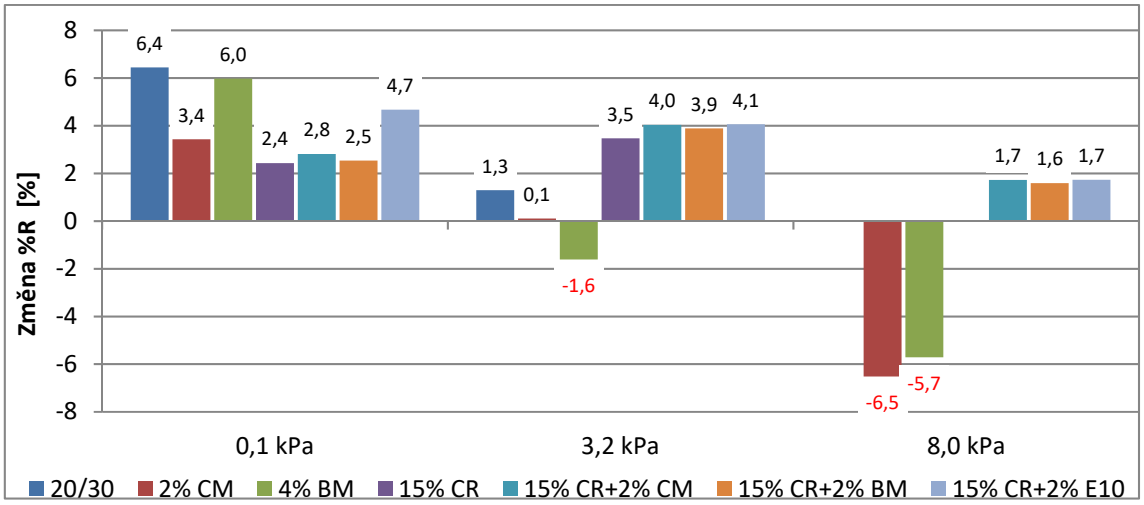
Obr. 166: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus

Další posuzovanou skupinou pojiv jsou pojiva se základním silničním asfaltem 20/30, modifikovaným nízkoviskózními vosky (NV), popřípadě pryžovým granulátem (CR) v kombinaci s NV (tab. 50).

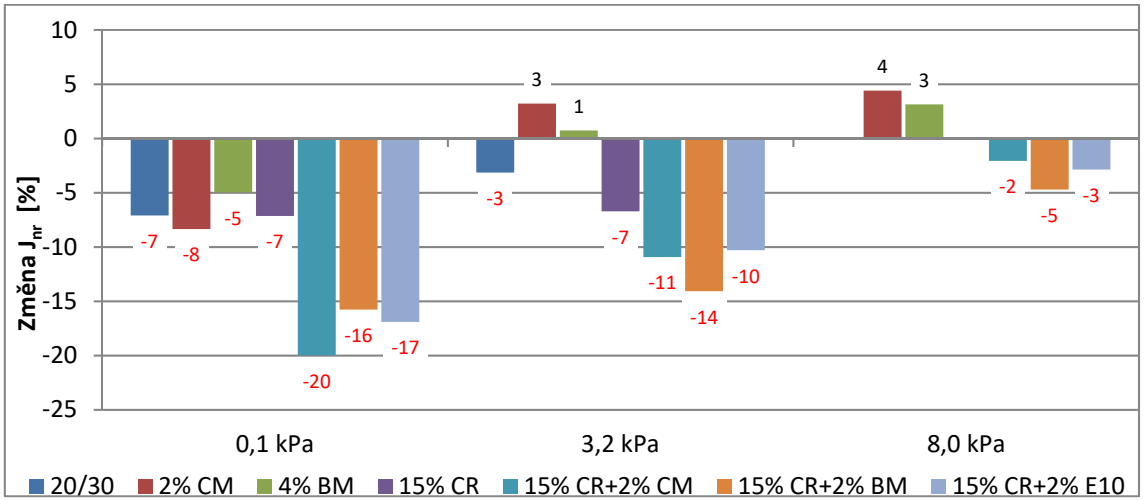
Tab. 50: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly*

Asfaltové pojivo	Posledních 5 cyklů						Pokles/nárůst v porovnání s 10 cykly					
	0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa		0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [%]	%R [%]	J_{nr} [%]	%R [%]	J_{nr} [%]
20/30	10,0	0,395	6,8	0,390	-	-	6,4	-7,1	1,3	-3,1	-	-
2% CM	16,0	0,192	8,9	0,306	3,7	0,402	3,4	-8,3	0,1	3,2	-6,5	4,4
4% BM	15,5	0,439	7,2	0,498	2,2	0,608	6,0	-5,0	-1,6	0,7	-5,7	3,1
15% CR	75,3	0,014	70,3	0,017	-	-	2,4	-7,1	3,5	-6,7	-	-
15% CR+2% CM	84,0	0,005	77,6	0,007	74,5	0,009	2,8	-20,0	4,0	-10,9	1,7	-2,1
15% CR+2% BM	80,6	0,006	78,6	0,007	74,4	0,009	2,5	-15,8	3,9	-14,1	1,6	-4,7
15% CR+2% E10	76,1	0,010	73,5	0,010	68,8	0,012	4,7	-16,9	4,1	-10,3	1,7	-2,9

Na obrázku 167 je zobrazena procentuální změna %R mezi hodnotami vypočítanými ze všech 10 cyklů a z pouze posledních 5 cyklů. Vypočítané rozdíly při všech napětích nebyly zásadně vysoké (do 7 %). Naopak obrázek 168 ukazuje, že procento změny mezi dvěma způsoby výpočtu J_{nr} při napětí 0,1 kPa může být až 20 %. Jedná se o poměrně významnou změnu, která může být zdrojem proměnlivosti výsledků. Při vyšších napětích je tato změna nižší a v případě aplikace napětí 8,0 kPa je dokonce do 5 %, což je možné považovat za zanedbatelné. Vyšších rozdílů při výpočtu z posledních 5 cyklů zaznamenala pojiva modifikovaná pryžovým granulátem.



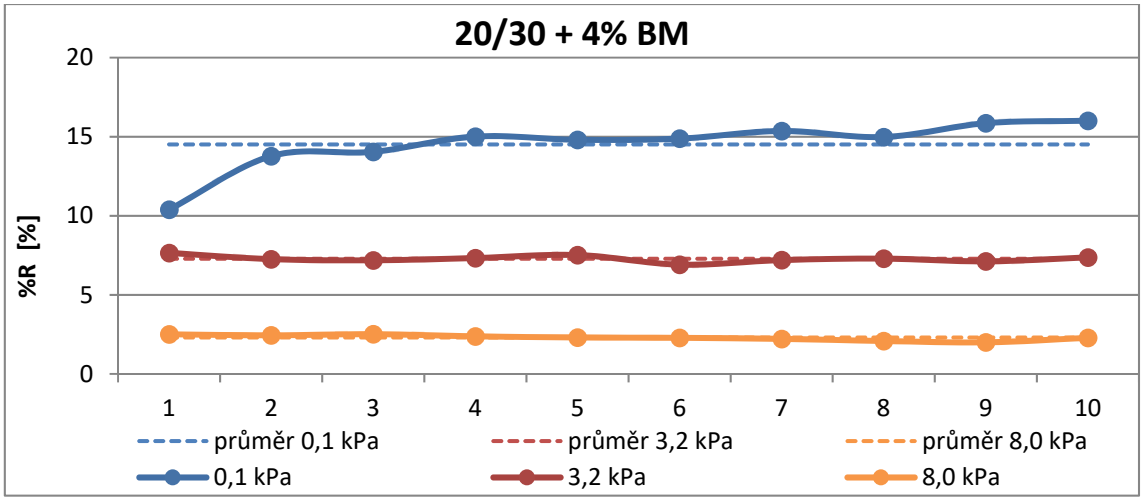
Obr. 167: Procentuální změna R při výpočtu z posledních 5 cyklů



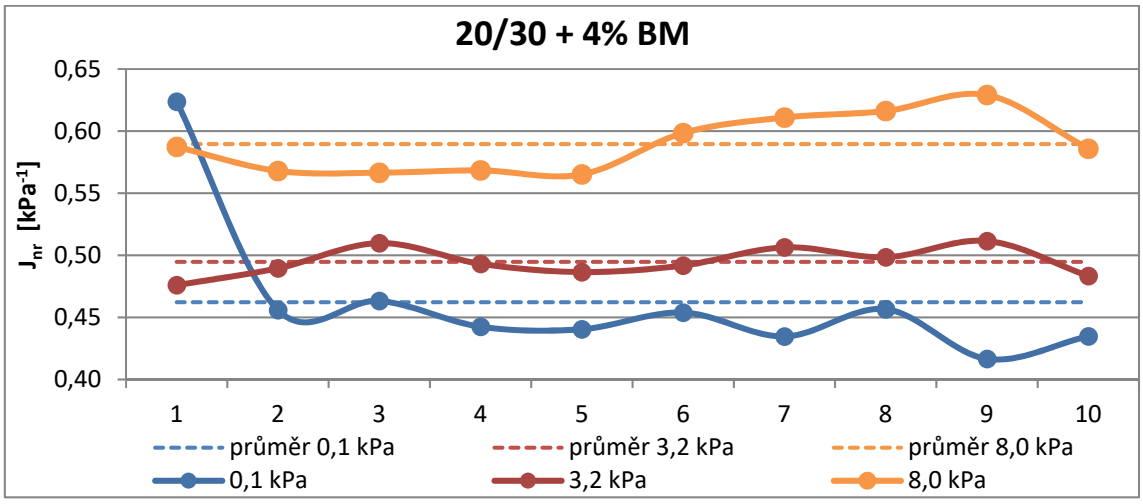
Obr. 168: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů

Ustálené hodnoty %R všech cyklů jsou zřejmé u asfaltových pojiv modifikovaných nízkoviskózními vosky (na obr. 169 s konkrétním voskem BM). Jen u nejnižší úrovně napětí 0,1 kPa jsou patrné rozdíly, ale ne až tak výrazné. Pro J_{nr} (obr. 170) jsou při napětí 3,2 kPa a 8,0 kPa hodnoty všech cyklů opět ustálené. Klesající hodnoty J_{nr} jsou zjevné během napětí 0,1 kPa. Nápadně rozdílná od ostatních hodnot je pouze první vypočítaná hodnota u nejnižšího napětí. Naopak v případě modifikace pryžovým granulátem CR (obr. 171 a 172) je vidět, že nejen první hodnota je výrazně odlišná u všech úrovní napětí. U těchto asfaltových pojiv

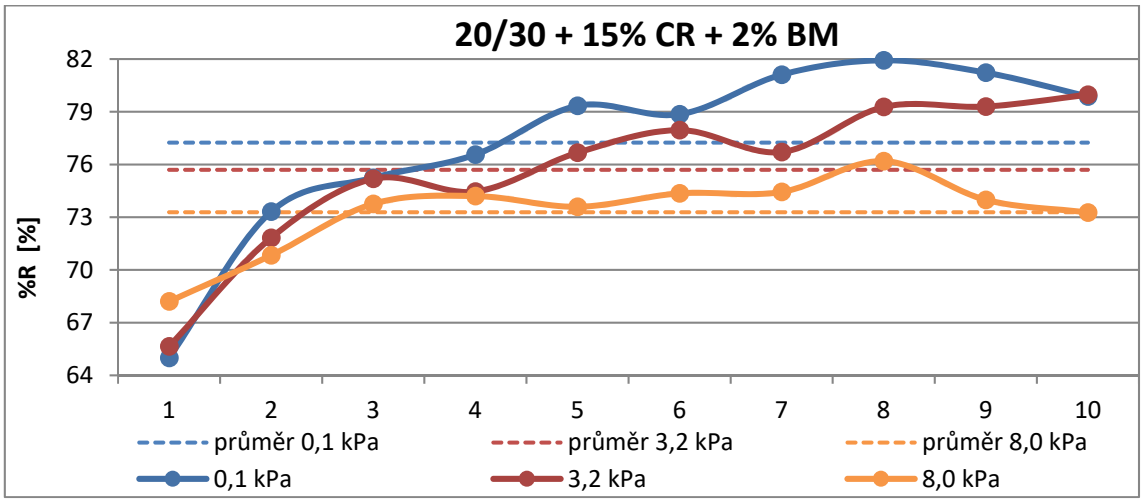
(modifikovaných 15 % CR) by bylo určitě vhodné zvýšit počet cyklů, z důvodu ustálení hodnot jednotlivých cyklů (zejména u nižšího napětí).



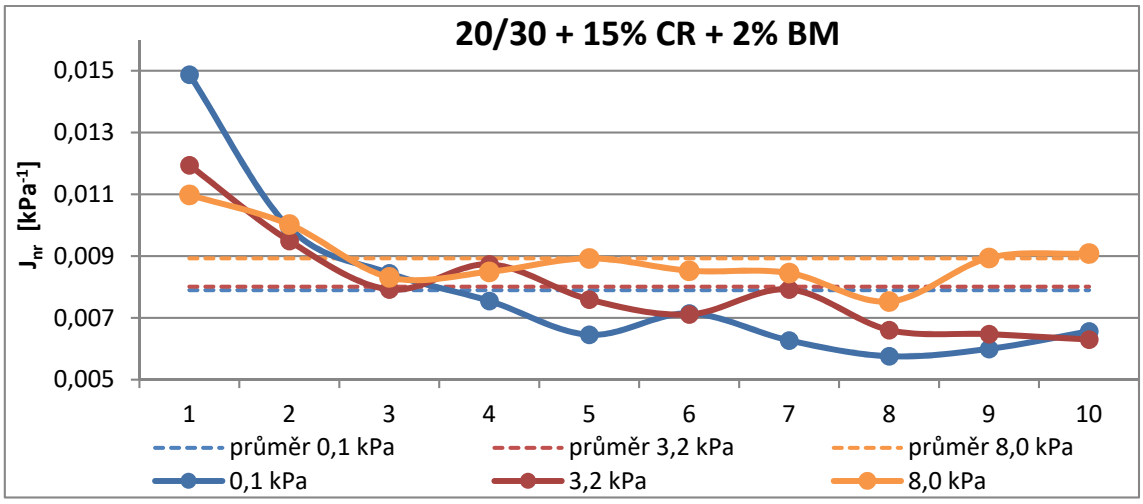
Obr. 169: Hodnoty %R pro každý cyklus



Obr. 170: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus



Obr. 171: Hodnoty %R pro každý cyklus



Obr. 172: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus

Následně hodnocená skupina je složena ze silničního asfaltu 50/70, pojiv modifikovaných CR (dva typy pryžového granulátu) nebo nízkoteplotními vosky a PMB pojiv (PMB 25/55-55 od dvou výrobců). V tabulce 51 jsou zobrazeny spočítané hodnoty základních charakteristik z posledních 5 cyklů a procentuální rozdíl pro výpočet z posledních 5 cyklů, v porovnání s uvažováním všech 10 cyklů.

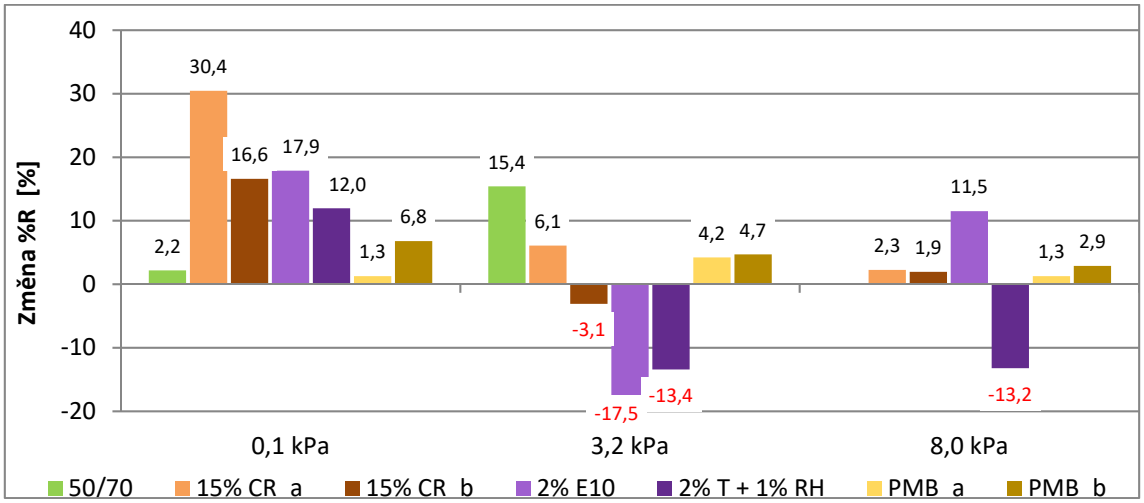
Tab. 51: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly*

Asfaltové pojivo	Posledních 5 cyklů						Pokles/nárůst v porovnání s 10 cykly					
	0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa		0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [%]	%R [%]	J_{nr} [%]	%R [%]	J_{nr} [%]
50/70	1,7	2,84	0,35	2,72	-	-	2,2	-4,6	15,4	-9,9	-	-
15% CR_a	65,5	0,07	3,00	0,37	1,23	0,44	30,4	-33,1	6,1	-28,2	2,3	-23,8
15% CR_b	62,7	0,16	10,05	0,52	2,75	0,79	16,6	-36,3	-3,1	0,5	1,9	-2,4
2% E10	1,1	4,57	0,04	6,94	0,04	7,56	17,9	1,9	-17,5	2,3	11,5	-0,1
2% T+1% RH	70,2	0,34	0,49	4,94	0,02	7,09	12,0	-37,7	-13,4	6,1	-13,2	2,7
PMB_a	98,4	0,01	96,07	0,02	92,12	0,05	1,3	-42,7	4,2	-52,1	1,3	-11,9
PMB_b	53,8	0,25	43,05	0,33	32,34	0,42	6,8	-7,1	4,7	-3,9	2,9	-4,4

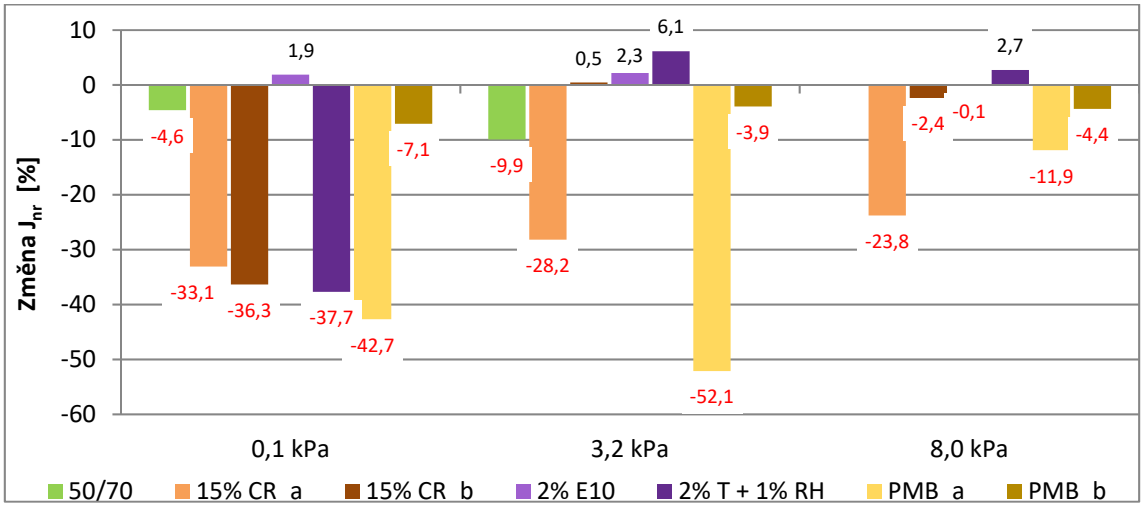
Na obrázku 173 je znázorněn procentuální rozdíl elastického zotavení vypočítaného z posledních 5 cyklů ve srovnání se standardní hodnotou určenou z 10 cyklů. U silničního asfaltu 50/70 je procentuální rozdíl hodnoty %R při napětí 3,2 kPa nepatrně přes 15 %. Nejedná se ale o žádné výrazné navýšení, protože silniční asfalt 50/70 má hodnotu elastického zotavení při napětí 3,2 kPa 0,30 %, jedná se o nárůst jen o 0,05 %. V případě pojiv modifikovaných CR je největší změna při nejnižším napětí (až 30 %), při vyšších napětích je změna %R zanedbatelná (do 6 %). Dle očekávání jsou u PMB pojiv hodnoty procentuální změny %R nízké (do 7 %).

Na obrázku 174 jsou vyobrazeny procentuální změny veličiny nevratné smykové poddajnosti vykalkulované z 5 a 10 cyklů. Potvrzuje se, že silniční asfalty se pohybují do 10 %

a PMB do cca 50 %. U pojiv modifikovaných pryžovým granulátem je rozdíl J_{nr} při napětí 0,1 kPa až 36 %, což je v porovnání s předchozí skupinou pojiv s CR nepatrně vyšší.

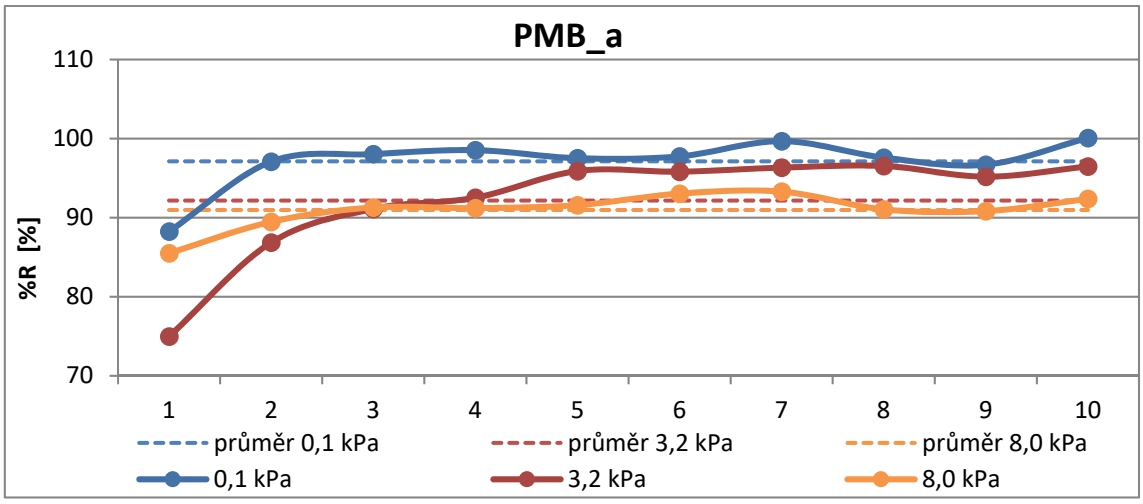


Obr. 173: Procentuální změna %R při výpočtu z posledních 5 cyklů

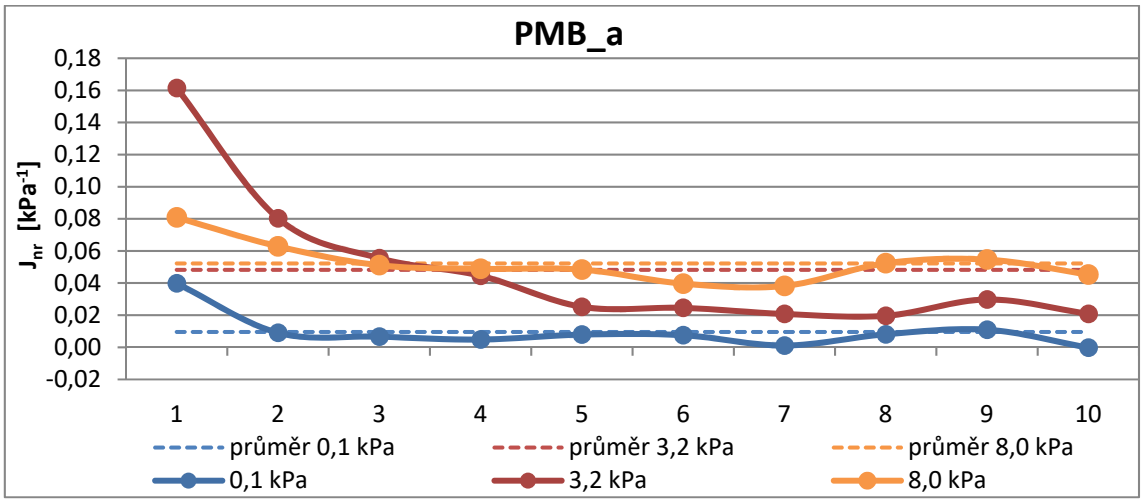


Obr. 174: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů

U prvních cyklů PMB pojiv se opět potvrzuje rostoucí (klesající) tendence, následující cykly jsou již ustálené (obr. 175 a 176). Zejména v případě hodnot J_{nr}, které jsou velmi malé (pod 0,2 kPa^{-1}), jsou procentuální změny výpočtu výrazné (cca 50 % při napětí 0,1 a 3,2 kPa) – obr. 174.



Obr. 175: Hodnoty %R pro každý cyklus



Obr. 176: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus

V tabulce 52 jsou zobrazena zestárnutá asfaltová pojiva s různou geometrií zkušebního přístroje. Varianty s geometrií PP08 mají za popisem pojiva označení „(2)“.

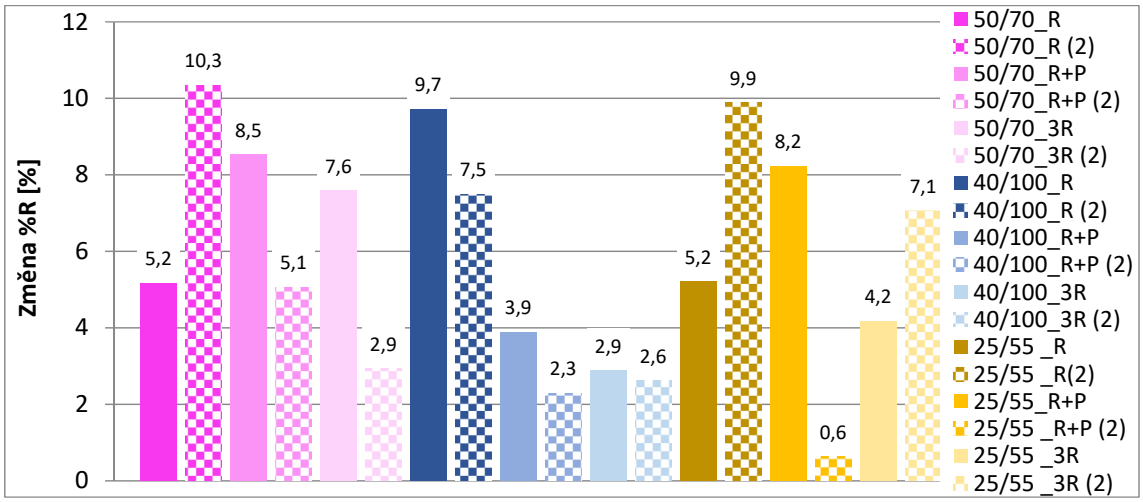
Tab. 52: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly*

Asfaltové pojivo	Posledních 5 cyklů				Pokles/nárůst v porovnání s 10 cykly			
	0,1 kPa		3,2 kPa		0,1 kPa		3,2 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [%]	%R [%]	J_{nr} [%]
50/70_R	5,9	1,502	1,2	1,535	5,17	-5,36	6,50	-2,04
50/70_R (2)	8,9	0,494	5,0	0,584	10,35	-8,52	0,50	0,58
50/70_R+P	18,5	0,245	14,4	0,225	8,53	-12,66	3,46	-4,21
50/70_R+P (2)	26,5	0,055	24,3	0,060	5,06	-10,72	1,70	-0,32
50/70_3R	18,2	0,280	13,3	0,268	7,60	-11,67	2,24	-3,77
50/70_3R (2)	22,2	0,080	22,5	0,084	2,94	-25,83	1,34	2,86
40/100_R	93,1	0,020	92,7	0,027	9,72	-77,53	4,19	-34,44
40/100_R (2)	91,2	0,015	92,8	0,012	7,50	-55,11	3,95	-33,58

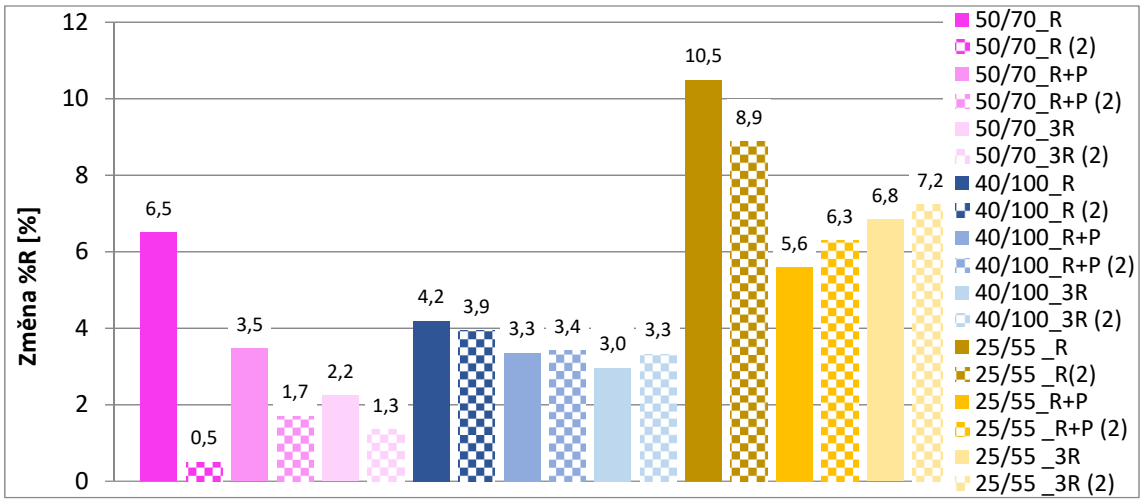
40/100_R+P	92,0	0,014	91,2	0,015	3,89	-42,35	3,35	-25,97
40/100_R+P (2)	93,9	0,004	93,2	0,004	2,29	-26,03	3,40	-33,31
40/100_3R	94,7	0,011	94,5	0,011	2,88	-38,76	2,96	-34,37
40/100_3R (2)	84,9	0,014	93,4	0,006	2,62	-12,65	3,32	-30,68
25/55_R	77,7	0,130	80,9	0,102	5,21	-17,20	10,48	-33,85
25/55_R (2)	81,2	0,041	81,4	0,043	9,88	-40,46	8,87	-25,87
25/55_R+P	69,8	0,051	67,8	0,053	8,23	-26,79	5,59	-11,63
25/55_R+P (2)	69,5	0,023	69,2	0,023	0,62	-0,70	6,29	-12,22
25/55_3R	72,9	0,071	70,1	0,074	4,18	-5,19	6,84	-14,52
25/55_3R (2)	71,8	0,038	71,7	0,036	7,06	-19,68	7,24	-17,60

Pozn.: zkratka R znamená stárnutí metodou RTFOT; R+P znamená stárnutí RTFOT+PAV a 3R znamená 3xRTFOT

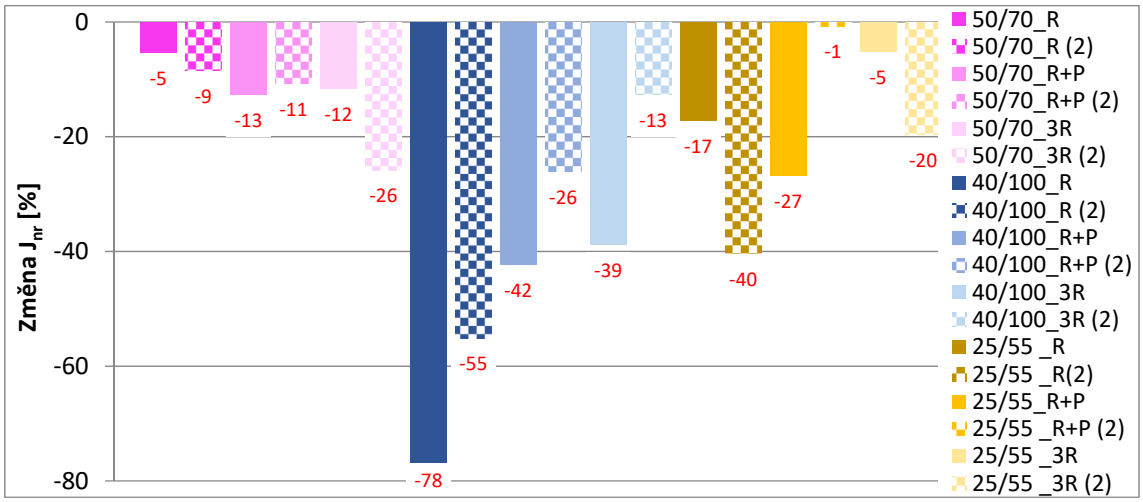
Pro lepší přehlednost jsou jednotlivé grafy pro napětí 0,1 kPa a 3,2 kPa znázorněny zvlášť. Zatímco změna %R při výpočtu s uvažováním 5 posledních cyklů byla u všech variant této skupiny do cca 10 % (obr. 177 a 178), změna J_{nr} je u PMB při napětí 3,2 kPa nejčastěji okolo 30 % (obr. 180) a to rámcově odpovídá i předešlé skupině s PMB. V případě napětí 0,1 kPa je rozdíl výpočtu charakteristiky J_{nr} zpravidla větší (maximální rozdíl je téměř 80%) – obr. 179. Nemodifikovaná pojiva mají zase nejmenší rozdíl J_{nr} související především s vysokou základní hodnotou J_{nr}, díky které je procentuální rozdíl mezi hodnotou J_{nr} vypočítanou ze všech 10 cyklů a z posledních 5 cyklů velmi malý.



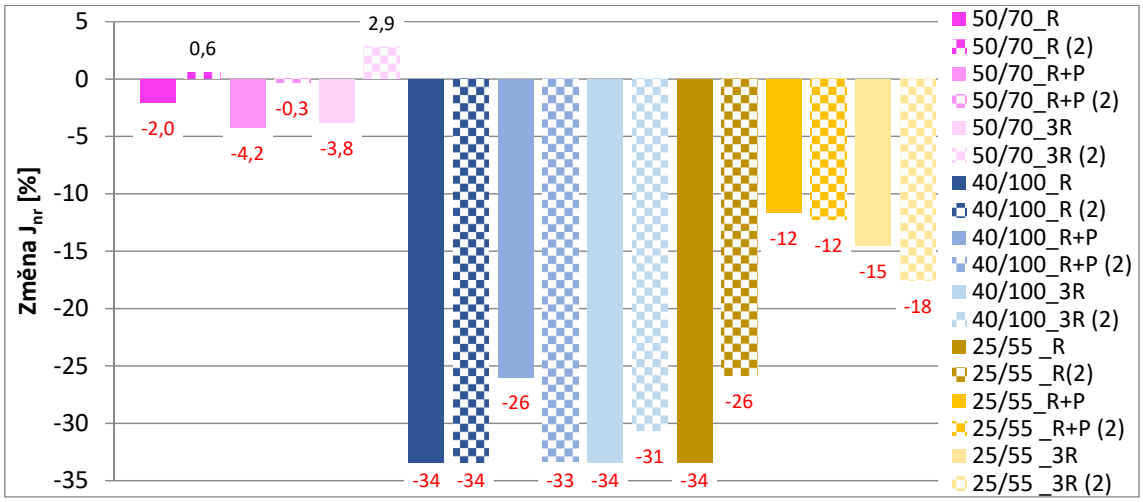
Obr. 177: Procentuální změna %R při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 0,1 kPa



Obr. 178: Procentuální změna %R při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 3,2 kPa



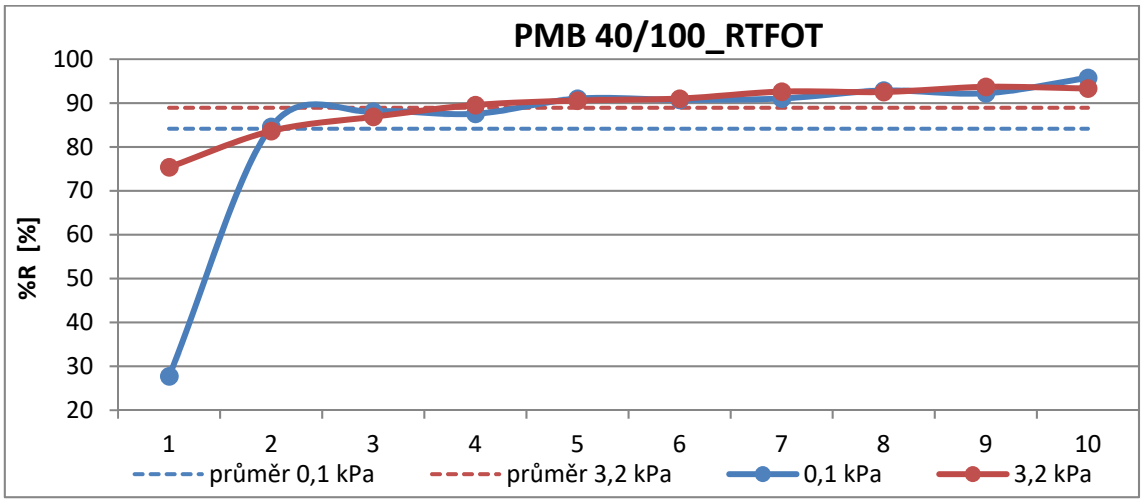
Obr. 179: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 0,1 kPa



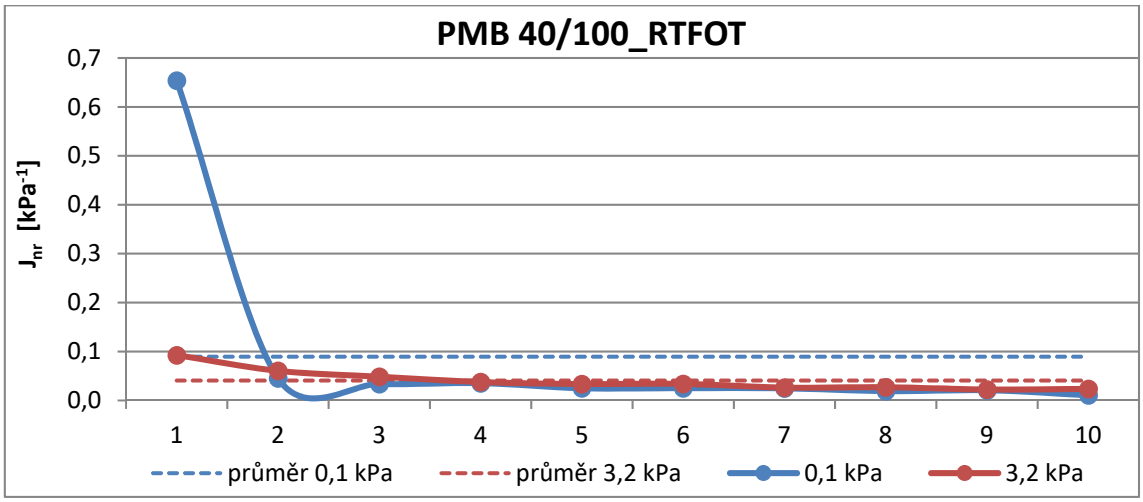
Obr. 180: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 3,2 kPa

Nejvýraznější rozdíl při výpočtu charakteristiky nevratné smykové poddajnosti je u pojiva označeného 40/100_R a pro jednodušší představu jsou hodnoty jednotlivých cyklů zobrazeny

na obr. 182. Je zřejmé, že hodnota prvního cyklu při napětí 0,1 kPa je značně rozdílná a v kombinaci s velmi nízkými hodnotami jednotlivých cyklů vede ke snížení průměrné hodnoty vypočítané z posledních 5 cyklů o více než 3/4. Obdobně rozdílná hodnota je i u charakteristiky elastického zotavení (obr. 181). Díky vysokým hodnotám %R došlo při výpočtu z posledních 5 cyklů k nárůstu přibližně o 1/3.



Obr. 181: Hodnoty %R pro každý cyklus



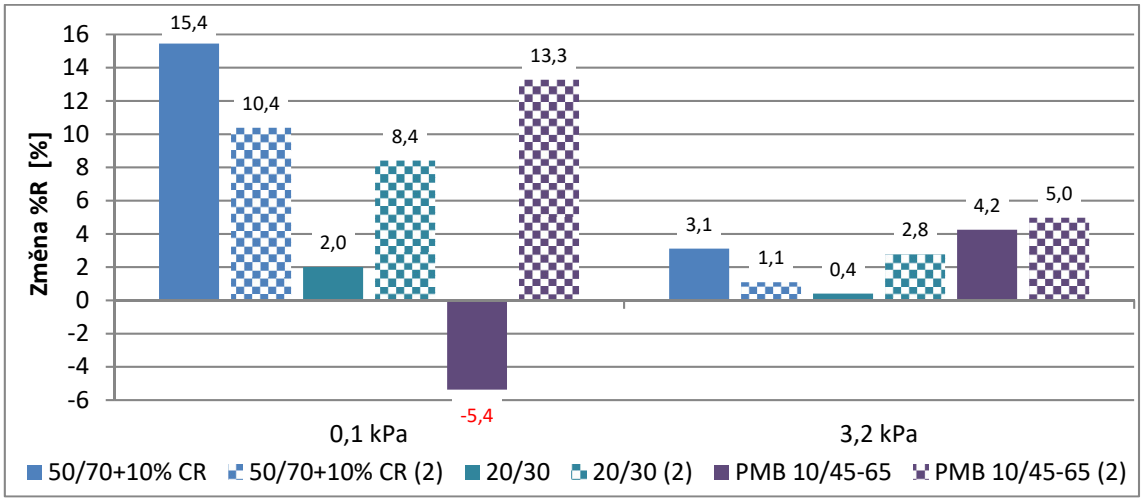
Obr. 182: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus

V tabulce 53 je uvedena poslední skupina asfaltových pojiv lišící se rovněž rozdílnou geometrií zkušebního přístroje. Jedná se o skupinu obsahující pojivo modifikované pryžovým granulátem (CR), tvrdší silniční asfalt gradace 20/30 a tvrdší PMB 10/45-65. Nestandardní geometrie PP08 je opět značena „(2)“.

