



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

HODNOCENÍ VLASTNOSTÍ POJIV TYPU PMB OBSAHUJÍCÍCH POJIVO Z R-MATERIÁLU

EVALUATION OF PROPERTIES OF PMB CONTAINING BINDER FROM RAP

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petra Měšťanová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Petra Měšťanová
Název	Hodnocení vlastností pojiv typu PMB obsahujících pojivo z R-materiálu
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	31.3.2020
Datum odevzdání	15.1.2021

V Brně dne 31.3.2020

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky materiálů

Zkušební normy pro asfaltová pojiva

Literatura z internetu

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem diplomové práce je popsat vliv přidání různého množství pojiva znovuzískaného z R-materiálu na změnu vlastností polymerem modifikovaného asfaltu. Bude využit R-materiál obsahující nemodifikované asfaltové pojivo i R-materiál získaný z asfaltové směsi, u které lze předpokládat, že obsahuje PMB. Pro hodnocení vlastností pojiv budou vybrány vhodné laboratorní zkoušky.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Předmětem diplomové práce je popsání vlivu přidání různého množství zestárlého pojiva znovuzískaného z R-materiálu na změnu vlastností polymerem modifikovaného asfaltu. Na znovuzískání asfaltového pojiva je použit R-materiál obsahující nemodifikovaný asfalt a R-materiál, u kterého lze předpokládat modifikaci. Získané pojivo z R-materiálu je do čerstvého pojiva dávkováno v množství 15 %, 30 % a 50 %. V teoretické části jsou popsány způsoby recyklace netuhých vozovek, extrakce a regenerace asfaltového pojiva, oživení jeho vlastností a použité metody empirických a funkčních zkoušek. Praktická část práce se zabývá vyhodnocením a porovnáním výsledků vlastností smíchaných asfaltových pojiv.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfalt, modifikovaný asfalt, polymerem modifikovaný asfalt, asfaltové pojivo, R-materiál, recyklace asfaltové vozovky, penetrace jehlou, bod měknutí, metoda kroužek a kulička, vratná duktilita, bod lámavosti, komplexní smykový modul, fázový úhel, dynamický smykový reometr.

ABSTRACT

Subject of this diploma thesis is to describe the effect of adding different amount of aged binder recovered from RAP on the change of properties of polymer modified bitumen. The RAP containing unmodified bitumen and the RAP where we can expect bitumen modification are used to recover binder. The binder obtained from RAP is dosed into the virgin binder in amount of 15 %, 30 % and 50 %. The methods of recycling of flexible pavements, extraction and regeneration of asphalt binders, rejuvenating of their properties and methods of empirical and functional laboratory tests are described in the theoretical part. The practical part deals with evaluating and comparison of the results mixed binders properties.

KEYWORDS

Bitumen, modified bitumen, polymer modified bitumen, asphalt binder, RAP, asphalt pavement recycling, needle penetration, softening point, ring and ball method, elastic recovery, breaking point, complex shear modulus, phase angle, Dynamic Shear Rheometer.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Petra Měšťanová *Hodnocení vlastností pojiv typu PMB obsahujících pojivo z R-materiálu*. Brno, 2021. 80 s., 19 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Hodnocení vlastností pojiv typu PMB obsahujících pojivo z R-materiálu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 8. 1. 2021

Bc. Petra Měšťanová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Hodnocení vlastností pojiv typu PMB obsahujících pojivo z R-materiálu* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 8. 1. 2021

Bc. Petra Měšťanová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ:

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce Ing. Ondřeji Daškovi Ph.D. za jeho cenné rady, čas a pomoc při zpracování a kontrole mé práce. Poděkování patří také Pavlu Strakovi za pomoc při provádění zkoušek v laboratoři. Na závěr bych chtěla poděkovat rodině a blízkým přátelům za podporu během studia.

Obsah

1	ÚVOD.....	10
2	REŠERŠE LITERATURY	11
2.1	POLYMEREM MODIFIKOVANÝ ASFALT	11
2.2	RECYKLACE NETUHÝCH VOZOVEK	11
2.2.1	<i>R-materiál.....</i>	12
2.2.2	<i>Způsoby recyklace.....</i>	13
2.2.3	<i>Použití recyklovaných materiálů.....</i>	20
2.2.4	<i>Přidávání R-materiálu do asfaltových směsí na obalovně.....</i>	20
2.3	OŽIVENÍ VLASTNOSTÍ AFALTOVÝCH POJIV.....	23
2.3.1	<i>Rejuvenátory.....</i>	24
2.3.2	<i>Měkké asfaly.....</i>	24
2.3.3	<i>Dávkování oživovací přísady během výroby.....</i>	25
2.4	MÍCHÁNÍ POJIV Z R-MATERIÁLU A NOVÉHO POJIVA.....	26
2.4.1	<i>Extrakce a regenerace asfaltového pojiva z R-materiálu.....</i>	26
2.5	RECYPMA – VÝZKUM VLASTNOSTÍ ZESTÁRLÉHO PMB	34
3	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	35
4	POUŽITÉ MATERIÁLY	36
4.1	EXTRAHOVÁNÍ POJIVA Z R-MATERIÁLU	36
4.1.1	<i>Rotační vakuové destilační zařízení.....</i>	37
4.2	MÍCHÁNÍ SMĚSÍ POJIV.....	39
5	POUŽITÉ ZKOUŠEBNÍ METODY	39
5.1	ZKOUŠKY EMPIRICKÉ	40
5.1.1	<i>Penetrace jehlou podle ČSN en 1426.....</i>	40
5.1.2	<i>Bod měknutí – Kroužek a kulička, podle ČSN 1427.....</i>	42
5.1.3	<i>Vratná duktilita podle ČSN EN 13398.....</i>	43
5.1.4	<i>Bod lámavosti podle Fraasse podle ČSN 12593.....</i>	46
5.2	ZKOUŠKY FUNKČNÍ (SUPERPAVE©).....	48
5.2.1	<i>Dynamický smykový reometr podle čsn en 14770.....</i>	48
6	VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK.....	51
6.1	PENETRACE JEHLOU	51
6.2	BOD MĚKNUTÍ – KROUŽEK A KULIČKA	53
6.3	ZAŘAZENÍ DO TŘÍD.....	55