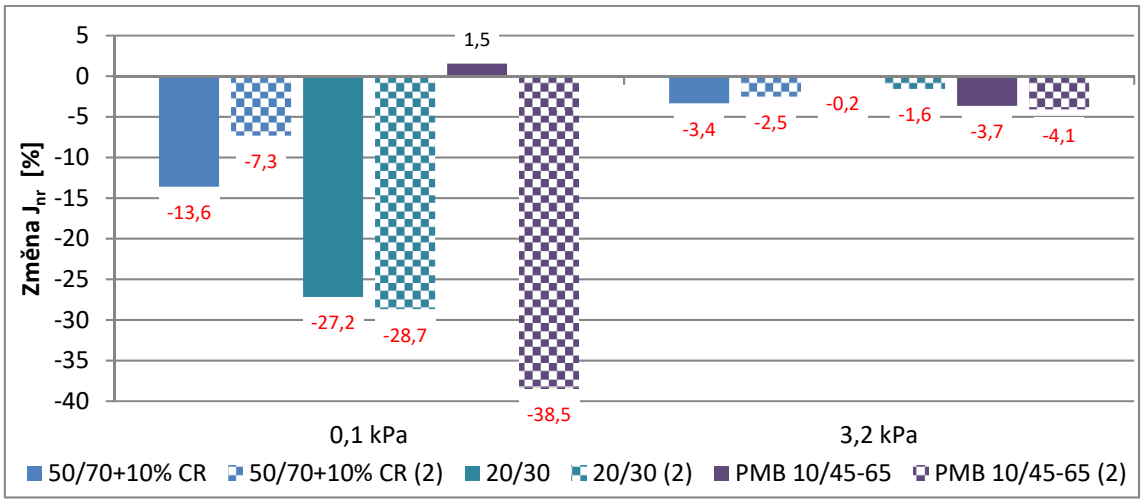
Tab. 53: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly*

Asfaltové pojivo	Posledních 5 cyklů				Pokles/nárůst v porovnání s 10 cykly			
	0,1 kPa		3,2 kPa		0,1 kPa		3,2 kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [%]	%R [%]	J_{nr} [%]
50/70+10% CR	41,0	0,43	8,1	0,78	15,4	-13,6	3,1	-3,4
50/70+10% CR (2)	37,2	0,39	7,6	0,69	10,4	-7,3	1,1	-2,5
20/30	25,0	0,22	9,3	0,35	2,0	-27,2	0,4	-0,2
20/30 (2)	50,3	0,07	16,7	0,15	8,4	-28,7	2,8	-1,6
PMB 10/45-65	45,0	0,10	35,2	0,13	-5,4	1,5	4,2	-3,7
PMB 10/45-65 (2)	50,7	0,03	50,7	0,03	13,3	-38,5	5,0	-4,1

Na obrázku 183 jsou zobrazeny hodnoty rozdílu elastického zotavení a na obr. 184 hodnoty nevratné smykové poddajnosti vypočítané z posledních 5 a 10 cyklů. Nelze jednoznačně určit, jaký trend má jiná geometrie v případě výpočtu z posledních 5 cyklů nebo všech 10 cyklů. Znovu se potvrzuje, že při vyšším napětí (3,2 kPa) dochází ke snížení variability výsledků, protože rozdíl vypočítaných hodnot ze všech 10 nebo z posledních 5 cyklů je výrazně nižší (do 5 % pro %R i J_{nr}).



Obr. 183: Procentuální změna %R při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 3,2 kPa



Obr. 184: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 3,2 kPa

4.2.8 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ ZKOUŠKY MSCR

Stejně jako u oscilační zkoušky FS byly i pro zkoušku MSCR v první části navrženy limitní hodnoty základních charakteristik pro všechny posuzované skupiny (tab. 54). Limitní hodnoty byly voleny podle 5-10% percentilů. Dlouhodobé stárnutí nemá z hlediska tvorby trvalých deformací podstatný vliv, ale v tabulce je uvedeno pro představu, jak se dané hodnoty mění vlivem stárnutí. Taktéž minimální hodnoty %R jsou v tabulce 54 zaznamenány pouze orientačně, protože se pro tuto charakteristiku neuvažuje se zavedením mezních hodnot. Navíc limitní hodnoty u PMB pojiv nejsou zcela směrodatné, neboť se nejedná o dostatečně velký soubor dat.

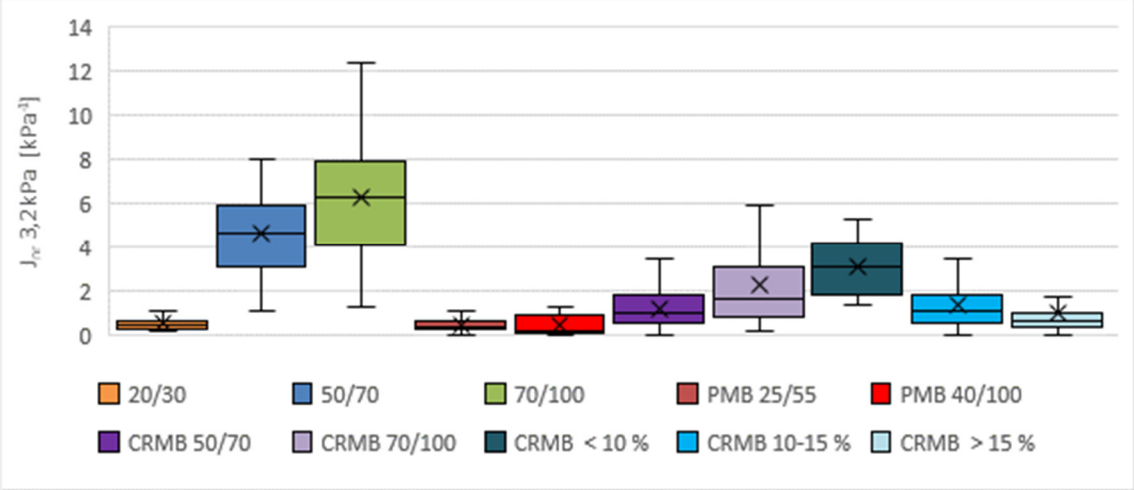
Tab. 54: *Návrh limitních hodnot zkoušky MSCR*

		Minimální %R [%]	Maximální J_{nr} [kPa^{-1}]	Maximální $J_{nr,diff}$ [%]
Silniční asfalty	20/30	2,2	1,0	200,0
	50/70	0,0	7,0	100,0
	70/100	0,0	11,0	50,0
	Krátkodobé stárnutí	0,2	3,0	100,0
	Dlouhodobé stárnutí	6,0	0,3	-
PMB	25/55-X	17,0	1,0	200,0
	40/100-X	3,2	1,0	200,0
	Krátkodobé stárnutí	17,0	0,4	100,0
	Dlouhodobé stárnutí	30,0	0,1	-
CRMB	báze 50/70	1,5	2,5	200,0
	báze 70/100	0,3	6,0	200,0
	< 10 % CR	0,3	5,0	200,0
	10-15 % CR	1,5	3,0	200,0
	> 15 % CR	2,0	2,0	200,0

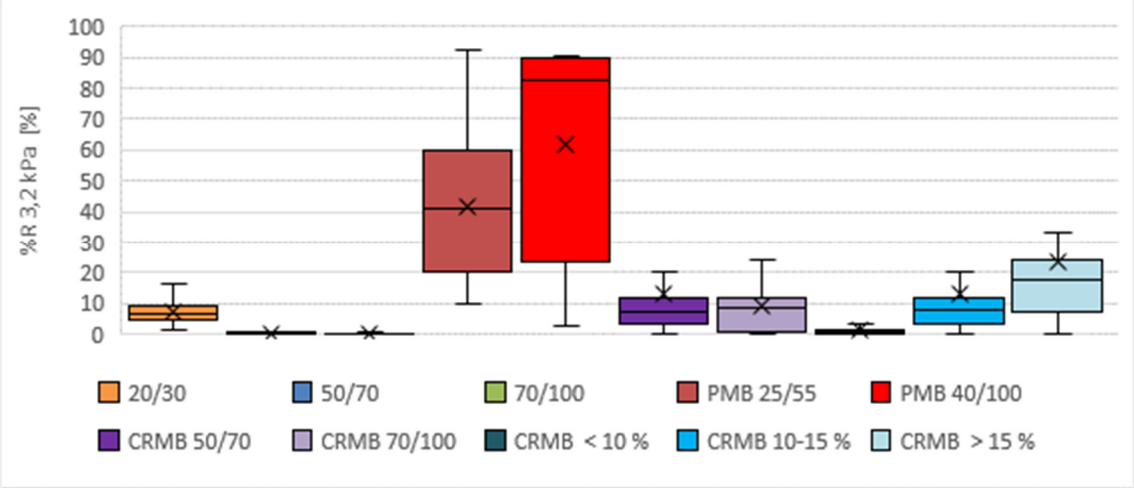
Z tabulky 54 je zřejmé, že s vyšší gradací asfaltových pojiv stoupá i hodnota nevratné smykové poddajnosti. Jen v případě PMB pojiv jsou určeny stejné limitní hodnoty pro obě

porovnávané penetrační třídy. Naopak s rostoucím množstvím pryžového granulátu se odolnost vůči trvalým deformacím zvyšuje (snižuje se hodnota J_{nr}). Stejně tak s vyšším stupněm stárnutí dochází k poklesu hodnoty J_{nr}. Z pohledu citlivosti na vnesené napětí (hodnota $J_{nr,diff}$) je většina limitních hodnot rovna 200 %. Jedině pro pojiva po krátkodobém stárnutí je zvolena hodnota 100 % (pro silniční asfalty i PMB), stejně jako pro silniční asfalty 50/70. Nejnižší hodnota $J_{nr,diff}$ byla navržena pro nejměkčí silniční asfalty 70/100. Ale jak již bylo napsáno v kapitole 4.2.1, pro všechny hodnocené skupiny silničních asfaltů by bylo možné navrhnout jednotnou hranici 100 %.

Pro názornější představu o základních statistických charakteristikách slouží grafická interpretace pomocí krabicových grafů (obr. 185 a 186). Díky nim je přehledně zobrazen rostoucí trend hodnot J_{nr} se zvyšující se penetrací a naopak klesající trend v případě rostoucího množství pryžového granulátu. Výška barevných obdélníků vymezuje 50 % hodnot, tzv. čím je obdélník vyšší, tím je i rozptyl průměrných 50 % hodnot vyšší. Největší rozptyl od průměrných hodnot mají silniční asfalty 70/100 a 50/70 u hodnoty J_{nr}. Naopak pro charakteristiku %R jsou nejvíce rozkolísané hodnoty u PMB pojiv.



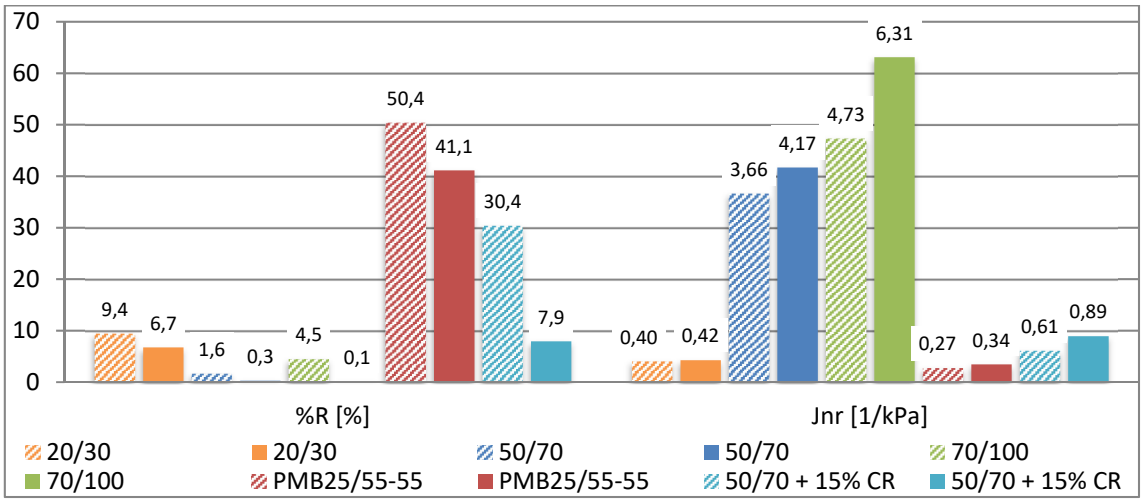
Obr. 185: Krabicový graf nevratné smykové poddajnosti



Obr. 186: Krabicový graf elastického zotavení

Na obr. 187 jsou zástupci každé posuzované skupiny, jejichž hodnoty jsou blízké průměrným. Napětí 0,1 kPa je ilustrováno šikmou vzorkovanou výplní a napětí 3,2 kPa je znázorněno souvislou výplní. Hodnoty nevratné smykové poddajnosti jsou pro snadnější přehlednost v grafu 10x zvětšeny, ale hodnoty napsané u každého pojiva jsou správné. Je zřejmé, že nejvyšší elastické zotavení mají pojiva PMB a následně CRMB. Naopak nejmenší %R je u silničních asfaltů 50/70 a 70/100.

V zásadě tomu odpovídají i hodnoty nevratné smykové poddajnosti, kde nejnižší hodnoty mají pojiva PMB, což poukazuje na nejlepší odolnost vůči vzniku trvalých deformací. Následuje však tvrdý silniční asfalt gradace 20/30 s hodnotou J_{nr} nižší než pojivo modifikované pryžovým granulátem. Nejvyšších hodnot J_{nr} z hodnocených pojiv dosáhla pojiva 70/100 a 50/70, u kterých se předpokládá větší náchylnost k tvorbě trvalých deformací. Současně je možné poukázat na běžný trend, kdy s vyšším zatížením (napětím) klesá %R a naopak stoupá J_{nr}.



Obr. 187: Hodnoty elastického zotavení a nevratné smykové poddajnosti

Druhá část kapitoly 4.2 se zabývala analýzou výsledků zkoušky MSCR pro asfaltová pojiva porovnávající vliv zvolené teploty, úroveň napětí, typ geometrie měřicího přístroje a různý počet cyklů, z nichž se počítají jednotlivé hodnoty.

Jednou ze sporných otázek ohledně zkoušky MSCR je volba úrovně napětí při které se provádí, protože základním předpokladem je, že vyšší napětí má být v nelineární viskoelastické oblasti. Problém se vyskytuje především u modifikovaných asfaltových pojiv s širokou oblastí LVR. Přidání další úrovně napětí např. 8,0 kPa se ukazuje vhodným, i když se zkouška prodlouží o 100 s. S tím souvisí další zjištění, kdy v případě, že je přetvoření velmi malé (na hranici rozsahu měřicího přístroje), není možné vypočítat dostatečně přesné hodnoty. Potíže nastávají zejména u provádění zkoušky při nízké teplotě nebo při nízkém napětí (0,1 kPa), kdy je variabilita mezi jednotlivými cykly vysoká. Navíc při napětí 0,1 kPa je korelace s asfaltovými směsmi a odolností vůči tvorbě trvalých deformací nižší [211].

Podle Koseho [171] je velmi náročné až nemožné stanovit přesný rozsah napětí v asfaltových pojivech odpovídající napětí, jemuž je pojivo vystaveno ve skutečné asfaltové směsi. Jednoznačně se ale ukázalo, že závislost na napětí není u všech asfaltových pojiv stejná.

Hranice lineárního viskoelastického chování je značně závislá na aplikovaném napětí, ale i na zkušební teplotě.

Větší fluktuace hodnot je pozorována při nízké úrovni napětí a zvyšující se úroveň napětí vede většinou k lepší variabilitě. Stejně tak Bahia a kol. [210] ukázaly, že variabilita je nejvyšší pro nízkou úroveň napětí 0,1 kPa. Navíc při nižší úrovni napětí je těžké určit rozdíl mezi modifikovanými pojivy, protože jejich hodnoty J_{nr} jsou velmi nízké, což poukazuje na podobné chování. Se zvyšující se úrovní napětí je rozdíl mezi jednotlivými modifikovanými pojivy většinou viditelnější.

Při provádění zkoušky stanovující oblast LVR pojiva PMB 40/100-65 u oscilační zkoušky FS bylo zjištěno, že napětí 4,5 kPa je stále v lineární viskoelastické oblasti, proto napětí 3,2 kPa je nedostačující. Z těchto důvodů opět vyplývá, že zejména u modifikovaných asfaltových pojiv je vhodné použít vyšší napětí.

V příspěvku Wasage a kol. [174] je uvedeno, že většina asfaltových pojiv začíná vykazovat nelineární chování při hladině napětí blízké 10 kPa. Jako příhodné třetí napětí by mohla být právě úroveň 10 kPa, uplatňovaná například v Rakousku.

Volba teploty zkoušky se jeví jako zásadní. Norma popisující zkoušku MSCR poskytuje uživateli vysoký stupeň volnosti při výběru zkušební teploty. Standardní zkušební metoda ČSN EN 16659 [166] doporučuje zkušební teplotu 50 °C, 60 °C, 70 °C nebo dokonce 80 °C, avšak mohou být použity i jiné teploty. Pro účely specifikace by ale měly být zkušební podmínky pevně stanoveny.

Dále by bylo vhodné sjednocení teploty provádění zkoušky MSCR a zkoušky pojíždění kolem na asfaltových směsích. Shodná zkušební teplota by poskytla přesnější porovnávání asfaltových pojiv s asfaltovými směsmi. Zkouška pojíždění kolem se provádí běžně při teplotě 50 °C, což je v případě zkoušky MSCR nedostatečná teplota. Při teplotě 50 °C by měla většina pojiv jen velmi nízké hodnoty J_{nr} (převážně modifikovaná pojiva). Zkoušení při vyšší teplotě má za následek větší přetvoření, čímž dochází ke snížení rizika nepřesnosti měření způsobených rozsahem přístroje. Navíc teplota 50 °C bývá v letních měsících na vozovkách překonána a vzhledem ke globálnímu oteplování se dá očekávat, že teploty budou stále vyšší. Z tohoto důvodu se jeví jako vhodnější zkoušku MSCR provádět při teplotě 60 °C nebo 70 °C. Teplota 70 °C by ale pro řadu nemodifikovaných pojiv s bodem měknutí nižším než 50 °C, byla příliš vysoká a hrozilo by samovolné vytékání vzorku z DSR a zkreslení výsledků.

Podle navržené základní PG mapy pro ČR (obr. 29) se uvažuje s nejvyšší teplotou 58 °C, proto i teplota zkoušky 60 °C se jeví jako nejvhodnější a předně dostatečná. K podobným závěrům se dospělo i v EUROVII, která měřila zkoušku MSCR při teplotě 50 °C. V příspěvku Bureše a kol. [176] je uvedeno, že teplota 50 °C je příliš nízká a zvláště modifikovaná pojiva nevystavuje dostatečnému zatížení. UniCRE ve spolupráci se silniční laboratoří ČVUT v Praze navíc dospěla ke zjištění, že výsledky zkoušky MSCR při 50 °C korelují s vyjížděním kolejí ve směsi méně, než výsledky MSCR při teplotě 60 °C. Přínosné by bylo i porovnání se zkouškou vyjíždění kolejí měřenou při teplotě 60 °C.

Rozdíly ve volbě geometrie měřicího přístroje jsou především u hodnot J_{nr}. Použití klasické geometrie PP25 je jednodušší při manipulaci v DSR a i příprava vzorku (odlití) je snadnější. Při modifikaci pryžovým granulátem s velikostí zrn 0,5 mm nebo větší se doporučuje analyzovat možnost zkoušení se standardní geometrií PP25, ale vyšší mezerou. Z výsledků je

patrné, že použití jiné geometrie vede k částečně odlišným výsledkům a je nutné vždy uvést, s jakou geometrií byla zkouška měřena. Nevýhodou geometrie PP08 je pravděpodobnost výraznější chyby měření díky náročnější manipulaci se vzorkem.

Z provedených měření vyplývá, že způsob průměrování odezvy všech 10 cyklů při každé úrovni napětí může vést k zavádějícím hodnotám vzhledem ke změnám v průběhu cyklů. V některých případech dochází k variabilitě výsledků zkoušky MSCR na základě rozdílných hodnot během jednotlivých cyklů. Maximální procentní změna mezi dvěma způsoby výpočtu zjištěná v kapitole 4.2.7 je pro obě napětí sumarizována v tab. 55.

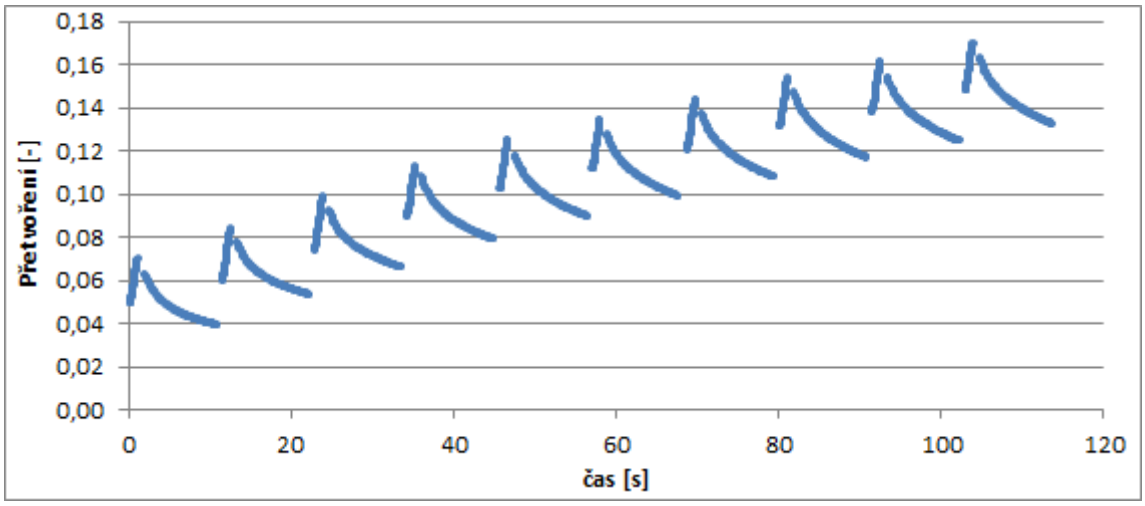
Tab. 55: *Maximální změny mezi výpočtem ze všech 10 cyklů nebo posledních 5 cyklů*

	%R [%]		J_{nr} [%]	
	0,1 kPa	**3,2 kPa**	**0,1 kPa**	**3,2 kPa**
Silniční asfalty	18	17	40	10
PMB	13	11	80	55
CRMB	30	6	40	30

Jedná se o významné rozdíly, které mohou být vážným zdrojem variability. Obecně platí, že s vyšším napětím je proměnlivost výsledků nižší. Nejvyšší variabilita je shledána u nevratné smykové poddajnosti pro pojiva PMB, neboť mají velmi nízké hodnoty J_{nr}.

Je třeba najít alternativní způsob výpočtu pro dosažení spolehlivějších výsledků. Všeobecně dochází k nejrozdílnějším výsledkům během prvních cyklů, a proto se jeví vhodným k výpočtu hodnot J_{nr} a %R pro každou úroveň napětí použít měření pouze z druhé poloviny cyklů nebo alespoň vyloučit první cyklus. Ještě přesnější by bylo, kdyby zkouška MSCR obsahovala alespoň prvních 5 cyklů pro získání ustáleného stavu a až následných 10 cyklů by sloužilo k výpočtu. Zkouška by se při zvolených dvou úrovních napětí, prodloužila jen o necelé 2 minuty.

Nadále zůstává otázkou, zda počet 10 cyklů nebo doba zatížení 1 sekundy a 9 sekundové odtížení simulují skutečné podmínky, kterým je pojivo vystaveno ve vozovce. Ve zprávě [16] je vyjádřena pochybnost o schopnosti pojiva dosáhnout ustáleného stavu po 10 cyklech. Z výzkumu je zřejmé, že by bylo vhodnější zvýšit počet cyklů především u pojiv PMB. 10 cyklů u většiny PMB pojiv není dostačující počet k dosažení stabilního sekundárního dotvarování. Alternativní možností je výběr vyššího napětí vedoucí k rychlejšímu ustálení výsledků. Na obr. 188 je vidět, že délka klidové fáze 9 sekund není dostatečná, neboť přetvoření ve fázi odtížení má stále klesající trend. Tato problematika však není obsahem disertační práce, a z tohoto důvodu není blíže zkoumána.



Obr. 188: Průběh přetvoření při napětí 0,1 kPa pojivo PMB 25/55-80

Souhrnným trendem porovnávaných asfaltových pojiv jsou rostoucí hodnoty J_{nr} a naopak klesající hodnoty %R se zvyšujícím se napětím nebo teplotou. Oboje nasvědčuje snižující se odolnosti asfaltových pojiv vůči tvorbě trvalých deformací a viskóznějšímu chování při větším zatížení (silnějším provozu).

PMB pojiva mají všeobecně vysoké elastické zotavení a relativně nízké J_{nr}. Během prvních několika cyklů zatížení a relaxace se výsledná reakce jednotlivých cyklů mění, zejména při nejnižší úrovni napětí. Během posledních 5 cyklů se reakce pojiva blíží rovnovážnému stavu. Zjištění bylo potvrzeno u většiny PMB a CRMB pojiv, neboť mají vysokou opožděnou elastickou odezvu.

Shrnutím výše popsaných skupin je možné upozornit na problémy v metodice zkoušky MSCR. Na některé z uvedených bodů je poukázáno i v jiných publikovaných příspěvcích [29, 102, 182]. Jednotlivé potíže lze rozdělit následovně:

1) **Rostoucí přetvoření po odtížení**. U silničních asfaltů došlo v některých případech k nárůstu přetvoření i po odtížení, kdy již není aplikováno napětí. Je to pravděpodobně způsobeno tím, že reometr není schopen uvolnit napětí tak rychle, jak je požadováno. Respektive, DSR vyvolává blokový signál napětí s jistým zpožděním zasahující do fáze odtížení. Tento jev byl popsán již dříve v literatuře [182] a objevuje se zpravidla u starších typů DSR. V takovém případě může být napětí v závěru fáze odlehčení vyšší než napětí zaznamenané na konci teoretického období zatížení, což vede k záporné hodnotě %R, která je ve skutečných podmínkách nelogická. Záporné elastické zotavení se vyskytuje zejména u měkkých pojiv s velmi nízkými hodnotami %R a vlivem nárůstu přetvoření i ve fázi zotavení vycházejí negativní hodnoty %R. Další možností příčiny popsané ve článku [180] je, že se může jednat o interní poruchu v asfaltovém pojivu a za těchto podmínek nemusí asfaltové pojivo plně vykazovat své viskoelastické vlastnosti.

2) **Záporné hodnoty R_{diff} nebo $J_{nr,diff}$.** Záporné hodnoty parametrů citlivosti na napětí znamenají, že při vyšším napětí došlo k nárůstu %R nebo poklesu J_{nr}, což opět není logické. Jedním z možných vysvětlení je, že během 9 sekund nedojde k úplnému zotavení. Častěji je však problém jen u prvního cyklu při napětí 0,1 kPa, kde u některých pojiv vychází výrazně nižší hodnoty %R a naopak vyšší hodnoty J_{nr}. V metodice [102] je tento jev vysvětlen na základě

paměťového efektu materiálu a taktéž pro nedostatečné zotavení přenášené i do dalších cyklů zkoušky MSCR.

3) **Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$.** Z důvodu velké variability výsledků $J_{nr,diff}$ a extrémním hodnotám někteří odborníci doporučují, aby se parametr přestal používat [173]. Je to obhajováno i tím, že parametr nemá ověřenou spojitost s tvorbou trvalých deformací. Zvláště u modifikovaných pojiv (PMB nebo CRMB) je někdy hodnota $J_{nr,diff}$ značně vysoká (několik milionů procent!). Extrémní hodnoty parametru se objevují u asfaltových pojiv s nízkým $J_{nr,3,2}$ (zejména pro $J_{nr,3,2} < 0,5$ kPa^{-1}), která mají hodnotu $J_{nr;0,1}$ ještě nižší. K podobnému závěru došly i v práci Stempihara a kol. [172].

4) **Variabilita hodnot jednotlivých cyklů.** Výrazná variabilita je patrná především u prvního cyklu. Při výpočtech se počítá s nulovým přetvořením na začátku zkoušky, ale v některých případech bylo první zaznamenané přetvoření tak velké, že pravděpodobně již před zatížením došlo k přetvoření. K přetvoření může docházet během temperace na požadovanou teplotu, kdy asfaltové pojivo mírně mění hustotu, čímž dochází k pohybu molekul. Po vynechání prvního cyklu ve výpočtu byly výsledné hodnoty reálnější. V metodice [102] se vysoká proměnlivost výsledků vysvětluje jako softwarová chyba přizpůsobení přístroje. Naopak výzkum prováděný v AASHTO Advanced Research Laboratory (AAPRL) [203] ukázal, že vysoce modifikovaná pojiva testovaná při teplotě PG nebo nižší mají proměnlivé trvalé přetvoření nebo se u nich vyskytuje stav terciárního proudění, což v obou případech výrazně ovlivňuje variabilitu zkoušky. Vycházet z průměru všech 10 cyklů, jak je požadováno v standardním postupu zkoušky MSCR, je někdy zavádějící, jelikož reakce se mění s cykly. Rozborem individuálních cyklů je patrný všeobecně rostoucí trend %R a naopak klesající trend J_{nr}. Ve zprávě o projektu NCHRP 9-10 [16] je uvedeno, že výsledky z počátečních cyklů zkoušky MSCR nejsou konzistentní, a že druhá polovina cyklů je méně variabilní. I díky tomu je v normě platné v USA od roku 2018 AASHTO T350-14 [181] prvních 10 cyklů při napětí 0,1 kPa jen aklimatizačních a do výpočtu se nezařazují. V poslední době se ale objevují požadavky na zrušení těchto aklimatizačních cyklů, protože údajně nemají velký vliv [173]. Největší variabilita dat se vyskytuje u asfaltových pojiv s vysokou zpožděnou elastickou odezvu (tzv. PMB nebo CRMB). Je vhodné upozornit, že i u zkoušky tuhosti asfaltových směsí ČSN EN 12697-26 příloha B a C [135] se počítá pouze s hodnotami posledních cyklů a ne s průměrem všech měřených cyklů.

5) Přesnost měření. Při výpočtu je důležité s jakou přesností máme změřeny výsledky zkoušky. U malých přetvoření je nedostatečné počítat jen s tisícinami, případně s ještě nižší přesností! Často jsou změřená přetvoření po zaokrouhlení stejná a rozdíl se mezi zatížením a zotavením jeví jako nulový. Nejvíc se tento problém projevil u pojiv PMB, která měla vlivem zatížení nejnižší přetvoření. S tím souvisí fakt, že hodnoty nevratné smykové poddajnosti modifikovaných pojiv při napětí 0,1 kPa jsou často tak nízké, že je některé přístroje jen obtížně zaznamenají. Z tohoto důvodu by bylo určitě vhodné zvýšit napětí z 0,1 kPa na například 1,0 kPa, což je s jistotou pro všechna pojiva v LVR.

Modifikovaná pojiva jsou ve srovnání s nemodifikovanými pojivy citlivější vůči napětí. Ukázalo se, že kritérium $J_{nr,diff}$ < 75 % platné v USA je velmi přísné a není vhodné pro vysoce

modifikovaná pojiva, jež často tuto podmínku nesplní. Tato pojiva mají malé hodnoty J_{nr} při napětí 3,2 kPa odpovídající vysoké odolnosti vůči vzniku trvalých deformací a rozdíl mezi napětími je proto výraznější.

Porovnání množství vzorků nevyhovujících parametrům $J_{nr,diff}$ a $J_{nr,slope}$ je zobrazeno v tabulce 56. Je vidět, že podmínka $J_{nr,diff}$ < 75 % je nejpřísnější a nesplní jí nejvíc pojiv. Z celkem 425 testovaných vzorků podmínku překročila téměř 1/4 vzorků. Je třeba upozornit, že v USA se zkouška provádí na krátkodobě zestárlých vzorcích při teplotě PG a v této práci byla prováděna nejčastěji na nezestárlých vzorcích a při teplotě 60 °C. Navržené maximální hodnoty v disertační práci jsou nejvíce benevolentní, přesto je přesáhne 1/7 vzorků (odpovídá to 5-10% percentilu). Poněkud striktnější je podmínka $J_{nr,slope}$, která je přísnější zejména u pojiv modifikovaných pryžovým granulátem.

Tab. 56: *Porovnání parametrů citlivosti*

		Množství pojiv	**Návrh na max. $J_{nr,diff}$ [%]**	**$J_{nr,diff}$ < návrh**	**$J_{nr,diff}$ < 75 %**	**$J_{nr,slope}$**
Silniční asfalty	20/30	22	200,0	3	4	3
	50/70	64	100,0	4	5	4
	70/100	31	50,0	3	1	1
	Krátkodobé stárnutí	41	100,0	6	9	5
	Dlouhodobé stárnutí	22	-	-	1	0
PMB	25/55-X	31	200,0	2	2	1
	40/100-X	10	200,0	4	5	3
	Krátkodobé stárnutí	21	100,0	4	5	2
	Dlouhodobé stárnutí	21	-	-	2	0
CRMB	Báze 50/70	125	200,0	29	51	39
	Báze 70/100	33	200,0	6	20	11
	< 10 % CR	8	200,0	1	3	2
	10-15 % CR	135	200,0	32	58	44
	> 15 % CR	19	200,0	2	10	4
celkem		**425**		**61**	**105**	**69**

Oba posuzované parametry citlivosti na změnu napětí $J_{nr,diff}$ a $J_{nr,slope}$ jsou zajímavé, ale jejich hlubší smysl není jasně stanoven a navíc se u nich objevuje řada nejasností. Hlavní nevýhoda parametru $J_{nr,diff}$ je, že v případě velmi nízké hodnoty J_{nr} při napětí 0,1 kPa (obzvlášť u PMB pojiv), jež je při výpočtu ve jmenovateli, vede k extrémně vysokým hodnotám $J_{nr,diff}$. Dle mého názoru by bylo nejvhodnější parametr nepoužívat, protože často nevyhoví ani pojiva, s nízkými hodnotami J_{nr}, u nichž je předpoklad lepší odolnosti vůči vzniku trvalých deformací. Vyšší citlivost na napětí prokazatelně nevede k zhoršení odolnosti vůči plastickým deformacím, a proto se přikláním k úplnému zrušení tohoto parametru.

Příkladem absurdně vysoké hodnoty parametru $J_{nr,diff}$ je pojivo modifikované pryžovým granulátem s hodnotou J_{nr} = 0,000004 kPa^{-1} při napětí 0,1 kPa. Při vyšším napětí 3,2 kPa byla hodnota J_{nr} = 0,603 kPa^{-1}, jedná se o velmi nízkou hodnotu u pojiv s CR. Parametr citlivosti pro toto pojivo je ale 14,6 milionu procent, což je enormní velikost. Jednou z možných příčin je, že

pojivo bylo měřeno s mezerou 1 mm, a proto by bylo vhodné opakovat měření s větší mezerou. Pojivo se do hodnocení nezapočítávalo z důvodu výrazného ovlivnění průměrných výsledků. Podobné příklady jsou i u pojiv PMB. Jednou z možností řešení problému s $J_{nr,diff}$ je ignorovat parametr pokud je $J_{nr} < 0,5$ kPa^{-1}. Tuto možnost navrhl D´Angelo [173].

4.2.9 VYBRANÉ ZAJÍMAVÉ SKUPINY

V této podkapitole jsou posouzeny základní charakteristiky zkoušky MSCR pro pět skupin asfaltových pojiv, totožných jako v kapitole 4.1.9.

4.2.9.1 POROVNÁNÍ POJIV PMB 25/55-55 [207]

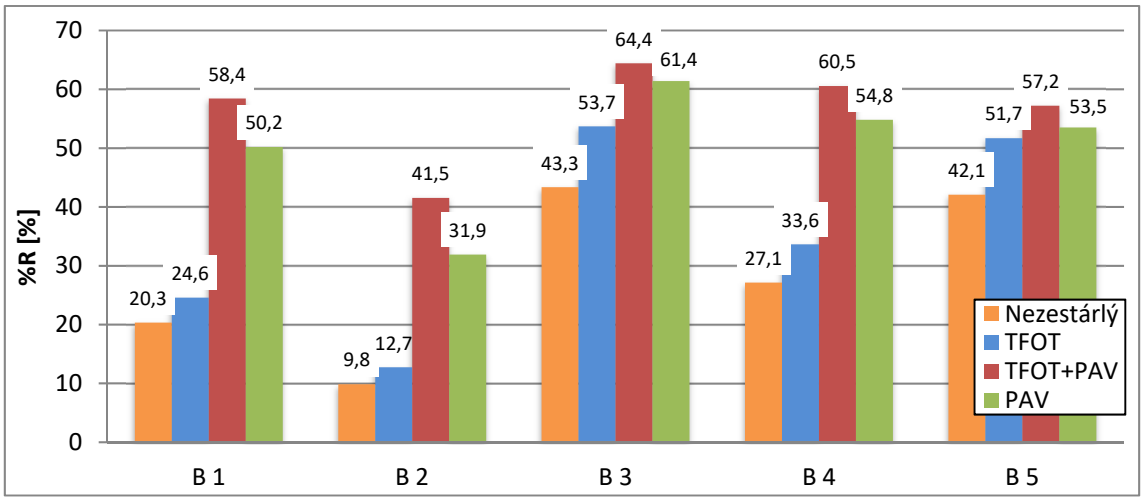
První zvolenou skupinou jsou asfaltová pojiva se stejným označením PMB 25/55-55 od různých výrobců. V následujících tabulkách 57 a 58 jsou shrnuty nejdůležitější hodnoty zkoušky MSCR pro nezestárlá i zestárlá pojiva. Opět se prokázal značný vliv jednotlivých typů metod stárnutí na výsledné hodnoty. Z uvedených výsledků je patrné, že po laboratorním stárnutí dochází ke zvýšení elastického zotavení a snížení nevratné smykové poddajnosti.

Tab. 57: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} pro napětí 0,1 kPa po stárnutí*

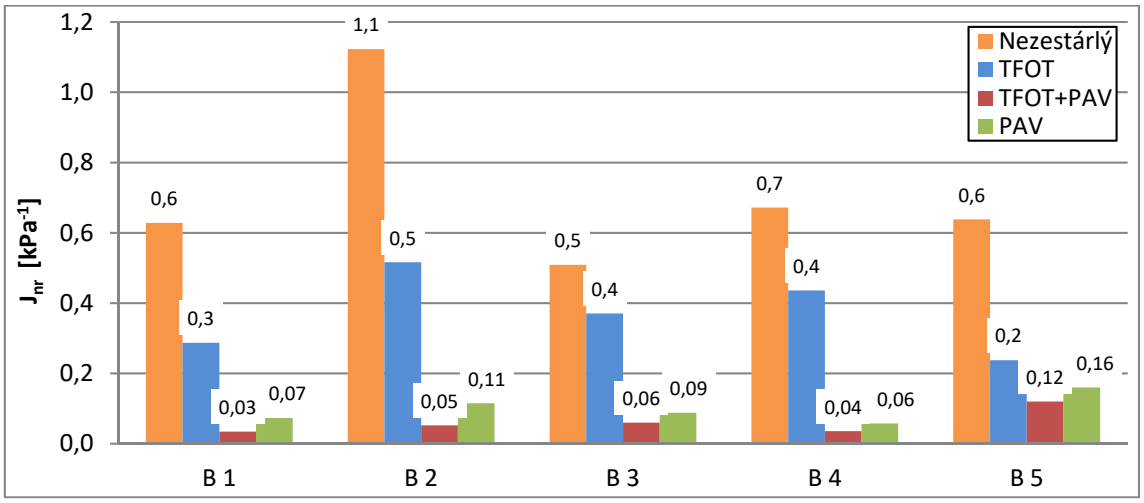
Označení vzorku	0,1 kPa							
	Nezestárlý		TFOT		TFOT+PAV		PAV	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]
B 1	26,9	0,55	31,3	0,26	61,7	0,03	71,6	0,04
B 2	18,0	0,97	24,6	0,40	18,6	0,08	32,7	0,12
B 3	58,7	0,36	69,2	0,17	67,9	0,05	64,6	0,08
B 4	37,3	0,52	41,3	0,35	72,5	0,02	56,2	0,06
B 5	48,3	0,56	55,8	0,21	59,4	0,11	55,1	0,16

Tab. 58: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} pro napětí 3,2 kPa po stárnutí*

Označení vzorku	3,2 kPa							
	Nezestárlý		TFOT		TFOT+PAV		PAV	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]
B 1	20,3	0,63	24,6	0,29	58,4	0,03	50,2	0,07
B 2	9,8	1,12	12,7	0,52	41,5	0,05	31,9	0,11
B 3	43,3	0,51	53,7	0,37	64,4	0,06	61,4	0,09
B 4	27,1	0,67	33,6	0,44	60,5	0,04	54,8	0,06
B 5	42,1	0,64	51,7	0,24	57,2	0,12	53,5	0,16



Obr. 189: Hodnoty elastického zotavení při napětí 3,2 kPa po stárnutí

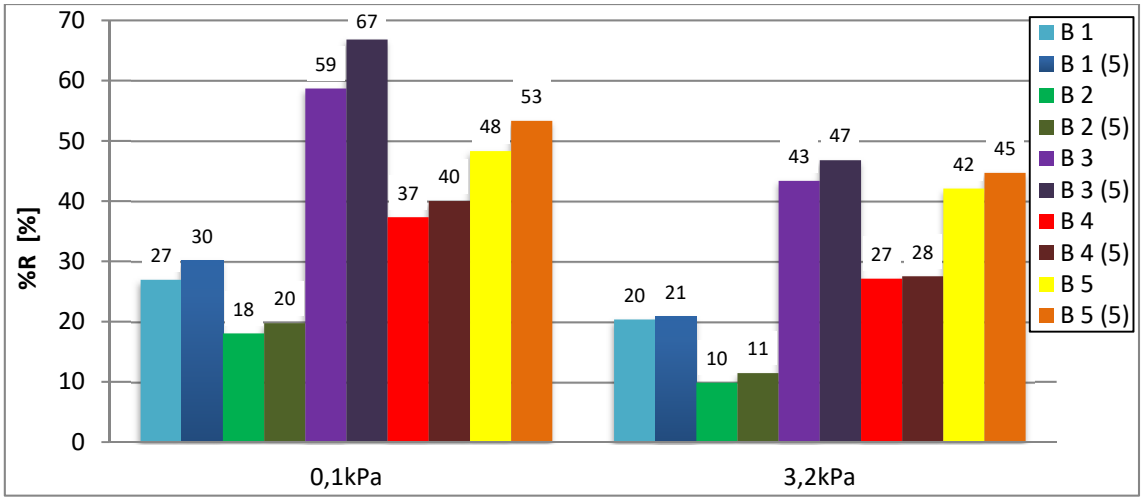


Obr. 190: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti při napětí 3,2 kPa po stárnutí

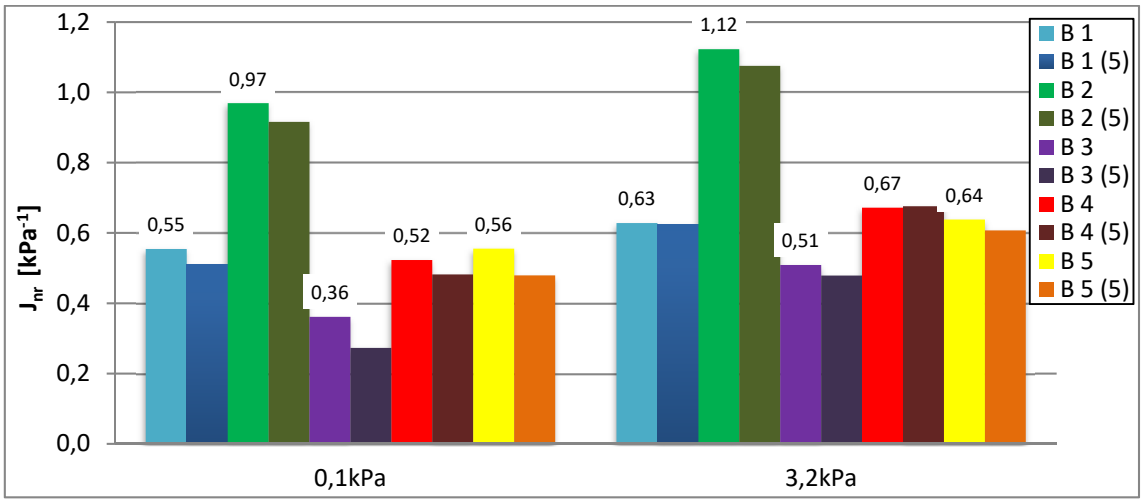
Jednotlivé hodnoty zkoušky MSCR se standardně získávají jako průměr deseti zatěžovacích cyklů, ale často jsou naměřené hodnoty po prvním cyklu výrazně odlišné (blíže popsáno v kapitole 4.2.7). V následujících grafech je zobrazeno porovnání naměřených hodnot z 10 cyklů a posledních 5 cyklů. Hodnoty získané z posledních 5 cyklů jsou v grafech označeny „(5)“. Při posuzování naměřených hodnot zkoušky MSCR po 10 a 5 cyklech se rámcově potvrzují zjištění popsaná v kapitole 4.2.7, tzv. nárůst elastického zotavení (obr. 191) a pokles nevratné smykové poddajnosti (obr. 192) u všech sledovaných pojiv. V případě napětí 0,1 kPa se jedná o nárůst elastického zotavení přibližně o 10 % způsobený výrazně nižším %R při prvním cyklu.

Při napětí 3,2 kPa jsou změny elastického zotavení různě velké (obr. 193). Někdy jsou téměř zanedbatelné, z čehož lze usuzovat, že naměřené hodnoty všech cyklů jsou konstantní. Na druhé straně lze pozorovat i výrazně vyšší změnu, jež poukazuje na ustálení měřených hodnot až po několika cyklech. Obdobné výsledky mají i varianty po stárnutí laboratorní metodou TFOT. Zjednodušeně lze říci, že při nižším napětí je změna vždy cca 10 %, ale při vyšším napětí dochází u některých variant k nárůstu až o 20 %. V případě dlouhodobého

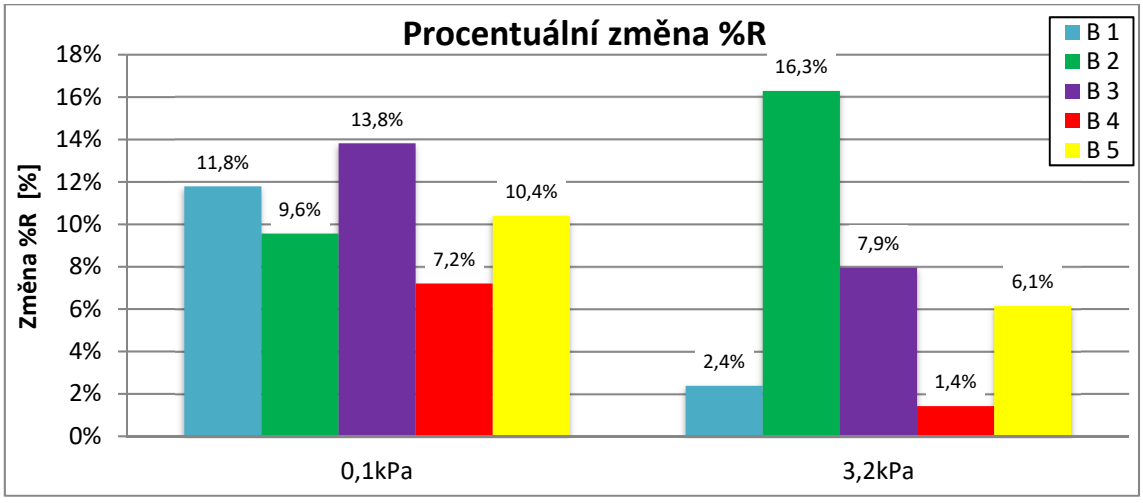
stárnutí jsou rozdíly %R naopak větší u nižšího napětí, zatímco při napětí 3,2 kPa se rozdíly elastického zotavení pohybují okolo 5 %.



Obr. 191: Hodnoty %R pro všech 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů

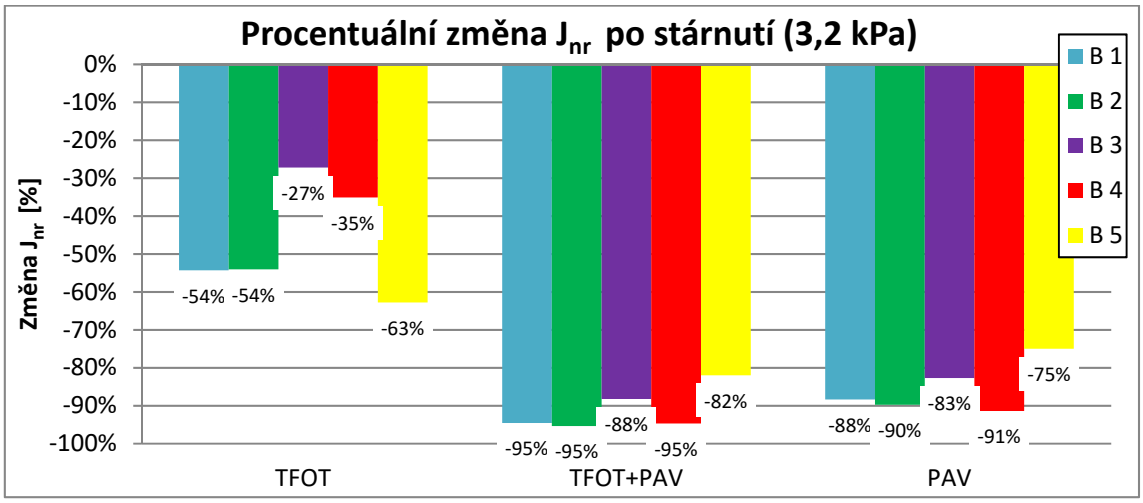


Obr. 192: Hodnoty J_{nr} pro všech 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů



Obr. 193: Procentuální změna elastického zotavení při výpočtu z 10 měření nebo posledních 5 měření

Dalším zajímavým ukazatelem, který prozatím není v žádné normě či platném technickém předpisu v ČR popsán, je vliv změny nevratné smykové poddajnosti (popřípadě elastického zotavení) na nezestárlých vzorcích a zestárlých vzorcích. Obr. 194 zobrazuje procentuální změnu při různých typech stárnutí. Znovu je velmi patrný rozdíl u krátkodobého a dlouhodobého stárnutí. Zatímco u krátkodobého stárnutí dochází ke snížení hodnoty J_{nr} přibližně na polovinu, v případě dlouhodobého stárnutí je změna u všech pojiv okolo 90 %.



Obr. 194: Procentuální změna hodnoty J_{nr} zestárlého a nezestárlého vzorku

4.2.9.2 POROVNÁNÍ SILNIČNÍHO ASFALTU 50/70 A DVOU PMB POJIV

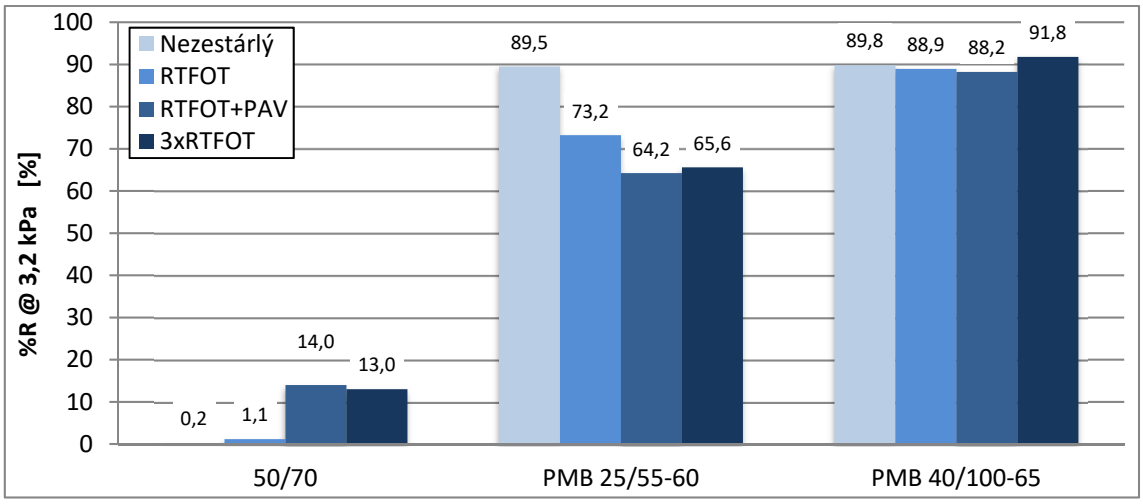
U druhé hodnocené skupiny asfaltových pojiv, obsahující dva odlišné typy PMB a silniční asfalt 50/70, se zkouška MSCR měřila na zestárlých i nezestárlých variantách. Dále se provedlo porovnání dvou odlišných měřících geometrií na DSR, která je blíže popsána v kapitole 4.2.6. U všech variant se provedlo i posouzení naměřených hodnot vypočítaných z 10 cyklů a posledních 5 cyklů.

Na obr. 195 jsou zobrazeny hodnoty elastického zotavení při napětí 3,2 kPa pro geometrii PP25 a je zde vidět výrazné zvýšení %R po stárnutí v případě silničního asfaltu 50/70. Naopak u pojiva PMB 25/55-50 došlo k nápadnému snížení této hodnoty po stárnutí, což ale koresponduje s výsledky zkoušky bodu měknutí. U posledního sledovaného pojiva jsou všechny hodnoty téměř shodné.

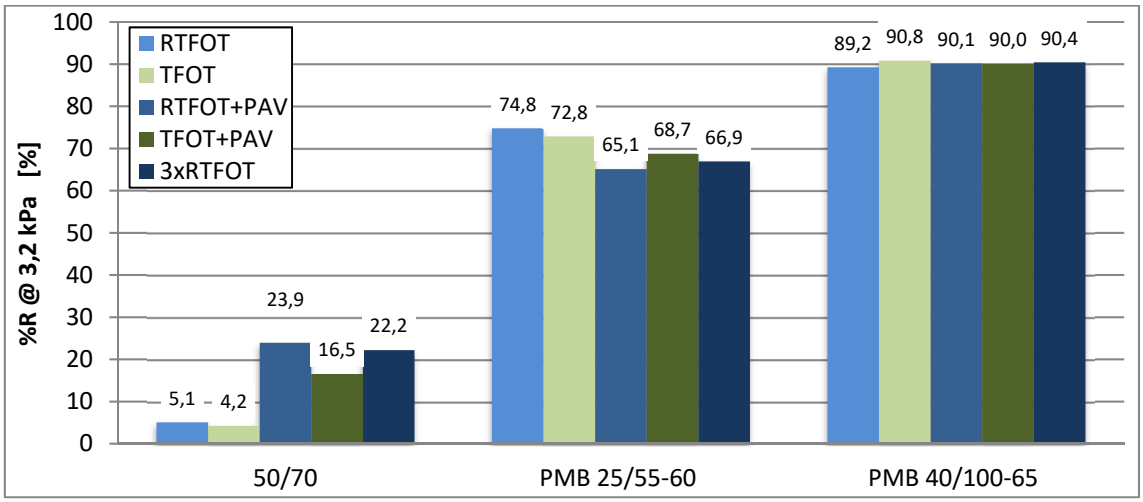
Následující obr. 196 znázorňuje taktéž hodnoty elastického zotavení při napětí 3,2 kPa, ale pro geometrii PP08 a pro více typů stárnutí. U pojiva 50/70 jsou opět zřetelné rozdíly simulovaného krátkodobého a dlouhodobého stárnutí, naopak u posledního pojiva PMB 40/100-65 jsou rozdíly jen nepatrné.

Tab. 59: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} pro napětí 3,2 kPa po stárnutí s geometrií PP25*

Označení vzorku	3,2 kPa							
	Nezestárlý		RTFOT		RTFOT+PAV		3xRTFOT	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]
50/70	0,2	3,62	1,1	1,57	14,0	0,23	13,0	0,28
PMB 25/55-60	89,5	0,10	73,2	0,15	64,2	0,06	65,6	0,09
PMB 40/100-65	89,8	0,07	88,9	0,04	88,2	0,02	91,8	0,02

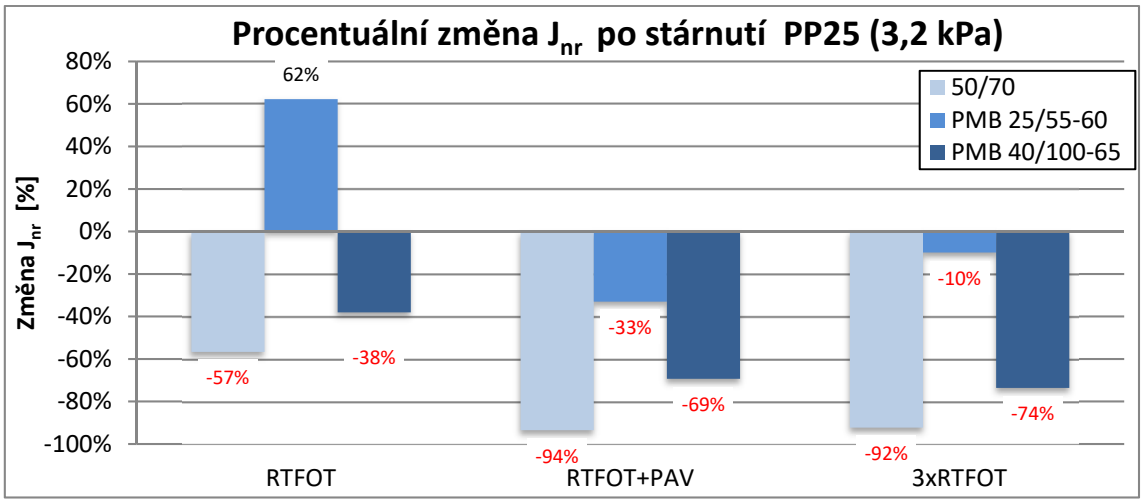


Obr. 195: Hodnoty elastického zotavení při napětí 3,2 kPa s geometrií PP25

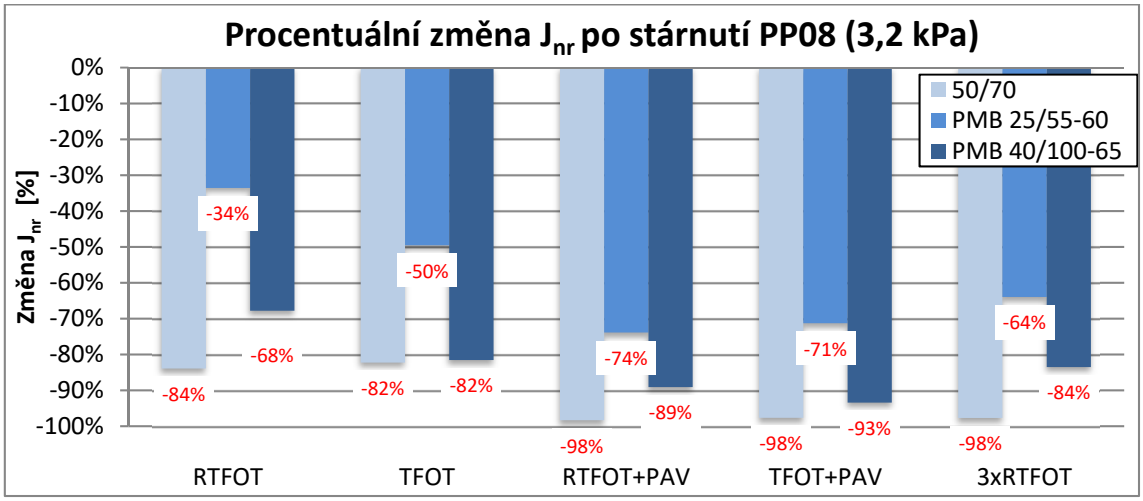


Obr. 196: Hodnoty elastického zotavení při napětí 3,2 kPa s geometrií DSR u zestárlých pojiv PP08

Dalším způsobem, jak lze hodnotit zkoušku MSCR, je procentuální změna hodnot nevratné smykové poddajnosti u nezestárlých a zestárlých vzorků. Z následujícího obr. 197 je zřejmé, že u krátkodobého stárnutí dochází k přibližně polovičnímu snížení charakteristiky J_{nr} ve srovnání s dlouhodobým stárnutím (měřeno s geometrií PP25). Pouze pro vzorek PMB 25/55-60 jsou zjištěné hodnoty do určité míry zavádějící. Další obr. 198 porovnává více metod stárnutí měřených s geometrií DSR PP08. V tomto případě zvolená geometrie ovlivňuje především změnu J_{nr} u krátkodobého stárnutí, kdy se zvyšuje k hodnotám okolo 80 %. Zase se ale potvrzuje podobnost metod simulujících krátkodobé stárnutí (RTFOT a TFOT) a metod simulujících dlouhodobé stárnutí (RTFOT+PAV, TFOT+PAV a 3xRTFOT).



Obr. 197: Procentuální změna hodnoty J_{nr} zestárlého a nezestárlého vzorku s geometrií DSR PP25



Obr. 198: Procentuální změna hodnoty J_{nr} zestárlého a nezestárlého vzorku s geometrií DSR PP08

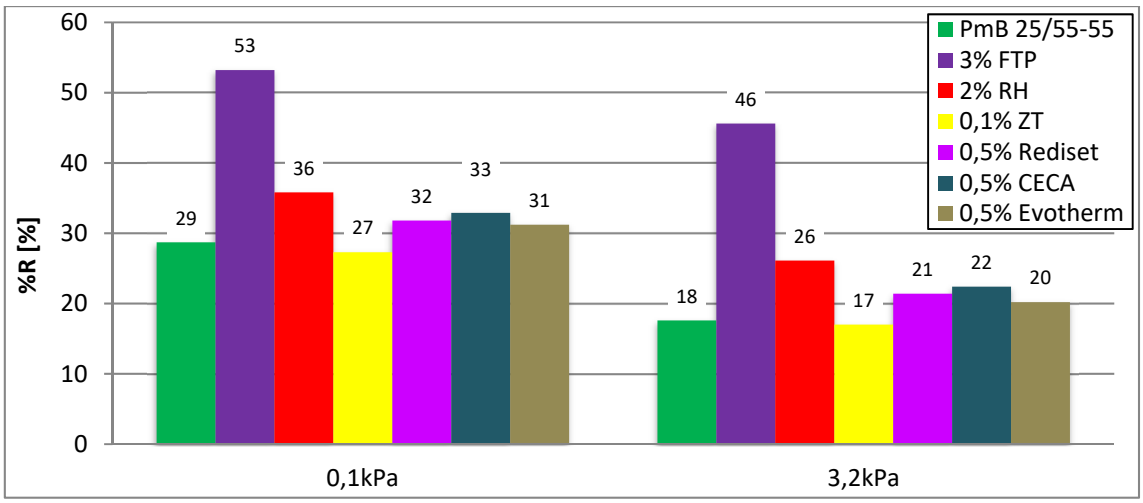
4.2.9.3 POROVNÁNÍ POJIV PMB S VYBRANÝMI PŘÍSADAMI [205]

Další posuzovaná skupina se skládá z pojiva PMB 25/55-55 modifikovaného řadou nízkoteplotních přísad. Nejlepších výsledků z hlediska deformačních charakteristik dosáhlo pojivo s FT parafínem, jež má nejvyšší elastické zotavení a zároveň nejnižší nevratnou smykovou poddajnost při obou napětích (tab. 60). K analogickým závěrům se dospělo i při provádění oscilační zkoušky FS.

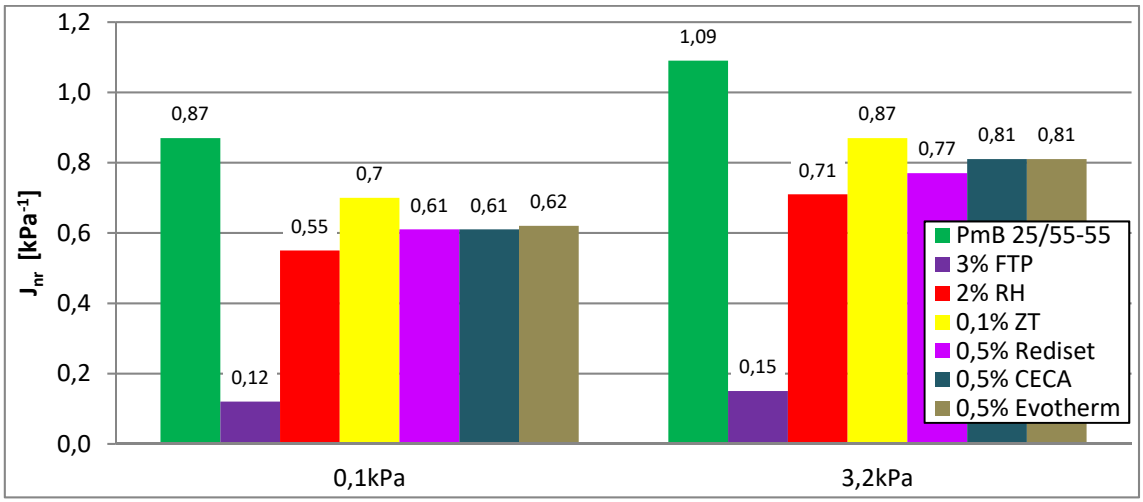
Zbývající pojiva vykazují v zásadě podobné hodnoty. Naopak pojivo PMB 25/55-55 bez další přísady má nejnižší elastické zotavení a nejvyšší hodnotu nevratné smykové poddajnosti. Grafické vyjádření výsledků hodnot %R a J_{nr} je zobrazeno na obr. 199, respektive obr. 200. Jak již bylo uvedeno dříve, zajímavé může být porovnání naměřených hodnot získaných výpočtem ze všech 10 cyklů nebo pouze z posledních 5 cyklů. Na obr. 201 je znázorněna změna J_{nr} vypočítaná z poměru 10 a 5 zatěžovacích cyklů. Při nižším napětí dochází ke snížení J_{nr} u většiny pojiv přibližně o 5 %. V případě vyššího napětí je změna zanedbatelná, s výjimkou pojiva s přísadou FT parafínu, která je při obou napětích výraznější.

Tab. 60: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr}*

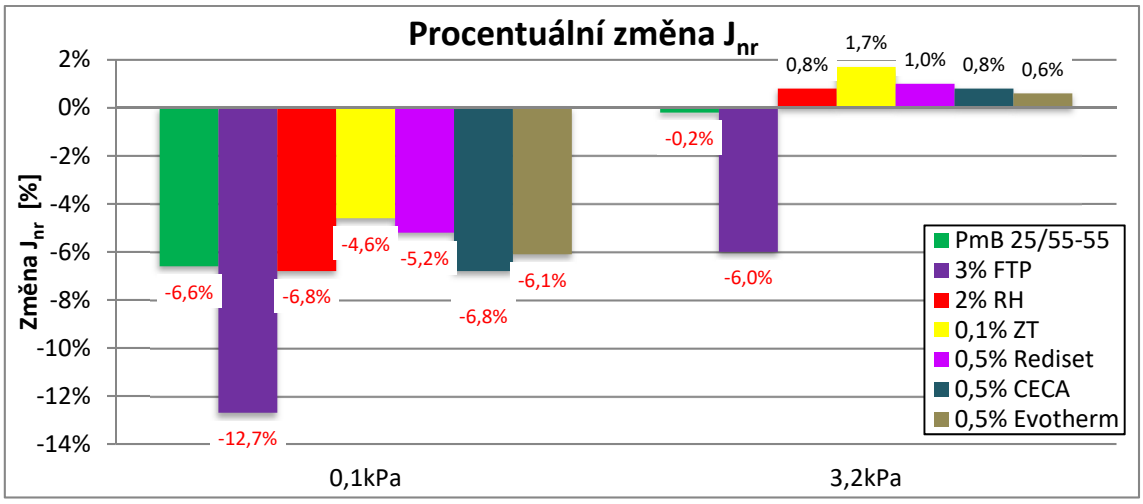
Označení vzorku	0,1kPa		3,2kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]
PMB 25/55-55	28,7	0,87	17,6	1,09
3% FT parafín	53,2	0,12	45,6	0,15
2% RH	35,8	0,55	26,1	0,71
0,1% ZT	27,3	0,70	17,0	0,87
0,5% Rediset	31,8	0,61	21,4	0,77
0,5% CECA	32,9	0,61	22,4	0,81
0,5% Evotherm	31,2	0,62	20,2	0,81



Obr. 199: Hodnoty elastického zotavení



Obr. 200: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti



Obr. 201: Změna J_{nr} při výpočtu z 10 měření nebo posledních 5 měření

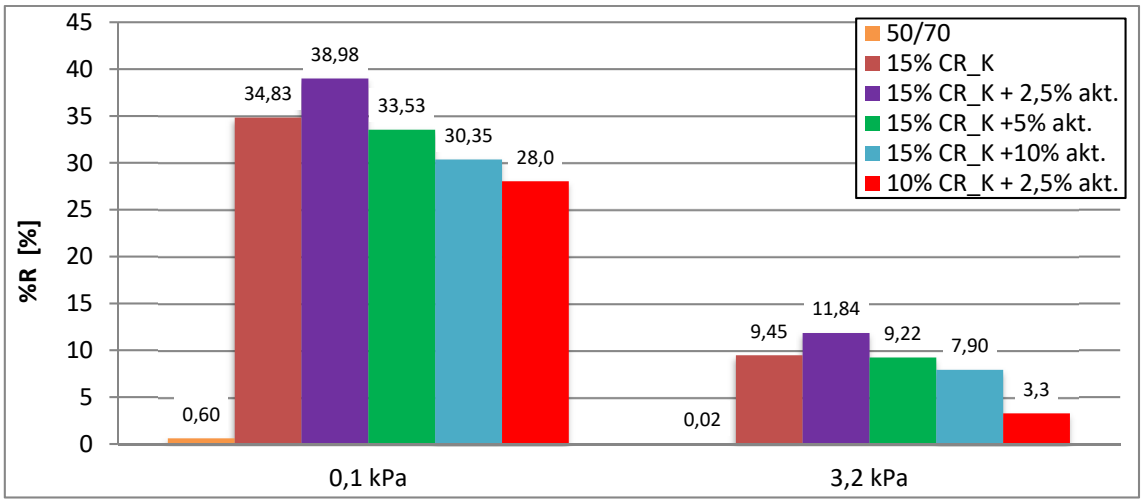
4.2.9.4 POUŽITÍ PRYŽOVÉHO GRANULÁTU A AKTIVÁTORU [209]

V této hodnocené skupině asfaltových pojiv jsou pojiva modifikována pryžovým granulátem, případně i aktivátorem. Z naměřených hodnot zkoušky MSCR lze konstatovat, že nejlépe se chovají varianty asfaltového pojiva, kde není zastoupen žádný aktivační katalyzátor či jeho podíl nepřesahuje 2,5 % -hm. (tab. 61). Je patrné, že se vzrůstajícím množstvím katalyzátoru se zvyšuje i hodnota J_{nr}. Dále se potvrzuje, že množství drcené pryže má vliv na hodnotu nevratné smykové poddajnosti a vyšší množství vede k lepším deformačním charakteristikám.

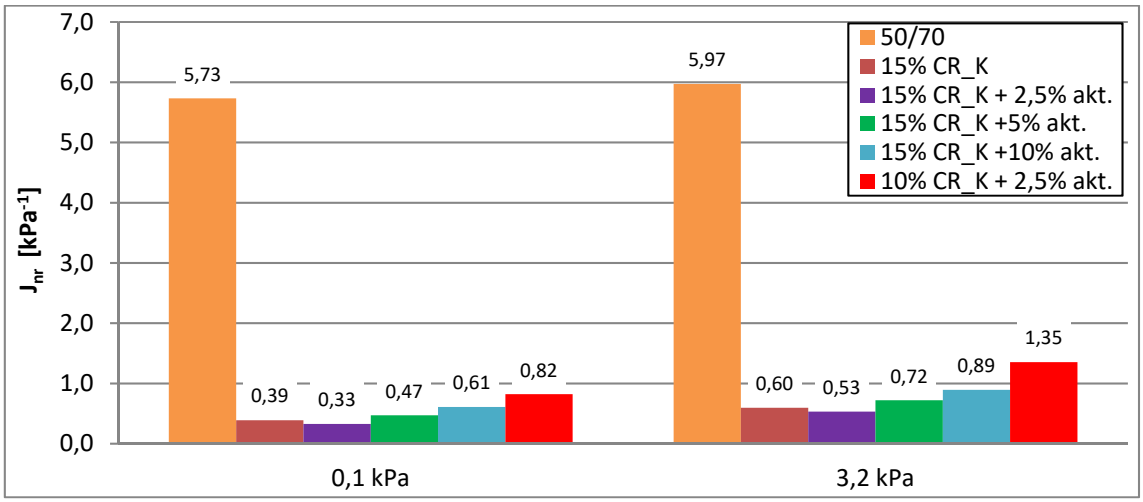
Tab. 61: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr}*

Označení vzorku	0,1kPa		3,2kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]
50/70	0,6	5,73	0,0	5,97
15% CR_K	34,8	0,39	9,5	0,60
15% CR_K +10% AKH	30,4	0,61	7,9	0,89
15% CR_K +5% AKH	33,5	0,47	9,2	0,72
15% CR_K + 2,5% AKH	39,0	0,33	11,8	0,53
10% CR_K + 2,5% AKH	28,0	0,82	3,3	1,35

Na obr. 202 je graficky znázorněno elastické zotavení jednotlivých variant. Je zde zjevná nejnižší hodnota nemodifikovaného silničního asfaltu 50/70, který byl použit jako báze pro výrobu posuzovaných CRMB pojiv. Druhou nejnižší hodnotu %R má varianta obsahující pouze 10 %-hm. pryžového granulátu. Uvedenému odpovídají i hodnoty nevratné smykové poddajnosti zobrazené na obr. 203.

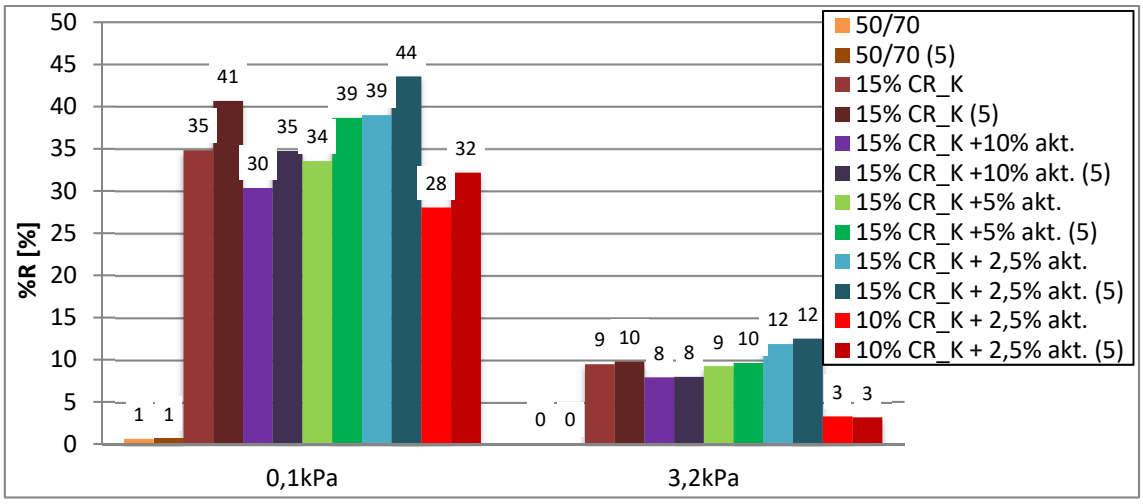


Obr. 202: Hodnoty elastického zotavení

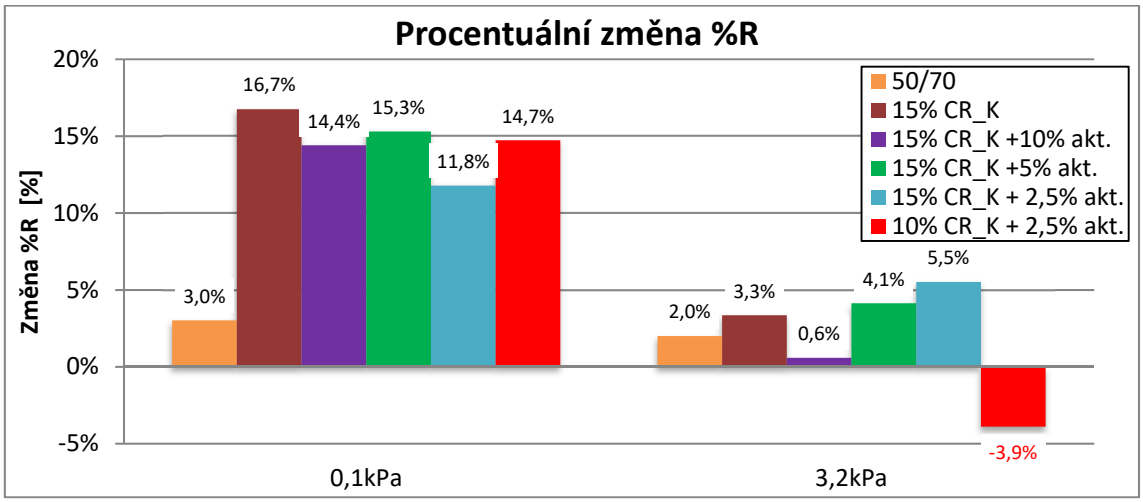


Obr. 203: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti

Z obr. 204 si lze všimnout, že při napětí 0,1 kPa dochází k většímu nárůstu elastického zotavení při uvažování posledních 5 cyklů. Procentuální rozdíl je zaznamenán na obr. 205. V případě napětí 0,1 kPa se jedná přibližně o 15% nárůst způsobený výrazně nižším elastickým zotavením při prvním cyklu. Při napětí 3,2 kPa se rozdíl pohybuje většinou do 5 %.



Obr. 204: Hodnoty elastického zotavení při uvažování všech 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů



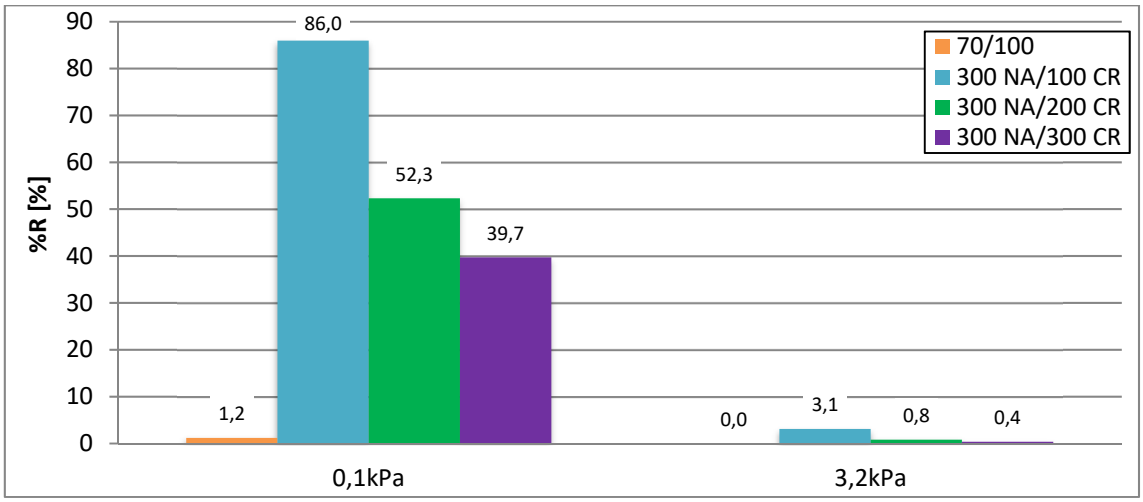
Obr. 205: Změna elastického zotavení při výpočtu z 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů

4.2.9.5 POUŽITÍ PRYŽOVÉHO GRANULÁTU A PŘÍRODNÍHO ASFALTU [208]

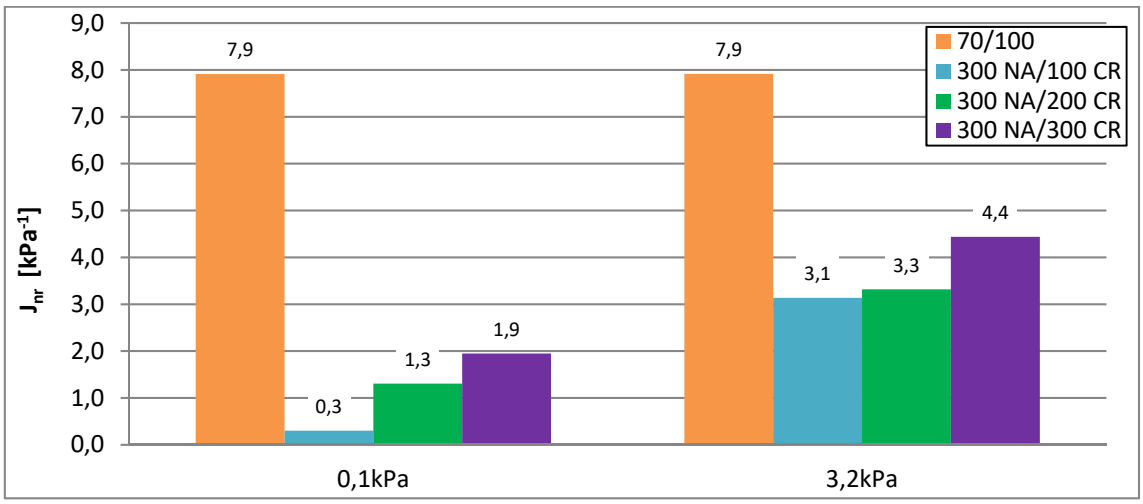
V této skupině asfaltových pojiv byly posouzeny tři varianty CRMB pojiv s přidáním přírodního asfaltu z lokality Selenica. Základním asfaltem, který se modifikoval kombinací přírodního asfaltu a pryžovým granulátem byl silniční asfalt 70/100. Po provedení zkoušky MSCR lze sledovat jistý trend, kdy s rostoucím množstvím pryžového granulátu dochází ke snížení elastického zotavení (obr. 206) a naopak ke zvýšení nevratné smykové poddajnosti (obr. 207) při obou úrovních napětí. Vypočítané hodnoty základních charakteristik zkoušky MSCR jsou uvedeny v tabulce 62.