6.4	VRATNÁ DUKTILITA	56
6.5	BOD LÁMAVOSTI PODLE FRAASSE.....	57
6.6	DYNAMICKÝ SMYKOVÝ REOMETR.....	59
6.7	SOUHRNNÁ TABULKA VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK.....	64
6.8	VZÁJEMNÉ KORELACE	65
6.8.1	<i>Penetrace jehlou – Bod měknutí.....</i>	<i>65</i>
6.8.2	<i>Vratná duktilita – bod lámavosti</i>	<i>66</i>
6.8.3	<i>Komplexní smykový modul ve smyku – fázový úhel</i>	<i>68</i>
6.8.4	<i>Souhrnná tabulka koeficientů determinace.....</i>	<i>70</i>
7	ZÁVĚR.....	71
8	CITOVANÁ LITERATURA.....	74
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	77
10	SEZNAM GRAFŮ.....	78
11	SEZNAM TABULEK	79
12	PŘÍLOHY	81
12.1	ZÁZNAMY ZKOUŠEK	81
12.2	KOMPLETNÍ VÝSLEDKY Z DSR.....	82
12.3	ISOTERMY	96

1 ÚVOD

Výstavby a opravy vozovek jsou v dnešní době nutné pro zvyšování komfortu silniční infrastruktury. S touto činností je spojeno obrovské množství použitého materiálu. Z hlediska ochrany životního prostředí, kdy dochází k postupnému vyčerpávání zásob nerostných surovin, je zapotřebí využít co možná nejvíce odpadního materiálu, tzn. recyklace.

Recyklací rozumíme zpracování odpadu za účelem jeho dalšího využití jako druhotné suroviny. Jde o cyklické využití materiálu ve výrobním procesu, z toho pak název recyklace. Hlavními výhodami recyklace jsou snížení spotřeby těžby nových obnovitelných i neobnovitelných surovin, využití odpadů místo jejich uložení na skládku, a především ochrana životního prostředí [1]. I přes celosvětový nárůst znovuoobnovení materiálů se spotřeba nových surovin zvyšuje a nejedná se tedy o udržitelný rozvoj [2].

V silničním stavitelství se nakládá s obrovským množstvím používaných hmot, které je nutné vytěžit, přemístit a uložit. V tomto odvětví stavitelství je významná snaha využít materiály, které nemají jiné smysluplné využití, musí se však jednat o materiály přínosné pro vlastnosti (zejm. životnost) konstrukcí vozovek. Zároveň při opravách a údržbách vozovek je cílem použít veškerý materiál z vozovky, který se nazývá R-materiál. Ve velké míře se používají recyklované materiály v podkladních vrstvách za pomoci různých pojiv [3], případně recyklované materiály přidané do asfaltových směsí.

V mé diplomové práci se budu zabývat mícháním zestárlého pojiva extrahovaného z R-materiálu s pojivem nezestárlým v různých poměrech a za pomoci laboratorních zkoušek vyhodnocovat změny vlastností.

2 REŠERŠE LITERATURY

2.1 POLYMEREM MODIFIKOVANÝ ASFALT

V přírodě se asfalt vyskytuje v různém geologickém prostředí převážně jako sediment v uskupení známém jako naftonosné. Přírodní asfalty se těží už od starověku po celém světě. Nejznámějšími těžařskými oblastmi je okolí Mrtvého moře, jezero Pitch Lake na Trinidadu a Tobagu, jezero Bermudez ve Venezuele nebo třeba přírodní průsaky v Kalifornii. Takto získané asfalty se musí míchat s měkkými ropnými asfalty, neboť jsou příliš tuhé. Asfalt se také získává ze surové ropy jako zbytek po vakuové destilaci.

V současné době se zvyšují nároky na životnost pozemních komunikací z důvodu rostoucí ceny ropy, proto je potřeba zlepšovat vlastnosti asfaltových pojiv. Používá se především modifikace polymerem. Takto modifikovaná asfaltová pojiva jsou zpracovávána při teplotách v rozmezí 150 °C až 180 °C. Avšak působením vysokých teplot dochází k přehřátí pojiva a tím k degradaci polymeru. Zároveň asfaltová pojiva postupem času stárnou, a tak dochází ke zhoršování jejich vlastností. Hlavní příčinou stárnutí je oxidace, při které se zhoršují chemické a fyzikální vlastnosti jako je pružnost, modul tuhosti a křehkost za nízkých teplot.

Po skončení své životnosti by měly být vozovky z polymerem modifikovaného asfaltu recyklovány. Zestárlý modifikovaný asfalt je možné recyklovat za pomoci rejuvenátorů nebo přidáním nového měkkého asfaltu [4].

2.2 RECYKLACE NETUHÝCH VOZOVEK

Netuhou vozovkou rozumíme vozovku s krytem z asfaltových směsí a nestmelených podkladních vrstev [5].

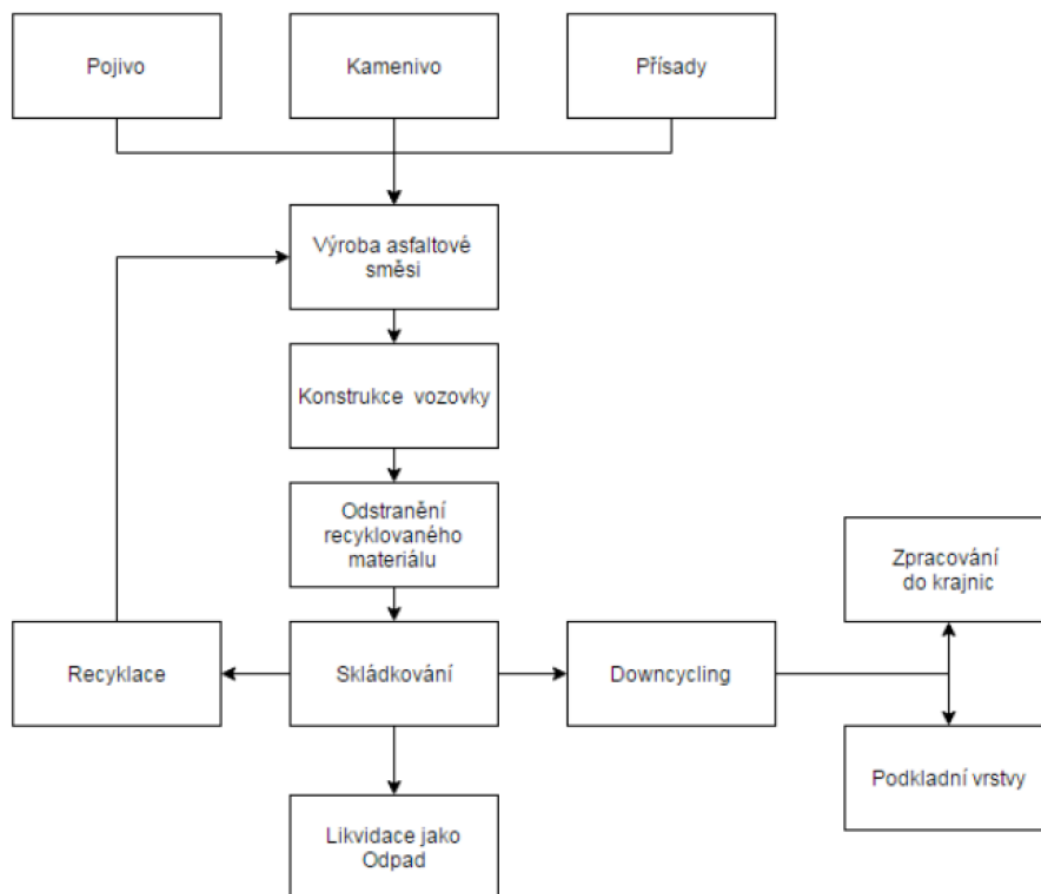
Recyklaci vozovek předchází diagnostický průzkum. Diagnostickým průzkumem se zhodnotí typ a rozsah poruch vizuální prohlídkou. Dále se kopanými či vrtanými sondami zjistí stav, tloušťka a druh konstrukčních vrstev. Důležité je také zjistit druh zeminy v podloží z hlediska dostatečné únosnosti [6].