Tab. 62: *Vypočítané hodnoty %R a J_{nr}*

Označení vzorku	0,1kPa		3,2kPa	
	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]
70/100	1,2	7,91	0,0	7,91
300 NA/100 CR	86,0	0,30	3,1	3,13
300 NA/200 CR	52,3	1,30	0,8	3,32
300 NA/300 CR	39,7	1,95	0,4	4,44

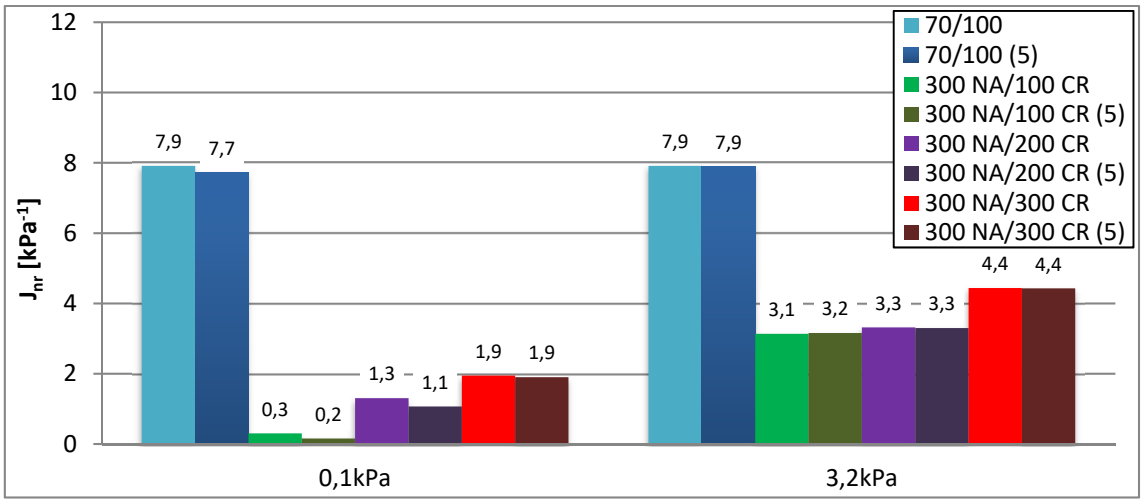


Obr. 206: Hodnoty elastického zotavení

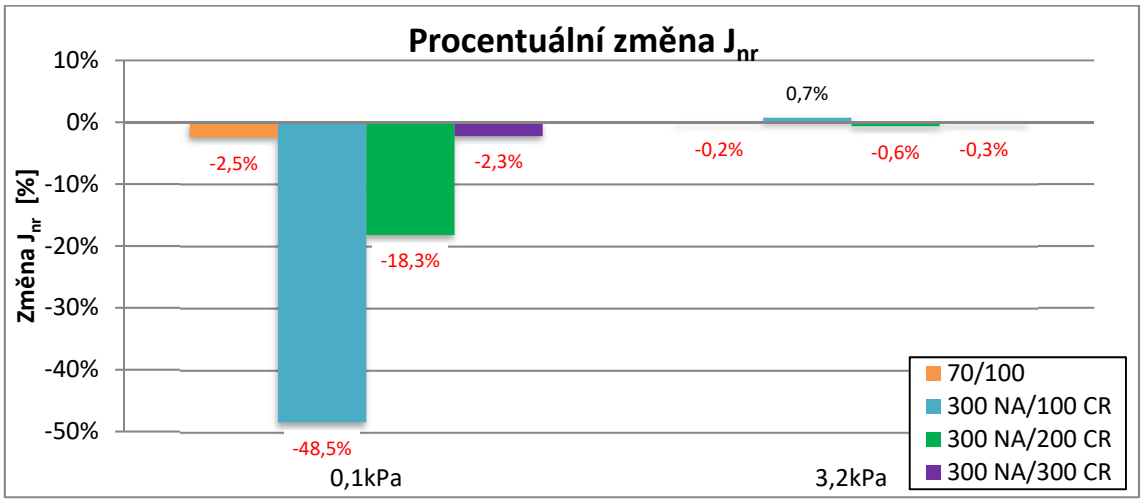


Obr. 207: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti

Při porovnání hodnot nevratné smykové poddajnosti vypočítaných ze všech 10 cyklů nebo posledních 5 cyklů je opět patrné, že k větším rozdílům dochází u nižšího napětí (obr. 208 a 209). V případě asfaltového pojiva 300 NA/100 CR je rozdíl téměř 50 %. Naopak při napětí 3,2 kPa jsou hodnoty J_{nr} takřka nezměněny. Výsledky potvrzují, že při nižším napětí trvá i několik cyklů, než se měřené hodnoty ustálí.



Obr. 208: Hodnoty J_{nr} při uvažování všech 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů



Obr. 209: Změna J_{nr} při výpočtu z 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů

4.3 VZÁJEMNÁ KORELACE MEZI JEDNOTLIVÝMI VÝSLEDKY

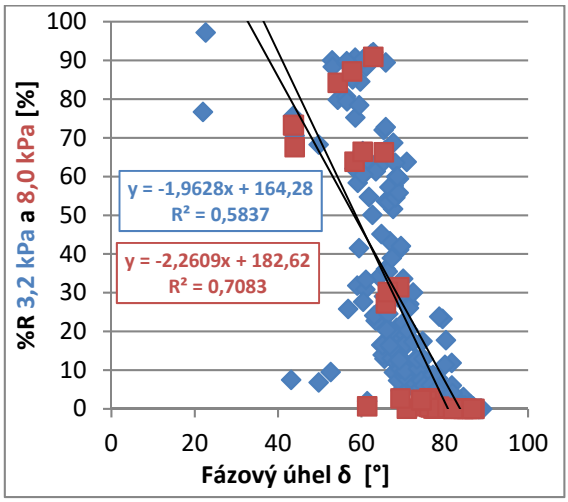
Během výzkumu byla asfaltová pojiva podrobena různým zkouškám a díky tomu je možné stanovit řadu korelačních vztahů mezi jednotlivými charakteristikami. V této kapitole jsou popsány korelace mezi empirickými i reologickými vlastnostmi asfaltových pojiv. K určení byla použita analýza dat (korelace) v programu Microsoft Excel ze všech dostupných hodnot. K hodnocení bylo zvoleno 31 parametrů, které se vzájemně posuzovaly na základě lineární korelace. Pomocí regresní analýzy lze zjistit míru těsnosti dvou spojitých znaků udávanou Pearsonovým korelačním koeficientem R. V grafech je uvedena hodnota spolehlivosti, tj. koeficient determinace R^2, z níž vychází korelační koeficient R. Označení silná závislost je dle principů statistiky pro korelační koeficient v rozmezí 0,7-0,9 a velmi silný stupeň korelační závislosti je pro R větší než 0,9. Naopak korelační koeficient menší než 0,7 značí střední, případně slabou korelaci pro R < 0,4, [212]. Všechny meze jsou uvažovány pro absolutní hodnotu korelačního koeficientu.

Vybrané velmi silné nebo silné závislosti jsou zobrazeny na následujících obrázcích a hodnoty lineárních korelačních koeficientů pro všechny porovnávané charakteristiky jsou uvedeny v příloze D.

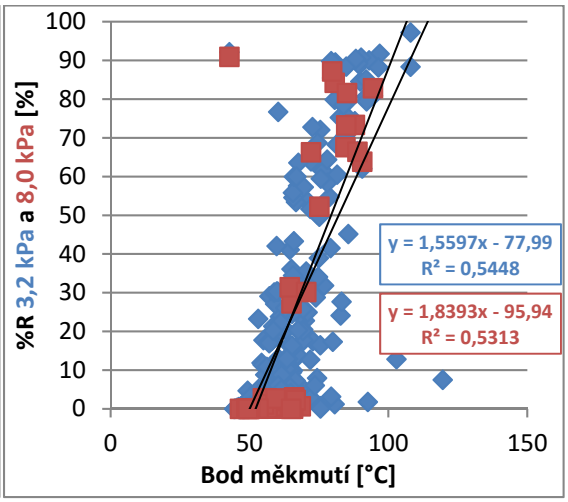
Na obrázku 210 je znázorněn silný lineární vztah mezi fázovým úhlem odvozeným z dynamické oscilační zkoušky v režimu FS při teplotě 60 °C s frekvencí zatížení 1,59 Hz a elastickým zotavením odvozeným ze zkoušky MSCR při teplotě 60 °C a napětí 3,2 kPa i 8,0 kPa. Koeficient determinace (R^2) v případě napětí 3,2 kPa je 0,58, čemuž odpovídá korelační koeficient R = -0,76. Pro napětí 8,0 kPa je R^2 = 0,71 a R = -0,84. V obou případech se jedná o zápornou korelaci, která poukazuje na vztah mezi rostoucí hodnotou %R a klesající hodnotou δ. %R charakterizuje elastické zotavení asfaltových pojiv a δ popisuje pružnou odezvu pojiv. Ještě silnější závislost je získána při použití exponenciální funkce s hodnotou koeficientu determinace R^2 = 0,64 pro napětí 3,2 kPa a R^2 = 0,74 pro napětí 8,0 kPa. Při napětí 0,1 kPa je korelace pouze střední.

Při porovnání hodnoty bodu měknutí a elastického zotavení byla stanovena silná lineární závislost vyjádřená korelačním koeficientem R = 0,74 (R^2 = 0,54) pro napětí 3,2 kPa a R = 0,73 (R^2 = 0,53) pro napětí 8,0 kPa (viz obr. 211). Čím vyšší je hodnota bodu měknutí, tím vyšší je %R, tzv. mezi těmito charakteristikami je silná pozitivní závislost. Díky tomu je možné v případě nutnosti pomocí menšího množství asfaltového pojiva nezbytného pro měření na DSR, odhadnout velikost bodu měknutí. Naopak negativní silná korelace s R = -0,74 je mezi charakteristikami bodu měknutí a fázového úhlu, kdy s klesající hodnotou bodu měknutí dochází ke zvýšení fázového úhlu, znázorněné na obrázku 212.

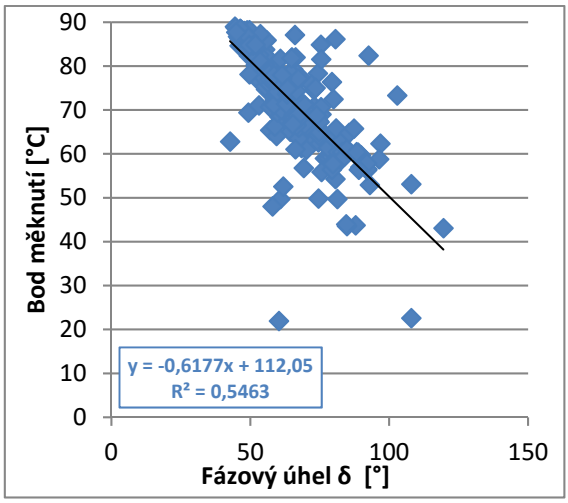
Pokud bychom vyjádřili míru závislosti vztahu penetrace a J_{nr} při napětí 3,2 kPa, korelační koeficient značí významnou (silnou) korelaci (R = 0,71), viz obrázek 213. Na stejném obrázku je zobrazena i lineární závislost mezi penetrací a teplotou viskoelastického přechodu s R = -0,72, značící silný korelační vztah těchto charakteristik. Při použití mocninné spojnice je korelační vztah ještě silnější R = -0,77.



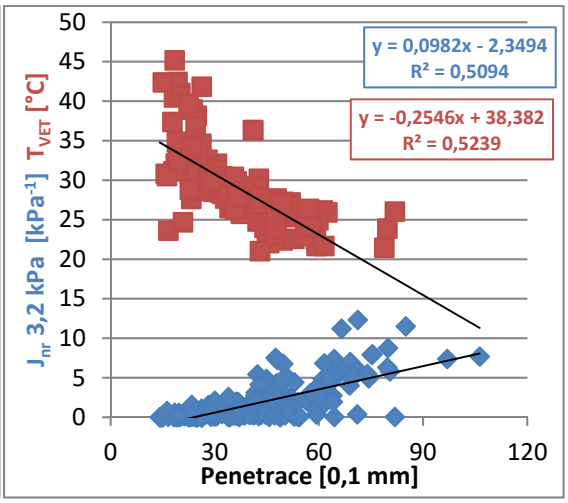
Obr. 210: Korelační vztah mezi δ a %R



Obr. 211: Korelace mezi bodem měknutí a %R

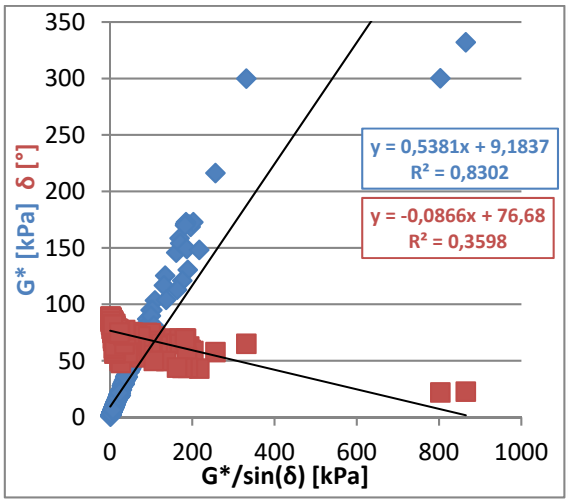


Obr. 212: Korelace mezi bodem měknutí a δ

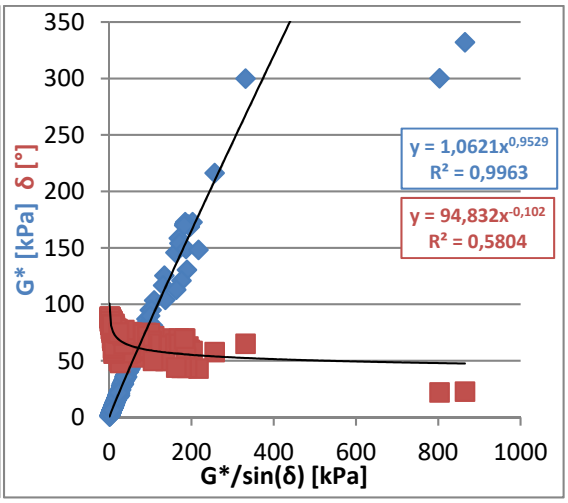


Obr. 213: Závislost penetrace na J_{nr} 3,2 kPa a T_{VET}

Z hlediska korelačního koeficientu lze říci, že charakteristika G*/sin(δ) je lineárně velmi silně závislá na hodnotě G* (R = 0,91), ale jen středně závislá na hodnotě fázového úhlu (R = -0,60), viz obr. 214. Je důležité upozornit, že u parametru G*/sin(δ) je vhodnější použít mocninnou funkci (obr. 215), díky které je závislost na G* ještě silnější R = 0,998 a pro fázový úhel je vztah silný R = -0,76. Opět se ukazuje, že parametr G*/sin(δ) je výrazněji ovlivněn charakteristikou komplexního smykového modulu než fázovým úhlem.

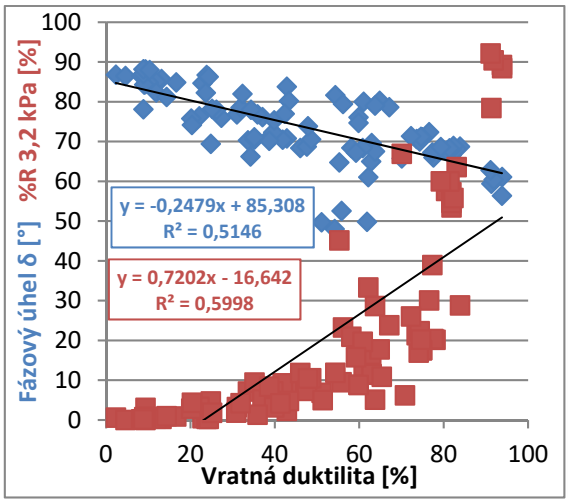


Obr. 214: Lineární závislost G/sin(δ) na G* a δ*

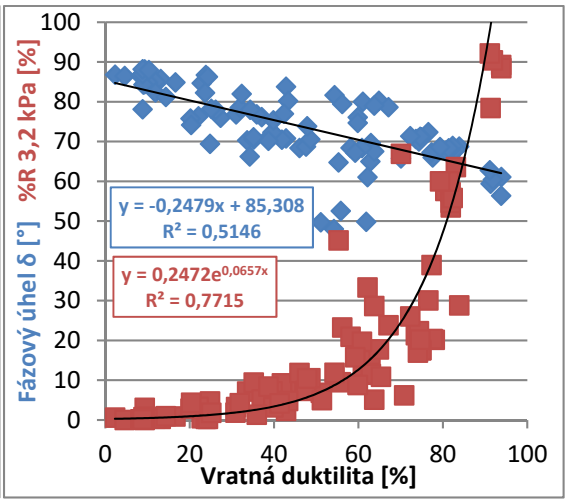


Obr. 215: Mocninná závislost G/sin(δ) na G* a δ*

Hodnota vratné duktility je závislá na velikosti fázového úhlu i na elastickém zotavení při napětí 3,2 kPa, vztah těchto charakteristik popisuje graf na obrázku 216. V obou případech se jedná o silnou korelaci, pro fázový úhel je R = -0,72 a v případě elastického zotavení je R = 0,77. Pro vztah vratné duktility a %R je přesnější zvolit mocninnou funkci (obr. 217), díky níž se korelační koeficient poměrně výrazně zvýší (R = 0,88), ale stále se jedná o silnou korelaci.



Obr. 216: Lineární závislost vratné duktility na δ a %R 3,2 kPa



Obr. 217: Závislost vratné duktility na δ a %R 3,2 kPa

Další silné korelace byly nalezeny mezi penetračním indexem a elastickým zotavením při napětí 3,2 kPa i 8,0 kPa. Nečekaně silná korelace byla zjištěna i u elastického zotavení stanoveného při napětí 8,0 kPa a dynamické viskozity měřené při 135 °C i 150 °C. Naopak trochu překvapivě byla shledána jen slabá korelace mezi hodnotou G*/sin(δ) a charakteristikou J_{nr}. Ke stejnému závěru ale dospěl v minulosti i Golalipour [29].

4.4 SGS PROJEKT

V roce 2016 bylo možné v rámci studentské grantové soutěže (SGS), kde jsem byla navrhovatelem a hlavním řešitelem, porovnat vliv deformačních vlastností asfaltových pojiv a směsí. Důležitým cílem projektu SGS bylo nalezení korelačních vztahů mezi jednotlivými charakteristikami a určení korelačního koeficientu sloužícího k přepočtu jednotlivých vlastností. Pro výzkum byla vybrána asfaltová směs SMA 11S, která se volí do obrusných vrstev vozovek s vysokým dopravním zatížením (dálnice, rychlostní silnice apod.). Zajímavým srovnáním, jemuž se částečně daný projekt věnoval, byl vliv různých typů kameniva.

Účelem výzkumného projektu bylo poukázat na nutnost výběru kvalitních vstupních materiálů pro dosažení potřebných vlastností výsledných asfaltových směsí. V poslední době je značně diskutovaným tématem používání kvalitního asfaltového pojiva, ale jak ukázaly výsledky zkoušek z SGS projektu, je velmi důležité nezapomínat ani na kvalitní vstupní kamenivo.

Závěry SGS projektu jsou popsány v pracích [213-215] a zde jsou shrnuty podstatné poznatky:

- Zjistit chování asfaltové směsi z chování asfaltového pojiva by bylo sice přínosné, ale je to do značné míry těžko realizovatelné. Samotné vlastnosti asfaltových pojiv ovlivňují chování konstrukčních vrstev, ale nejsou jediným prvkem, na němž závisí tvorba plastických deformací. Nezanedbatelný vliv mají i další parametry, např. charakteristiky kameniva, vlastní návrh složení směsi včetně množství asfaltového pojiva, mezerovitost nebo podmínky výroby (např. pracovní teploty).

- Vysoká hodnota otlukovosti kameniva nebo vysoký tvarový index kameniva mají negativní vliv na výsledné charakteristiky asfaltové směsi, zejména na tvorbu trvalých deformací.
- Oproti původnímu očekávání plní daleko významnější úlohu kamenivo a jeho charakteristiky.
- Z naměřených dat je patrný jednoznačný vliv komplexního smykového modulu asfaltových pojiv na modulu tuhosti asfaltových směsí.
- Při hledání korelačních vztahů mezi jednotlivými charakteristikami se prokázala velmi silná závislost (korelační koeficient R > 0,9) mezi mezerovitostí asfaltových směsí a hodnotami naměřenými při zkoušce odolnosti vůči tvorbě trvalých deformací.
- Silná závislost (R = 0,7 - 0,9) byla nalezena mezi mezerovitostí asfaltových směsí a vlastnostmi kameniva (tvarový index a přilnavost), dále mezi modulem tuhosti stanoveným při teplotě 0 °C a hodnotami ze zkoušky odolnosti vůči trvalým deformacím.
- Moduly tuhosti při teplotě 15 °C nebo 27 °C mají závislost na dalších charakteristikách jen slabou.
- Silná závislost byla také nalezena mezi přilnavostí pojiva ke kamenivu a napětím při porušení (zkouška odolnosti proti šíření trhliny).
- Zkouška odolnosti vůči trvalým deformacím je i silně závislá na vlastnostech kameniva.
- Varianty s pryžovým granulátem, které mají nižší elastické zotavení, mají vyšší modul tuhosti při 0 °C i napětí při porušení (zkouška měření odolnosti proti šíření trhliny).
- U většiny variant se potvrdila závislost, kdy s nižší nevratnou smykovou poddajností pojiva je nižší tvorba trvalých deformací zjištěná u konkrétní asfaltové směsi.

5. ZÁVĚR

Zpočátku se pro testování asfaltových pojiv používaly pouze empirické zkušební metody, díky kterým se získala základní orientace o jejich vlastnostech a výkonnosti. Hlavní předností je nenáročnost a jednoduchost, a proto se často aplikují i v dnešní době. Nevýhodou však je, že nejsou schopny vystihnout komplikované reologické vlastnosti asfaltových pojiv, zejména těch modifikovaných. Asfaltová pojiva jsou složité materiály s viskoelastickým charakterem, u kterého se chování liší nejen s rozdílnou teplotou, ale i časem nebo velikostí zatížení.

Nejvýraznější změna v testování asfaltových pojiv nastala na základě rozsáhlého výzkumného programu SHRP v USA, jehož výsledkem byly nové zkušební postupy, umožňující zkoušet asfaltové materiály pomocí reologických metod. I nadále ale zůstává řada problémů související s interpretací funkčních zkoušek, eventuálně vstupních podmínek při realizaci jednotlivých zkoušek.

V průběhu práce se věnovala pozornost řadě úkolů prováděných se záměrem splnit cíle definované na počátku studia a popsané v kapitole 2. Hlavním cílem bylo zvolit limitní hodnoty dvou základních reologických zkoušek na dynamickém smykovém reometru. První popisovanou metodou, které se věnuje pozornost v disertační práci, je dynamická oscilační zkouška Frequency Sweep a druhou je zkouška opakovaného zatížení a odlehčení MSCR. Obě metody jsou určeny k hodnocení vlastností asfaltových pojiv v oboru vysokých teplot, jež by měly předvídat odolnost vůči vzniku trvalých deformací.

Zkouška MSCR se v posledních letech prosazuje jako nejvhodnější technický postup pro posuzování odolnosti asfaltových pojiv proti vzniku trvalých deformací. Důkaz dobré korelace mezi hodnotou J_{nr} a tvorbou trvalých deformací asfaltových směsí byl již prokázán několika odborníky [16, 23, 31, 33, 174, 175, 211]. Přesto stále probíhá diskuze o nedostatcích tohoto testu. Problémy objevující se u zkoušky MSCR jsou především ve volbě konfigurace metody. Z tohoto důvodu se práce zaměřila na posouzení vlivu aplikovaného napětí a teploty provádění zkoušky. Dále bylo provedeno porovnání dvou odlišných měřicích geometrií na DSR a konfrontovaly se získané hodnoty ze všech 10 cyklů s hodnotami vypočítanými jen z posledních 5 cyklů.

Ke stanovení závěrů se vycházelo z měření na více než 350 asfaltových pojivech různých typů a modifikací. K hodnocení byla vybrána skupina běžných silničních asfaltů, polymerem modifikovaná pojiva a pojiva modifikovaná pryžovým granulátem. V některých případech byla k pojivům přidána další přísada (nízkoviskózní, zlepšující přilnavost či povrchovou aktivitu nebo multifunkční kyselina polyfosforečná). Je nutné upozornit, že měření byla provedena na jednom konkrétním DSR, a proto mohou být postižena systematickou chybou.

Z výsledků a provedených analýz je možné vyvodit následující závěry a doporučení:

- Pro omezení používání asfaltových pojiv náchylných k tvorbě trvalých deformací byly navrženy limitní hodnoty pro jednotlivé skupiny asfaltových pojiv (tab. 20 v kapitole 4.1.8 a tab. 54 v kapitole 4.2.8). Mezní hodnoty byly určeny na základě matematické statistiky (percentilových hodnot), kdy stanovené mezi nevyhoví 5-10 % zkoumaných asfaltových pojiv. Tato metoda nemusí nutně odpovídat kvalitě asfaltového pojiva. U některých skupin (zejména PMB) je nezbytné brát

v úvahu malý statistický soubor, u něhož byla analýza provedena, a je vhodné ke zvoleným limitním hodnotám přistupovat s jistou mírou opatrnosti.

- U měření na krátkodobě zestárnutých vzorcích byla zaznamenána větší odchylka mezi dvěma měřeními na stejném vzorku (větší variabilita).
- Důležitou roli při zpracování výsledků má přesnost měření jednotlivých charakteristik. Někdy se zaokrouhlením naměřených či odvozených hodnot objevily zavádějící výsledky. Minimální doporučená přesnost by měla být nastavena na tisíciny jednotek, případně minimálně na tři platná čísla.
- V případě modifikace pryžovým granulátem se doporučuje vždy použít 2 mm mezeru na DSR, protože i pokud byla velikost CR < 0,5 mm vycházely někdy nelogické výsledky.
- U CRMB pojiv je důležitější procentuální dávkování pryžového granulátu, než typ základního asfaltového pojiva. Důvod lze spatřit v samotném porovnání hodnot silničních asfaltů 50/70 a 70/100, u kterých je rozdíl minimální a které se k modifikaci pryžovým granulátem využívají nejčastěji.
- Je důležité, aby teplota zkoušek nebyla příliš vysoká a nehrozilo vytékání pojiva z měřící destičky. Komplikace by nastaly, pokud by byla teplota zkoušky výrazně vyšší než bod měknutí (přibližně o více než 20 °C). Výsledky by v takovém případě byly zkreslené. Jako krajní teplota provádění zkoušek na DSR se jeví teplota do 70 °C.
- Prokázalo se, že upravený parametr $G^*/\{1-[1/(tg(\delta)sin(\delta))]\}$ je citlivější na změny fázového úhlu (vliv elastické složky komplexního smykového modulu) než parametr $G^*/sin(\delta)$, ale pro $\delta < 51,8°$ model předpovídá nereálné negativní hodnoty. Na hodnoty upraveného parametru vypočítané s fázovým úhlem od 51,8° do přibližně 53,0°, je nutné pohlížet s jistou rezervou, neboť vychází naopak extrémně vysoké.
- Zkušební teplota 60 °C se zdá být nejvhodnější v případě metody MSCR. Teplota 70 °C je pro měkčí pojiva příliš vysoká a naopak při teplotě 50 °C jsou hodnoty J_{nr} velmi nízké. Teplota 60 °C je obecně považována za reprezentativní pro teplotní rozsah, ve kterém dochází k tvorbě trvalých deformací. To je důvod, proč mnoho zemí ve střední a jižní Evropě provádí standardní zkoušky vyjíždění kolejí podle EN 12697-22 [200] při teplotě 60 °C. Za předpokladu shodných teplot měření zkoušky MSCR i zkoušky odolnosti proti tvorbě trvalých deformací u asfaltových směsí by bylo možné snadněji porovnávat naměřené hodnoty. V současné době se v ČR zkouška pojíždění kolem realizuje většinou při teplotě 50 °C.
- Napětí 0,1 kPa u zkoušky MSCR se jeví jako příliš nízké pro nejčastěji používaná asfaltová pojiva. Základní hodnoty změřené při napětí 0,1 kPa jsou někdy tak malé, že nejsou dostatečně přesné. I z tohoto důvodu je variabilita jednotlivých cyklů při napětí 0,1 kPa nejvyšší. Současně napětí 0,1 kPa poskytuje nejnižší korelace s chováním asfaltových směsí. Vhodnější napětí, které je ze zkušenosti v LVR, je 2,0 kPa.

- Pro běžné silniční asfalty je standardní druhá úroveň napětí 3,2 kPa dostatečná, ale v případě tvrdších silničních asfaltů (20/30) nebo modifikovaných pojiv je smykové napětí 3,2 kPa často v LVR. Podstatou zkoušky MSCR je, že vyšší úroveň napětí musí být mimo LVR. Zvýšení úrovně napětí je nutné zejména pro charakterizování chování modifikovaných pojiv. Vhodnějším napětím mimo LVR je 8,0 kPa.
- Variabilita výsledků při různých úrovních napětí ukázala, že zvýšení hodnoty napětí nebo teploty snižuje proměnlivost výsledků.
- Nevratná smyková poddajnost většinou s cykly klesá, nebo je konstantní. V případě, že strmě stoupá, došlo k nevratnému poškození.
- Parametr $J_{nr,diff}$ nemá přímý vztah k tvorbě trvalých deformací, a proto je jeho přínos značně diskutabilní. Počítá se z J_{nr} při napětí 0,1 kPa, které má poměrně vysokou variabilitu, a proto i jeho proměnlivost je značná. Při použití univerzální mezní hodnoty 75 % platné v USA se vyloučí i řada asfaltových pojiv s velmi nízkými hodnotami J_{nr}, odpovídající vysoké odolnosti vůči tvorbě trvalých deformací. Z těchto důvodů se doporučuje úplné zrušení tohoto parametru.
- V našem případě by americkou limitní hodnotu parametru citlivosti nesplnila téměř čtvrtina sledovaných asfaltových pojiv, jedná se tedy o velmi přísné kritérium.
- Z provedených měření vyplývá, že výběr jiné geometrie vede k částečně odlišným výsledkům, a proto je třeba vždy uvést, s jakou geometrií byla zkouška měřena. Výhodou aplikace standardní geometrie PP25 je jednodušší manipulace v DSR i samotná příprava vzorku (odlití).
- Současná metoda zprůměrování odezvy všech 10 cyklů při každé úrovni napětí může vést k zavádějícímu znázornění skutečné reakce asfaltového pojiva v důsledku změn během jednotlivých cyklů. Největší rozdíly jsou zaznamenány u počátečních cyklů, a proto se doporučuje přidat prvních 5 cyklů aklimatizačních. V zásadě by se použil obdobný přístup známý např. u stanovení modulu tuhosti asfaltové směsi metodou IT-CY dle ČSN EN 12697-26 (příloha C) [135].
- Je nutné sledovat, jestli jednotlivé hodnoty každého cyklu nejsou nápadně odlišné od průměrné hodnoty pro dané napětí. Případně, zda se přetvoření nezvyšuje i ve fázi odtížení. Proto je vhodnější kontrolovat surová data a nespoléhat se na software, který sám vypočítá jednotlivé charakteristiky.
- V případě měkčího asfaltového pojiva (70/100) a některých speciálních pojiv vycházely záporné hodnoty %R. Záporné hodnoty %R jsou logicky nemožné, protože by to znamenalo, že deformace se ve fázi relaxace nadále zvyšuje a přitom je napětí nulové.
- Provedením řady empirických i funkčních zkoušek na většině měřených asfaltových pojiv bylo možné hodnotit jednotlivé charakteristiky mezi sebou a určit korelační koeficienty.

- Při porovnání zkoušky FS a MSCR by si měly navzájem odpovídat parametr G*/sin(δ) s nevratnou smykovou poddajností J_{nr} a fázový úhel δ s elastickým zotavením %R. Na základě provedení korelací je evidentní, že první zmiňované charakteristiky nemají mezi sebou téměř žádný vztah (korelační koeficient R = -0,22). Naopak vztah mezi δ a %R je silný (R = - 0,76).

Pro ověření navržených limitních hodnot by bylo dobré získat hodnoty z dlouhodobého sběru dat, který je i do budoucna velmi důležitý. Je třeba zmínit, že v případě mezilaboratorních srovnávacích měření byly hodnoty komplexního smykového modulu G* pro silniční laboratoř ČVUT v Praze podstatně vyšší, než hodnoty ostatních laboratoří. Primární problém je zřejmě v určitém typu DRS. Modernější přístroje mají větší přesnost měření a běžnou součástí bývá i ohřev z obou stran vzorku.

Po vyhodnocení všech měření je možné stanovit povolené hodnoty měřených charakteristik pro jednotlivé skupiny asfaltových pojiv, neboť v současných normách zcela chybí. Dle poznatků prezentovaných experimentálních měření lze navrhnout, aby se současný postup zkoušky MSCR změnil z hlediska velikosti zatížení na napětí 2,0 kPa a 8,0 kPa a teplota se jasně definovala na hodnotu 60 °C, případně na hodnotu, která bude odvozena v závislosti na minimální hodnotě bodu měknutí daného asfaltového pojiva.

Při porovnání oscilační zkoušky FS a MSCR je možné poukázat na výhody zkoušky FS:

- měření v rozsáhlém teplotním a frekvenčním spektru, díky kterému je možné popsat široký rozsah podmínek vyskytujících se na vozovce;
- lepší opakovatelnost měření;
- snadnější výpočet dvou základních charakteristik G* a δ.

Na druhé straně výhody zkoušky MSCR v porovnání s FS jsou:

- kratší doba měření zkoušky;
- lepší korelace s tvorbou trvalých deformací;
- aplikování vyššího napětí, které přesněji simuluje reálné podmínky na vozovce.

Doporučení pro budoucí práci:

- prověřit různé délky zatížení a odlehčení v případě zkoušky MSCR;
- před zvolením vyšších úrovní napětí u zkoušky MSCR je nutné ověřit obě nově navržená napětí, včetně reprodukovatelnosti zkoušky, protože v některých publikacích [113] je poukázáno na snižující se reprodukovatelnost s vyšším napětím;
- před uvedením limitních hodnot do praxe se doporučuje potvrzení na širším souboru asfaltových pojiv (zejména u PMB pojiv a u krátkodobě zestárnutých pojiv).

POUŽITÁ LITERATURA

[1] VALENTIN, J. a kol. Poznatky k funkčním charakteristikám a zkouškám asfaltových pojiv z pohledu evropského projektu FunDBitS. In: *Konference asfaltové vozovky 2015* [CD]. Praha, 2015.

[2] EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. Asphalt in figures 2017. Belgium: EAPA, 2018.

[3] VACIN, O., CERNY, R. and PLITZ, J. Evaluation of performance tests on bitumens. In: *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress* [online]. Czech Technical University in Prague, 2016, 2016-06-30. DOI: 10.14311/EE.2016.370. ISBN 9788001059623.

[4] Association of Modified Asphalt Producers, AMAP Survey, 2008.

[5] VALENTIN, J. a kol. Validace vybraných funkčních zkoušek pro různé typy asfaltových směsí. In: *Sborník technických listů CESTI 2014: Příloha č. 3 průběžné zprávy za rok 2014*. Praha, 2014, s. 14-17.

[6] SOUKUPOVÁ, L. Funkční charakteristiky asfaltových pojiv s mikromletou pryží a různými typy katalyzátorů a chemických přísad. Praha, 2013. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Jan Valentin.

[7] HILL, A. *Rheology application in road asphalt/bitumen industry: Summary and future*. Malvern, 2017.

[8] EAPA MAGAZINE 43 - DECEMBER 2018. EAPA, 2018.

[9] KENNEDY, T.W. Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program. Washington, DC United States: Strategic Highway Research Program, 1994, 156 s. Dostupné také z: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-410.pdf

[10] VALENTIN, J. a kol. *Reologie a experimentální vymezení funkčních charakteristik nízkoteplotních asfaltových směsí: Závěrečná zpráva projektu GAČR 103/09/0335*. Praha, 2012.

[11] AL-QADI, I.L. et al. Creep Behavior of Hot-Mix Asphalt due to Heavy Vehicular Tire Loading. *Journal of Engineering Mechanics* [online]. 2009, **135**(11), 1265-1273. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2009)135:11(1265). ISSN 0733-9399. Dostupné z: http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9399%282009%29135%3A11%281265%29

[12] BAGHAEE MOGHADDAM, T., SOLTANI, M. and KARIM, M.R. Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test. *Materials & Design* [online]. 2014, **53**, 317-324. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.07.015. ISSN 02613069. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306913006390

[13] DELGADILLO, R. and BAHIA, H.U. The Relationship between Nonlinearity of Asphalt Binders and Asphalt Mixture Permanent Deformation. *Road Materials and Pavement Design* [online]. 2011, **11**(3), 653-680. DOI: 10.1080/14680629.2010.9690298. ISSN 1468-0629. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2010.9690298

[14] SYBILSKI, D. et al. Binder testing. In: *Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials: State-of-the-art report of the RILEM Technical Committee 206-ATB*. New York: Springer, c2013. RILEM state of the art reports, v. 9. pp 15–83. ISBN 978-94-007-5104-0.

[15] DRESSEN, S., PLANCHE, J.P., and GARDEL, V. A New Performance Test Method for Rutting Prediction: MSCRT, *Proceedings of the 7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Rhodes, Greece, 2009, s. 971-980.

[16] BAHIA, H. U. et al. *Characterization of modified asphalt binders in Superpave mix design*. Washington, D.C.: National Academy Press, 2001. Report (National Cooperative Highway Research Program), no. 459. ISBN 0-309-06707-3.

[17] STUART, K., MOGAWER, W. and ROMERO, P. Evaluation of the Superpave asphalt binder specification for high-temperature pavement performance. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions* 69*,* 2000, s. 148–176.

[18] Dongre, R. and D'Angelo, J. Evaluation of Different Parameters for Superpave High Temperature Binder Specification Based on Rutting Performance in the Accelerated Loading Facility at FHWA. Transportation Research Record, TRB, 2003, Transportation Research Board Annual Meeting, National Research Council, Washington D.C., 2003, s. 455-487.

[19] D'Angelo, J. and Dongre, R. Superpave Binder Specifications and their Performance Relationship to Modified Binders. Proceeding Canadian Technical Asphalt Association 47, 2002, s. 91–103.

[20] DELGADILLO, R., NAM, K. and BAHIA, H. Why do we Need to Change G*/Sinδ and How? *Road Materials and Pavement Design* [online]. 2011, **7**(1), 7-27. DOI: 10.1080/14680629.2006.9690024. ISSN 1468-0629. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2006.9690024

[21] PHILIPS, M.C. and ROBERTUS, C. Binder rheology and asphaltic pavement permanent deformation; the zero-shear-viscosity. In: *Proceedings of Eurasphalt & Eurobitume Congress*. European Asphalt Pavement Association, Strasbourg, 1996, s. 12.

[22] SYBILSKI, D. Zero-Shear Viscosity of Bituminous Binder and Its Relation to Bituminous Mixture's Rutting Resistance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 1996, **1535**, 15-21. DOI: 10.3141/1535-03. ISSN 0361-1981. Dostupné z: http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/1535-03

[23] D'ANGELO, J. et al. Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: The Multiple Stress Creep Recovery Test. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 2007, (76), 123-162. ISSN 0270-2932. Dostupné také z: http://worldcat.org/issn/02702932

[24] BOULDIN, M.G., DONGRÉ, R. and D'ANGELO, J. Proposed Refinement of Superpave High-Temperature Specification Parameter for Performance-Graded Binders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 2018, **1766**(1), 40-47. DOI: 10.3141/1766-06. ISSN 0361-1981. Dostupné z: http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1766-06

[25] SHENOY, A. Refinement of the Superpave Specification Parameter for Performance Grading of Asphalt. *Journal of Transportation Engineering* [online]. 2001, **127**(5), 357-362. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:5(357). ISSN 0733-947X. Dostupné z: http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-947X%282001%29127%3A5%28357%29

[26] SYBILSKI, D. Zero-shear viscosity: phenomenons at measurement, interpretation and relation to permanent deformation. In: *Proceedings of Eurasphalt & Eurobitume Congress*. European Asphalt Pavement Association, Strasbourg, 1996, s. 13.

[27] DELGADILLO, R., CHO, D.W. and BAHIA, H. Nonlinearity of Repeated Creep and Recovery Binder Test and Relationship with Mixture Permanent Deformation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 2018, **1962**(1), 2-11. DOI: 10.1177/0361198106196200101. ISSN 0361-1981. Dostupné z: http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198106196200101

[28] BENEŠOVÁ, L. a J. VALENTIN. Porovnání naměřených hodnot při zkoušce MSCR v závislosti na vybraných vstupních parametrech. In: *Asfaltové vozovky 2017*. České Budějovice, 2017-11-28/2017-11-29. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic, 2017. Asfaltové vozovky. ISBN 978-80-906809-0-6.

[29] GOLALIPOUR, A. Modification of Multiple Stress Creep and Recovery Test Procedure and Usage in Specification (University of Wisconsin – Madison), 2011.

[30] KRIZ, Pavel, Daniel GRANT, Nadjib BOUSSAD, Danielle GAUSSON, Frederique COINTE, Charlotte TOULEMONDE a Ralph SHIRTS. Assessment of performance specification tests for rheologically simple bitumens. In: *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress* [online]. Czech Technical University in Prague, 2016, 2016-06-30. DOI: 10.14311/EE.2016.269. ISBN 9788001059623. Dostupné z: http://guarant.topinfo.cz/ee2016/download/proceedings/data/c269.html

[31] LAUKKANEN, O. et al. Creep-recovery behavior of bituminous binders and its relation to asphalt mixture rutting. *Materials and Structures* [online]. 2015, **48**(12), 4039-4053. DOI: 10.1617/s11527-014-0464-7. ISSN 1359-5997. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1617/s11527-014-0464-7

[32] HUANG, W., TANG, N. and LIU, S. Comparative Evaluation of Dynamic Oscillatory Test and Multiple Stress Creep Recovery Test in Characterizing Polymer Modified Asphalt at Varying Contents. In: *Transportation Research Board 94th Annual Meeting*. Washington DC, United States, 2015, s. 16.