Recyklace přináší celou řadu výhod:

- Snížení spotřeby materiálů jako je kamenivo a asfalt
- Snížení spotřeby pohonných hmot
- Snížení znečištění ovzduší výfukovými plyny
- Redukce vzniku skleníkových plynů, zejména CO₂
- Redukce hluku
- Omezení skládek pro materiál
- Snížení ekonomických nákladů
- Zkrácení doby výstavby [7]

Těmito pozitivními vlivy směřujeme k udržitelnému rozvoji, který je pro naši a budoucí společnost velmi důležitý. [7]

Na obrázku 1 je znázorněn životní cyklus asfaltové směsi. Objevuje se zde termín „downcycling“, který svým významem znamená použití jiným způsobem, než byl jeho původní záměr. Příkladem může být materiál použitý do krajnic [7].



Obrázek 1: Životní cyklus asfaltové směsi [7]

2.2.1 R-MATERIÁL

Jedná se o asfaltovou směs, která se získá odfrézováním asfaltové vrstvy vozovky nebo vybouráním desek či velkých kusů z vozovky a jejich podrcením nebo také asfaltové směsi z nadbytečné výroby [8].

Frézování vrstev vozovky se provádí pomocí silničních fréz za studena. Jednotlivé konstrukční vrstvy je potřeba frézovat samostatně, aby se dosáhlo co nejvyšší kvality získaného materiálu. Zásadou tohoto postupu je možné použít materiál z obrusné vrstvy opět do obrusné vrstvy. Znovupoužití R-materiálu je tedy závislé na druhu vrstvy odkud byl recyklovaný materiál získán. Je však nutné počítat s tím, že frézováním dochází ke změně zrnitosti R-materiálu. Asfaltový recyklát se skladuje odděleně podle typu konstrukční vrstvy odkud byl vyfrézován a je vhodné ho skladovat v suchu. [9] Na obrázku 2 je zachyceno zastřešení skládky R-materiálu na obalovně.



Obrázek 2: Skladování R-materiálu [10]

2.2.2 ZPŮSOBY RECYKLACE

Recyklaci lze rozdělit do dvou základních skupin, a to podle místa provádění a podle teploty provádění. Recyklace se může provádět na místě nebo v míchacím centru, za horka nebo za studena. Rozeznáváme tedy čtyři způsoby recyklace: [10]

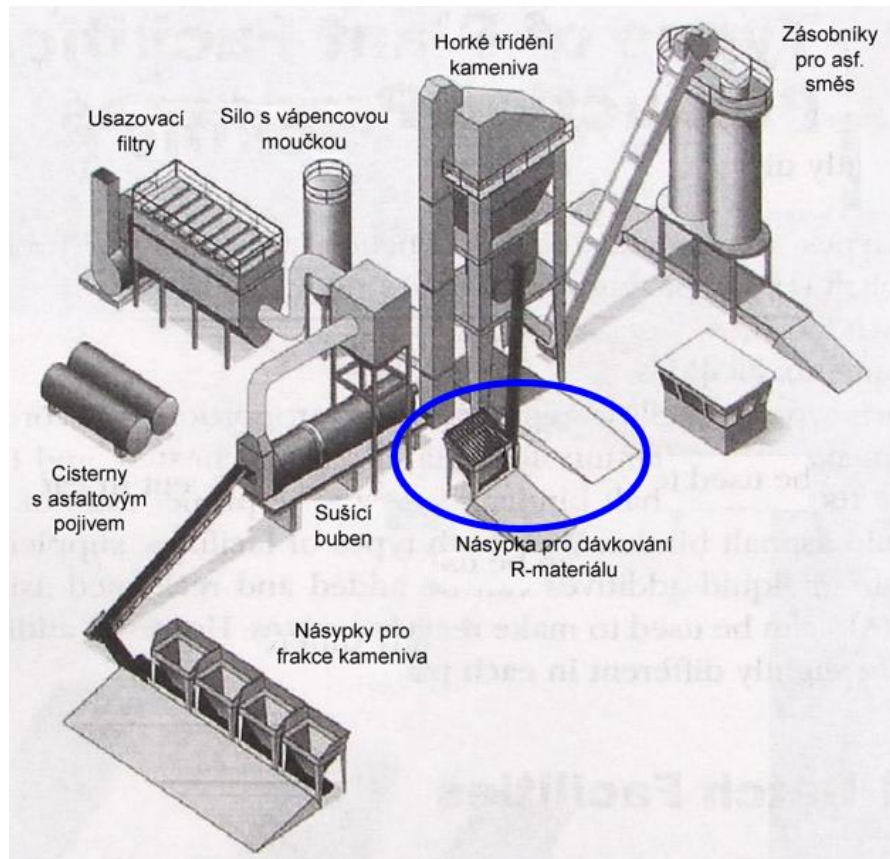
- V míchacím centru (na obalovně) za horka
- V míchacím centru (na obalovně) za studena
- Na místě za horka
- Na místě za studena [10]

2.2.2.1 V MÍCHACÍM CENTRU (NA OBALOVNĚ) ZA HORKA

Vyfrézovaná či vybouraná asfaltová směs z vozovky je odvezena do míchacího centra (obalovny) k dalšímu novému zpracování. R-materiál se nadrtí, roztřídí a následně dávkuje, což probíhá třemi způsoby: [11]