[33] DREESSEN. MSCRT: Performance related test method for rutting prediction of asphalt mixtures from binder rheological characteristics. In: *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Istanbul, 2012, s. 8.

[34] SYBILSKI, Dariusz. Zero-Shear Viscosity of Bituminous Binder and Its Relation to Bituminous Mixture's Rutting Resistance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 1996, **1535**, 15-21. DOI: 10.3141/1535-03. ISSN 0361-1981. Dostupné z: http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/1535-03

[35] CENTENO, M. et al. Assessing Rutting Susceptibility of Five Different Modified Asphalts in Bituminous Mixtures Using Rheology and Wheel Tracking Test. In: *Transportation Research Board 87th Annual Meeting*. Washington DC, United States, 2008, s. 16.

[36] *A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. WASHINGTON, D.C.: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2011. ISBN 978-0-309-15564-9.

[37] *Binder Characterization and Evaluation: Volume 1*. Washington, DC: Strategic Highway Research Program (SHRP), 1994. ISBN 0-309-05809-0.

[38] Permanent deformation rutting classification. *Roadex Network for better rural roads* [online]. [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: https://www.roadex.org/e-learning/lessons/permanent-deformation/permanent-deformation-rutting-classification/

[39] *Katalog poruch netuhých vozovek: Technické podmínky TP 82*. TU Ostrava: Fakulta stavební VŠB. Dostupné také z: http://fast10.vsb.cz/rezac/download/poruchy_netuhych_vozovek.pdf. Přednáška.

[40] HANZÍK, V. Asfaltové vozovky 2007 - vize. In: *Konference asfaltové vozovky 2005* [prezentace]. Praha, 2005

[41] ČSN EN 12597 (657000). *Asfalty a asfaltová pojiva – Terminologie*. Praha, 2014.

[42] *The tenth watch* [online]. The university of Queensland, Australia [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: http://www.thetenthwatch.com/

[43] Asphalt Paves the Way. *American Oil & Gas Historical Society* [online]. Washington, DC: Bruce A. Wells [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: https://aoghs.org/products/asphalt-paves-the-way/

[44] *Binder Characterization and Evaluation: Volume 3: Physical Characterization*. Washington, DC: Strategic Highway Research Program (SHRP), 1994. ISBN 0-309-05767-1.

[45] LEIVA-VILLACORTA, F. et al. Effect of Aging on Rheological, Chemical and Thermodynamic Properties of Asphalt Components. In: *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting.* Washington DC, United States, 2014, s. 16.

[46] PUELLO, Juliana, Natalia AFANASJEVA a Mario ALVAREZ. Zero shear viscosity from oscillation tests on aged and non-aged bitumens. In: *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress* [online]. Czech Technical University in Prague, 2016, 2016-06-30, s.9. DOI: 10.14311/EE.2016.367. ISBN 9788001059623. Dostupné z: http://guarant.topinfo.cz/ee216/download/proceedings/data/c367.html

[47] VIDEO: Slavná asfaltová kapka se utrhla, ale ne sama. *Týden.cz* [online]. EMPRESA MEDIA, 2006, 28.04.2014 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: https://www.tyden.cz/rubriky/veda/priroda/video-slavna-asfaltova-kapka-se-utrhla-ale-ne-sama_305328.html

[48] VALENTIN, V. Trendy asfaltového trhu nejen v České republice. *SILNICE ŽELEZNICE*. 2006, **2006**(3). ISSN 1803-8441.

[49] BUREŠ, P. a kol. *Pozemní komunikace-navrhování a stavba*. FAST VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, 310 s. Projekt inovace programu stavební inženýrství.

[50] READ, J., WHITEOAK, D. and HUNTER, R.N. *The Shell Bitumen handbook*. 5th ed. London: Thomas Telford, 2003. ISBN 072773220x.

[51] Photo: "Tour guide demonstrating the pitch in its liquid form". *Tripadvisor* [online]. United Kingdom [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: https://www.tripadvisor.co.uk/LocationPhotoDirectLink-g147388-d150283-i132972952-La_Brea_Pitch_Lake-Trinidad_Trinidad_and_Tobago.html

[52] Po hladině jezera Pitch Lake se můžete projít. Opravdu. Není v něm totiž voda, ale asfalt. *National Geographic* [online]. 2013 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: http://www.national-geographic.cz/clanky/po-hladine-jezera-pitch-lake-se-muzete-projit-opravdu-neni-v-nem-totiz-voda-ale-asfalt.html

[53] Chemicals. *East Moon Energy* [online]. Calgary, Canada [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: http://www.eastmoonenergy.com/drilling-fluid-additives

[54] Selenizza®. *Selenizza®: Natural Additive Asphaltite* [online]. Albania [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: http://www.selenizza.eu/selenizza.php

[55] KRCHMA, L.C. and GAGLE, D.W. A U.S.A. History of Asphalt Refined from Crude Oil and Its Distribution. In: *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists Proc*, Williamsburg, Virginia, 1974.

[56] History of Asphalt. *NAPA: National Asphalt Pavement Association* [online]. Lanham [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: http://www.asphaltpavement.org/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=268

[57] Pavement History. *Pavement Interactive* [online]. [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-types-and-history/pavement-history

[58] DAVIS, J. Early uses of asphalt. *Asphalt: The magazine of the Asphalt Institute,* [online]. [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: http://asphaltmagazine.com/early-uses-of-asphalt/

[59] VOJÍŘ, J. *Modifikace asfaltových pojiv*. Praha, 2009. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Otakar Vacín.

[60] PĚNČÍK, M. *Pojiva do netuhých vozovek*. Brno, 2013. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Petr Hýzl.

[61] VOLF, T. Unipetrol překvapil dvojnásobnou ztrátou. Zvažuje, že omezí výrobu. *Ekonom* [online]. 2012 [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: https://ekonom.ihned.cz/c1-55228790-unipetrol-prekvapil-dvojnasobnou-ztratou-zvazuje-ze-omezi-vyrobu-v-pardubickem-paramu

[62] BLAŽEK, J. a RÁBL, V. *Základy zpracování a využití ropy*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-619-2.

[63] ROBINSON, Paul R. Petroleum Processing Overview. HSU, Chang S. a Paul R. ROBINSON, ed. *Practical Advances in Petroleum Processing* [online]. New York, NY: Springer New York, 2006, s. 1-78. DOI: 10.1007/978-0-387-25789-1_1. ISBN 978-0-387-25811-9. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-0-387-25789-1_1

[64] LESUEUR, D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2009, **145**(1-2), 42-82. DOI: 10.1016/j.cis.2008.08.011. ISSN 00018686. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001868608001413

[65] Zpracování ropy. *Petroleum* [online]. VŠCHT, 2007 [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: http://www.petroleum.cz/zpracovani/index.aspx

[66] LAUKKANEN, O. *Low-temperature rheology of bitumen and its relationship with chemical and thermal properties*. Helsinki, 2015. Master's thesis. Aalto University. Vedoucí práce Terhi Pellinen.

[67] BUDÍN, J. Zpracování ropy - 1. část - základní zpracování ropy. *OEnergetice* [online]. OM Solutions, 2015 [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/ropa/zpracovani-ropy-1-cast-zakladni-zpracovani-ropy/

[68] STANGL, K., JÄGER A. and LACKNER, R. The Effect of Styrene-Butadiene-Styrene Modification on the Characteristics and Performance of Bitumen. *Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly* [online]. 2007, **138**(4), 301-307. DOI: 10.1007/s00706-007-0614-5. ISSN 0026-9247. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s00706-007-0614-5

[69] OYEKUNLE, L. O. Certain Relationships between Chemical Composition and Properties of Petroleum Asphalts from Different Origin. *Oil & Gas Science and Technology - Revue de l'IFP* [online]. 2006, **61**(3), 433-441. DOI: 10.2516/ogst:2006043a. ISSN 1294-4475. Dostupné z: http://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/10.2516/ogst:2006043a

[70] REDELIUS, P. Bitumen Solubility Model Using Hansen Solubility Parameter. *Energy & Fuels* [online]. 2004, **18**(4), 1087-1092. DOI: 10.1021/ef0400058. ISSN 0887-0624. Dostupné z: http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef0400058

[71] CHRISTENSEN, D. and ANDERSON, D. Rheological evidence concerning the molecular architecture of asphalt cements. In: *Proceedings chemistry of bitumen*. 1991, Vol. 2; pp. 568-595.

[72] REDELIUS, P. Solubility parameters and bitumen. *Fuel* [online]. 2000, **79**(1), 27-35. DOI: 10.1016/S0016-2361(99)00103-9. ISSN 00162361. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236199001039

[73] PFEIFFER, J.P. and SAAL, R.N.J. Asphaltic Bitumen as Colloid System. *The Journal of Physical Chemistry* [online]. 1940, **44**(2), 139-149. DOI: 10.1021/j150398a001. ISSN 0092-7325. Dostupné z: http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/j150398a001

[74] LESUEUR, D. et al. A structure-related model to describe asphalt linear viscoelasticity. *Journal of Rheology* [online]. 1996, **40**(5), 813-836. DOI: 10.1122/1.550764. ISSN 0148-6055. Dostupné z: http://sor.scitation.org/doi/10.1122/1.550764

[75] CORBETT, L.W. Composition of asphalt based on generic fractionation, using solvent deasphaltening, elution-adsorption chromatography, and densimetric characterization. *Analytical Chemistry* [online]. 1969, **41**(4), 576-579. DOI: 10.1021/ac60273a004. ISSN 0003-2700. Dostupné z: http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ac60273a004

[76] ASTM D4124-09(2018), Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018. DOI: 10.1520/D4124-09R18.

[77] HOLLERAN, G a I HOLLERAN. Bitumen chemistry using cheaper sources: an improved method of measurement by TLC-FID and the characterisation of bitumen by rheological and compositional means. In: *ARRB Conference, 24th*. Melbourne , Australia, 2010, s. 33. ISBN 187659263X.

[78] JONES, D.R. and KENNEDY, T.W. The asphalt model: Results of the SHRP Asphalt Research Program. In: *Proceedings of the Conference, Strategic Highway Research Program and Traffic Safety on Two Continents, Part Four*. Gothenburg, Sweden: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), 1991, s. 11. ISSN 0347-6030.

[79] PINK, H.S., MERZ, R.E. and BOSNIACK, D.S. Asphalt Rheology: Experimental Determination of Dynamic Moduli at Low Temperature. In: *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*. 1980, s. 64-94.

[80] BASHA, B.M. Bituminous materials. In: *CE2020: Construction materials* [online]. s. 131 [cit. 2019-02-08]. Dostupné z: https://slideplayer.com/slide/5669797/

[81] VAN POEL, C.D. A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data. *Journal of Applied Chemistry* [online]. 1954, **4**(5), 221-236. DOI: 10.1002/jctb.5010040501. ISSN 00218871. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/jctb.5010040501

[82] PERALTA, Joana, Loic HILLIOU, Hugo M. R. D. SILVA, Ana V. MACHADO a R. Christopher WILLIAMS. Rheological changes in the bitumen caused by heating and interaction with rubber during asphalt–rubber production. *Rheologica Acta* [online]. 2014, **53**(2), 143-157 [cit. 2019-02-06]. DOI: 10.1007/s00397-013-0748-9. ISSN 0035-4511. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s00397-013-0748-9

[83] CUNICO, R.L., SHEU, E.Y. and MULLINS, O.C. Molecular Weight Measurement of UG8 Asphaltene Using APCI Mass Spectroscopy. *Petroleum Science and Technology* [online]. 2004, **22**(7-8), 787-798. DOI: 10.1081/LFT-120038719. ISSN 1091-6466. Dostupné z: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/LFT-120038719

[84] BODUSZYNSKI, M.M. Composition of heavy petroleums. 1. Molecular weight, hydrogen deficiency, and heteroatom concentration as a function of atmospheric equivalent boiling point up to 1400.degree.F (760.degree.C). *Energy & Fuels* [online]. 1987, **1**(1), 2-11. DOI: 10.1021/ef00001a001. ISSN 0887-0624. Dostupné z: http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef00001a001

[85] MORIAN, N.E. *Influence of mixture characteristics on the oxidative aging of asphalt binders*. Reno, 2014. Dissertation. University of Nevada. Vedoucí práce Peter E. Sebaaly.

[86] ROBERTS, F.L. *HOT MIX ASPHALT MATERIALS, MIXTURE DESIGN AND CONSTRUCTION*. 2nd edition. United States: National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, 1996, 603 s.

[87] LIU, M. et al. Oxygen Uptake As Correlated to Carbonyl Growth in Aged Asphalts and Asphalt Corbett Fractions. *Industrial & Engineering Chemistry Research* [online]. 1998, **37**(12), 4669-4674. DOI: 10.1021/ie980450o. ISSN 0888-5885. Dostupné z: http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie980450o

[88] KLOBOUČEK, B. *Živičné vozovky: navrhování, stavba, údržba a rekonstrukce*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988, 30s.

[89] ČSN EN 1426. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. Praha, 2015.

[90] PFEIFFER, J.P.H. and Van Doormaal, P.M. The rheological properties of asphaltic bitumens. *Journal of the Institute of Petroleum.* 1936, **22**, 414–440.

[91] VARAUS, M. *Pozemní komunikace II: Modul 3 Asfaltová pojiva*. Brno: VUT, 2005.

[92] *A Basic Introduction to Rheology*. Worcestershire, UK: Malvern Instruments, 2017, 24 s.

[93] *Asphalt Binder PG Tests - Module F: Participant workbook laboratory manual*. Federal Highway administration.

[94] HILL, A. *Introducing rotational rheology and Kinexus*. Malvern, 2017.

[95] TANNER, R.I. and WALTERS, K. *Rheology: an historical perspective*. New York: Elsevier, 1998. Rheology series, 7. ISBN 0444829458.

[96] VALENTIN, J. *Užitné vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí: charakteristiky, nové zkušební metody, vývojové trendy*. Praha: INPRESS, 2003, 224 s.

[97] HILL, A. *Rheology and its importance to dispersion stability*. Malvern, 2017.

[98] VALENTIN, J. *Reologie asfaltových směsí a pojiv*. Praha, ČVUT, 2011. Přednáška STPK.

[99] Reologie. *ÚSTAV PRO HYDRODYNAMIKU* [online]. Praha: Akademie věd České republiky [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: https://www.ih.cas.cz/vyzkum/reologie

[100] GUNGOR, A.G. and SAĞLIK, A. Evaluation of rutting performance of neat and modified binders using zero shear viscosity. In: *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Istanbul, 2012, s. 11.

[101] ŽALMAN, L. Dynamická viskozita asfaltových pojiv a přísad. In: *Asfaltové vozovky 2011*. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic, 2011, s. 4.

[102] VALENTIN, J. a kol. *Metodická příručka funkčních zkoušek asfaltových pojiv*. Praha, 2015.

[103] *Viskoelastické modely*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, ústav fyziky a materiálového inženýrství, 8 s. Dostupné také z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_09.pdf

[104] YUT, I. and ZOFKA, A. Correlation between rheology and chemical composition of aged polymer-modified asphalts. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, **62**, 109-117. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.043. ISSN 09500618. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814003067

[105] COOKMAN, A.O, FARRAR, M.J. and PLANCHE, J.P. Nonlinear oscillatory shear tests applied to bitumen: analysis and application of large amplitude oscillatory shear (LAOS). In: *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress* [online]. Czech Technical University in Prague, 2016, 2016-06-30, s. 9. DOI: 10.14311/EE.2016.189. ISBN 9788001059623. Dostupné z: http://guarant.topinfo.cz/ee2016/download/proceedings/data/c189.html

[106] ISACSSON, U. and LU, X. Testing and appraisal of polymer modified road bitumens—state of the art. *Materials and Structures* [online]. 1995, **28**(3), 139-159. DOI: 10.1007/BF02473221. ISSN 0025-5432. Dostupné z: http://www.springerlink.com/index/10.1007/BF02473221

[107] ISACSSON, U. and LU, X. Laboratory investigations of polymer modified bitumens. In: *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Publisher: Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 1999, s. 35-63. ISSN 0270-2932.

[108] JONGEPIER, R. et al. Characteristics of the Rheology of Bitumens. In: *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*. 1969, s. 98-122.

[109] DOBSON, G.R. et al. The Dynamic Mechanical Properties of Bitumen. In: *Association of Asphalt Paving Technologists Proc*. 1969, s. 123-139.

[110] CARSWELL, J. and GREEN, P.J. Prediction of rutting resistance in hot rolled asphalt using rheological parameters. *THE ASPHALT YEARBOOK 2000*. INSTITUTE OF ASPHALT TECHNOLOGY, 2000, s. 27-36.

[111] MIRÓ, R.R. et al. Characterisation of bitumen from cohesion, tenacity, rheology and fatigue cracking resistance, In: *4th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Copenhagen: 2008.

[112] ČSN EN 14023 (657220). *Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty*. Praha, 2010.

[113] DE VISSCHER, J. et al. European round robin tests for the Multiple Stress Creep Recovery Test and contribution to the development of the European standard test method. In: *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress* [online]. Czech Technical University in Prague, 2016, 2016-06-30, s. 11. DOI: 10.14311/EE.2016.059. ISBN 9788001059623. Dostupné z: http://guarant.topinfo.cz/ee2016/download/proceedings/data/c59.html

[114] VARAUS, M. a kol. Soubor pokročilých funkčních zkoušek pro asfaltová pojiva, včetně jejich validace. In: *Sborník technických listů CESTI 2013: Příloha č. 3 průběžné zprávy za rok 2013*. Praha, 2013, s. 11-12.

[115] D'ANGELO, J.A. Understanding the superpave performance related binder specification and how it has performed in the real world, 40th International Petroleum Conference, Bratislava, 17-19. 9. 2001.

[116] ČERNÝ, R., PLITZ, J. a MAXA, D. Nové zkušební metody EU pro silniční asfalty. In: *APROCHEM 2007: Odpadové fórum*. Milovy, 2007, s. 6.

[117] ŠVADLÁK, D., ČERNÝ, R. a PLITZ, J. Aplikace nových metod pro zkoušení silničních asfaltů. In: *APROCHEM 2009: Odpadové fórum*. Milovy, 2009, s. 6.

[118] ČERNÝ, R. a ZBUZEK, M. Kvalita asfaltových pojiv hodnocená pomocí reologických parametrů na DSR a BBR. In: *Konference asfaltové vozovky 2009* [CD]. Praha, 2009.

[119] ČSN P CEN/TS 15325. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení viskozity při nulovém smyku v režimu pomalého toku smykovým reometrem (SSR).* Praha, 2008.

[120] DESMAZES, C. et al. A Protocol for Reliable Measurement of Zero-shear-viscosity in Order to Evaluate Anti-rutting Performance of Binders. In: *Proceedings of 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Barcelona, 2000, s. 203-211. ISBN 90-802884-3-8.

[121] ROWE, G., D'ANGELO, J.A. and SHARROCK, M.J. Use of zero shear viscosity as a specification parameter for the high temperature binder specification. In: *2nd International Symposium on Binder Rheology and Pavement Performance*. Texas, 2002, s. 24.

[122] ČSN P CEN/TS 15324. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení ekviviskózní teploty založené na viskozitě při nízkém smyku na dynamickém smykovém reometru v nízkofrekvenčním oscilačním modu*. Praha, 2009.

[123] ČSN EN 14770. *Asfalty a asfaltová pojiva- Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR).* Praha: Český normalizační institut, 2006.

[124] BAHIA, H.U. et al. Development of Binder Specification Parameters Based on Characterization of Damage Behavior. In: *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 70. Florida: Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 2001, s. 442-470. ISSN 0270-2932.

[125] PLANCHE, J.P. et al. Evaluation of fatigue properties of bituminous binders. *Materials and Structures* [online]. 2004, **37**(5), 356-359. DOI: 10.1007/BF02481683. ISSN 1359-5997. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/BF02481683

[126] JOHNSON, C.M., BAHIA, H.U. and WEN, H. Evaluation of Strain-Controlled Asphalt Binder Fatigue Testing in the Dynamic Shear Rheometer. In: *Proceedings of the 4th International SIIV Congress*, Italy, 2007.

[127] ČSN EN 12697-24. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 24: Odolnost vůči únavě.* Praha, 2018.

[128] VAN ROOIJEN, R. et al. Bitumen fatigue performance evaluation - with or without RAP - a real challenge. In: *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress* [online]. Czech Technical University in Prague, 2016, 2016-06-30, s. 12. DOI: 10.14311/EE.2016.055. ISBN 9788001059623. Dostupné z: http://guarant.topinfo.cz/ee2016/download/proceedings/data/c55.html

[129] JOHNSON, C.M., BAHIA, H.U. and WEN, H. Practical Application of Viscoelastic Continuum Damage Theory to Asphalt Binder Fatigue Characterization. In: *Asphalt Paving Technology*. 78. United States: Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 2009, s. 597-638. ISSN 0270-2932.

[130] AASHTO TP 101-12-UL. *Estimating damage tolerance of asphalt binders using the linear amplitude sweep.* American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.

[131] HINTZ, C., et al. Modification and Validation of Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 2011, **2207**(1), 99-106. DOI: 10.3141/2207-13. ISSN 0361-1981. Dostupné z: http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2207-13

[132] ANDRIESCU, A., HESP, S.A.M. and YOUTCHEFF, J.S. Essential and Plastic Works of Ductile Fracture in Asphalt Binders. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 2004, **1875**(1), 1-7. DOI: 10.3141/1875-01. ISSN 0361-1981. Dostupné z: http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1875-01

[133] ČSN EN 14771. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR).* Praha, 2013.

[134] ROWE, G. and ANDERSON, D. *Fracture of Asphalt Binders*. Stockholm, Sweden: Rheobit workshop organized by Asphalt Institute, 2013.

[135] ČSN EN 12697-26. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 26: Tuhost.* Praha, 2012.

[136] DE VISSCHER, J. and VANELSTRAETE, A.. Equiviscous temperature based on Low Shear Viscosity: Evaluation as binder indicator for rutting and critical discussion of the test procedure. LOIZOS, A. et al. *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*. London: CRC Press, 2009, s. 1009-1018. ISBN 978-0-415-55854-9.

[137] VALENTIN, J. a kol. Postupy funkčních zkoušek deformačního chování asfaltových pojiv s různou modifikací či aditivací. In: *Sborník technických listů CESTI 2014: Příloha č. 3 průběžné zprávy za rok 2014*. Praha, 2014, s. 10-13.

[138] ANDERSON, D.A. and KENNEDY, T.W. Development of SHRP binder specification. In: *Asphalt Paving Technology*. 62. United States: Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 1993, s. 481-507. ISSN 0270-2932.

[139] AASHTO M 320-17. *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder.* American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.

[140] BLOW, M.D. Asphalt Binder Basics Specifications, History and Future. In: *North Dakota asphalt conference* [online]. Asphalt Institute, 2016. Dostupné z: https://www.ndltap.org/events/asphalt/downloads/2016_05_AsphaltBinderBasics.pdf

[141] AASHTO M 332-14. *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test*. American Association of State and Highway Transportation Officials 2014.

[142] US State Binder Specifications. *Asphalt Institute* [online]. USA [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: http://www.asphaltinstitute.org/engineering/specification-databases/us-state-binder-specifications/

[143] MORAES, R., SWIERTZ, D and BAHIA, H. Comparison of New Test Methods and New Specifications for Rutting Resistance and Elasticity of Modified Binders. In: *Proceedings of the Sixth-Second Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*. Nova Scotia, 2017, s. 203-223.

[144] WASIUDDIN, N.M. et al. Rheology of asphalt emulsion residues and its relationships to elastic recovery in AASHTO T301. In: *TRB 92nd Annual Meeting Compendium of Papers*. Washington, D.C., 2013, s. 23.

[145] ROWE, G.M. and SHARROCK, M.J. Cracking of asphalt pavements and the development of specifications with rheological measurements. In: *Proceedings of 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress* [online]. Czech Technical University in Prague, 2016, 2016-06-30, s. 7. DOI: 10.14311/EE.2016.215. ISBN 9788001059623. Dostupné z: http://guarant.topinfo.cz/ee2016/download/proceedings/data/c215.html

[146] FIEDLER, J. a kol. Chování pojiv při dlouhodobém a opakovaném zatížení s odlehčením. In: *IDEAS 2009*. Ostrava: Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava, 2009.

[147] BINARD, C. et al. Zero Shear Viscosity of Modified and Unmodified Binders. In: *3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Vienna, 2004, s. 1721-1733. ISBN 90-802884-4-6.

[148] SOENEN,H. et al. Selection of binder performance indicators for asphalt rutting based on triaxial and wheel tracking tests. In: *Asphalt Paving Technology*. 75 United States: Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 2006, s. 165-201. ISSN 0270-2932.

[149] PELLINEN, T. et al. Asphalt Mixture Stiffness Predictive Models. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 2007, (76), 575-625. ISSN 0270-2932. Dostupné také z: http://worldcat.org/issn/02702932

[150] COLE, K.S. and COLE, R.H. Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. *The Journal of Chemical Physics* [online]. 1941, **9**(4), 341-351 [cit. 2019-03-06]. DOI: 10.1063/1.1750906. ISSN 0021-9606. Dostupné z: http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1750906

[151] VAN GURP, M. and PALMEN, J. Time-temperature superposition for polymeric blends. *Rheology Bulletin*. 1998, (67), 5-8.

[152] TRINKLE, S. and FRIEDRICH, Ch. Van Gurp-Palmen-plot: a way to characterize polydispersity of linear polymers. *Rheologica Acta* [online]. 2001, **40**(4), 322-328 [cit. 2019-03-06]. DOI: 10.1007/s003970000137. ISSN 0035-4511. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s003970000137

[153] TEUGELS, W. The Black diagram, only a rheological data presentation? In: *Proceedings of 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress* [online]. Barcelona, 2000, s. 862-872. ISBN: 90-802884-3-8.

[154] DEALY, J. and PLAZEK, D. Time-temperature superposition—a users guide. *Rheology Bulletin.* 2009, **78**(2), 16-31. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/284663363_Time-temperature_superposition-a_users_guide

[155] MEZGER, T.G. *The Rheology Handbook*. 3rd Revised Edition. Germany: Vincent Network, 2011. ISBN 978-3866308640.

[156] WILLIAMS, M.L., LANDEL, R.F. and FERRY, J.D. The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids. *Journal of the American Chemical Society* [online]. 1955, **77**(14), 3701-3707 [cit. 2019-03-07]. DOI: 10.1021/ja01619a008. ISSN 0002-7863. Dostupné z: http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja01619a008

[157] KAELBLE, D.H. *Computer-aided design of polymers and composites*. New York: M. Dekker, 1985. Plastics engineering (Marcel Dekker, Inc.), 7, pp. 145-147. ISBN 9780824772888.

[158] ROWE, G.M. and SHARROCK, M.J. Alternate shift factor relationship for describing the temperature dependency of the visco-elastic behaviour of asphalt materials. In: *TRB 90nd Annual Meeting Compendium of Papers*. Washington, D.C., 2011.

[159] ŽÁK, J. *Reologické modely asfaltových směsí*. Praha, ČVUT, 2012. Přednáška STPK.

[160] HEUKELOM, W. and KLOMP, A.J.G. Dynamic Testing as Means of Controlling Pavement during and After Construction. *Proceedings First International Conference of the Structural Design of Asphalt Pavements.* 1962, **203**(1), 495-510.

[161] BONNAURE, F. et al. New Method of Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist.* 1977, 46, 64-104. ISSN: 0270-2932.

[162] WITCZAK, M.W. and FONSECA, O.A. Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 1996, **1540**(1), 15-23. DOI: 10.1177/0361198196154000103. ISSN 0361-1981. Dostupné z: http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198196154000103

[163] WITCZAK, M.W. and BARI, J. Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist.* 2006, 75, 381-423. ISSN: 0270-2932.

[164] CHRISTENSEN JR.D.W., PELLINEN, T. and BONAQUIST, R.F. Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist.* 2003, 72, 97-121. ISSN: 0270-2932.

[165] AL-KHATEEB, G. Et al. A New Simplistic Model for Dynamic Modulus Predictions of Asphalt Paving Mixtures. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist.* 2006, 75, 1254-1293. ISSN: 0270-2932.

[166] ČSN EN 16659. *Asfalty a asfaltová pojiva - Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test).* Praha, 2016.

[167] BUREŠ, P. a kol. Měření vybraných vlastností asfaltových pojiv a směsí; chování pojiv při dlouhodobém a opakovaném zatížení s odlehčením. In: *IDEAS 2009*. Ostrava: Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava, 2009.

[168] HORAN, B. Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Task Force. SEAUPG Annual Meeting. Georgia, 2011. Dostupné z: http://www.seaupg.org/events--GA11.shtml

[169] D'ANGELO, J. *Development of a performance based binder specification for rutting using creep and recovery testing*. Alberta, Canada, 2009. Ph.D. dissertation. University of Calgary.

[170] ČSN EN 13398. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů.* Praha, 2010.

[171] KOSE, S. Development of a Virtual Test Procedure for Asphalt Concrete (University of Wisconsin – Madison), 2001, PhD Thesis.

[172] STEMPIHAR, J., GUNDLA, A. and UNDERWOOD, B.S. Interpreting Stress Sensitivity in the Multiple Stress Creep and Recovery Test. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 2018, **30**(2). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002153. ISSN 0899-1561. Dostupné z: http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002153

[173] DONGRE, R. and YOUTCHEFF, J. *MSCR issues: Variability in Jnr difference*. Laramie, 2017.

[174] WASAGE, T.L.J., STASTNA, J. and ZANZOTTO, L. Rheological analysis of multi-stress creep recovery (MSCR) test. *International Journal of Pavement Engineering* [online]. 2011, **12**(6), 561-568. DOI: 10.1080/10298436.2011.573557. ISSN 1029-8436. Dostupné z: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10298436.2011.573557

[175] GARDEL, V., PLANCHE, J. and DREESSEN, S. A new performance related test method for rutting prediction. LOIZOS, Andreas, Manfred PARTL, Tom SCARPAS a Imad AL-QADI, ed. *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials* [online]. CRC Press, 2009, 2009-05-14. DOI: 10.1201/9780203092989.ch93. ISBN 978-0-415-55854-9. Dostupné z: http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9780203092989.ch93

[176] BUREŠ, P., FIEDLER, J. a KOMÍNEK Z. Reologické vlastnosti asfaltových pojiv a směsí za středních a vysokých teplot. In: *Konference asfaltové vozovky 2011* [CD]. Praha, 2011.

[177] ROBERTUS, C., VAN ROOIJEN, R. and THIMM, L. A Comparison of Binder Tests that Relate to Asphalt Mixture Deformation. In: *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*. Istanbul, 2012, s. 11.

[178] D'ANGELO, J.A. The Relationship of the MSCR Test to Rutting. *Road Materials and Pavement Design* [online]. 2011, **10**(sup1), 61-80. DOI: 10.1080/14680629.2009.9690236. ISSN 1468-0629. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14680629.2009.9690236

[179] DOMINGOS, M. D. I., FAXINA, A. L. Creep-recovery behavior of modified asphalt binders with similar high-temperature performance grades. In: *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting.* Washington DC, United States, 2014, s. 14.

[180] MOHSENI, A. and AZARI, H. High-Temperature Characterization of Highly Modified Asphalt Binders and Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* [online]. 2014, **2444**(1), 38-51. DOI: 10.3141/2444-05. ISSN 0361-1981. Dostupné z: http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2444-05

[181] AASHTO T 350-14 (2018). *Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. American Association of State and Highway Transportation Officials 2014.

[182] SOENEN, H. et al. The multiple stress creep-recovery test: a detailed analysis of repeatability and reproducibility. *Road Materials and Pavement Design* [online]. 2013, **14**(sup1), 2-11 [cit. 2019-03-08]. DOI: 10.1080/14680629.2013.774742. ISSN 1468-0629. Dostupné z: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14680629.2013.774742

[183] D'ANGELO, J., DONGRE, R. and REINKE, G. Evaluation of repeated creep and recovery test method as an alternative to SHRP+ requirements for polymer modified asphalt binders. In: *Proceedings, Canadian Technical Asphalt Conference.* Canada, 2006, 143-162.

[184] BENEŠOVÁ, L. and VALENTIN, J. Influence of selected test parameters on measured values during the MSCR test. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **236**. DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012016. ISSN 1757-8981. Dostupné z: http://stacks.iop.org/1757-899X/236/i=1/a=012016?key=crossref.1dfdc6c8a7ef2805bb903dc2943425e0

[185] LIU, Y., YOU, Z. *Determining Burgers Model Parameters of Asphalt Materials using Creep-recovery Testing Data.* ASCE Geotechnical Special Publication No. 184. Edited by You Z., Abbas A.A.,. Wang L., Minneapolis, (2008), pp. 26-36.

[186] ČSN 657204. *Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční asfalty*. Praha, 2016.

[187] ČSN 652222-1. *Asfalty a asfaltová pojiva – Silniční modifikované asfalty - Část 1: Polymerem modifikované asfalty*. Praha, 2017.

[188] DAŠEK, O. *Novinky v normách pro asfaltová pojiva a nové metody jejich zkoušení*. Brno, 2017.

[189] HOFKO, B. a kol. Aktuální poznatky k aspektům stárnutí asfaltových pojiv a směsí. In: P*ozemní komunikace 2014*. Praha, 2014, s. 12.

[190] ČSN 12607-1. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 1: Metoda RTFOT*. Praha, 2015.

[191] ČSN 12607-2. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 2: Metoda TFOT.* Praha, 2015.

[192] ČSN 12607-2. *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení odolnosti proti stárnutí vlivem tepla a vzduchu - Část 2: Metoda RFT.* Praha, 2015.

[193] ČSN 14769. *Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV).* Praha, 2012.

[194] BS EN 14769. *Bitumen and bituminous binders. Accelerated long-term ageing conditioning by a Pressure Ageing Vessel (PAV).* British Standards Institution, 2012.

[195] ČSN 15323. *Asfalty a asfaltová pojiva - Urychlené dlouhodobé stárnutí metodou rotujícího válce (RCAT).* Praha, 2007.

[196] RTFOT oven Controls. *ABM* [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: http://www.abmbv.nl/en/catalog/articlegroup/612391/rtfot-oven-controls

[197] *Zkoušení asfaltových pojiv: projekt 1716/2011*. ČVUT Praha: Fakulta stavební. Dostupné také z: https://slideplayer.cz/slide/2864707/. Přednáška.

[198] DAŠEK, O a kol. *Metodika pro hodnocení silničních asfaltů z hlediska náchylnosti k termooxidačnímu stárnutí*. VUT, Brno, 2015.

[199] PLITZ, J. Stárnutí silničních pojiv. In: *Konference asfaltové vozovky 1997*. České Budějovice, 1997, s. 5.

[200] ČSN EN 12697-22. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 22: Zkouška pojíždění kolem.* Praha 2007.

[201] MONDSCHEIN, P. a VALENTIN, J. Teplotní PG mapa ČR. [Specialized Map with Expert Content] 2007.

[202] KAMEL, N.I., Bahia H.U. and Cho, D.-W. Critical Laboratory Evaluation of Asphalt Binders Modified by Refining Processes. In: *Proceedings of the Forty-Ninth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA).* Montreal, Quebec, 2004, s. 57-75.

[203] AZARI, H. Precisioin Estimates of AASHTO TP70, Multiple Stress Creep and Recovery Test of Asphalt binders Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). NCHRP Report 10-87, 2013.

[204] *Technische Lieferbedingungen für Gummimodifizierte Bitumen: TL RmB-StB By*. Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, 2010.

[205] VALENTIN, J., SOUKUPOVÁ, L., VALENTOVÁ, T. a BUREŠ, P. Vliv vybraných přísad pro nízkoteplotní směsi na běžná PMB pojiva používaná u SMA směsi. In *Sborník příspěvků Konference Asfaltové vozovky 2015*. Praha: Sdružení pro výstavbu silnic, 2015, čl. č. 4.4, ISBN 978-80-903925-7-1.

[206] ŽÁK, J. *IRIS Rheo - Hub: Popis programu*. ČVUT, FSv, Katedra silničních staveb, 2012.

[207] SOUKUPOVÁ, L. a VALENTIN, J. *Srovnávací zkoušky asfaltových pojiv: shrnující protokol*. [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb, 2014, 12 s. Zpráva č. 136060/2014.

[208] SOUKUPOVÁ, L. a VALENTIN, J. *Posouzení charakteristik experimentálně navržených CRMB pojiv s příměsí přírodního asfaltu.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb, 2015. Zpráva č. WP1_02_2015.

[209] SOUKUPOVÁ, L. a VALENTIN, J. *Posouzení charakteristik CRMB pojiv s využitím aktivované jemně mleté pryže a nového typu aktivačního katalyzátoru AKH.* [Výzkumná zpráva] Praha: ČVUT, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb, 2015, 17s. Zpráva č. WP1_01_2015.

[210] BAHIA, H. et al. *Evaluation of the MSCR Test for Modified Binder Specification*. In: *Proceedings, Canadian Technical Asphalt Conference.* Canada, 2011.

[211] DREESSEN, S. and PASCAL, J. P. *Seeking for a relevant binder test method for rutting prediction.* ENVIROAD 2009. Poland, Warsaw, 2009.

[212] DE VAUS, D. A. *Analyzing social science data*. Thousand Oaks, Calif.: SAGE, 2002. ISBN 0761959386.

[213] BENEŠOVÁ, L. a VACKOVÁ, P. Korelační vztahy mezi vybranými charakteristikami asfaltové směsi SMA a jejími vstupními materiály. In: *Obnova cestných komunikácií*. XXII. seminár Ivana Poliačka s medzinárodnou účasťou, Jasná, Nízké Tatry, 2017-11-14/2017-11-16. Bratislava: Kongres STUDIO, spol. s r.o., 2017. p. 199-208. ISBN 978-80-89565-32-0.

[214] BENEŠOVÁ, L., VACKOVÁ, P and ŠEDINA, J. Correlation relationships of deformation properties among asphalt mixtures and their input materials. In: *Young Scientist 2017*. Young Scientist 2017, Vysoké Tatry, Štrbské Pleso, 2017-04-20/2017-04-21. Košice: TU Košice Fakulta Stavebná, 2017. ISBN 978-80-553-3136-2.

[215] VACKOVÁ, P. a BENEŠOVÁ, L. Vliv vlastností vstupních materiálů na deformační charakteristiky asfaltových směsí. In: *Juniorstav 2017, 19. odborná konference doktorského studia*. Juniorstav 2017, 19. odborná konference doktorského studia, BRNO, vut, 2017-01-26. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2017. ISBN 978-80-214-5462-0.

[216] MASAD, E. et al. Modeling and Experimental Measurements of Strain Distribution in Asphalt Mixes. *Journal of Transportation Engineering* [online]. 2001, **127**(6), 477-485. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:6(477). ISSN 0733-947X. Dostupné z: http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-947X%282001%29127%3A6%28477%29

[217] DEACON, J.A. et al. Influence of binder loss modulus on the fatigue performance of asphalt concrete pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 1997, (66), 633-685. ISSN 0270-2932.

[218] HARVEY, J. et al. Tests to evaluate the stiffness and permanent deformation characteristics of asphalt binder-aggregate mixes and their use in mix design and analysis. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*. Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 2001, (70), 572-604. ISSN 0270-2932.