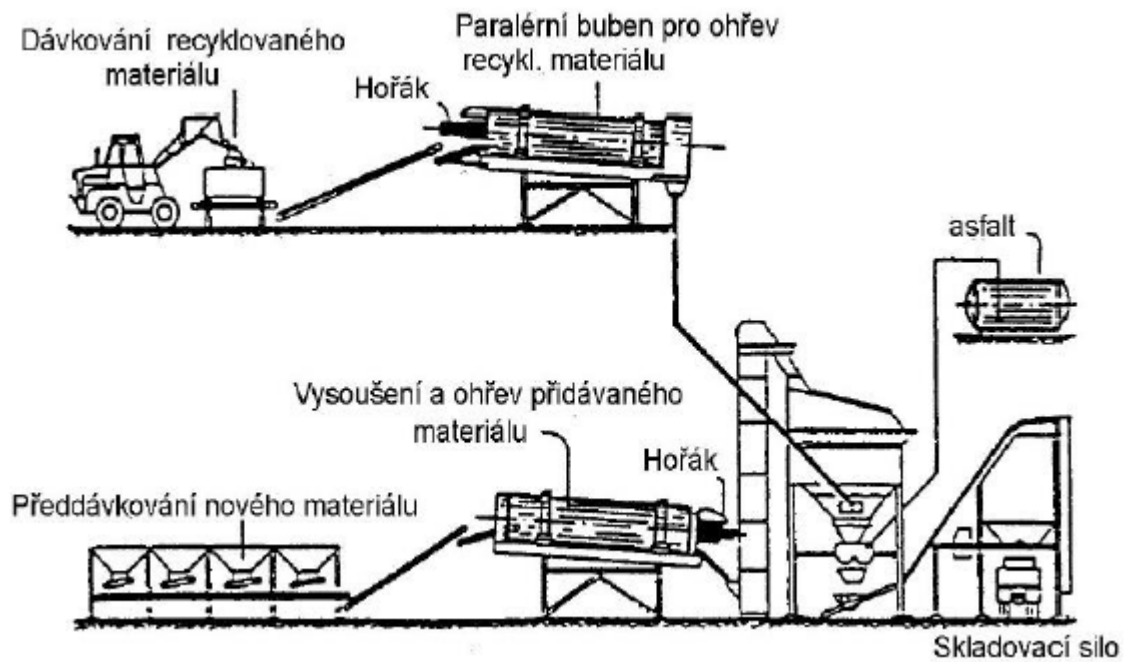
- Dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny
 - Nadrcená vyfrézovaná asfaltová směs se roztřídí na jednotlivé frakce. Přímo do míchačky šaržové obalovny se dle druhu asfaltové směsi přidává hrubší či jemnější frakce R-materiálu bez předchozího nahřátí. Kamenivo použité do směsi se tedy musí nahřát na vyšší teplotu, než je předepsaná teplota míchání.
 - Při této metodě se do směsi přidává maximálně 25 % R-materiálu, při požadavku většího množství je nutné provést výpočet gradace přidaného pojiva.

- Tato metoda je nevhodná z hlediska vzniku vodních par při míchání, způsobené vlhkostí recyklovaného materiálu, proto je nutné do výrobního cyklu začlenit odvětrávání. [11]
- Na obrázku 3 je vidět umístění násypky pro dávkování R-materiálu.



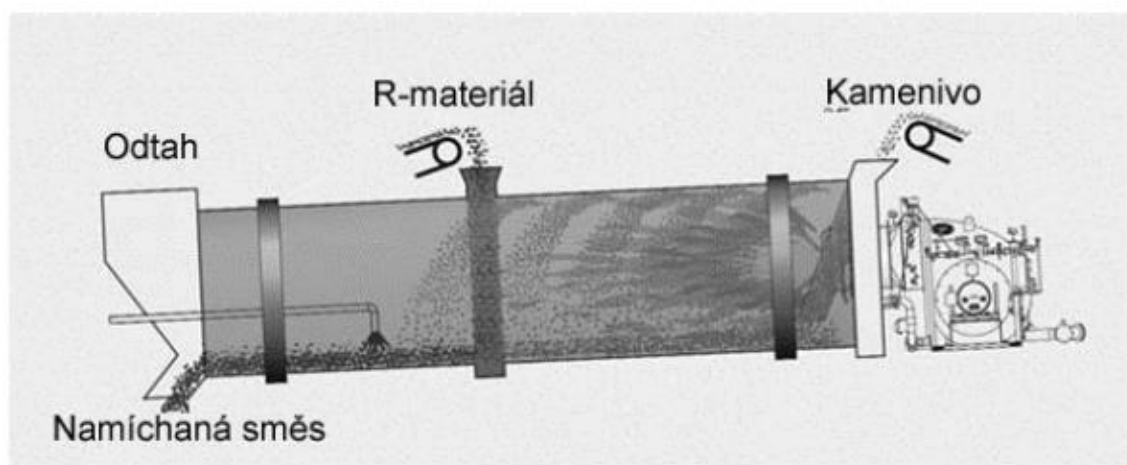
Obrázek 3: Dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny [11]

- Předehřívání R-materiálu v paralelním sušícím bubnu
 - R-materiál se předehřívá v paralelním sušícím bubnu a poté se přidává do míchačky. Tato metoda umožňuje dávkování většího množství R-materiálu než předchozí metoda. V sušícím bubnu se dá předehřát až 80 % recyklátu pro použití do podkladních vrstev. Vzhledem k vysokému množství dávkovaného R-materiálu je nutná pravidelná kontrola vlastností pojiva [6].
 - Uspořádání obalovny s předehříváním R-materiálu v paralelním bubnu je znázorněn na obrázku 4.

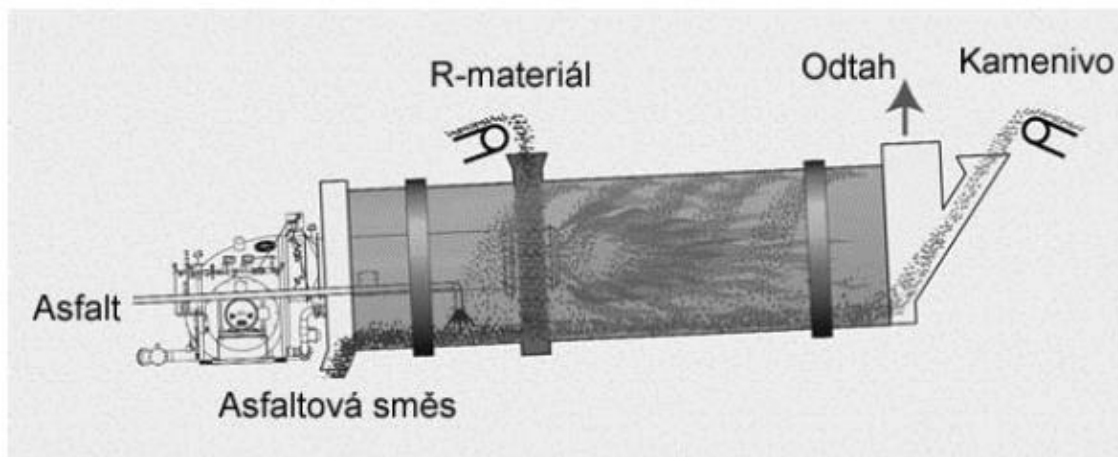


Obrázek 4: Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu [6]

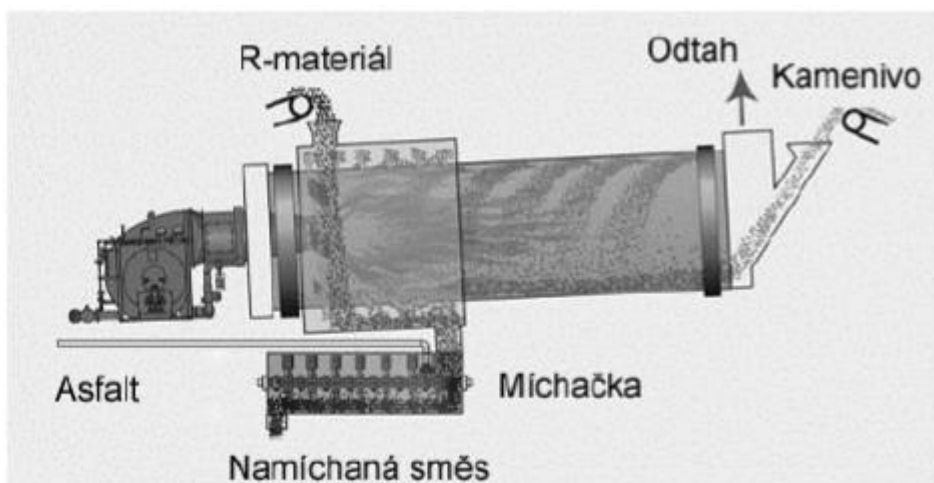
- Metoda Drum-mix v kontinuální obalovně
 - Metoda Drum-mix je rozvinutá především v USA, kde se asfaltové směsi zpracovávají tímto způsobem až v 80 %. Při této metodě se požaduje stálá kvalita vstupního materiálu, toho lze dosáhnout přidáním R-materiálu o vysoké kvalitě [11].
 - Asfaltová směs s R-materiálem může být v kontinuální obalovně připravována několika způsoby. R-materiál se při výrobě směsi přidává s proudem horkého vzduchu (obr. 5) nebo proti proudu horkého vzduchu (obr. 6). Dalším způsobem je separátní vysoušení R-materiálu (obr. 7) ve vnějším bubnu a kameniva ve vnitřním sušícím bubnu s následným mícháním asfaltové směsi v míchačce [10].



Obrázek 5: Přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu [10]



Obrázek 6: Přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu [10]



Obrázek 7: Separátní vysoušení R-materiálu a kameniva [10]

2.2.2.2 V MÍCHACÍM CENTRU ZA STUDENA

Vyfrézovaný materiál se uloží na skládku v místě stavby nebo na jiném vhodném místě. R-materiál se nadrtí, roztřídí a následně se naváží do míchací jednotky, kde se míchá s pojivem. Míchací jednotka může být mobilní (obr. 8) anebo se sestaví přímo na obalovně. Nejčastěji používané pojivo je asfaltová emulze, zpeněný asfalt nebo cement. Asfaltová směs se zpracovává běžnými finišery za studena [6].



Obrázek 8: Mobilní míchací jednotka [6]

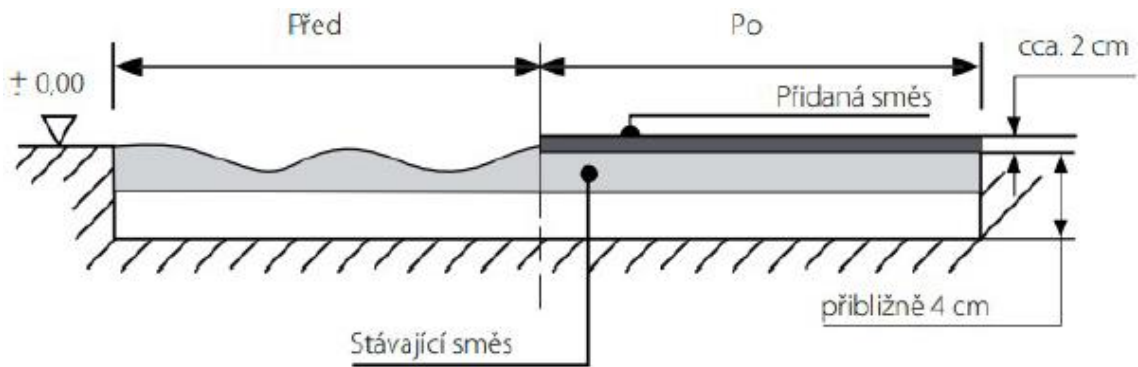
2.2.2.3 NA MÍSTĚ ZA HORKA

Recyklace na místě je výhodná z hlediska okamžitého využití recyklovaného materiálu, minimálního zatížení silniční sítě, nízké ekonomické náročnosti a rychlosti opravy komunikace [9].

Jedná se o technologický proces, při kterém se recyklovaná vrstva pozvolně ohřívá pomocí infrazářičů, rozpojí se remixerem a následně promíchá s dalšími materiály, jako je kamenivo, pojivo či nová asfaltová směs. Propojená směs se položí zpět finišerem a zhutní válci. Rozlišuje se pět způsobu provádění: Reshape, Repave, Remix, Remix Plus a Regrip [11].

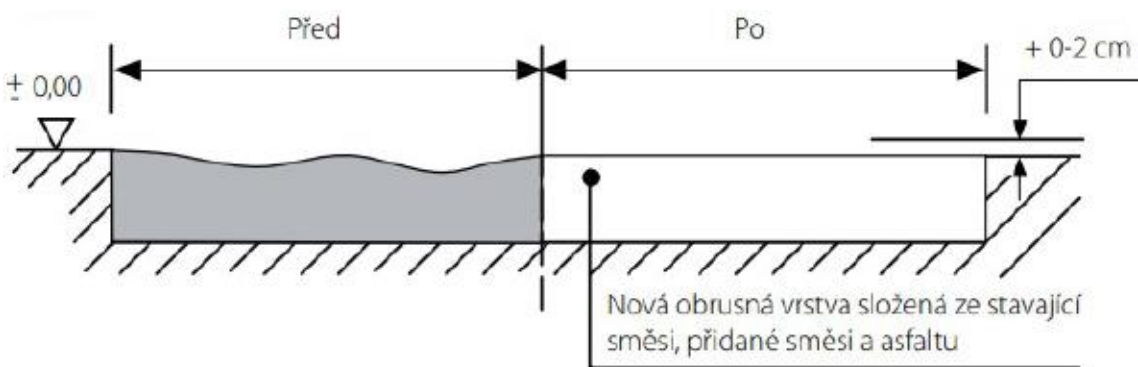
U této metody je velmi důležité provést předběžný diagnostický průzkum původních vrstev asfaltové vozovky [10].