[219] MOTAMED, A. et al. Effects of Increased Loading Level and Time on Rutting Resistance of Modified Asphalt Binders and Mixtures. In: *Proceedings of the Fifty-third Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*. Canada, 2008, s. 211-233.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Nejčastější poruchy vozovek: vyjeté koleje, únavové trhliny a nízkoteplotní trhliny [7] 5
Obr. 2: Trvalé deformace: vyjeté koleje (vlevo) a rolety (vpravo) [38, 39] 10
Obr. 3: Experiment padající kapky asfaltového pojiva [43] 12
Obr. 4: Terminologie uhlovodíkových pojiv [41] 13
Obr. 5: Asfaltové jezero Pitch lake – Trinidad [51,52] 14
Obr. 6: Asfaltový důl v Albánii – Selenica [53, 54] 14
Obr. 7: Rafinerie Paramo [61] 16
Obr. 8: Proces výroby ropného asfaltu [49]. 18
Obr. 9: Znázornění struktury asfaltu typu SOL [80] 20
Obr. 10: Znázornění struktury asfaltu typu GEL [80] 21
Obr. 11: Rozdíl v uspořádání micel u asfaltových pojiv typu SOL a GEL (saturáty jsou žlutě a modře, aromáty červeně, pryskyřice růžově, asfaltény fialově a černé tečky symbolizují oxidaci) [82] 21
Obr. 12: Závislost teploty na viskoelastických vlastnostech asfaltového pojiva [91] 22
Obr. 13: Reologické modely viskoelastické látky 24
Obr. 14: Znázornění smykového přetvoření pro ideálně pevnou látku deformující se elasticky [94] 25
Obr. 15: Příklady látek s různou viskozitou [97] 26
Obr. 16: Toková a viskózní křivka [98, 100] 27
Obr. 17: Odpověď ideálně pevné látky (pružiny) při aplikaci a následném odstranění síly 28
Obr. 18: Odpověď ideální tekutiny (tlumiče) na aplikaci a následné odstranění síly 29
Obr. 19: Maxwellův model a základní grafy napětí a přetvoření v čase 30
Obr. 20: Kelvinův model a základní grafy napětí a přetvoření v čase 32
Obr. 21: Burgersův model a základní grafy napětí a přetvoření v čase 33
Obr. 22: Vztah mezi časem a teplotou asfaltového pojiva [96] 33
Obr. 23: Znázornění lineární viskoelasticity [105] 34
Obr. 24: Vliv reologických vlastností asfaltového pojiva na chování asf. vozovky [30] 34
Obr. 25: Základní empirické a reologické zkoušky asfaltových pojiv 36
Obr. 26: Nejčastěji používané reologické zkoušky asfaltových pojiv [96] 40
Obr. 27: Mapa s doporučenými třídami PG v USA [140] 41
Obr. 28: Používané normy pro klasifikaci asfaltových pojiv v USA [142] 42
Obr. 29: PG mapa pro ČR základní (vlevo) a redukovaná (vpravo) z roku 2007 [201] 43
Obr. 30: Rostoucí amplituda napětí (přetvoření) [94] 44
Obr. 31: Rostoucí frekvence [94] 44
Obr. 32: Dynamický smykový reometr a základní dvě měřicí geometrie 45
Obr. 33: Princip měření na DSR [94] 46
Obr. 34: oblast lineární viskoelasticity [94] 46
Obr. 35: Vektorový diagram složek komplexního smykového modulu a vztah mezi nimi 47
Obr. 36: Elastické a viskózní chování 48
Obr. 37: Viskoelastické spektrum 49

Obr. 38: Vztah fázového úhlu a hodnoty upraveného parametru 51
Obr. 39: Oscilační princip namáhání vzorku na DSR [92] 52
Obr. 40: Sinusové napětí a přetvoření 53
Obr. 41: Ukázka zobrazení výsledků oscilační zkoušky pomocí izochron a izoterm 54
Obr. 42: Ukázka zobrazení výsledků pomocí Cole-Cole diagramu a Black diagramu 55
Obr. 43: Black diagram látky, která není termoreologicky jednoduchá 55
Obr. 44: Ukázka zobrazení výsledků pomocí řídící křivky 56
Obr. 45: Ukázka konstrukce řídící křivky 57
Obr. 46: Hranice elasticity 62
Obr. 47: Schéma průběhu zkoušky dotvarování 62
Obr. 48: Typický první cyklus zatížení a zotavení 64
Obr. 49: Složky přetvoření Burgersova modelu a základní grafy napětí a přetvoření v čase 66
Obr. 50: Mikromechanické modelování stárnutí asfaltového pojiva [189] 69
Obr. 51: Nejčastěji používané metody stárnutí – RTFOT, TFOT a PAV [196,197] 70
Obr. 52: Komplexní smykový modul a fázový úhel silničních asfaltů 75
Obr. 53: Parametry indikující náchylnost k tvorbě trvalých deformací silničních asfaltů 76
Obr. 54: Viskoelastická teplota přechodu a odpovídající komplexní smykový modul silničních asfaltů 77
Obr. 55: Komplexní smykový modul a fázový úhel PMB pojiv 78
Obr. 56: Parametry indikující náchylnost k tvorbě trvalých deformací PMB pojiv 79
Obr. 57: Viskoelastická teplota přechodu a odpovídající komplexní smykový modul PMB pojiv 80
Obr. 58: Komplexní smykový modul a fázový úhel všech CRMB pojiv (rozdělen podle základního asfaltu) 82
Obr. 59: Hodnoty G* a δ pro zredukovanou sadu CRMB pojiv (rozděleno podle základního asfaltu) 82
Obr. 60: Hodnoty G* a δ pro zredukovanou sadu CRMB pojiv (rozděleno podle množství CR) 82
Obr. 61: Parametry indikující náchylnost k tvorbě trvalých deformací všech CRMB pojiv 84
Obr. 62: Parametry indikující náchylnost k tvorbě trvalých deformací pro zredukovanou sadu CRMB pojiv (rozděleno podle základního asfaltu) 84
Obr. 63: Parametry indikující náchylnost k tvorbě trvalých deformací pro zredukovanou sadu CRMB pojiv (rozděleno podle množství CR) 85
Obr. 64: Komplexní smykový modul silničních asfaltů po krátkodobém stárnutí 86
Obr. 65: Komplexní smykový modul silničních asfaltů po dlouhodobém stárnutí 87
Obr. 66: Parametr citlivosti vzniku trvalých deformací silničních asfaltů po krátkodobém stárnutí 88
Obr. 67: Parametr citlivosti vzniku trvalých deformací silničních asfaltů po dlouhodobém stárnutí 88
Obr. 68: Vliv stárnutí na komplexní smykový modul silničních asfaltů 50/70 89
Obr. 69: Poměr G* zestárlého k nezestárlému vzorku silničních asfaltů 50/70 89
Obr. 70: Poměr δ zestárlého k nezestárlému vzorku silničních asfaltů 50/70 90

Obr. 71: Viskoelastická teplota přechodu zestárlých silničních asfaltů 50/70 90
Obr. 72: Vliv stárnutí na komplexní smykový modul PMB pojiv 91
Obr. 73: Poměr G* zestárlého k nezestárlému vzorku PMB pojiv 92
Obr. 74: Hodnoty parametru citlivosti zestárlých PMB pojiv 93
Obr. 75: Viskoelastická teplota přechodu zestárlých PMB pojiv 93
Obr. 76: Izochrony komplexního smykového modulu 94
Obr. 77: Izotermy komplexního smykového modulu 94
Obr. 78: Cole-Cole diagram 95
Obr. 79: Black diagram 96
Obr. 80: Řídící křivky komplexního smykového modulu 97
Obr. 81: Řídící křivky fázového úhlu 97
Obr. 82: Krabicový graf komplexního smykového modulu G* 100
Obr. 83: Krabicový graf komplexního fázového úhlu δ 100
Obr. 84: Krabicový graf parametru G*/sin(δ) 100
Obr. 85: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu 101
Obr. 86: Hodnoty parametrů indikujících tvorbu trvalých deformací 101
Obr. 87: Řídící křivka úhlu fázového posunutí při směrné teplotě 20 °C 102
Obr. 88: Hodnoty komplexního smykového modulu po stárnutí 103
Obr. 89: Řídící křivka komplexního smykového modulu pojiva B1 po stárnutí 103
Obr. 90: Řídící křivka fázového úhlu 104
Obr. 91: Hodnoty komplexního smykového modulu po laboratorním stárnutí 105
Obr. 92: Řídící křivka komplexního smykového modulu pojiva PMB 25/55-60 po laboratorním stárnutí 105
Obr. 93: Řídící křivka komplexního smykového modulu 106
Obr. 94: Řídící křivka komplexního smykového modulu při směrné teplotě 20°C 107
Obr. 95: Řídící křivka úhlu fázového posunutí při směrné teplotě 20°C 108
Obr. 96: Řídící křivka komplexního smykového modulu při směrné teplotě 20°C 109
Obr. 97: J_{nr} a %R silničních asfaltů při napětí 0,1 kPa 112
Obr. 98: J_{nr} a %R silničních asfaltů při napětí 3,2 kPa 113
Obr. 99: Parametry citlivosti všech silničních asfaltů 114
Obr. 100: Parametry citlivosti silničních asfaltů zredukované o extrémní (i záporné) hodnoty 114
Obr. 101: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na J_{nr} při napětí 3,2 kPa pro silniční asfalty 115
Obr. 102: Celkové přetvoření silničních asfaltů 115
Obr. 103: Nevratná smyková poddajnost PMB pojiv 117
Obr. 104: Elastické zotavení PMB pojiv 117
Obr. 105: Parametry citlivosti všech PMB pojiv 119
Obr. 106: Upravené a zredukované parametry citlivosti PMB pojiv 119
Obr. 107: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na J_{nr} při napětí 3,2 kPa pro PMB pojiva 120
Obr. 108: Nevratná smyková poddajnost CRMB pojiv (rozdělení podle základního asfaltového pojiva) 122

Obr. 109: Nevratná smyková poddajnost CRMB pojiv (rozdělení podle množství pryžového granulátu) 122
Obr. 110: Elastické zotavení CRMB pojiv (rozdělení podle základního asfaltového pojiva) 123
Obr. 111: Elastické zotavení CRMB pojiv (rozdělení podle množství pryžového granulátu) 123
Obr. 112: Parametry citlivosti PMB pojiv (rozdělení podle množství pryžového granulátu) 124
Obr. 113: Upravené a zredukované parametry citlivosti PMB pojiv (rozdělení podle základního asfaltového pojiva) 125
Obr. 114: Upravené a zredukované parametry citlivosti PMB pojiv (rozdělení podle množství CR) 125
Obr. 115: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na J_{nr} při napětí 3,2 kPa pro CRMB pojiva 126
Obr. 116: Nevratná smyková poddajnost po krátkodobém stárnutí 128
Obr. 117: Elastické zotavení po krátkodobém stárnutí 128
Obr. 118: Nevratná smyková poddajnost silničních asfaltů po dlouhodobém stárnutí 128
Obr. 119: Elastické zotavení silničních asfaltů po dlouhodobém stárnutí 129
Obr. 120: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ u krátkodobě zestárnutých pojiv 130
Obr. 121: Parametr citlivosti R_{diff} u krátkodobě zestárnutých pojiv 130
Obr. 122: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ silničních asfaltů u dlouhodobě zestárnutých pojiv 131
Obr. 123: Parametr citlivosti R_{diff} silničních asfaltů u dlouhodobě zestárnutých pojiv 131
Obr. 124: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na J_{nr} při napětí 3,2 kPa pro krátkodobě zestárnutá pojiva 132
Obr. 125: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na $J_{nr;3,2}$ pro dlouhodobě zestárnutá pojiva 132
Obr. 126: Nevratná smyková poddajnost pro různá stádia stárnutí PMB pojiv 133
Obr. 127: Elastické zotavení pro různá stádia stárnutí PMB pojiv 134
Obr. 128: Parametr citlivosti R_{diff} pro různá stádia stárnutí PMB pojiv 135
Obr. 129: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ pro různá stádia stárnutí PMB pojiv 135
Obr. 130: Parametr citlivosti $J_{nr,slope}$ v závislosti na $J_{nr;3,2}$ pro různá stádia stárnutí PMB pojiv 136
Obr. 131: Nevratná smyková poddajnost 137
Obr. 132: Elastické zotavení 138
Obr. 133: Parametr citlivosti R_{diff} 139
Obr. 134: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ 139
Obr. 135: Nevratná smyková poddajnost 140
Obr. 136: Elastické zotavení 141
Obr. 137: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ 141
Obr. 138: Parametr citlivosti R_{diff} 142
Obr. 139: Nevratná smyková poddajnost 143
Obr. 140: Elastické zotavení 143
Obr. 141: Parametr citlivosti R_{diff} 144
Obr. 142: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ 144

Obr. 143: Elastické zotavení 145
Obr. 144: Nevratná smyková poddajnost 146
Obr. 145: Parametr citlivosti R_{diff} 146
Obr. 146: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ 146
Obr. 147: Závislost velikosti napětí na hodnotě nevratné smykové poddajnosti 147
Obr. 148: Procentuální změna %R mezi geometrií PP25 a PP08 148
Obr. 149: Procentuální změna J_{nr} mezi geometrií PP25 a PP08 149
Obr. 150: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ 149
Obr. 151: Procentuální změna J_{nr} a %R mezi geometrií PP25 a PP08 150
Obr. 152: Parametr citlivosti $J_{nr,diff}$ 150
Obr. 153: Procentuální změna R při výpočtu z posledních 5 cyklů 151
Obr. 154: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů 152
Obr. 155: Hodnoty %R pro každý cyklus 152
Obr. 156: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus 153
Obr. 157: Hodnoty %R pro každý cyklus 153
Obr. 158: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus 154
Obr. 159: Hodnoty %R pro každý cyklus 154
Obr. 160: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus 155
Obr. 161: Procentuální změna R při výpočtu z posledních 5 cyklů 156
Obr. 162: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů 156
Obr. 163: Hodnoty %R pro každý cyklus 157
Obr. 164: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus 157
Obr. 165: Hodnoty %R pro každý cyklus 158
Obr. 166: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus 158
Obr. 167: Procentuální změna R při výpočtu z posledních 5 cyklů 159
Obr. 168: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů 159
Obr. 169: Hodnoty %R pro každý cyklus 160
Obr. 170: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus 160
Obr. 171: Hodnoty %R pro každý cyklus 160
Obr. 172: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus 161
Obr. 173: Procentuální změna %R při výpočtu z posledních 5 cyklů 162
Obr. 174: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů 162
Obr. 175: Hodnoty %R pro každý cyklus 163
Obr. 176: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus 163
Obr. 177: Procentuální změna %R při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 0,1 kPa 164
Obr. 178: Procentuální změna %R při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 3,2 kPa 165
Obr. 179: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 0,1 kPa 165
Obr. 180: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 3,2 kPa 165
Obr. 181: Hodnoty %R pro každý cyklus 166
Obr. 182: Hodnoty J_{nr} pro každý cyklus 166
Obr. 183: Procentuální změna %R při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 3,2 kPa 167
Obr. 184: Procentuální změna J_{nr} při výpočtu z posledních 5 cyklů při napětí 3,2 kPa 168
Obr. 185: Krabicový graf nevratné smykové poddajnosti 169

Obr. 186: Krabicový graf elastického zotavení 169
Obr. 187: Hodnoty elastického zotavení a nevratné smykové poddajnosti 170
Obr. 188: Průběh přetvoření při napětí 0,1 kPa pojivo PMB 25/55-80 173
Obr. 189: Hodnoty elastického zotavení při napětí 3,2 kPa po stárnutí 177
Obr. 190: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti při napětí 3,2 kPa po stárnutí 177
Obr. 191: Hodnoty %R pro všech 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů 178
Obr. 192: Hodnoty J_{nr} pro všech 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů 178
Obr. 193: Procentuální změna elastického zotavení při výpočtu z 10 měření nebo posledních 5 měření 178
Obr. 194: Procentuální změna hodnoty J_{nr} zestárlého a nezestárlého vzorku 179
Obr. 195: Hodnoty elastického zotavení při napětí 3,2 kPa s geometrií PP25 180
Obr. 196: Hodnoty elastického zotavení při napětí 3,2 kPa s geometrií DSR u zestárlých pojiv PP08 180
Obr. 197: Procentuální změna hodnoty J_{nr} zestárlého a nezestárlého vzorku s geometrií DSR PP25 181
Obr. 198: Procentuální změna hodnoty J_{nr} zestárlého a nezestárlého vzorku s geometrií DSR PP08 181
Obr. 199: Hodnoty elastického zotavení 182
Obr. 200: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti 182
Obr. 201: Změna J_{nr} při výpočtu z 10 měření nebo posledních 5 měření 183
Obr. 202: Hodnoty elastického zotavení 184
Obr. 203: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti 184
Obr. 204: Hodnoty elastického zotavení při uvažování všech 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů 185
Obr. 205: Změna elastického zotavení při výpočtu z 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů 185
Obr. 206: Hodnoty elastického zotavení 186
Obr. 207: Hodnoty nevratné smykové poddajnosti 186
Obr. 208: Hodnoty J_{nr} při uvažování všech 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů 187
Obr. 209: Změna J_{nr} při výpočtu z 10 cyklů nebo pouze posledních 5 cyklů 187
Obr. 210: Korelační vztah mezi δ a %R 188
Obr. 211: Korelace mezi bodem měknutí a %R 188
Obr. 212: Korelace mezi bodem měknutí a δ 189
Obr. 213: Závislost penetrace na J_{nr} 3,2 kPa a T_{VET} 189
Obr. 214: Lineární závislost G*/sin(δ) na G* a δ 189
Obr. 215: Mocninná závislost G*/sin(δ) na G* a δ 189
Obr. 216: Lineární závislost vratné duktility na δ a %R 3,2 kPa 190
Obr. 217: Závislost vratné duktility na δ a %R 3,2 kPa 190

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Limitní hodnoty pro stanovení PG 41
Tab. 2: Požadované hodnoty $J_{nr;3,2}$ a $J_{nr,diff}$ pro jednotlivé stupně zatížení dle AASHTO M 332-14 [141] 61
Tab. 3: Statistické údaje silničních asfaltů – G* (T = 60 °C) 74
Tab. 4: Statistické údaje silničních asfaltů – δ (T = 60 °C) 74
Tab. 5: Statistické údaje silničních asfaltů – G*/sin(δ) a G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} (T = 60 °C) 76
Tab. 6: Statistické údaje silničních asfaltů – T_{VET} a G^*_{VET} 77
Tab. 7: Statistické údaje pro PMB – G* (T = 60 °C) 78
Tab. 8: Statistické údaje pro PMB – δ (T = 60 °C) 78
Tab. 9: Statistické údaje pro PMB – G*/sin(δ) a G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} (T = 60 °C) 79
Tab. 10: Statistické údaje pro PMB – T_{VET} a G^*_{VET} 79
Tab. 11: Statistické údaje CRMB pojiv – G* (T = 60 °C) 80
Tab. 12: Statistické údaje CRMB pojiv – δ (T = 60 °C) 81
Tab. 13: Statistické údaje CRMB pojiv – G*/sin(δ) a G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} (T = 60 °C) 83
Tab. 14: Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí – G* (T = 60 °C) 86
Tab. 15: Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí – δ (T = 60 °C) 86
Tab. 16: Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí – G*/sin(δ) (T = 60 °C) 87
Tab. 17: Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí – G* (T = 60 °C) 91
Tab. 18: Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí – δ (T = 60 °C) 91
Tab. 19: Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí – G*/sin(δ) (T = 60 °C) 92
Tab. 20: Návrh limitních hodnot oscilační zkoušky FS (T = 60 °C) 98
Tab. 21: Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep (T = 60 °C) 102
Tab. 22: Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep (T = 60 °C) 104
Tab. 23: Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep po stárnutí metodou RTFOT (T = 60 °C) 104
Tab. 24: Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep (T = 60 °C) 106
Tab. 25: Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep (T = 60 °C) 107
Tab. 26: Výsledné hodnoty zkoušky Frequency Sweep (T = 60 °C) 108
Tab. 27: Statistické údaje silničních asfaltů – J_{nr} (T = 60 °C) 111
Tab. 28: Statistické údaje silničních asfaltů – %R (T = 60 °C) 111
Tab. 29: Statistické údaje silničních asfaltů – parametry citlivosti (T = 60 °C) 113
Tab. 30: Statistické údaje pro PMB – J_{nr} (T = 60 °C) 116
Tab. 31: Statistické údaje pro PMB – %R (T = 60 °C) 116
Tab. 32: Statistické údaje pro PMB – parametry citlivosti (T = 60 °C) 118
Tab. 33: Statistické údaje CRMB pojiv – J_{nr} (T = 60 °C) 120
Tab. 34: Statistické údaje pro CRMB – %R (T = 60 °C) 121
Tab. 35: Statistické údaje pro CRMB – parametry citlivosti (T = 60 °C) 123
Tab. 36: Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí při napětí 3,2 kPa – J_{nr} (T = 60 °C) 127

Tab. 37: Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí při napětí 3,2 kPa – %R (T = 60 °C) 127
Tab. 38: Statistické údaje silničních asfaltů po stárnutí – parametry citlivosti (T = 60 °C) 129
Tab. 39: Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí při napětí 3,2 kPa – J_{nr} (T = 60 °C) 132
Tab. 40: Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí při napětí 3,2 kPa – %R (T = 60 °C) 133
Tab. 41: Statistické údaje pro pojiva PMB po stárnutí – parametry citlivosti (T = 60 °C) 134
Tab. 42: Vypočítané hodnoty %R, J_{nr} a charakteristiky citlivosti 137
Tab. 43: Vypočítané hodnoty %R, J_{nr} a charakteristiky citlivosti (T = 60 °C) 140
Tab. 44: Vypočítané hodnoty %R, J_{nr} a charakteristiky citlivosti (T = 60 °C) 142
Tab. 45: Vypočítané hodnoty %R, J_{nr} a charakteristiky citlivosti (T = 60 °C) 144
Tab. 46: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} (T = 60 °C) 148
Tab. 47: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} (T = 60 °C) 149
Tab. 48: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly 151
Tab. 49: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly 155
Tab. 50: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly 158
Tab. 51: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly 161
Tab. 52: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly 163
Tab. 53: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} z posledních 5 cyklů a procentuální změna v porovnání s 10 cykly 167
Tab. 54: Návrh limitních hodnot zkoušky MSCR 168
Tab. 55: Maximální změny mezi výpočtem ze všech 10 cyklů nebo posledních 5 cyklů 172
Tab. 56: Porovnání parametrů citlivosti 175
Tab. 57: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} pro napětí 0,1 kPa po stárnutí 176
Tab. 58: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} pro napětí 3,2 kPa po stárnutí 176
Tab. 59: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} pro napětí 3,2 kPa po stárnutí s geometrií PP25 179
Tab. 60: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} 182
Tab. 61: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} 183
Tab. 62: Vypočítané hodnoty %R a J_{nr} 186
Tab. 63: Korelační koeficient jednotlivých charakteristik (část 1) 248
Tab. 64: Korelační koeficient jednotlivých charakteristik (část 2) 249

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta stavební

Katedra silničních staveb

PŘÍLOHY

PŘÍLOHA A

Witczakův model (1999)

$$\log_{10}|E^*| = -1{,}249937 + 0{,}029232P_{200} - 0{,}001767(P_{200})^2 - 0{,}002841P_4 - 0{,}058097V_a - 0{,}0802208\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a}\right) + \frac{3{,}871977 - 0{,}0021P_4 + 0{,}003958P_{3/8} - 0{,}00017P\left(P_{3/8}\right)^2 + 0{,}005470P_{3/4}}{1+e^{(-0{,}603313-0{,}31335\log f-0{,}39353\log\eta)}}$$

Kde: |E*|…komplexní modul tuhosti asfaltové směsi [Pa]
η…viskozita asfaltového pojiva [Pa.s]
f…zatěžovací frekvence [Hz]
V_a…mezerovitost asfaltové směsi [%]
V_{beff}…množství asfaltového pojiva [%]
$P_{3/4}$…množství kameniva na sítě 19 mm [%]
$P_{3/8}$…množství kameniva na sítě 9,5 mm [%]
P_4… množství kameniva na sítě 4,75 mm [%]
P_{200}…propady kameniva sítem 0,075 mm [%]

Modifikovaný Witczakův model (2006)

$$\log_{10}|E^*| = -0{,}349 + 0{,}754(|G^*|^{-0.0052})\left[6{,}65 - 0{,}032P_{200} + 0{,}0027(P_{200})^2 + 0{,}011P_4 - 0{,}0001(P_4)^2 + 0{,}006P_{3/8} - 0{,}00014\left(P_{3/8}\right)^2 - 0{,}08V_a - 1{,}06\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a}\right)\right] + \frac{2{,}558 + 0{,}032V_a + 0{,}713\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a}\right) + 0{,}0124P_{3/8} - 0{,}0001\left(P_{3/8}\right)^2 - 0{,}0098P_{3/4}}{1+e^{(-0{,}7814-0{,}5785log|G^*|+0{,}8834log\delta)}}$$

Kde: |E*|…komplexní modul tuhosti asfaltové směsi [Pa]
|G*|…komplexní smykový modul asfaltového pojiva [Pa]
δ…fázový úhel asfaltového pojiva [rad]
V_a…mezerovitost asfaltové směsi [%]
V_{beff}…množství asfaltového pojiva [%]

$P_{3/4}$…množství kameniva na sítě 19 mm [%]
$P_{3/8}$…množství kameniva na sítě 9,5 mm [%]
P_4… množství kameniva na sítě 4,75 mm [%]
P_{200}…propady kameniva sítem 0,075 mm [%]

Hirschův model

$$|E^*| = \frac{\left(20 + \frac{VFA.3|G^*|}{VMA}\right)^{0,58}}{650 + \left(\frac{VFA.3|G^*|}{VMA}\right)^{0,58}}\left[4200000\left(1 - \frac{VMA}{100}\right) + 3|G^*|\left(\frac{VFA.VMA}{10000}\right)\right] + \left(1 - \frac{\left(20 + \frac{VFA.3|G^*|}{VMA}\right)^{0,58}}{650 + \left(\frac{VFA.3|G^*|}{VMA}\right)^{0,58}}\right)\left(\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4200000} + \frac{VMA}{3VFA|G^*|}\right)^{-1}$$

Kde: VMA…mezerovitost kameniva [%]
VFA…dutiny vyplněné asfaltovým pojivem [%]
|G*|…komplexní smykový modul asaltového pojiva [Pa]

Al-Khateeb model

$$|E^*| = 3|G^*|\left(\frac{100 - VMA}{100}\right)\left[\frac{\left(90 + 10000\frac{|G^*|}{VMA}\right)^{0,66}}{1100 + \left(900\frac{|G^*|}{VMA}\right)^{0,66}}\right]$$

Kde: |G*|…komplexní smykový modul asfaltového pojiva [Pa]
VMA…mezerovitost kameniva [%]

PŘÍLOHA B

Silniční asfalty

Označení	Číslo	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin [kPa]	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} [kPa]	T_{VET} [°C]	G^*_{VET} [kPa]
20/30_A	1	27,8	75,6	28,7		32,4	1357,0
20/30_B	2	33,8	69,1	36,2	57,3	32,8	959,0
20/30_C	3	30,9	75,1	32,0	42,6	32,3	1388,0
20/30_D	4	45,6	73,6	47,5	65,8	33,9	1270,0
20/30_A + 2%_a	5	24,1	74,4	25,0	33,9	32,2	1200,0
20/30_A + 3%_a	6	30,7	72,5	32,2	45,9	37,4	893,0
20/30_A + 3%_b	7	23,3	74,2	24,2	33,1	31,3	1286,0
20/30_A + 4%_b	8	19,1	74,3	19,8	26,9	31,5	1105,0
20/30_C + 3%_c	9	36,8	73,3	38,4	53,5	34,8	1209,0
20/30_D + 1%_d	10	6,0	81,7	6,0	7,0	30,8	1345,0

20/30_D + 3%_d	11	8,7	78,5	8,9	11,0	31,9	1171,0
20/30_D + 5%_d	12	12,4	77,2	12,7	16,2	34,3	946,0
20/30_D + 1%_e	13	35,7	77,2	36,6	46,5	31,2	1620,0
20/30_D + 3%_e	14	22,8	76,6	23,4	30,1	30,8	1373,0
20/30_D + 5%_e	15	12,7	77,9	13,0	16,2	30,6	1328,0
20/30_D + 2%_f	16	20,6	77,0	21,1	27,0		
20/30_D + 3%_f	17	17,0	77,9	17,4	21,7	28,8	1177,0
20/30_D + 5%_f	18	6,5	81,8	6,6	7,6	27,9	1039,0
20/30_E + 3%_d	19	21,7	74,9	22,4	30,0	32,6	1250,0
20/30_F + 1%_g	20	21,2	66,8	23,1	39,8	30,5	779,0
20/30_F	21	11,4	76,8	11,7	15,0	28,6	824,0
20/30_F + 2%_h	22	14,9	75,0	15,4	20,6	29,9	885,0
50/70_A + 0,5%_g	23	7,7	78,4	7,8	9,7		
50/70_B + 0,5%_g	24	6,2	80	6,3	7,6		
50/70_A + 1%_g	25	5,6	76,1	5,8	7,5		
50/70_B + 1%_g	26	13,6	74,9	14,1	18,9	30,2	783,0
50/70_C + 1%_g	27	17,5	70,6	18,5	27,9	30,6	749,0
50/70_D + 1%_g	28	6,4	78,3	6,5	8,1	26,5	853,0
50/70_A + 0,3%_i	29	7,6	83,7	7,7	8,6		
50/70_B + 0,3%_i	30	10,8	82,7	10,9	12,4		
50/70_A + 0,3%_j	31	3,2	86,5	3,2	3,4		
50/70_B + 0,3%_j	32	3,8	86	3,8	4,1		
50/70_A + 0,3%_k	33	5,2	80,7	5,3	6,2		
50/70_B + 0,3%_k	34	2,7	83,3	2,8	3,1		
50/70_A + 0,3%_l	35	2,8	86,8	2,8	3,0		
50/70_B + 0,3%_l	36	2,8	86,8	2,8	2,9		
50/70_A + 0,3%_m	37	3,4	86,4	3,4	3,6		
50/70_B + 0,3%_m	38	2,6	87,1	2,6	2,8		
50/70_C + 0,3%_m	39	6,4	83,5	6,5	7,3		
50/70_A + 0,3_n	40	3,5	86,3	3,5	3,7		
50/70_B + 0,3_n	41	12,2	82,7	12,3	14,0		
50/70_A + 0,5%_o	42	3,4	85	3,4	3,7		
50/70_B + 0,5%_o	43	4,3	85,7	4,3	4,6		
50/70_E	44						
50/70_F	45	3,9	85,9	3,9	4,2	24,2	1250,8
50/70_A	46	6,5	84,5	6,5	7,1		
50/70_B	47	20,4	75,0	21,2	28,3		
50/70_C	48	5,0	85,7	5,1	5,4		
50/70_G	49	3,3	86,5	3,3	3,5		
50/70_H	50	2,4	87,1	2,4	2,5	20,0*	
50/70 _I	51	4,6	83,2	4,6	5,2	23,0	1205,0
50/70_J	52	5,1	83,4	5,1	5,8	24,2	1014,0
50/70_K	53	2,6	86,8	2,6	2,7	20,0*	
50/70_L	54	5,1	83,4	5,1	5,8	24,2	1016,0
50/70_M	55	5,9	84,6	5,9	6,5	25,8	1153,0
50/70_N	56	3,7	83,0	3,7	4,2	20,0*	
50/70_O	57	4,5	85,3	4,6	4,9	25,8	1192,0
50/70_P	58	2,7	83,9	2,7	3,0	20,0*	
50/70_Q	59	2,4	87,1	2,4	2,5	20,0*	
50/70_R	60	3,9	85,9	3,9	4,2	24,2	1274,0
50/70_S	61	1,1	88,0	1,1	1,1		
50/70_T + 2%_h	62	31,5	64,7	34,8	66,1	32,7	806,5
50/70_A + 3%_h	63	7,0	84,7	7,0	7,7		
50/70_B + 3%_h	64	7,8	84,5	7,8	8,6	26,0	1471,0

50/70_C + 3%_h	65	18,3	75,4	18,9	25,0	33,3	817,0
50/70_K + 3%_f	66	2,0	87,3	2,0	2,1	20,0*	
50/70_D + 3%_c	67	5,6	82,4	5,7	6,5	26,2	1012,0
50/70_Q + 3%_p	68	7,0	76,4	7,2	9,3	27,4	1076,0
50/70_Q + 2%_d	69	2,3	86,5	2,3	2,4	27,3	925,0
50/70_Q + 3%_d	70	2,0	84,7	2,0	2,2	25,7	992,0
50/70_Q + 1,5%_d + 1,5%_f	71	1,5	87,7	1,5	1,6	20,0*	
50/70_Q + 2%_q	72	2,2	84,8	2,2	2,4	20,0*	
50/70_Q + 3%_q	73	2,0	84,9	2,0	2,2	21,7	1016,0
50/70_Q + 2%_r	74	3,1	82,0	3,1	3,6	27,0	709,0
50/70_Q + 3%_r	75	3,4	81,6	3,4	4,0	27,8	728,0
50/70_Q + 2%_r + 1%_f	76	3,1	82,0	3,1	3,6	26,9	692,0
50/70_A + 0,75%_s	77	6,8	81,3	6,9	8,0		
50/70_B + 0,75%_s	78	9,8	79,6	10,0	12,1	27,8	1021,0
50/70_K + 0,08 %_t	79	3,0	86,3	3,0	3,2	20,0*	
50/70_K + 0,12 %_t	80	3,1	86,2	3,1	3,3	20,0*	
50/70_R + 0,1%_t	81	3,9	85,9	3,9	4,1	22,5	1536,0
50/70_U	82	3,2	86,7	3,2	3,4	20,0*	
50/70_V	83	4,9	81,3	4,9	5,8	25,6	777,0
50/70_W	84	3,0	86,5	3,0	3,2	20,0*	
50/70_K + 2%_f	85	2,2	87,1	2,2	2,3	20,0*	
50/70_K + 3%_h	86	4,3	84,9	4,3	4,7	23,8	1345,0
50/70_K + 1%_s	87	3,0	86,3	3,0	3,2	20,0*	
50/70_X	88	3,7	85,9	3,7	4,0		
50/70_Y	89	1,1	88,0	1,1	1,1		
50/70_Z	90	3,9	86,0	3,9	4,2		
50/70_AA	91	3,1	86,7	3,1	3,3		
50/70_BB	92	6,6	83,1	6,7	7,5	27,0	1030,0
50/70_CC	93	8,3	82,1	8,4	9,7	27,6	1169,0
50/70_DD	94	6,9	83,1	6,9	7,8	27,3	1145,0
50/70_EE	95	6,0	83,3	6,1	6,8	26,5	1111,0
50/70_FF	96	4,5	83,9	4,5	5,0	24,1	1177,0
50/70_GG	97	3,9	84,4	3,9	4,3	20,0*	
70/100_A + 0,5%_g	98	5,0	84,3	5,0	5,6	25,0	1120,8
70/100_A + 1,0%_g	99	6,0	81,3	6,0	7,1	26,4	963,5
70/100_A + 1,5%_g	100	11,5	74,2	12,0	16,3	27,7	821,8
70/100_B	101	2,5	88,1	2,5	2,6	20,0*	
70/100_C	102	2,4	88,2	2,5	2,5	21,5	1694,7
70/100_D	103	4,0	87,0	4,0	4,2	23,9	1278,8
70/100_E	104	2,5	88,2	2,5	2,5	21,5	1702,0
70/100_F + 2%_f	105	1,47	89,0	1,47	1,5		
70/100_G + 2%_f	106	1,6	88,7	1,6	1,7	20,0*	
70/100_G + 3%_f	107	1,6	88,5	1,6	1,7	20,0*	
70/100_G + 3%_h	108	3,6	86,1	3,7	3,9	26,0	1255,0
70/100_G + 0,08%_t	109	2,4	88,0	2,4	2,5	20,0*	
70/100_G + 0,12%_t	110	2,2	88,4	2,2	2,3	20,0*	
70/100_G + 0,1%_u	111	4,1	86,6	4,1	4,4	26,2	1047,2
70/100_G + 0,2%_u	112	3,6	86,7	3,6	3,9	26,0	1056,2
70/100_H + 0,1%_t	113	3,2	86,9	3,2	3,4		
70/100_I + 0,1%_t	114	7,3	85,1	7,3	8,0		
70/100_J + 0,1%_t	115	6,1	85,1	6,2	6,7		
70/100_K + 0,1%_t	116	4,8	85,6	4,8	5,2		
70/100_H + 0,3%_t	117	4,1	86,3	4,1	4,4		
70/100_I + 0,3%_t	118	4,9	85,9	4,9	5,3		

70/100_J + 0,3%_t	119	4,7	85,2	4,8	5,2	
70/100_H + 1%_s	120	3,7	86,6	3,7	3,9	
70/100_I + 1%_s	121	4,0	86,7	4,0	4,2	
70/100_L	122	3,7	83,4	3,7	4,2	20,0*
70/100_M	123	3,8	87,1	3,8	4,0	
70/100_N	124	0,6	89,1	0,6	0,6	20,0*
70/100_O	125	0,5				20,0*
70/100_P	126	1,8	87,7	1,8	1,8	20,0*
70/100_Q	127	2,0	87,3	2,0	2,1	20,0*
70/100_R	128	1,51	87,6	1,51	1,6	20,0*

*Zkouška FS byla měřena v teplotním intervalu od 60 °C do 20 °C, ale teplota T_{VET} je nižší, než 20 °C

Polymerem modifikované asfalty (PMB)

Označení	Číslo	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin [kPa]	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} [kPa]	T_{VET} [°C]	G^*_{VET} [kPa]
10/40-65_A	1	31,4	67,3	34,0	57,5	30,8	1376,0
50/70_P + 3% SBS_a	2	17,4	67,2	18,8	31,9	30,5	802,0
50/70_P + 3% SBS_b	3	16,8	68,8	18,0	28,8	29,9	812,0
25/55-55_A	4	9,5	71,1	10,0	14,8	26,4	886,0
25/55-55_B	5	13,4	66,6	14,6	25,3	27,5	848,0
25/55_A + 0,1%_t	6	8,6	70,7	9,1	13,6	25,8	918,0
25/55_A + 0,5%_v	7	8,9	70,6	9,4	14,2	26,6	845,0
25/55_A + 0,5%_w	8	9,9	70,0	10,5	16,1	26,9	840,0
25/55_A + 0,5%_x	9	8,8	71,2	9,3	13,8	26,8	845,0
25/55_B + 0,1%_t	10	8,4	68,1	9,1	14,8	25,4	892,0
25/55_B + 0,5%_v	11	9,1	68,1	9,8	16,0	26,5	822,0
25/55_B + 0,5%_w	12	10,4	68,9	11,1	17,6	26,7	863,0
25/55_B + 0,5%_x	13	8,9	68,3	9,5	15,5	26,7	835,0
25/55_A + 3%_h	14	29,8	64,8	32,9	62,2	32,4	1026,0
25/55_A + 2%_f	15	10,2	71,4	10,8	15,9	26,3	958,0
25/55_B + 3%_h	16	14,8	65,8	16,2	29,2	28,7	860,0
25/55_B + 2%_f	17	7,3	68,6	7,9	12,6	23,1	993,0
25/55-55_C	18	10,0	69,0	10,7	17,0	27,5	863,0
25/55-55_D	19	9,4	62,8	10,5	22,2	26,1	1013,0
25/55-55_E	20	11,0	69,4	11,7	18,3	27,1	838,0
25/55-55_F	21	10,1	70,5	10,8	16,3	26,8	747,0
25/55-55_G	22	9,2	66,8	10,0	17,2	24,3	1045,0
25/55-55_H	23	9,3	71,5	9,8	14,3	26,6	854,0
25/55-55_I	24	7,4	69,4	7,9	12,4	24,8	986,0
25/55-60_A	25	9,4	65,8	10,4	18,6	25,3	1015,0
25/55-60_B	26	9,2	66,3	10,1	17,7	26,9	940,0
25/55-60_C	27	9,8	67,7	10,6	17,6	26,3	865,0
25/55-65_A	28	19,0	67,0	20,6	35,3	28,6	1065,0
25/55-65_B	29	17,9	66,0	19,6	34,9	28,5	968,0
25/55-80_A	30	12,0	60,3	13,8	34,8	26,2	466,0
40/100-65_A	31	9,4	56,4	11,2	46,0	20,0*	
40/100-65_B	32	9,3	66,7	10,1	17,5	25,5	776,0
40/80-85_A	33	7,8	61,1	9,0	21,2	20,0*	
40/80-85_A + 1%_y	34	9,2	60,4	10,6	26,5	24,4	968,0
45/80-55_A	35	9,5	72,4	9,9	14,2	21,0	1329,0
45/80-65_A	36	10,7	57,7	12,7	42,3	25,9	695,0
45/80-75_A	37	8,7	56,4	10,5	42,9	20,0*	

45/80-75_B	38	7,9	59,4	9,2	25,1	21,7	914,0
50/70_P + 5%_y	39	8,5	76,4	8,7	11,3	29,2	851,0
50/70_P + 6%_y	40	9,3	75,8	9,6	12,6	29,3	917,0

*Zkouška FS byla měřena v teplotním intervalu od 60 °C do 20 °C, ale teplota T_{VET} je nižší, než 20 °C

Pojiva modifikovaná pryžovým granulátem (CRMB)

Označení	Číslo	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin [kPa]	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} [kPa]	T_{VET} [°C]	G^*_{VET} [kPa]
20/30_A + 15% CR_yy		104	49,7	136,2	-941,5	42,4	596,0
20/30_A + 15% CR_yy + 2%_a		131	43,8	188,7	-256,2	20,0*	
20/30_A + 15% CR_yy + 2%_b		121	43,6	175,5	-230,5	20,0*	
20/30_A + 15% CR_yy + 2%_d		113	44,0	162,8	-228,5	20,0*	
50/70_JJ + 20% CR_q		332	22,6	864,9	-63,2		
50/70_JJ + 20% CR_q2		149	53,1	186,4	2420,1	41,9	627,5
50/70_JJ + 12% CR_q2		300	22,0	803,0	-53,3		
50/70_JJ + 20% CR_q (60min)		148	43,1	216,9	-262,8		
50/70_AA + 15% CR_nn + 3% ff		81,2	49,8	106,2	-779,4		
50/70_X + 15% CR_vv		55,2	49,5	72,6	-450,5		
70/100_B + 3% CR_a + 7,5%_z	1	5,4	85,1	5,4	5,9	26,3	1223,0
70/100_B + 3% CR_b + 7,5%_z	2	5,4	84,5	5,5	6,0	26,0	1247,5
70/100_B + 4% CR_b + 6%_z	3	4,8	84,8	4,8	5,3	25,5	1265,0
50/70_F + 5% CR_c	4	7,5	78,9	7,7	9,4	27,2	881,0
50/70_F + 5% CR_c + 0,5%_g	5	13,5	71,7	14,2	20,7	28,5	899,3
50/70_F + 5% CR_d	6	6,8	79,4	6,9	8,4	28,0	769,5
50/70_F + 5% CR_d + 5%_z	7	33,0	65,0	36,4	68,0	36,3	603,0
70/100_C + 5% CR_e	8	4,7	82,0	4,7	5,5	24,6	916,5
70/100_C + 5% CR_f	9	1,6	88,0	1,6	1,6	20,0*	
70/100_C + 5% CR_f + 0,5%_g	10	1,8	87,7	1,8	1,9	20,0*	
70/100_B + 5% CR_g + 5%_z	11	3,7	82,4	3,7	4,3	22,6	1535,0
50/70_F + 7% CR_d + 0,7%_g	12	8,6	75,4	8,8	11,7	27,7	792,0
50/70_F + 7% CR_h	13	28,3	64,1	31,5	61,5	31,9	1095,5
50/70_HH + 8% CR_i	14	4,4	82,0	4,4	5,1		
50/70_II + 8% CR_i	15	3,0	85,0	3,0	3,3		
50/70_II + 8% CR_j	16	4,8	78,0	4,9	6,1		
50/70_II + 8% CR_k	17	2,2	82,0	2,2	2,6		
50/70_W + 10% CR_l + 2,5%_aa	18	7,8	76,9	8,0	10,2	22,4	1011,0
50/70_W + 10% CR_m	19	5,6	76,1	5,7	7,5	26,3	709,5
50/70_F + 10% CR_d	20	43,7	57,4	51,9	181,4	38,6	491,0
50/70_F + 10% CR_d + 0,5%_g	21	42,5	57,0	50,7	188,3	39,5	458,7
50/70_F + 10% CR_d + 0,1%_u	22	10,3	79,3	10,5	12,8	28,8	1107,5
50/70_F + 10% CR_n	23	42,7	63,5	47,7	96,4	34,1	981,5
50/70_F + 10% CR_f	24	4,2	81,5	4,3	5,0	24,6	977,8
70/100_C + 10% CR_e	25	4,9	80,2	5,0	5,9	22,8	1201,0
70/100_C + 10% CR_e + 0,5%_g	26	6,2	77,0	6,4	8,1	24,9	966,5
70/100_C + 10% CR_o	27	5,0	79,1	5,1	6,2	23,5	1049,6
70/100_C + 10% CR_o + 0,5%_g	28	8,4	73,9	8,7	12,0	26,9	723,5
70/100_C + 10% CR_o + 1%_g	29	11,2	68,4	12,0	19,5	26,8	702,3
70/100_C + 10% CR_o + 0,1%_u	30	5,2	74,7	5,3	7,2	22,5	1139,7
50/70_HH + 10% CR_i	31	2,5	82,0	2,5	2,9		
50/70_HH + 10% CR_i + 1%_g	32	9,0	66,0	9,9	17,6		
50/70_HH + 10% CR_i + 1%_bb	33	5,4	78,0	5,5	6,9		
50/70_JJ + 12% CR_p	34	8,7	77,8	8,9	11,2	24,9	876,0
50/70_JJ + 12% CR_p	35	15,8	73,8	16,4	22,6	22,5	1265,0
50/70_JJ + 12% CR_q	36	25,7	67,3	27,9	47,0	26,5	1005,0

70/100_C + 12% CR_r	37	6,8	81,7	6,9	8,0	25,8	1018,7
70/100_C + 12% CR_r + bb	38	4,3	83,8	4,3	4,8	25,6	966,3
50/70_F + 15% CR_q + 1% g	39	35,9	56,8	42,9	164,8	31,2	702,0
50/70_W + 15% CR_r +10%_aa	40	12,8	71,5	13,4	19,7	26,9	658,0
50/70_W + 15% CR_r +2,5%_aa	41	15,7	70,3	16,6	25,2	28,1	611,0
50/70_W + 15% CR_l	42	14,6	70,5	15,4	23,3	28,0	590,5
50/70_W + 15% CR_l + 10%_aa	43	11,6	70,8	12,2	18,3	24,3	732,6
50/70_W + 15% CR_l + 5%_aa	44	12,2	70,5	12,9	19,5	26,1	666,6
50/70_W + 15% CR_l + 2,5%_aa	45	14,6	68,4	15,6	25,3	27,3	568,7
50/70_W + 15% CR_s+ 10%_aa	46	13,6	68,8	14,6	23,3	27,2	669,5
50/70_W + 15% CR_t+ 10%_aa	47	11,1	72,3	11,6	16,7	26,3	624,9
50/70_W + 15% CR_m	48	9,2	70,6	9,8	14,7	27,2	587,1
50/70_F + 15% CR_c	49	16,4	68,8	17,6	28,1	30,3	531,0
50/70_F + 15% CR_d	50	13,6	73,1	14,2	19,9	29,3	661,5
50/70_F + 15% CR_d + 0,5%_g	51	35,8	55,9	43,2	196,3	33,2	560,5
50/70_J + 15% CR_u	52	12,5	69,3	13,4	20,9	27,0	664,0
50/70_II + 15% CR_i	53	11,0	76,0	11,3	14,8		
50/70_II + 15% CR_j	54	14,1	78,0	14,4	18,0		
50/70_II + 15% CR_k	55	5,5	77,0	5,6	7,2		
50/70_KK + 15% CR_v	56	3,3	78,2	3,4	4,2	20,0*	
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_cc	57	4,5					
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_dd	58	22,9	66,3	25,0	44,1		
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_dd + 1%_ee	59	12,3					
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_ff	60	1,5	84,9	1,5	1,6	20,0*	
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_ff (170°C)	61	8,8	71,1	9,3	13,8		
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_ff + 1%_ee	62	0,3					
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_gg	63	10,5					
50/70_AA + 15% CR_w	64	4,2	79,9	4,3	5,2		
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_hh	65	8,6	76,8	8,9	11,4		
50/70_AA + 15% CR_y	66	6,6	73,3	6,9	9,6		
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_cc	67	19,9	59,5	23,1	62,9		
50/70_AA + 15% CR_z	68	2,5	80,5	2,5	3,0		
50/70_AA + 15% CR_aa	69	3,0	81,5	3,0	3,5		
50/70_AA + 15% CR_bb	70	3,4	79,4	3,4	4,1		
50/70_AA + 15% CR_cc	71	15,3	69,5	16,3	25,5		
50/70_AA + 15% CR_dd	72	3,2	75,1	3,3	4,4		
50/70_AA + 15% CR_ee	73	3,0	84,3	3,0	3,4		
50/70_AA + 15% CR_ff	74	7,6	75,7	7,9	10,4		
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_ii	75	14,6	67,7	15,8	26,2		
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_jj	76	14,7	74,0	15,3	21,0		
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_gg	77	5,4	79,1	5,4	6,7		
50/70_AA + 15% CR_y + 5%_ii	78	8,0	68,6	8,6	13,8		
50/70_AA + 15% CR_gg	79	4,9	80,6	4,9	5,9		
50/70_AA + 15% CR_hh	80	7,3	77,3	7,5	9,5		
50/70_AA + 15% CR_ii	81	6,3	80,9	6,4	7,5		
50/70_AA + 15% CR_ii + 5%_gg	82	5,1	80,9	5,2	6,1		
50/70_AA + 15% CR_ii + 5%_gg2	83	4,9	81,0	4,9	5,8		
50/70_AA + 15% CR_jj	84	7,3	74,5	7,5	10,2		
50/70_AA + 15% CR_kk	85	5,1	82,3	5,2	5,9		
50/70_AA + 15% CR_kk + 5%_t	86	6,5	77,9	6,7	8,3		
50/70_AA + 15% CR_x + 1%_g	87	0,6	85,2	0,6	0,7		
50/70_AA + 15% CR_x + 2%_ll	88	12,1	71,8	12,8	18,6		
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_cc (170°C)	89	1,4	85,4	1,4	1,5		
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_cc + 1%_g	90	6,1	73,9	6,3	8,7		

50/70_AA + 15% CR_x + 5%_cc2	91	0,3	46,9	0,5	-1,2		
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_cc + gg	92	9,4	68,6	10,1	16,3		
50/70_KK + 15% CR_x + 5%_cc	93	0,1	90,0	0,1	0,1		
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_dd	94	16,8	68,0	18,1	29,7		
50/70_AA+ 15% CR_v + 5%_dd + 1%_ee	95	8,9	73,2	9,3	13,0		
50/70_AA + 15% CR_v + 5%_ff + 1%_ee2	96	0,2	90,0	0,2	0,2		
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_gg	97	7,6	70,9	8,1	12,1		
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_t	98	5,8	73,9	6,1	8,3		
50/70_AA + 15% CR_v + 3%_cc	99	29,9	53,9	37,0	301,1		
50/70_AA + 15% CR_v + 7%_cc	100	4,1	77,8	4,2	5,3		
50/70_AA + 15% CR_v + dd + 0,5%_ee	101	54,2	84,3	54,5	60,2		
50/70_KK + 15% CR_v + dd + 0,5%_ee	102	3,1	83,9	3,1	3,5		
50/70_KK + 15% CR_v + dd + 1,5%_ee	103	0,9	85,0	0,9	1,0		
50/70_KK + 15% CR_v + dd + 2%_ee	104	56,1	87,4	56,2	58,8		
50/70_AA + 15% CR_ll + 1%_ee	105	16,1	65,9	17,6	31,6		
50/70_AA + 15% CR_mm + 3% ff (170°C)	106	7,1	78,4	7,2	8,9		
50/70_AA + 15% CR_mm + 7% ff	107	2,6	84,1	2,6	2,9		
50/70_AA + 15% CR_nn + 1%_g	108	2,2	82,1	2,2	2,5		
50/70_AA + 15% CR_nn + 3% ff	109	3,4	82,3	3,4	3,9	20,0*	842,0
70/100_S + 15% CR_oo	110	4,7	84,1	4,8	5,3	20,0*	
CRMB_A	111	7,3	69,4	7,8	12,2	25,6	766,6
CRMB_B	112	2,5	84,7	2,5	2,8	20,0*	
CRMB_C	113	2,2	86,8	2,2	2,4	20,0*	
70/100_B + 15% CR_pp	114	6,2	76,9	6,4	8,2	24,0	1099,0
70/100_B + 15% CR_qq	115	5,5	78,6	5,6	7,0	22,1	1343,0
CRMB_D	116	6,4	78,7	6,5	8,1		
CRMB_E	117	3,2	83,3	3,3	3,7		
CRMB_F	118	1,5	86,3	1,5	1,6		
CRMB_G	119	2,6	79,8	2,6	3,1		
70/100_T + 15% CR_l + 1%_g	120	13,9	70,2	14,7	22,4	27,1	650,3
70/100_D + 15% CR_r	121	5,8	80,0	5,9	7,0	26,4	904,5
70/100_D + 15% CR_o	122	6,3	69,6	6,7	10,5	20,0*	
70/100_U + 15% CR_rr	123	2,4	86,7	2,4	2,5	20,0*	
70/100_U + 15% CR_ss	124	4,3	85,8	4,3	4,7	20,0*	
50/70_X + 15% CR_tt + bb	125	33,5	56,0	40,5	180,3		
50/70_X + 15% CR_tt + 5%_cc + ee	126	13,8	73,0	14,5	20,3		
50/70_X + 15% CR_uu	127	9,1	77,2	9,4	11,9		
50/70_X + 15% CR_uu + 5%_cc	128	8,0	78,4	8,2	10,1		
50/70_X + 15% CR_uu + bb	129	13,0	72,9	13,6	19,2		
50/70_X + 15% CR_uu + 0,1%_t	130	5,5	79,3	5,6	6,9		
50/70_X + 15% CR_uu + 5%_cc + ee	131	9,3	75,9	9,6	12,6		
50/70_X + 15% CR_vv + bb	132	10,5	73,9	11,0	15,0		
50/70_X + 15% CR_vv + 5%_cc + 0,1%_t	133	10,7	72,9	11,2	15,8		
50/70_X + 15% CR_vv + 5%_cc	134	6,7	79,3	6,8	8,3		
50/70_X + 15% CR_vv + 5%_cc + 1%_ee	135	7,2	77,4	7,4	9,4		
50/70_X + 15% CR_vv + 5%_cc + 1,5%_ee	136	6,9	76,9	7,1	9,1		
70/100_M + 15% CR_ww	137	6,9	78,6	7,0	8,7		
70/100_M + 15% CR_xx	138	5,2	73,7	5,4	7,5		
70/100_M + 15% CR_zz + bb	139	12,4	75,4	12,8	17,0		
50/70_Y + 15% CR_aaa + 1%_g (30min)	140	35,0	57,8	41,4	136,8		
50/70_Y + 15% CR_aaa + 1%_g	141	29,8	60,0	34,4	89,4		
50/70_Y + 15% CR_aaa + 1%_g (60min)	142	27,7	60,0	32,0	83,1		
50/70_Y + 15% CR_aaa	143	15,3	72,0	16,1	23,2		

50/70_Z + 15% CR_aaa + 1%_g	144	19,1	62,0	21,6	48,0		
70/100_E + 15% CR_bbb	145	19,3	48,0	25,9	-92,5	27,1	659,0
50/70_JJ + 20% CR_p	147	20,3	71,2	21,4	31,7	28,5	749,8
50/70_JJ + 20% CR_p2	148	19,2	71,2	20,2	29,9	27,5	948,0
70/100_D + 20% CR_r	149	6,4	80,3	6,5	7,8	26,6	856,5
70/100_D + 20% CR_h	150	6,9	67,5	7,5	12,5	20,0*	
70/100_V + 20% CR_ccc	151	2,4	86,3	2,4	2,5	20,0*	
70/100_V + 20% CR_ddd	152	4,8	84,9	4,8	5,2	20,0*	
50/70_Y + 20% CR_aaa	153	14,4	68,6	15,5	24,9		
70/100_D + 22% CR_r	154	7,2	79,5	7,3	8,9	27,0	838,8
70/100_D + 22% CR_r + 0,5%_g	155	11,4	76,1	11,8	15,3	27,7	825,5
70/100_D + 22% CR_r + 1%_g	156	16,5	68,4	17,7	28,6	28,8	816,0
70/100_D + 22% CR_r + 1,5%_g	157	27,2	61,1	31,0	73,8	30,2	771,8
70/100_D + 22% CR_r + bb	158	7,1	80,2	7,3	8,7	27,2	843,0
CRMB_H	159	15,1	65,0	16,7	31,0	27,5	606,0
CRMB_I	160	17,9	49,7	23,5	-162,4	26,9	616,0
CRMB_J	161	18,7	52,6	23,5	502,7	27,6	647,5
70/100_D + 25% CR_r	162	7,1	78,7	7,3	9,0	26,9	807,0

*Zkouška FS byla měřena v teplotním intervalu od 60 °C do 20 °C, ale teplota T_{VET} je nižší, než 20 °C

Krátkodobé stárnutí silničních asfaltů 50/70 – laboratorní metoda TFOT

Označení	Číslo	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin [kPa]	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} [kPa]	T_{VET} [°C]	G^*_{VET} [kPa]
50/70_L	1	10,1	77,9	10,3	12,9	27,9	789,0
50/70_M	2	13,2	80,5	13,4	15,9	28,5	1145,0
50/70_U	3	7,0	83,7	7,0	7,8	26,1	1085,0
50/70_V	4	22,9	65,4	25,2	46,1	30,0	1020,0
50/70_P	5	7,9	78,2	8,0	10,0	28,5	795,0
50/70_P + 5%_y	6	10,7	74,7	11,1	15,0	37,4	576,0
50/70_P + 6%_y	7	21,0	70,7	22,3	33,4	39,3	597,0

Dlouhodobé stárnutí silničních asfaltů 50/70 – laboratorní metoda PAV

Označení	Číslo	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin [kPa]	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} [kPa]	T_{VET} [°C]	G^*_{VET} [kPa]
50/70_L	1	64,6	63,4	72,3	146,9	41,1	641,0
50/70_M	2	32,7	74,9	33,9	45,3	34,9	1027,0
50/70_U	3	29,4	76,1	30,3	39,4	32,6	1225,0
50/70_V	4	36,4	68,4	39,2	63,4	38,2	609,0

Dlouhodobé stárnutí silničních asfaltů 50/70 – laboratorní metoda TFOT+PAV

Označení	Číslo	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin [kPa]	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} [kPa]	T_{VET} [°C]	G^*_{VET} [kPa]
50/70_L	1	84,3	60,9	96,4	231,3	42,5	680,0
50/70_M	2	37,8	73,2	39,5	55,3	36,8	894,0
50/70_U	3	37,1	73,3	38,7	54,0	33,3	1136,0
50/70_V	4	64,3	64,0	71,6	140,8	41,0	641,0

50/70_P	5	36,0	67,8	38,9	64,5	39,0	609,5
50/70_P + 5%_y	6	70,8	63,1	79,4	164,6	43,7	681,0
50/70_P + 6%_y	7	66,1	60,4	76,0	190,7	42,9	592,0

Krátkodobé stárnutí silničních asfaltů

Označení	Číslo	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin [kPa]	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} [kPa]	T_{VET} [°C]	G^*_{VET} [kPa]
TFOT							
50/70_L	1	10,1	77,9	10,3	12,9	27,9	789,0
50/70_M	2	13,2	80,5	13,4	15,9	28,5	1145,0
50/70_U	3	7,0	83,7	7,0	7,8	26,1	1085,0
50/70_V	4	22,9	65,4	25,2	46,1	30,0	1020,0
50/70_P	5	7,9	78,2	8,0	10,0	28,5	795,0
50/70_P + 5%_y	6	10,7	74,7	11,1	15,0	37,4	576,0
50/70_P + 6%_y	7	21,0	70,7	22,3	33,4	39,3	597,0
50/70_T + 0,3%_t	8	11,5	82,0	11,6	13,4		
50/70_T + 0,5%_g	9	16,9	73,1	17,6	24,7		
50/70_I	10	12,3	78,0	12,6	15,7	28,6	980,0
50/70_I + 0,6%_kk	11	20,0	73,0	20,9	29,4	30,3	1064,0
50/70_I + 0,3%_kk	12	20,9	73,7	21,8	30,0	30,5	1112,0
50/70_I + 0,6%_ll	13	21,1	73,1	22,1	31,0	30,5	1120,0
50/70_I + 0,3%_ll	14	14,6	78,5	14,9	18,4	29,1	1180,0
50/70_I + 0,3%_mm	15	24,0	74,6	24,8	33,5	31,5	1138,0
50/70_I + 0,1%_t	16	37,8	71,0	40,0	59,4	24,7	966,0
50/70_LL	17	29,9	75,1	30,9	41,1	20,0*	
50/70_AA + 0,5%_s + 2%_t	18	1,5	87,3	1,5	1,6		
50-70_AA + 0,15%_t	19	2,2	85,7	2,2	2,4		
RTFOT							
50/70_N	20	27,9	74,5	28,9	39,1	20,0*	
50/70_O	21	10,9	80,7	11,0	13,1	29,0	1208,0
50/70_P + 5%_y	22	17,2	77,2	17,6	22,3	31,6	1334,0
50/70_P + 6%_y	23	16,6	78,3	16,9	21,0	32,9	1206,5
extrakce							
50/70_EX-A	24	9,6	78,5	9,8	12,2	30,0	998,5
50/70_EX-B	25	12,7	76,7	13,1	16,8	30,3	979,8
50/70_EX-C	26	8,9	77,3	9,1	11,6	28,1	757,5
50/70_EX-D	27	21,8	61,4	24,8	57,7	32,1	612,0
50/70_EX-E	28	19,8	70,9	21,0	31,3	45,2	494,0
50/70_EX-F	29	9,3	76,4	9,5	12,3	28,6	695,0
50/70_EX-G	30	11,7	76,3	12,0	15,5	29,0	885,0
50/70_EX-H	31	14,3	75,7	14,8	19,4	29,5	1051,0
70/100_EX-A	32	7,1	82,5	7,1	8,1	27,5	919,0
70/100_EX-B	33	5,5	83,8	5,5	6,2	26,6	976,0
70/100_EX-C	34	12,1	77,7	12,4	15,6	29,1	971,0
70/100_EX-D	35	9,4	78,7	9,6	11,9	28,5	874,0
70/100_EX-E	36	11,4	75,1	11,7	15,7	29,4	888,0
70/100_EX-F	37	13,4	76,3	13,7	17,8	34,6	917,0
50/70_EX-I	38	1,9	84,5	1,9	2,0	20,0*	
PMB_EX-A	39	18,8	65,9	20,5	36,9	30,1	786,0
50/70_EX-J	40	8,2	79,5	8,4	10,1	28,2	816,0

50/70_EX-K	41	9,8	78,2	10,0	12,5	28,6	785,0
50/70_EX-L	42	7,0	79,0	7,2	8,8	28,2	718,5

*Zkouška FS byla měřena v teplotním intervalu od 60 °C do 20 °C, ale teplota T_{VET} je nižší, než 20 °C

Dlouhodobé stárnutí silničních asfaltů

Označení	Číslo	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin [kPa]	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} [kPa]	T_{VET} [°C]	G^*_{VET} [kPa]
PAV							
50/70_L	1	64,6	63,4	72,3	146,9	41,1	641,0
50/70_M	2	32,7	74,9	33,9	45,3	34,9	1027,0
50/70_U	3	29,4	76,1	30,3	39,4	32,6	1225,0
50/70_V	4	36,4	68,4	39,2	63,4	38,2	609,0
TFOT+PAV							
50/70_L	5	84,3	60,9	96,4	231,3	42,5	680,0
50/70_M	6	37,8	73,2	39,5	55,3	36,8	894,0
50/70_U	7	37,1	73,3	38,7	54,0	33,3	1136,0
50/70_V	8	64,3	64,0	71,6	140,8	41,0	641,0
50/70_P	9	36,0	67,8	38,9	64,5	39,0	609,5
50/70_P + 5%_y	10	70,8	63,1	79,4	164,6	43,7	681,0
50/70_P + 6%_y	11	66,1	60,4	76,0	190,7	42,9	592,0
50/70_LL	12	154,0	64,7	170,3	322,1	27,7	3812,0
50/70_N	13	89,9	65,1	99,1	184,3	25,9	2849,0
50/70_AA + 0,5%_s	14	52,6	74,7	54,5	73,5	20,0*	
50/70_AA + 1%_s	15	62,9	73,8	65,5	90,3	20,0*	
50/70_AA + nn	16	300,0	65,0	331,1	619,5	26,1	6720,0
50/70_AA + 0,5%_s + 2%_f	17	36,3	72,8	38,0	53,6		
50-70_AA + 0,15%_t	18	69,6	71,5	73,3	107,3		
50/70_MM	19	53,8	61,36	61,2	142,3		
50/70_MM2	20	34,1	58,97	39,8	114,5	37,8	815,0
3xTFOT							
70/100_H + 1%_s	21	87,0	74,65	90,2	121,6		
70/100_I + 1%_s	22	94,9	74,4	98,5	133,8	25,0**	
50/70_A + 0,3%_j	23	81,5	74,16	84,7	115,6		
50/70_B + 0,3%_j	24	72,7	73,82	75,7	104,1	25,0**	
50/70_A + 0,3%_k	25	19,4	78,12	19,8	24,7	25,0**	
50/70_A + 0,3%_l	26	77,6	73,3	81,0	113,0		
50/70_B + 0,3%_l	27	49,3	74,7	51,1	68,9	25,0**	
50/70_A + 0,3%_m	28	43,8	75,4	45,2	59,8		
50/70_B + 0,3%_m	29	54,9	74,6	56,9	76,9	25,0**	
50/70_A + 0,3%_i	30	125,4	69,63	133,8	207,6		
50/70_B + 0,3%_i	31	103,5	71,7	109,0	159,0	25,0**	
50/70_A + 0,5%_o	32	116,8	63,34	130,7	266,5		
50/70_B + 0,5%_o	33	81,9	62,8	92,0	193,4	29,9	1383,0
50/70_A + 0,5%_g	34	170,7	62,61	192,3	409,9		
50/70_B + 0,5%_g	35	168,7	59,6	195,7	529,2	25,0**	
50/70_A + 0,75%_s	36	75,6	68,24	81,4	132,5		
50/70_B + 0,75%_s	37	145,8	65,2	160,6	296,8	25,0**	
50/70_A + 1%_g	38	216,3	57,7	255,9	858,0		
50/70_B + 1%_g	39	172,8	58,66	202,3	602,1	27,5	3255,0

50/70_A + 3%_h	40	172,8	69,6	184,4	286,6	
50/70_B + 3%_h	41	158,6	69,8	169,0	261,3	25,0**
50/70_A	42	171,2	69,8	182,5	282,0	25,0**
50/70_N	43	75,9	65,5	83,4	152,0	20,0*

*Zkouška FS byla měřena v teplotním intervalu od 60 °C do 20 °C, ale teplota T_{VET} je nižší, než 20 °C

**Zkouška FS byla měřena v teplotním intervalu od 60 °C do 25 °C, ale teplota T_{VET} je nižší, než 25 °C

Krátkodobé stárnutí PMB pojiv – laboratorní metoda TFOT nebo RTFOT

Označení	Číslo	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin [kPa]	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} [kPa]	T_{VET} [°C]	G^*_{VET} [kPa]
25/55-55_E	1	18,5	66,4	20,2	35,3	29,1	937,0
25/55-55_F	2	14,4	69,8	15,3	23,7	28,6	802,0
25/55-55_G	3	11,3	65,9	12,4	22,2	26,5	943,0
25/55-55_H	4	12,4	70,0	13,2	20,3	28,3	930,0
25/55-55_I	5	12,0	67,6	13,0	21,7	27,4	890,0
25/55-60_A	6	35,9	65,8	39,3	70,6	20,0*	
25/55-60_B	7	19,2	65,4	21,1	38,6	40,0**	
25/55-80_A	8	34,7	58,3	40,7	126,0	40,0	
40/100-65_A	9	24,3	57,0	28,9	107,8	20,0*	
40/80-85_A	10	12,2	59,7	14,1	37,7	26,7	838,5
40/80-85_A + 1%_y	11	15,4	57,9	18,1	59,6	27,9	805,0
45/80-65_A	12	21,2	54,3	26,0	184,4	40,0**	
50/70_P + 3% SBS_b	13	23,4	64,2	26,0	50,5	36,1	643,0

*Zkouška FS byla měřena v teplotním intervalu od 60 °C do 20 °C, ale teplota T_{VET} je nižší, než 20 °C

**Zkouška FS byla měřena v teplotním intervalu od 60 °C do 40 °C, ale teplota T_{VET} je nižší, než 40 °C

Dlouhodobé stárnutí PMB pojiv – laboratorní metoda PAV

Označení	Číslo	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin [kPa]	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} [kPa]	T_{VET} [°C]	G^*_{VET} [kPa]
25/55-55_E	1	48,9	62,6	55,1	117,2	37,2	749,0
25/55-55_F	2	32,7	59,0	38,2	109,6	39,0	404,0
25/55-55_G	3	29,8	63,4	33,3	67,6	31,6	1164,0
25/55-55_H	4	52,3	61,8	59,4	133,9	39,0	690,0
25/55-55_I	5	23,6	65,4	26,0	47,6	30,4	1087,0

Dlouhodobé stárnutí PMB pojiv – laboratorní metoda TFOT+PAV nebo RTFOT+PAV

Označení	Číslo	G* [kPa]	δ [°]	G*/sin [kPa]	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]} [kPa]	T_{VET} [°C]	G^*_{VET} [kPa]
25/55-55_E	1	79,3	59,1	92,4	262,5	40,5	719,0
25/55-55_F	2	70,6	59,4	82,0	225,9	40,7	657,0
25/55-55_G	3	40,1	61,4	45,7	105,9	33,4	1127,0
25/55-55_H	4	64,9	60,4	74,6	186,4	39,7	762,0
25/55-55_I	5	33,3	63,6	37,2	74,8	32,6	1133,0
25/55-60_A	6	95,0	67,6	102,7	171,1	20,0*	0,0
40/100-65_A	9	66,0	58,8	77,2	226,2	20,0*	0,0
40/80-85_A	10	29,3	56,3	35,2	147,2	30,1	1012,0

40/80-85_A + 1%_y	11	29,7	56,5	35,5	142,8	30,7	991,0
50/70_P + 3% SBS_b	13	40,4	58,5	47,4	143,1	39,3	509,0

*Zkouška FS byla měřena v teplotním intervalu od 60 °C do 20 °C, ale teplota T_{VET} je nižší, než 20 °C

PŘÍLOHA C

Silniční asfalty

		0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa		0,1 kPa - 3,2 kPa			0,1 - 8,0 kPa	
Označení	**Č.**	**%R [%]**	**J_{nr} [kPa^{-1}]**	**%R [%]**	**J_{nr} [kPa^{-1}]**	**%R [%]**	**J_{nr} [kPa^{-1}]**	**R_{diff} [%]**	**$J_{nr,diff}$ [%]**	**$J_{nr,slope}$ [%]**	**R_{diff} [%]**	**$J_{nr,diff}$ [%]**
20/30_A	1	9,4	0,4	6,7	0,4			28,6	-5,3	-0,7		
20/30_B	2	17,9	0,3	12,6	0,3	-	-	29,8	8,7	0,7		
20/30_C	3	12,0	0,3	8,8	0,3			26,4	13,8	1,2		
20/30_D	4	10,6	0,5	8,3	0,3			21,6	-34,1	-5,3		
20/30_A + 2%_a	5	38,7	0,1	5,6	0,3	2,3	0,4	85,6	228,6	7,8	93,9	290,4
20/30_A + 3%_a	6	72,5	0,1	17,4	0,3			76,1	503,2	8,8		
20/30_A + 3%_b	7	11,1	0,7	5,4	0,6			51,2	-1,7	-0,4		
20/30_A + 4%_b	8	14,6	0,5	7,3	0,5	2,3	0,6	50,0	7,0	1,0	84,2	27,5
20/30_C + 3%_c	9	20,1	0,2	12,8	0,2			36,1	10,6	0,7		
20/30_D + 1%_d	10	9,1	0,4	4,9	0,5			46,6	37,9	4,7		
20/30_D + 3%_d	11	13,8	0,5	4,4	0,7			67,8	34,1	5,9		
20/30_D + 5%_d	12	5,8	3,7	1,3	2,0			78,5	-47,1	-56,5		
20/30_D + 1%_e	13	11,7	0,3	7,0	0,4			40,0	35,0	3,3		
20/30_D + 3%_e	14	9,8	0,4	4,8	0,5			50,6	43,9	5,2		
20/30_D + 5%_e	15	7,4	0,7	2,1	1,0			72,0	45,9	10,3		
20/30_D + 2%_f	16	11,5	0,3	6,6	0,4			43,1	25,0	2,4		
20/30_D + 3%_f	17	11,9	0,4	4,0	0,6			66,3	51,0	6,9		
20/30_D + 5%_f	18	35,4	0,3	3,3	1,1			90,8	218,8	23,7		
20/30_E + 3%_d	19	22,3	0,2	10,3	0,4			53,6	76,7	5,0		
20/30_F + 1%_g	20	28,0	0,3	16,4	0,3			41,5	16,5			
20/30_F	21	8,5	0,9	2,3	1,0			73,0	11,8	3,5		
20/30_F + 2%_h	22	15,2	0,5	6,1	0,6			60,0	24,5	3,7		
50/70_B + 0,5%_g	23	13,9	1,3	1,9	1,7			86,3	25,0	10,7		

50/70_A + 1%_g	24	12,9	1,4	1,8	1,7			86,4	24,1	10,8		
50/70_D + 1%_g	25	13,4	1,4	1,8	1,7			86,4	24,6	10,8		
50/70_A + 0,3%_j	26	1,1	4,1	0,0	4,1			95,9	-0,1	-0,2		
50/70_B + 0,3%_j	27	0,6	5,7	0,0	6,0			97,2	5,1	9,4		
50/70_A + 0,3%_k	28	1,8	2,6	0,3	2,7			81,0	2,2	1,9		
50/70_B + 0,3%_k	29	1,0	5,3	0,0	5,6			97,8	6,1	10,5		
50/70_A + 0,3%_l	30	0,6	5,8	0,0	6,0			97,4	3,2			
50/70_B + 0,3%_l	31	0,4	6,3	0,0	6,5			93,0	2,4			
50/70_A + 0,3%_m	32	6,0	3,9	0,3	5,3			95,5	35,6			
50/70_B + 0,3%_m	33	0,3	4,1	0,1	4,7			66,7	12,5			
50/70_C + 0,3%_m	34	1,6	3,3	0,3	3,3			83,6	0,3	0,3		
50/70_A + 0,3_n	35	0,5	6,3	0,0	6,9			95,2	10,3	20,9		
50/70_A + 0,5%_o	36	1,9	4,8	0,1	6,7			96,1	37,8	59,1		
50/70_B + 0,5%_o	37	2,3	2,7	0,3	3,1			88,6	12,5	11,0		
50/70_E	38	3,8	4,6	0,1	5,5			98,3	18,3	27,3		
50/70_F	39	3,2	3,1	0,3	3,4			90,6	9,8	9,7		
50/70_C	40	2,5	2,9	0,3	3,2			87,1	9,0	8,4		
50/70_G	41	2,3	3,8	0,2	3,9			92,7	1,6	2,0		
50/70_H	42	0,5	5,1	0,1	5,1	0,0	4,6	88,9	0,2	0,3	95,6	-9,3
50/70 _I	43	2,4	2,8	0,3	3,1			87,8	10,7	9,7		
50/70_J	44	1,7	3,0	0,3	3,0	0,1	3,2	82,3	1,2		93,5	6,7
50/70_K	45	3,8	4,6	0,1	5,5			98,3	18,3	27,3		
50/70_OO	46	3,1	3,4	0,6	3,4			80,6	-0,8	-0,9		
50/70_L	47	1,7	3,0	0,3	3,0			82,3	1,2			
50/70_M	48	1,6	3,3	0,1	3,4			91,8	4,0	4,2		
50/70_N	49	2,7	3,4	0,2	3,6			91,5	5,3			
50/70_O	50	0,3	4,1	0,1	4,7	0,0	4,8	66,7	12,5		96,5	14,9
50/70_NN	51	0,5	5,1	0,1	5,1	0,0	4,6	88,9	0,2	0,3	95,6	-9,3
50/70_P	52	1,2	1,7	0,4	2,0			69,9	17,5			
50/70_Q	53	1,2	5,6	0,1	6,6			95,5	17,7			
50/70_R	54	5,5	4,1	0,3	5,3			94,9	29,5			
50/70_S	55	0,5	5,2	0,0	5,8			90,6	10,4			
50/70_T + 2%_h	56	1,8	9,9	0,0	11,2			98,0	13,3			
50/70_K + 3%_f	57	1,0	7,0	0,1	8,0			93,7	14,3	32,3		
50/70_D + 3%_c	58	18,9	1,4	1,8	2,6			90,4	76,2	35,6		
50/70_Q + 3%_p	59	78,4	0,1	3,2	2,1			96,0	1932,5	65,1		

50/70_Q + 2%_d	60	0,9	4,5	0,1	6,8	0,0	7,6	89,4	51,2	74,0	96,6	68,7
50/70_Q + 3%_d	61	5,0	5,2	0,4	7,5			92,7	45,3	75,9		
50/70_Q + 1,5%_d + 1,5%_f	62	1,2	10,5	0,0	11,2			98,3	7,3	24,5		
50/70_Q + 2%_q	63	1,7	6,3	0,1	6,9			94,8	9,4	19,0		
50/70_Q + 3%_q	64	5,2	4,9	0,2	6,8			96,7	38,6	61,4		
50/70_Q + 2%_r	65	53,0	0,9	0,5	5,4			99,0	497,6	146,2		
50/70_Q + 3%_r	66	15,4	0,9	0,1	5,5			99,5	526,4	148,3		
50/70_Q + 2%_r + 1%_f	67	62,7	0,5	0,7	4,7	0,0	6,9	98,8	761,1	132,8	99,9	1176,3
50/70_K + 0,08 %_t	68	2,9	4,4	0,1	4,8			96,0	10,3	14,5		
50/70_K + 0,12 %_t	69	1,8	4,8	0,1	5,4			92,4	11,0	17,2		
50/70_R + 0,1%_t	70	1,6	3,7	0,3	4,2			83,6	13,8	16,3		
50/70_U	71	1,1	4,7	0,0	4,9			96,8	3,4	5,1		
50/70_V	72	3,8	2,4	0,5	2,6			88,0	6,3	5,0		
50/70_W	73	0,6	5,7	0,0	6,0			97,3	4,2	7,7		
50/70_K + 2%_f	74	1,9	6,3	0,1	7,3			96,2	15,5	31,5		
50/70_K + 3%_h	75	9,3	2,5	0,7	4,3			92,2	74,3	59,2		
50/70_K + 1%_s	76	3,1	4,2	0,1	4,9			95,2	17,2	23,4		
50/70_X	77			0,3	4,6					148,4		
50/70_Y	78			0,0	4,2					135,5		
50/70_Z	79			0,9	2,3					74,2		
50/70_AA	80	0,1	7,5	0,1	6,7			34,2	-11,4	-27,8		
50/70_BB	81	6,0	1,0	2,0	1,1			65,7	10,0	3,2		
50/70_CC	82	6,0	1,6	1,2	1,7			79,4	6,1	3,2		
50/70_DD	83	5,8	1,8	0,8	2,1			85,9	22,3	12,6		
50/70_EE	84	6,4	2,1	0,7	2,4			88,8	17,9	11,9		
50/70_FF	85	5,8	2,7	0,5	3,3			91,8	24,7	21,2		
50/70_GG	86	3,6	3,6	0,4	3,9			88,2	8,8	10,2		
70/100_A + 0,5%_g	87	5,6	1,5	0,8	2,5			86,5	69,5	33,6		
70/100_A + 1,0%_g	88	7,8	2,1	1,0	2,5			87,5	23,7	15,8		
70/100_A + 1,5%_g	89	19,6	1,0	4,4	1,3			77,7	31,0	9,9		
70/100_B	90	1,2	7,9	0,0	7,9			99,7	0,0	0,1		
70/100_C	91	0,9	7,7	0,0	7,8			99,6	1,1	2,8		
70/100_D	92	4,5	4,7	0,1	6,3			96,7	33,4	50,9		
70/100_E	93	3,3	4,2	0,1	7,1			97,6	68,6	93,2		
70/100_F + 2%_f	94	0,8	10,1	0,0	11,5			99,8	13,5	44,3		

70/100_G + 2%_f	95	1,5	7,7	0,1	8,8	96,2	14,6	36,0
70/100_G + 3%_f	96	1,6	10,0	0,0	12,3	97,7	23,0	74,5
70/100_G + 3%_h	97	31,2	1,6	1,2	4,9	96,1	208,2	106,3
70/100_G + 0,08%_t	98	1,8	5,9	0,0	6,2	98,9	6,1	11,6
70/100_G + 0,12%_t	99	1,4	5,7	0,0	6,3	98,1	10,1	18,7
70/100_G + 0,1%_u	100	2,1	4,4	0,2	4,8	92,2	8,9	12,8
70/100_G + 0,2%_u	101	1,7	3,9	0,2	4,2	89,4	6,9	8,7
70/100_H + 0,1%_t	102	1,0	9,0	0,0	10,9	99,7	20,6	60,1
70/100_I + 0,1%_t	103	2,0	1,8	0,3	1,9	84,7	3,0	1,8
70/100_J + 0,1%_t	104	1,8	2,1	0,4	2,2	79,5	5,0	3,4
70/100_K + 0,1%_t	105	2,2	5,9	0,3	4,8	85,8	-18,4	-34,8
70/100_H + 0,3%_t	106	2,8	5,9	0,0	6,3	98,9	7,5	14,2
70/100_I + 0,3%_t	107	3,9	3,7	0,5	3,7	86,3	-0,5	-0,6
70/100_J + 0,3%_t	108	3,6	5,3	0,1	6,3	97,5	19,0	32,5
70/100_H + 1%_s	109	2,5	3,1	0,3	3,4	88,4	8,7	8,8
70/100_I + 1%_s	110	3,8	4,2	0,2	4,7	95,2	13,0	17,6
70/100_L	111	3,2	3,7	0,2	4,1	92,5	11,2	13,2
70/100_M	112	1,5	5,8	0,1	6,4	91,8	10,5	19,6
70/100_N	113	7,2	27,0	0,0	9,1	100,0	-66,4	-578,6
70/100_O	114	2,5	8,6	0,0	7,0	98,3	-19,1	-53,1
70/100_P	115	0,4	7,2	0,0	5,9	88,7	-18,7	-43,4
70/100_Q	116	2,4	14,5	0,1	10,4	96,3	-28,3	-132,3
70/100_R	117	5,4	19,8	0,0	14,2	100,0	-28,1	-179,4

Polymerem modifikované asfalty (PMB)

Označení	Č.	0,1 kPa		3,2 kPa		8,0 kPa		Rozdíl (0,1 kPa - 3,2 kPa)			0,1 - 8,0 kPa	
		%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	$J_{nr,slope}$ [%]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]
50/70_P + 3% SBS_a	1	26,1	0,4	15,8	0,5			39,4	16,4	2,2		
50/70_P + 3% SBS_b	2	47,7	0,4	28,8	0,5			39,6	33,4	4,0		
10/40-65_A	3	36,9	0,1	39,0	0,1			-5,5	-8,3	-0,4		
25/55-55_A	4	28,7	0,9	17,6	1,1			38,8	25,1	7,0		
25/55-55_B	5	56,5	0,3	53,5	0,3			5,4	6,0	0,6		