- Reshape
 - Jedná se o reprofilaci obrusné asfaltové vrstvy. Lze použít, pokud asfaltové pojivo, které je obsaženo ve směsi, splňuje požadované fyzikálně mechanické vlastnosti. Při míchání se nepřidává další materiál [9] [11].
- Repave
 - Postup této metody se podobá předchozí metodě. Na urovnanou vrstvu se nanese vrstva nová v tloušťce 10 až 40 milimetrů bez společného promísení. Následně se hutní obě vrstvy současně [9].
 - Tato metoda lze použít pro opravu trvalých deformací nebo ztrátu hmoty z krytu vozovky [6].
 - Na obrázku 9 je vidět vrstva asfaltové vozovky před a po recyklaci metodou repave.



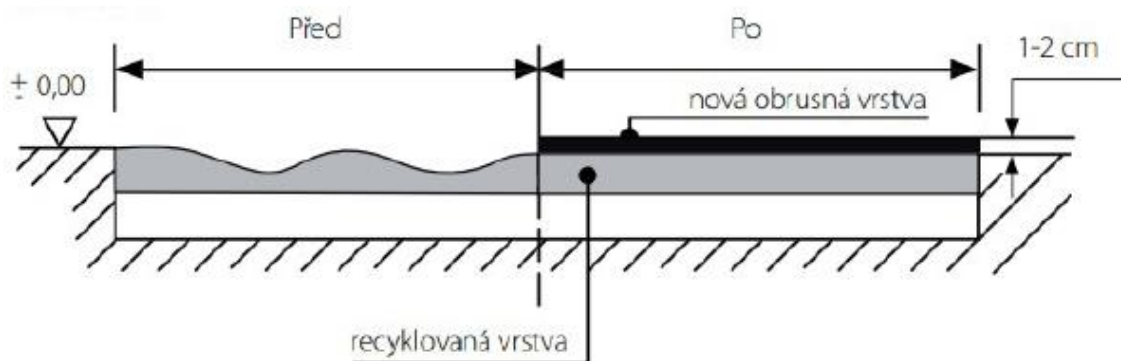
Obrázek 9: Metoda Repave – před a po [9]

- Remix
 - I tato metoda je podobná metodě Reshape. Do recyklované směsi se přimíchá nový materiál, tím dojde ke zlepšení fyzikálně mechanických vlastností [9]. Přidaným potřebným materiálem může být kamenivo, změkčující přísady, asfalt nebo předobalená směs kameniva. Prohřátá asfaltová směs s přidanými materiály se promíchá, zpětně položí a zhutní válci [12]. Jedná se o relativně složitý technologický postup.
 - Touto metodou je možno opravovat trvalé deformace, trhliny nebo zhoršené protismykové vlastnosti. Dá se použít pro obrusné, ložné i podkladní vrstvy [6].
 - Na obrázku 10 je vidět vrstva asfaltové vozovky před a po recyklaci metodou remix.



Obrázek 10: Metoda Remix – před a po [9]

- Remix Plus
 - Metoda Remix Plus je podobná metodě Remix. Na recyklovanou vrstvu se položí vrstva nová systémem horké na horké. Obě vrstvy se hutní současně [9].
 - Na obrázku 11 je vidět vrstva asfaltové vozovky před a po recyklaci metodou remix plus.



Obrázek 11: Metoda Remix Plus – před a po

- Regrip
 - Stávající povrch vozovky se nahřeje pomocí infrazářičů, následně se podrtí kamenivem úzké frakce a zaválcuje se do povrchu vozovky.
 - Používá se pro zlepšení protismykových vlastností vozovky [10].

2.2.2.4 NA MÍSTĚ ZA STUDENA

Tento způsob technologie se používá pro recyklaci nestmelených, částečně stmelených a asfaltových vrstev. Může se recyklovat za použití pojiva nebo bez pojiva.

- Recyklace s pojivem
 - Jako pojivo se používá asfaltová emulze, pěnoasfalt, cement nebo vápno, případně jejich kombinace. Recyklací s pojivem se dosáhne vyšší únosnosti konstrukce vozovky a zároveň zmenšení tloušťek vrstev.
- Recyklace bez pojiva
 - Recyklované vrstvy se chovají jako štěrkodrt nebo mechanicky zpevněné kamenivo. Používají se jen do podkladní nebo ochranné vrstvy.

Rozlišujeme dva typy dle hloubky provádění:

- Celková
 - Konstrukce vozovky se obnovuje do hloubky 150 až 200 milimetrů. Provádí se u vozovek, které ztratily svou únosnost např. síťovými trhlinami či jinými deformacemi a u vozovek z penetračního makadamu. Celková recyklace se realizuje bez drčení a frézování.
- Částečná
 - Při tomto způsobu se konstrukce vozovky obnovuje pouze do hloubky 80 až 150 milimetrů. Používá se u zhuťných asfaltových vrstev a vozovek, které vykazují jen povrchové poruchy jako jsou mozaikové trhliny a výtluky. Částečná recyklace se realizuje s předrcením vyfrézovaného materiálu [11].

- o Směr postupu recyklace na místě za studena je vidět na obrázku 12.



Obrázek 12: Recyklace na místě za studena [11]

2.2.3 POUŽITÍ RECYKLOVANÝCH MATERIÁLŮ

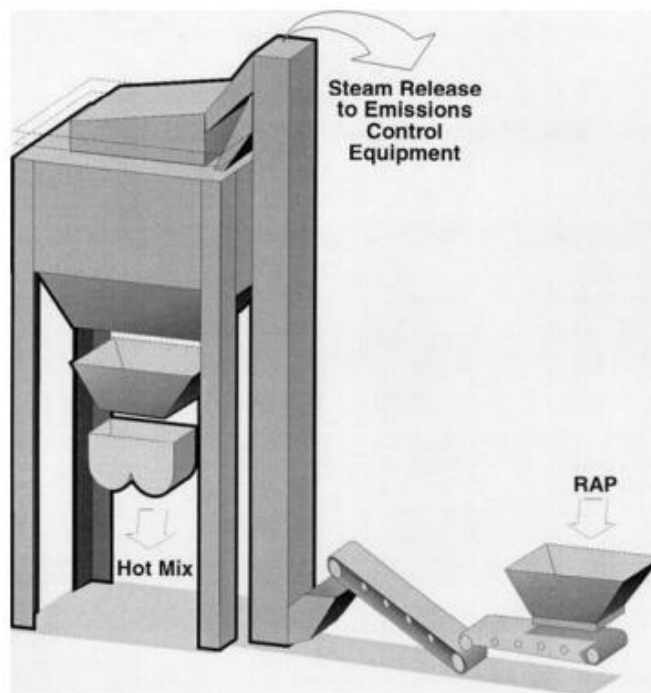
Recyklované materiály jsou při správném použití stejně kvalitní jako materiály standartní. Příhodné použití tohoto materiálu nemá vliv na výslednou kvalitu vozovky [13].

2.2.4 PŘIDÁVÁNÍ R-MATERIÁLU DO ASFALTOVÝCH SMĚSÍ NA OBALOVNĚ

R-materiál do asfaltových směsí je možné na obalovnách dávkovat odlišným způsobem. Ohřev přírodního kamene a dávkování ovlivňují způsob dávkování R-materiálu. Rozlišujeme pět metod dávkování [11].

2.2.4.1 1. METODA

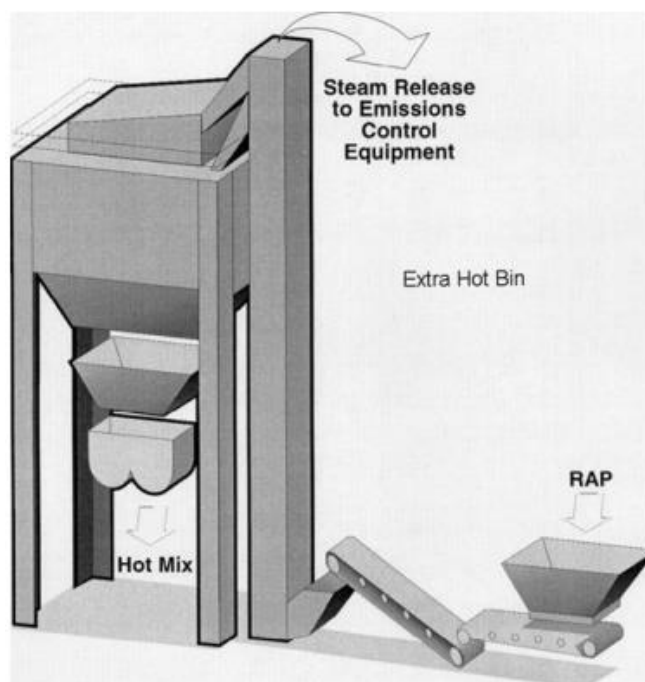
V korečkovém dopravníku se smíchá R-materiál společně s kamenivem, který je dopraven do věže obalovny (obr. 13). Ve věži obalovny dochází k horkému třídění kamene na jednotlivé frakce. Aby se odpařila přebytečná vlhkost R-materiálu, musí být kamenivo přehřáté na vyšší teplotu. Jednotlivé frakce kamene se po horkém třídění přidávají do navažovacího zásobníku v závislosti na druhu asfaltové směsi. Dále se přidává do míchačky, kde se kamenivo s R-materiálem spojí s novým pojivem. Smícháním vzniká nová asfaltová směs, která je připravena k plnění do nákladních vozů a následnému položení na stavbě [11].



Obrázek 13: Dávkování R-materiálu společně s kamenivem [11]

2.2.4.2 2. METODA

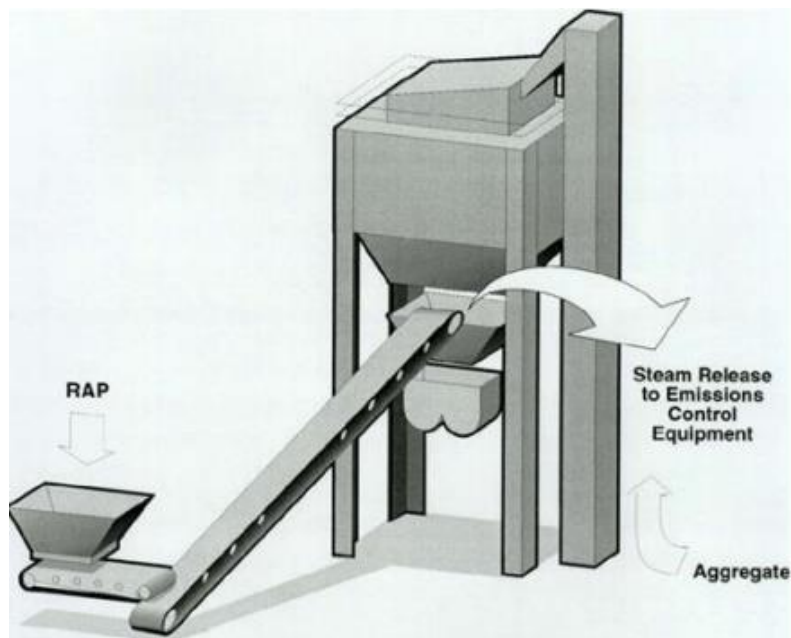
Tato metoda je podobná 1. metodě. Jediným rozdílem je, že R-materiál smíchaný s kamenivem se plní rovnou do takzvaného horkého zásobníku bez použití sít (obr. 14). Tato metoda umožňuje použít až 40 % R-materiálu. Obalovny jsou schopny střídavě vyrábět asfaltovou směs s přidáním R-materiálu nebo bez [11].



Obrázek 14: Dávkování R-materiálu do horkého zásobníku [11]

2.2.4.3 3. METODA

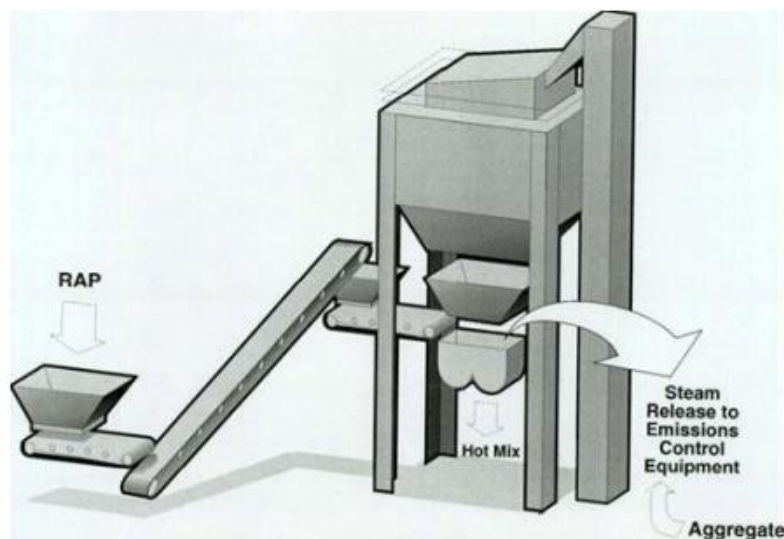
Při této metodě je R-materiál dávkován za studena přímo do navažovacího zásobníku na věži obalovny spolu s předehřátým kamenivem na vyšší teplotu (obr. 15). R-materiál je přidán k horkému kamenivu a má dostatek času k nahřátí, a tím odpaření přebytečné vlhkosti [11].