25/55_A + 0,1%_t	6	27,3	0,7	17,0	0,9			37,8	23,9	5,4		
25/55_A + 0,5%_v	7	31,8	0,6	21,4	0,8			32,8	25,4	5,0		
25/55_A + 0,5%_w	8	32,9	0,6	22,4	0,8			32,0	31,8	6,3		
25/55_A + 0,5%_x	9	31,1	0,6	20,2	0,8			35,1	29,8	6,0		
25/55_B + 0,1%_t	10	78,4	0,2	63,6	0,4			18,9	73,0	4,9		
25/55_B + 0,5%_v	11	55,4	0,4	54,6	0,4			1,4	2,8	0,3		
25/55_B + 0,5%_w	12	51,4	0,4	55,9	0,4			-8,6	-10,2	-1,3		
25/55_B + 0,5%_x	13	61,4	0,3	60,0	0,3			2,3	3,2	0,3		
25/55_A + 3%_h	14	53,1	0,1	45,2	0,1			14,8	24,9	0,9		
25/55_A + 2%_f	15	35,8	0,6	26,1	0,7			27,2	28,2	5,0		
25/55_B + 3%_h	16	68,3	0,1	67,0	0,2			1,9	20,7	1,0		
25/55_B + 2%_f	17	66,1	0,2	60,0	0,3			9,1	21,8	1,6		
25/55-55_C	18	97,1	0,0	92,2	0,0	91,0	0,1	5,1	404,6	1,2	1,3	446,0
25/55-55_D	19	50,4	0,3	41,1	0,3	31,4	0,4	18,4	25,9	2,3	4,5	60,5
25/55-55_E	20	26,9	0,6	20,3	0,6			24,5	13,4	2,4		
25/55-55_F	21	18,0	1,0	9,8	1,1			45,4	15,8	5,0		
25/55-55_G	22	58,7	0,4	43,3	0,5			26,2	40,9	4,8		
25/55-55_H	23	37,3	0,5	27,1	0,7			27,3	28,4	4,8		
25/55-55_I	24	48,3	0,6	42,1	0,6			12,9	15,0	2,7		
25/55-60_A	25	84,3	0,2	89,5	0,1			-6,3	-55,8	-3,9		
25/55-60_D	26	76,8	0,1	38,5	0,5	29,7	0,6	49,9	267,0	11,6		
25/55-60_B	27	85,7	0,1	63,8	0,2	66,5	0,2	25,6	33,1	1,5	1,7	16,2
25/55-60_C	28	59,5	0,3	57,6	0,3			3,2	8,0	0,7		
25/55-65_A	29	22,5	0,4	20,2	0,4			10,1	9,2	1,1		
25/55-65_B	30	30,5	0,3	20,4	0,4			33,1	25,2	2,5		
25/55-80_A	31	69,4	0,2	66,6	0,2	66,4	0,2	4,1	3,8	0,2	0,3	9,1
40/100-65_A	32	81,1	0,7	89,8	0,1			-10,8	-90,2	-19,4		
40/100-65_B	33	61,3	0,2	57,3	0,3			6,5	14,1	1,1		
40/80-85_A	34	83,0	0,1	88,5	0,1			-6,6	-13,2	-0,4		
40/80-85_A + 1%_y	35	92,8	0,0	90,4	0,1			2,5	41,4	0,5		
45/80-55_A	36	39,5	0,5	30,1	0,8			23,8	54,7	9,5		
45/80-65_A	37	78,7	0,1	86,0	0,1	87,9	0,1	-9,2	-36,6	-1,7	-2,2	-49,3
45/80-75_A	38	89,6	0,0	89,3	0,1			0,4	413,9	2,6		
45/80-75_B	39	82,3	0,1	78,5	0,4			4,7	329,0	8,8		
50/70_P + 5%_y	40	29,4	0,4	3,3	1,3			88,7	193,1	27,4		
50/70_P + 6%_y	41	25,0	0,3	2,9	1,2			88,4	268,6	28,9		

Pojiva modifikovaná pryžovým granulátem (CRMB)

		0,1 kPa		**3,2 kPa**		**8,0 kPa**		**Rozdíl (0,1 kPa - 3,2 kPa)**		
Označení	**Č.**	**%R**	**J_{nr}**	**%R**	**J_{nr}**	**%R**	**J_{nr}**	**R_{diff}**	**$J_{nr,diff}$**	**$J_{nr,slope}$**
		[%]	**[kPa^{-1}]**	**[%]**	**[kPa^{-1}]**	**[%]**	**[kPa^{-1}]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**
20/30_A + 15% CR_yy		98,4	0,0	68,3	0,0			30,6	205,8	0,4
20/30_A + 15% CR_yy + 2%_a		79,1	0,0	74,3	0,0	73,4	0,0	6,0	16,4	0,0
20/30_A + 15% CR_yy + 2%_b		78,6	0,0	75,7	0,0	73,3	0,0	3,7	12,5	0,0
20/30_A + 15% CR_yy + 2%_d		72,7	0,0	70,6	0,0	67,6	0,0	2,9	1,8	0,0
70/100_B + 3% CR_a + 7,5%_z	1	7,5	2,6	0,4	3,0			94,6	17,4	14,5
70/100_B + 3% CR_b +	2	86,0	0,3	3,1	3,1			96,4	948,2	91,5

7,5%_z								
70/100_B + 4% CR_b + 6%_z	3	52,3	1,3	0,8	3,3	98,5	154,4	64,9
70/100_B + 5% CR_g + 5%_z	4	39,7	1,9	0,4	4,4	99,1	128,1	80,4
50/70_II + 8% CR_i	5	7,5	4,1	0,3	5,3	96,0	28,5	37,7
50/70_II + 8% CR_j	6	15,6	1,8	1,2	1,8	92,3	0,0	0,0
50/70_II + 8% CR_k	7	14,7	1,0	1,8	1,4	87,8	40,0	12,9
50/70_HH + 8% CR_i	8	18,5	1,9	1,4	2,1	92,4	8,4	5,2
50/70_W + 10% CR_m	9	25,0	0,8	5,2	1,1	79,3	43,0	10,6
50/70_E + 10% CR_ddd + bb	10	11,2	1,8	1,7	2,2	85,0	20,4	11,9
50/70_E + 10% CR_ddd + 1%_g	11	21,6	0,7	5,5	1,0	74,4	34,3	8,1
50/70_HH + 10% CR_i	12	26,3	0,8	6,0	0,8	77,2	-0,9	-0,2
50/70_HH + 10% CR_i + 1%_g	13	51,5	0,1	34,4	0,1	33,2	-9,9	-0,4
50/70_HH + 10% CR_i + 1%_bb	14	38,5	0,8	5,7	0,8	85,2	-1,7	-0,5
70/100_C + 10% CR_o	15	30,0	1,0	5,1	1,7	82,9	73,1	23,7
70/100_C + 10% CR_o + 0,5%_g	16	28,2	0,5	10,5	0,9	62,9	77,8	12,8
70/100_C + 10% CR_o + 1%_g	17	37,6	0,3	19,7	0,5	47,6	86,1	8,1
70/100_C + 10% CR_o + 0,1%_u	18	47,5	0,7	8,9	1,6	81,4	141,1	30,4
50/70_JJ + 12% CR_p	19	31,6	0,6	6,1	1,1	80,7	74,6	14,9
50/70_JJ + 12% CR_p	20	23,2	0,5	6,8	0,7	70,8	47,1	7,2
50/70_JJ + 12% CR_q	21	94,0	0,0	13,1	0,4	86,1	4019,0	13,0
50/70_JJ + 12% CR_q2	22	98,0	0,0	76,7	0,0	21,7	2591,0	0,6
70/100_C + 12% CR_r	23	36,7	0,9	11,9	1,5	67,5	68,8	19,6
70/100_C + 12% CR_r + bb	24	16,1	1,9	2,3	2,6	85,5	38,4	23,0
50/70_F + 15% CR_q + 1% g	25	47,3	0,1	25,8	0,2	45,4	48,0	1,7
50/70_W + 15% CR_r +10%_aa	26	16,4	0,7	6,0	0,8	63,7	17,0	4,0
50/70_W + 15% CR_r +2,5%_aa	27	17,0	0,5	7,2	0,6	57,8	12,8	2,2
50/70_W + 15% CR_l	28	34,8	0,4	9,5	0,6	72,9	53,6	6,7
50/70_W + 15% CR_l + 10%_aa	29	30,4	0,6	7,9	0,9	74,0	46,6	9,2
50/70_W + 15% CR_l + 5%_aa	30	33,5	0,5	9,2	0,7	72,5	52,7	8,0
50/70_W + 15% CR_l + 2,5%_aa	31	39,0	0,3	11,8	0,5	69,6	62,3	6,6
50/70_W + 10% CR_l + 2,5%_aa	32	28,0	0,8	3,3	1,4	88,3	64,7	17,1
50/70_W + 15% CR_s+ 10%_aa	33	22,2	0,5	7,3	0,7	66,9	39,0	6,7
50/70_W + 15% CR_t+ 10%_aa	34	28,1	0,6	7,2	0,8	74,3	43,6	8,0
50/70_W + 15% CR_m	35	22,6	0,3	10,5	0,6	53,4	108,7	10,1
50/70_E + 15% CR_ddd +	36	21,1	1,3	2,8	1,9	86,8	47,1	19,2

5%_mm										
50/70_E + 15% CR_ddd + 1%_bb	37	22,2	1,0	3,7	1,6			83,3	54,4	17,9
50/70_E + 15% CR_ddd + 1%_g	38	28,7	0,5	9,3	0,7			67,8	48,4	7,8
50/70_E + 15% CR_ddd + 0,14%_t	39	42,8	0,7	4,4	1,3			89,7	102,8	21,6
50/70_J + 15% CR_bbb	40	50,2	0,1	2,8	0,5	1,2	0,6	94,4	394,8	13,3
50/70_J + 15% CR_u	41	53,8	0,3	10,4	0,5	2,7	0,8	80,7	102,0	8,4
50/70_II + 15% CR_i	42	23,8	1,0	2,0	1,6			91,6	60,0	19,4
50/70_II + 15% CR_j	43	32,7	0,6	4,4	0,9			86,5	50,0	9,7
50/70_II + 15% CR_k	44	36,1	1,4	4,5	1,3			87,5	-7,1	-3,2
50/70_KK + 15% CR_v	45	89,8	0,1	5,1	1,3			94,3	1426,1	40,5
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_cc	46	18,5	1,5	3,1	2,1			83,4	40,1	19,7
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_dd	47	96,3	0,1	12,6	0,7			86,9	511,7	17,7
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_dd + 1%_ee	48	39,4	0,2	8,0	0,6			79,8	242,9	12,7
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_ff	49	97,7	0,0	13,8	0,6			85,9	1251,7	18,7
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_ff (170°C)	50	97,0	0,1	4,1	2,6			95,7	2514,3	80,2
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_gg	51	35,1	0,5	8,0	0,9			77,1	66,2	11,4
50/70_AA + 15% CR_nn + 3% ff	52	68,3	0,0	60,0	0,0			12,1	68,2	0,2
50/70_AA + 15% CR_nn + 3% ff2	53	17,7	3,9	1,5	2,9			91,6	-24,5	-30,8
CRMB_D	54	26,1	4,7	1,4	3,5			94,7	-26,5	-40,2
CRMB_E	55	21,4	2,8	1,7	2,3			92,1	-17,3	-15,5
CRMB_F	56	22,6	2,5	2,1	1,9			90,9	-24,2	-19,4
CRMB_G	57	89,2	0,2	13,0	0,5			85,5	138,7	9,3
50/70_X + 15% CR_vv	58			98,0	0,0					0,3
50/70_X + 15% CR_tt + bb	59			90,0	0,1					1,6
50/70_X + 15% CR_tt + 5%_cc + ee	60	43,3	0,3	10,0	0,8			76,9	174,0	15,8
50/70_X + 15% CR_uu	61	35,5	0,5	9,0	1,0			74,7	106,0	17,1
50/70_X + 15% CR_uu + 5%_cc	62	49,7	0,3	9,0	1,0			81,9	220,4	22,0
50/70_X + 15% CR_uu + bb	63			15,0	0,5					14,8
50/70_X + 15% CR_uu + 0,1%_t	64	22,2	0,5	8,0	1,4			63,9	162,8	27,8
50/70_X + 15% CR_uu + 5%_cc + ee	65	33,4	0,4	9,0	0,8			73,0	112,4	14,0
50/70_X + 15% CR_vv + bb	66	34,6	0,4	10,0	0,7			71,1	83,5	10,1
50/70_X + 15% CR_vv + 5%_cc + 0,1%_t	67	31,5	0,4	10,0	0,8			68,3	69,3	9,9
50/70_X + 15% CR_vv + 5%_cc	68	33,9	0,5	8,0	1,1			76,4	123,8	20,2
50/70_X + 15% CR_vv +	69	18,6	1,1	8,0	1,2			56,9	10,5	3,5

5%_cc + 1%_ee								
50/70_X + 15% CR_vv + 5%_cc + 1,5%_ee	70	42,9	0,7	9,0	0,9	79,0	24,2	5,8
50/70_Y + 15% CR_aaa + 1%_g (30min)	71			50,7	0,0			0,0
50/70_Y + 15% CR_aaa + 1%_g	72			55,1	0,0			1,0
50/70_Y + 15% CR_aaa + 1%_g (60min)	73	88,1	0,1	20,3	0,2	76,9	202,1	4,3
50/70_Y + 15% CR_aaa	74	52,1	0,6	10,8	0,5	79,3	-15,0	-2,8
50/70_Z + 15% CR_aaa + 1%_g	75	67,3	0,1	14,6	0,6	78,3	302,7	14,5
50/70_AA + 15% CR_ccc	76	67,3	0,3	4,0	1,7	94,1	426,2	43,4
50/70_AA + 15% CR_w	77	49,2	0,6	2,9	1,8	94,1	217,9	40,3
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_hh	78	38,5	1,1	2,8	2,4	92,8	109,7	40,1
50/70_AA + 15% CR_y	79	69,2	0,7	7,0	1,9	89,9	182,4	39,8
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_cc	80	94,5	0,1	3,3	1,8	96,5	3460,2	56,6
50/70_AA + 15% CR_z	81	40,8	1,3	5,6	1,4	86,3	2,4	1,1
50/70_AA + 15% CR_aa	82	36,3	0,8	3,7	1,8	89,9	129,2	32,7
50/70_AA + 15% CR_bb	83	38,4	2,6	2,8	2,8	92,8	6,4	5,4
50/70_AA + 15% CR_cc	84	44,6	0,6	11,6	1,0	74,0	58,4	12,0
50/70_AA + 15% CR_dd	85	59,1	0,4	11,6	1,0	80,3	140,3	19,7
50/70_AA + 15% CR_ee	86	20,3	1,7	1,0	2,8	95,2	64,0	34,7
50/70_AA + 15% CR_ff2	87	91,4	0,1	3,7	2,3	95,9	1712,6	69,6
50/70_AA + 15% CR_ff	88	94,1	0,0	8,8	1,1	90,7	2669,5	33,2
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_ii	89	58,2	0,3	10,7	0,6	81,7	113,2	9,6
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_jj	90	20,2	3,8	0,8	6,3	96,0	64,9	79,4
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_gg	91	43,0	1,4	3,3	2,2	92,4	55,8	25,6
50/70_AA + 15% CR_y + 5%_ii	92	38,5	1,0	8,7	1,3	77,4	27,1	9,0
50/70_AA + 15% CR_gg	93	27,6	1,3	3,3	1,9	88,1	46,1	19,4
50/70_AA + 15% CR_hh	94	19,8	3,9	2,2	2,8	88,9	-27,7	-34,9
50/70_AA + 15% CR_ii	95	11,9	3,6	1,0	3,7	91,3	1,2	1,5
50/70_AA + 15% CR_ii + 5%_gg	96	20,6	1,4	4,1	2,1	79,9	48,1	21,8
50/70_AA + 15% CR_ii + 5%_gg2	97	17,5	1,7	2,6	2,4	84,9	41,7	22,3
50/70_AA + 15% CR_jj	98	24,3	3,2	3,5	2,3	85,5	-29,1	-29,8
50/70_AA + 15% CR_kk	99	15,5	1,9	1,6	2,4	89,9	23,8	14,7
50/70_AA + 15% CR_kk + 5%_t	100	31,5	1,0	3,7	2,4	88,2	133,2	43,5
50/70_AA + 15% CR_x + 1%_g	101	96,9	0,0	7,9	0,8	91,9	4393,2	25,5
50/70_AA + 15% CR_x + 2%_ll	102	39,3	0,3	20,0	0,5	49,1	92,7	8,1
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_cc (170°C)	103	91,2	0,7	5,2	1,8	94,3	149,8	34,8
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_cc + 1%_g	104	98,5	0,1	17,3	0,4	82,4	188,2	8,5

50/70_AA + 15% CR_x + 5%_cc2	105	84,0	1,0	6,5	1,3		92,2	20,7	6,9
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_cc + gg	106	97,6	0,0	10,5	0,9		89,2	3623,5	27,4
50/70_KK + 15% CR_x + 5%_cc	107	95,0	0,2	3,3	2,6		96,5	1497,5	79,8
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_dd + 1,5%_ee	108	91,3	0,8	7,1	1,2		92,2	58,1	14,6
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_dd + 1%_g	109	106,6	1,2	34,5	0,2		67,6	-84,8	-32,9
50/70_KK + 15% CR_v + 5%_dd	110	97,3	0,0	18,3	0,5		81,2	4419,8	15,8
50/70_AA+ 15% CR_v + 5%_dd + 1%_ee	111	89,3	0,0	11,7	0,7		86,9	5801,9	20,7
50/70_AA + 15% CR_v + 5%_ff + 1%_ee2	112	95,3	0,1	4,9	1,5		94,9	1425,7	44,6
50/70_X + 15% CR_vv	113	89,8	0,1	5,1	1,3		94,3	1426,1	40,5
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_gg	114	94,5	0,0	7,8	1,2		91,7	4400,2	39,1
50/70_AA + 15% CR_x + 5%_t	115	37,2	0,8	11,4	1,4		69,4	66,7	17,8
50/70_AA + 15% CR_v + 3%_cc	116	98,1	0,0	8,5	0,8		91,4	8934,6	26,2
50/70_AA + 15% CR_v + 7%_cc	117	95,6	0,1	20,5	0,4		78,6	506,3	11,0
50/70_AA + 15% CR_v + 9%_cc	118	97,6	0,0	37,3	0,1		61,8	677,7	3,7
50/70_KK + 15% CR_v + dd + 0,5%_ee	119	50,0	0,6	7,0	1,0		86,0	61,1	12,0
50/70_KK + 15% CR_v + dd + 1,5%_ee	120	33,9	2,1	2,2	3,3		93,4	55,7	37,5
50/70_KK + 15% CR_v + dd + 2%_ee	121	35,0	1,3	4,3	1,6		87,7	19,9	8,3
50/70_AA + 15% CR_ll + 1%_ee	122	98,6	0,2	43,6	0,1		55,8	-73,0	-5,0
50/70_AA + 15% CR_mm + 3% ff	123	97,9	0,0	0,0	0,6		100,0	14648809	19,4
50/70_AA + 15% CR_mm + 3% ff (170°C)	124	42,3	0,9	4,1	1,5		90,2	62,1	18,4
50/70_AA + 15% CR_mm + 7% ff	125	39,6	1,1	3,4	2,0		91,4	83,2	29,9
50/70_AA + 15% CR_nn + 1%_g	126	34,1	0,3	10,8	0,5		68,3	85,6	7,5
70/100_T + 15% CR_l + 1%_g	127	31,8	0,5	8,4	0,7		73,5	52,7	8,0
70/100_D + 15% CR_r	128	28,0	0,8	11,4	1,1		59,2	34,2	9,0
70/100_D + 15% CR_o	129	68,0	0,3	11,6	1,3		83,0	283,6	31,0
70/100_U + 15% CR_rr	130	4,2	6,3	0,3	7,4		92,7	17,1	34,8
70/100_U + 15% CR_ss	131	4,5	3,6	0,3	4,0		93,3	13,1	15,1
70/100_M + 15% CR_ww	132	28,5	0,6	9,0	1,5		68,5	141,6	28,5
70/100_M + 15% CR_xx	133	36,1	0,9	12,0	0,9		66,8	-1,1	-0,3
70/100_M + 15% CR_zz + bb	134	46,6	0,5	9,0	1,2		80,7	132,6	21,5
CRMB_A	135	97,0	0,0	4,7	1,7	- -	95,1	29611,0	54,2

CRMB_B	136	16,6	4,5	0,5	7,0	-	-	97,2	56,7	81,7
CRMB_C	137	60,1	1,7	0,6	5,9			98,9	247,3	136,7
70/100_B + 15% CR_pp	138	16,5	1,8	1,3	2,5			91,9	40,0	23,5
70/100_B + 15% CR_qq	139	78,7	0,3	4,2	1,8			94,6	574,7	50,0
50/70_JJ + 20% CR_p	140	58,5	0,1	17,8	0,4			69,6	168,7	7,2
50/70_JJ + 20% CR_p2	141	43,8	0,1	20,5	0,2			53,2	64,9	2,5
50/70_JJ + 20% CR_q	142	96,0	0,0	97,2	0,0			-1,3	-30,2	0,0
50/70_JJ + 20% CR_q2	143	93,7	0,0	88,4	0,0			5,7	241,8	0,1
50/70_JJ + 20% CR_q (60min)	144	33,7	0,4	7,5	0,7			77,7	66,3	9,0
50/70_Y + 20% CR_aaa	145	52,9	0,3	16,6	0,4			68,6	39,9	3,7
70/100_D + 20% CR_r	146	49,0	0,5	17,8	0,8			63,8	84,2	12,4
70/100_D + 20% CR_h	147	86,3	0,0	28,7	0,4			66,8	664,7	10,6
70/100_V + 20% CR_ccc	148	5,2	7,0	0,3	7,7			94,5	9,4	21,3
70/100_V + 20% CR_ddd	149	9,2	2,2	0,9	2,8			90,3	23,5	17,0
CRMB_H	150	57,6	0,2	16,5	0,4			71,3	117,8	7,0
CRMB_I	151	51,6	0,4	6,9	1,0			86,7	181,0	21,7
CRMB_J	152	31,7	0,4	9,5	0,6			69,9	62,7	8,1
70/100_D + 22% CR_r	153	51,6	0,3	23,3	0,6			54,9	95,0	9,6
70/100_D + 22% CR_r + 0,5%_g	154	39,5	0,5	8,9	1,0			77,6	94,8	15,3
70/100_D + 22% CR_r + 1%_g	155	46,9	0,3	21,0	0,5			55,4	83,9	6,9
70/100_D + 22% CR_r + 1,5%_g	156	51,5	0,1	33,3	0,2			35,2	55,2	1,9
70/100_D + 22% CR_r + bb	157	33,2	0,9	4,8	1,7			85,5	91,2	26,3
70/100_D + 25% CR_r	158	38,6	0,5	23,9	0,7			38,2	38,7	6,0

Krátkodobé stárnutí silničních asfaltů

Označení	Číslo	0,1 kPa		3,2 kPa		Rozdíl (0,1 kPa - 3,2 kPa)		
		%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	$J_{nr,slope}$ [%]
TFOT								
50/70_L	1	8,0	1,4	1,9	1,6	75,7	16,9	7,4
50/70_M	2	3,8	1,2	1,2	1,3	68,1	5,8	2,3
50/70_U	3	1,5	2,0	0,3	2,1	79,1	6,3	4,0
50/70_V	4	39,8	0,2	29,1	0,2	26,9	22,0	1,3
50/70_P	5	6,8	1,1	1,7	1,3	75,2	11,5	4,2
50/70_P + 5%_y	6	49,8	0,1	17,5	0,3	64,8	94,0	3,9
50/70_P + 6%_y	7	95,9	0,0	16,5	0,2	82,8	5260,0	6,0
50/70_I	8	7,1	0,6	2,9	0,7	59,3	8,7	1,8
50/70_I + 0,6%_kk	9	22,1	0,3	12,9	0,3	41,6	16,4	1,3
50/70_I + 0,3%_kk	10	19,3	0,3	10,4	0,4	46,3	19,1	1,8
50/70_I + 0,6%_ll	11	20,0	0,3	11,0	0,3	44,9	19,4	1,7
50/70_I + 0,3%_ll	12	7,6	0,6	3,0	0,7	60,5	12,8	2,4
50/70_I + 0,3%_mm	13	7,9	0,4	4,6	0,5	42,1	21,3	2,9
50/70_I + 0,1%_t	14	14,0	0,3	10,1	0,3	27,9	-3,3	-0,4
50/70_LL	15	5,5	0,7	4,2	0,6	23,0	-10,7	-2,5
50/70_AA + 0,5%_s + 2%_t	16	5,6	9,1	0,1	5,2	97,9	-42,7	-125,4
50-70_AA + 0,15%_t	17	2,2	6,4	0,1	3,3	95,9	-48,2	-99,6
RTFOT								

50/70_N	18	5,6	1,6	1,1	1,6	79,7	-1,3	-0,7
50/70_O	19	3,6	1,0	1,4	1,3	62,7	35,4	11,1
50/70_P + 5%_y	20	32,0	0,3	5,7	0,7	82,2	126,2	13,1
50/70_P + 6%_y	21	41,4	0,2	8,0	0,7	80,8	165,5	13,2
Extrakce								
50/70_EX-A	22	0,8	1,0	0,4	1,6	45,6	55,5	17,9
50/70_EX-B	23	1,1	1,0	1,0	1,3	15,1	36,5	11,4
50/70_EX-C	24	0,8	1,1	0,3	2,0	64,3	76,8	27,6
50/70_EX-D	25	7,2	1,3	2,0	1,5	72,2	10,4	4,5
50/70_EX-E	26	14,9	0,6	7,6	0,6	49,2	1,7	0,3
50/70_EX-F	27	2,1	0,7	0,2	1,6	91,2	113,7	27,4
50/70_EX-G	28	7,4	0,6	6,3	0,5	14,2	-1,7	-0,3
50/70_EX-H	29	6,9	0,7	3,3	0,8	51,5	17,0	3,6
70/100_EX-A	30	1,9	2,0	0,3	2,1	82,3	4,1	2,6
70/100_EX-B	31	1,9	2,7	0,3	2,8	85,3	2,8	2,5
70/100_EX-C	32	0,5	0,8	0,5	1,2	0,6	62,4	15,2
70/100_EX-D	33	5,7	1,4	1,7	1,4	69,7	3,3	1,4
70/100_EX-E	34	6,2	0,5	2,2	1,0	65,0	74,8	13,2
70/100_EX-F	35	4,5	0,5	2,8	1,1	39,2	118,2	19,2
20/30_EX-A	36	24,5	0,3	9,3	0,3	62,1	15,0	1,5
20/30_EX-B	37	46,4	0,1	16,3	0,2	64,9	66,9	2,0
50/70_EX-I	38	1,1	5,5	0,1	5,8	87,0	5,6	10,0
50/70_EX-J	39	3,3	2,2	0,6	2,2	83,0	0,7	0,5
50/70_EX-K	40	4,4	1,9	0,7	2,0	82,9	4,7	2,9
50/70_EX-L	41	6,2	2,2	0,7	2,6	88,0	18,5	13,0
PMB_EX-B	42	40,1	0,2	33,4	0,2	16,7	8,3	0,5
PMB_EX-C	43	40,9	0,3	30,3	0,4	26,0	27,7	3,1
PMB_EX-D	44	31,7	0,5	21,4	0,6	32,7	25,8	4,2
PMB_EX-E	45	29,2	0,6	17,3	0,7	40,6	29,5	5,4
PMB_EX-F	46	41,8	0,3	30,3	0,4	27,5	23,0	2,5
PMB_EX-G	47	40,9	0,2	34,5	0,3	15,6	15,6	1,3
PMB_EX-A	48	44,6	0,2	36,1	0,2	18,9	21,2	1,2
20/30_EX-A	49	42,1	0,1	35,3	0,1	16,1	4,8	0,2
20/30_EX-B	50	44,7	0,0	48,3	0,0	-8,0	-35,3	-0,5

Dlouhodobé stárnutí silničních asfaltů

Označení	Číslo	0,1 kPa		3,2 kPa		Rozdíl (0,1 kPa - 3,2 kPa)		
		%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	$J_{nr,slope}$ [%]
PAV								
50/70_L	1	24,9	0,1	22,8	0,1	8,4	-4,0	-0,1
50/70_M	2	9,7	0,3	6,9	0,3	28,1	1,5	0,2
50/70_U	3	10,4	0,4	5,8	0,4	44,9	8,7	1,1
50/70_V	4	18,6	0,2	13,9	0,2	25,4	3,9	0,3
TFOT+PAV								
50/70_L	5	33,5	0,1	30,9	0,1	7,9	0,3	0,0
50/70_M	6	13,5	0,2	9,9	0,3	26,8	6,9	0,5
50/70_U	7	10,7	0,4	7,2	0,4	32,7	10,4	1,2
50/70_V	8	27,9	0,1	25,0	0,1	10,6	0,6	0,0
50/70_P	9	27,3	0,3	9,5	0,2	65,4	-17,5	-1,6
50/70_P + 5%_y	10	69,2	0,0	24,1	0,1	65,1	68,2	0,8
50/70_P + 6%_y	11	59,3	0,0	27,7	0,1	53,3	177,1	1,1

50/70_LL	12	24,5	0,1	13,4	0,1	45,4	6,4	0,2
50/70_N	13	17,0	0,3	14,0	0,2	18,0	-16,4	-1,5
50/70_O	14	11,4	0,3	6,8	0,3	40,2	5,4	0,6
50/70_OO	15	50,6	0,1	11,2	0,2	77,9	60,9	2,8
50/70_AA + 0,5%_s	16	10,0	0,1	3,8	0,1	61,7	67,0	1,9
50/70_AA + 1%_s	17	12,5	0,2	12,2	0,2	1,8	12,5	0,6
50/70_AA + nn	18	42,0	0,0	25,7	0,0	38,8	45,1	0,4
50/70_AA + 0,5%_s + 2%_f	19	15,6	0,1	13,2	0,1	15,4	-7,9	-0,3
50-70_AA + 0,15%_t	20	28,1	0,1	16,9	0,1	39,8	32,3	0,8
3xRTFOT								
50/70_N	21	16,9	0,3	13,0	0,3	23,3	-12,1	-1,2
50/70_OO	22	18,6	0,3	14,0	0,2	24,5	-13,0	-1,1

Krátkodobé stárnutí PMB pojiv – laboratorní metoda TFOT nebo RTFOT

Označení	Číslo	0,1 kPa		3,2 kPa		Rozdíl (0,1 kPa - 3,2 kPa)		
		%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	$J_{nr,slope}$ [%]
25/55-55_E	1	31,3	0,257	24,6	0,287	21,3	11,7	0,97
25/55-55_F	2	24,6	0,397	12,7	0,516	48,2	29,9	3,83
25/55-55_G	3	69,2	0,173	53,7	0,370	22,4	114,0	6,36
25/55-55_H	4	41,3	0,353	33,6	0,436	18,5	23,6	2,69
25/55-55_I	5	55,8	0,214	51,7	0,238	7,3	11,0	0,76
25/55-60_E	6	83,6	0,068	72,1	0,156	13,8	129,4	2,84
25/55-60_A	7	60,1	0,133	72,8	0,044	-21,1	-67,2	-2,89
25/55-60_F	8	70,2	0,207	73,2	0,153	-4,3	-25,9	-1,73
25/55-60_G	9	73,9	0,069	74,8	0,058	-1,3	-16,5	-0,37
25/55-60_B	10	80,6	0,110	65,8	0,164	18,3	49,1	1,74
25/55-80_A	11	65,4	0,103	62,1	0,099	5,1	-3,7	-0,12
40/100-65_C	12	70,0	0,187	88,1	0,023	-25,9	-87,4	-5,28
40/100-65_D	13	84,8	0,089	88,9	0,041	-4,8	-54,6	-1,57
40/100-65_A	14	89,9	0,037	89,1	0,038	0,9	2,5	0,03
40/100-65_E	15	74,1	0,091	90,8	0,011	-22,5	-88,5	-2,61
40/80-85_A	16	81,1	0,078	84,6	0,069	-4,3	-11,9	-0,30
40/80-85_A + 1%_y	17	81,2	0,065	85,1	0,060	-4,9	-6,5	-0,14
45/80-65_A	18	69,6	0,129	79,9	0,072	-14,7	-44,2	-1,84
45/80-65_B	19	49,8	0,130	17,5	0,252	64,8	94,0	3,94
45/80-65_C	20	95,9	0,004	16,5	0,191	82,8	5260,0	6,03
50/70_P + 3% SBS_b	21	99,5	0,001	34,1	0,182	65,7	23146,0	5,83

Dlouhodobé stárnutí PMB pojiv – laboratorní metoda PAV

Označení	Číslo	0,1 kPa		3,2 kPa		Rozdíl (0,1 kPa - 3,2 kPa)		
		%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	%R [%]	J_{nr} [kPa^{-1}]	R_{diff} [%]	$J_{nr,diff}$ [%]	$J_{nr,slope}$ [%]
25/55-55_E	1	71,6	0,040	50,2	0,073	30,0	80,9	1,05
25/55-55_F	2	32,7	0,116	31,9	0,115	2,5	-0,6	-0,02
25/55-55_G	3	64,6	0,081	61,4	0,088	5,0	7,9	0,21
25/55-55_H	4	56,2	0,056	54,8	0,058	2,5	2,8	0,05
25/55-55_I	5	52,1	0,134	50,8	0,134	2,5	0,2	0,01

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta stavební

Katedra silničních staveb

Dlouhodobé stárnutí PMB pojiv – laboratorní metoda TFOT+PAV nebo RTFOT+PAV

		0,1 kPa		3,2 kPa		Rozdíl (0,1 kPa - 3,2 kPa)		
Označení	**Číslo**	**%R**	**J_{nr}**	**%R**	**J_{nr}**	**R_{diff}**	**$J_{nr,diff}$**	**$J_{nr,slope}$**
		[%]	**[kPa^{-1}]**	**[%]**	**[kPa^{-1}]**	**[%]**	**[%]**	**[%]**
25/55-55_E	1	61,7	1,091	58,4	0,034	5,3	5,2	0,05
25/55-55_F	2	42,1	1,663	41,5	0,052	1,4	-21,4	-0,46
25/55-55_G	3	67,9	1,912	64,4	0,060	5,1	9,4	0,17
25/55-55_H	4	72,4	1,135	60,5	0,035	16,4	48,9	0,38
25/55-55_I	5	57,3	3,173	53,8	0,099	6,1	5,9	0,18
25/55-60_E	6	87,0	2,064	59,5	0,065	31,6	44,2	0,64
25/55-60_A	7	79,6	2,777	63,9	0,087	19,8	31,6	0,67
25/55-60_F	8	64,5	1,903	64,2	0,059	0,4	-15,3	-0,35
25/55-60_G	9	52,8	0,796	68,7	0,025	-30,2	-75,0	-2,41
25/55-60_B	10	43,7	2,831	49,6	0,088	-13,6	-18,3	-0,64
25/55-80_A	11	79,0	0,244	80,9	0,008	-2,4	-28,2	-0,10
40/100-65_C	12	86,2	0,731	86,6	0,023	-0,4	-46,7	-0,65
40/100-65_D	13	88,6	0,643	88,2	0,020	0,4	-16,3	-0,13
40/100-65_A	14	65,2	0,119	90,0	0,004	-38,1	-93,7	-1,80
40/100-65_E	15	92,1	0,553	91,8	0,017	0,3	-6,2	-0,04
40/80-85_A	16	80,3	1,052	80,7	0,033	-0,6	-32,7	-0,52
40/80-85_A + 1%_y	17	85,1	1,033	79,5	0,032	6,6	-17,9	-0,23
45/80-65_A	18	86,2	0,477	79,2	0,015	8,1	10,7	0,05
45/80-65_B	19	69,2	2,060	24,1	0,064	65,1	68,2	0,84
45/80-65_C	20	59,3	1,706	27,7	0,053	53,3	177,1	1,10
50/70_P + 3% SBS_b	21	97,1	1,148	75,3	0,036	22,5	14032,0	1,15

PŘÍLOHA D

Zelená výplň značí velmi silnou korelaci a modrá výplň označuje silnou korelaci.

Tab. 63: *Korelační koeficient jednotlivých charakteristik (část 1)*

	KK	Pen	PI	SS	VD	visk.135°C	visk.150°C	G*	δ	G*/sin	G*.sin	G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]}	T_{VET}	G_{VET}
Bod měknutí (KK)	1,000													
Penetrace	-0,562	1,000												
Penetrační index (PI)	0,917	-0,265	1,000											
Skladovací stabilita (SS)	0,341	-0,211	0,212	1,000										
Vratná duktilita (VD)	0,689	-0,422	0,658	0,123	1,000									
Dynamická visk. 135 °C	0,544	-0,309	0,443	0,236	0,202	1,000								
Dynamická visk. 150 °C	0,440	-0,177	0,370	0,228	0,088	0,818	1,000							
G*	0,516	-0,429	0,340	0,599	0,327	0,558	0,501	1,000						
δ	-0,739	0,509	-0,640	-0,162	-0,717	-0,664	-0,547	-0,589	1,000					
G*/sin	0,378	-0,270	0,264	0,549	0,299	0,427	0,387	0,911	-0,600	1,000				
G*.sin	0,567	-0,563	0,364	0,614	0,337	0,660	0,565	0,951	-0,527	0,740	1,000			
G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]}	0,252	-0,078	0,203	0,373	0,031	0,055	-0,012	0,380	-0,200	0,227	0,451	1,000		
T_{VET}	0,489	-0,724	0,125	0,506	0,201	0,330	0,285	0,393	-0,469	0,405	0,381	0,230	1,000	
G_{VET}	-0,041	-0,139	-0,136	0,362	-0,284	-0,218	-0,376	0,663	0,116	0,635	0,688	0,210	-0,220	1,000
$\varepsilon_{0,1}$	-0,540	0,640	-0,465	-0,037	-0,600	-0,313	-0,235	-0,297	0,637	-0,198	-0,363	-0,121	-0,305	0,042
$\%R_{0,1}$	0,600	-0,182	0,543	0,345	0,560	0,493	0,461	0,375	-0,700	0,321	0,367	0,143	0,130	-0,090
$J_{nr,0,1}$	-0,540	0,683	-0,450	-0,037	-0,600	-0,333	-0,224	-0,294	0,628	-0,194	-0,361	-0,118	-0,353	0,026
$\varepsilon_{3,2}$	-0,554	0,711	-0,440	-0,001	-0,724	-0,380	-0,222	-0,330	0,677	-0,218	-0,406	-0,135	-0,413	0,013
$\%R_{3,2}$	0,738	-0,255	0,709	0,415	0,774	0,552	0,437	0,434	-0,764	0,363	0,432	0,227	0,162	-0,055
$J_{nr,3,2}$	-0,549	0,714	-0,433	-0,007	-0,723	-0,381	-0,219	-0,328	0,672	-0,216	-0,404	-0,134	-0,415	0,009
$\varepsilon_{8,0}$	-0,550	0,535	-0,427	0,428	-	-0,468	-0,420	-0,377	0,652	-0,349	-0,413	0,058	-0,053	-0,127
$\%R_{8,0}$	0,729	-0,107	0,718	-0,247	-	0,785	0,734	0,529	-0,842	0,529	0,523	-0,196	-0,266	-0,091
$J_{nr,8,0}$	-0,570	0,558	-0,444	0,428	-	-0,468	-0,420	-0,385	0,669	-0,356	-0,423	0,058	-0,090	-0,129
$R_{diff,0,1-3,2}$	-0,580	0,478	-0,514	-0,123	-0,865	-0,312	-0,174	-0,369	0,683	-0,257	-0,434	-0,217	-0,292	-0,007
$J_{nr,diff,0,1-3,2}$	0,011	0,047	-0,056	-0,010	-0,108	-0,006	0,100	0,012	-0,083	0,022	-0,001	0,001	0,082	-0,065
$R_{diff,0,1-8,0}$	-0,605	0,107	-0,649	-0,732	-	-0,480	-0,410	-0,320	0,654	-0,318	-0,317	0,076	0,234	0,053
$J_{nr,diff,0,1-8,0}$	-0,190	0,202	-0,126	0,010	-	-0,211	-0,183	-0,130	0,146	-0,126	-0,135	0,015	0,098	-0,073

Tab. 64: *Korelační koeficient jednotlivých charakteristik (část 2)*

	$\varepsilon_{0,1}$	$\%R_{0,1}$	$J_{nr,0,1}$	$\varepsilon_{3,2}$	$\%R_{3,2}$	$J_{nr,3,2}$	$\varepsilon_{8,0}$	$\%R_{8,0}$	$J_{nr,8,0}$	$R_{diff,0,1-3,2}$	$J_{nr,diff,0,1-3,2}$	$R_{diff,0,1-8,0}$	$J_{nr,diff,0,1-8,0}$
Bod měknutí (KK)													
Penetrace													
Penetrační index (PI)													
Skladovací stabilita (SS)													
Vratná duktilita (VD)													
Dynamická visk. 135 °C													
Dynamická visk. 150 °C													
G*													
δ													
G*/sin													
G* .sin													
G*/{1-[1/(tg(δ)sin(δ))]}													
T_{VET}													
G_{VET}													
$\varepsilon_{0,1}$	1,000												
$\%R_{0,1}$	-0,411	1,000											
$J_{nr,0,1}$	0,981	-0,400	1,000										
$\varepsilon_{3,2}$	0,928	-0,365	0,949	1,000									
$\%R_{3,2}$	-0,443	0,714	-0,428	-0,485	1,000								
$J_{nr,3,2}$	0,921	-0,361	0,949	0,999	-0,479	1,000							
$\varepsilon_{8,0}$	0,815	-0,471	0,815	0,953	-0,547	0,953	1,000						
$\%R_{8,0}$	-0,482	0,881	-0,482	-0,536	0,996	-0,536	-0,525	1,000					
$J_{nr,8,0}$	0,833	-0,485	0,833	0,965	-0,557	0,965	0,992	-0,535	1,000				
$R_{diff,0,1-3,2}$	0,536	-0,285	0,532	0,617	-0,734	0,612	0,542	-0,637	0,555	1,000			
$J_{nr,diff,0,1-3,2}$	-0,090	0,181	-0,086	-0,036	0,018	-0,035	0,245	-0,132	0,235	0,077	1,000		
$R_{diff,0,1-8,0}$	0,483	-0,557	0,483	0,519	-0,758	0,519	0,545	-0,758	0,556	0,852	0,185	1,000	
$J_{nr,diff,0,1-8,0}$	-0,159	0,183	-0,159	0,175	-0,179	0,175	0,317	-0,192	0,307	0,258	0,955	0,279	1,000