Obrázek 15: Dávkování R-materiálu do navažovacího zásobníku [11]

2.2.4.4 4. METODA

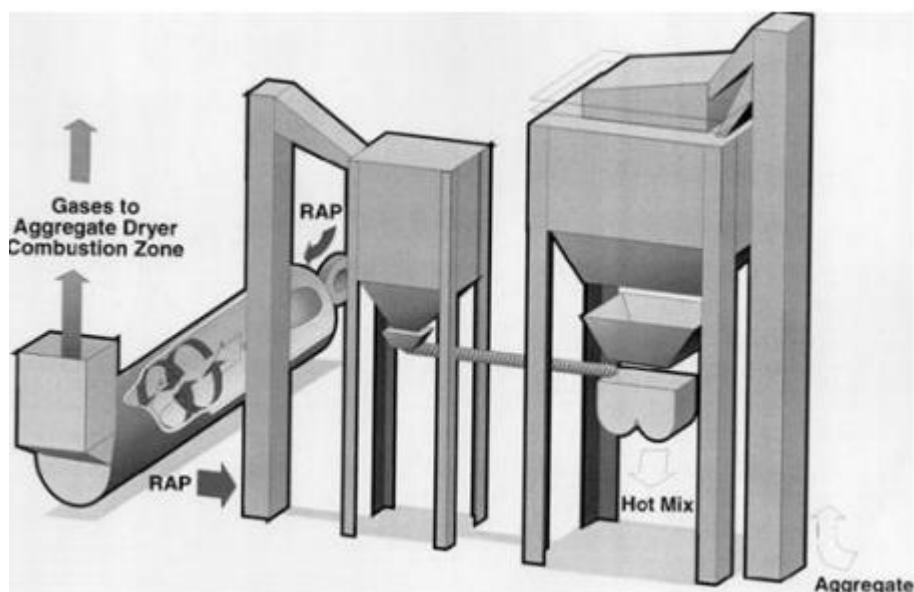
Při této metodě má R-materiál vlastní dávkovací zásobník, ze kterého je dávkován za studena přímo do míchacího zařízení, kde se po dobu 20 až 30 sekund míchá (obr. 16). Díky zpomalenému dávkovacímu zařízení se lépe reguluje odpařování přebytečné vlhkosti z R-materiálu [11].



Obrázek 16: Dávkování R-materiálu z vlastního dávkovacího zásobníku [11]

2.2.4.5 5. METODA

Tato metoda představuje velice složitý a drahý systém. Oproti předchozím metodám umožňuje přidat do asfaltové směsi až 80 % R-materiálu. Tého metoda je charakteristická tím, že R-materiál je vybavený vlastním paralelním sušícím bubnem (obr. 17). V tomto bubnu se R-materiál nahřeje na určitou teplotu a zbaví se přebytečné vlhkosti. Dále je R-materiál pomocí korečkového dopravníku dopraven do vlastního vyhřívaného zásobníku s dávkovacím zařízením. Poté je dávkován přímo do míchačky, kde se smíchá s kamenivem [11].



Obrázek 17: Dávkování R-materiálu s vlastním paralelním bubnem [11]

2.3 OŽIVENÍ VLASTNOSTÍ AFALTOVÝCH POJIV

Asfaltové pojivo v důsledku stárnutí tvrdne. Pokud použijeme R-materiál pro výrobu asfaltové směsi, musíme jeho zhoršené vlastnosti vyvážit. Ideální výsledné tvrdosti dosáhneme přimícháním změkčovadel (rejuvenátorů) nebo novým měkkým asfaltovým pojivem [9]. Jejich účinnost je dána schopností rozptýlit se v asfaltové směsi a vstřebávání oživovací přísady zestárlym pojivem [7].

Kamenivo obalené zestárlym pojivem se obalí vrstvou oživovací přísady s velmi nízkou viskozitou. Oživovací přísada postupně začne pronikat do vrstvy zestárleho pojiva, tím dochází ke změkčení. Po úplném vstřebání oživovací přísady se začne snižovat viskozita vnitřní vrstvy zestárleho pojiva a zvětšovat viskozita jeho vnější vrstvy až dojde k rovnováze.

V posledních letech se oživovací přísady používají také k preventivní údržbě asfaltových vozovek, přičemž se tato technologie označuje jako regenerační postřik. Po 3 až 4 letech se provede nástřik asfaltové vozovky regeneračním materiálem, tím dojde k prodloužení její životnosti. Nástřik regeneračním postřikem změkčuje zoxidovanou vrstvu

asfaltové vozovky. Tímto procesem je docilováno zlepšení odolnosti proti ztrátě hmoty z krytu [7].

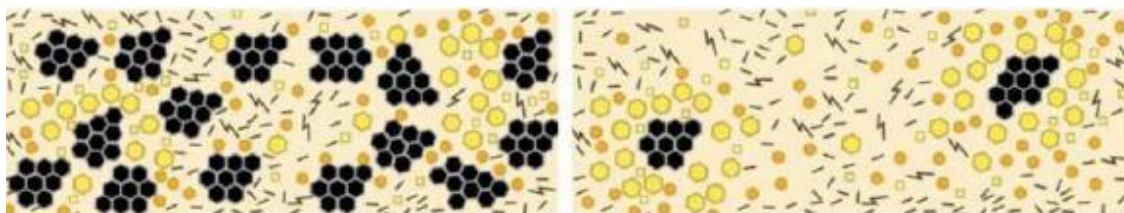
2.3.1 REJUVENÁTORY

K obnovení vlastností zestárlého pojiva se používají rejuvenátory, které obnovují vhodný poměr mezi asfaltény a maltény. Jedná se o olejový extrakt získaný během zpracování ropy, z biomasy, bio-olejů nebo papírenské výroby.

Dělíme je na:

- Fluxační přísady – snižují viskozitu pojiva
 - z dlouhodobého hlediska nejsou schopné zabránit tvorbě únavových a mrazových trhlin
 - při vyšších provozních teplotách může jejich účinek oživení zcela vymizet
 - nedochází k rozptýlení shluků asfalténů, pouze ke zředění malténové fáze (obr. 18 – levá část)
- Rejuvenační přísady – obnovují visko-elastické chování
 - zamezují shlukování micel asfalténů (obr. 18 – pravá část)

Díky rejuvenátorům se může dávkovat vyšší množství R-materiálu. Lze je smíchat s R-materiálem na obalovně nebo aplikovat přímo na povrch vozovky. Dávkování rejuvenátorů se pohybuje v rozmezí 3 až 4 %. Hlavní výhodou je snadné přidávání do směsi bez nutnosti skladovací síla [7], [9].



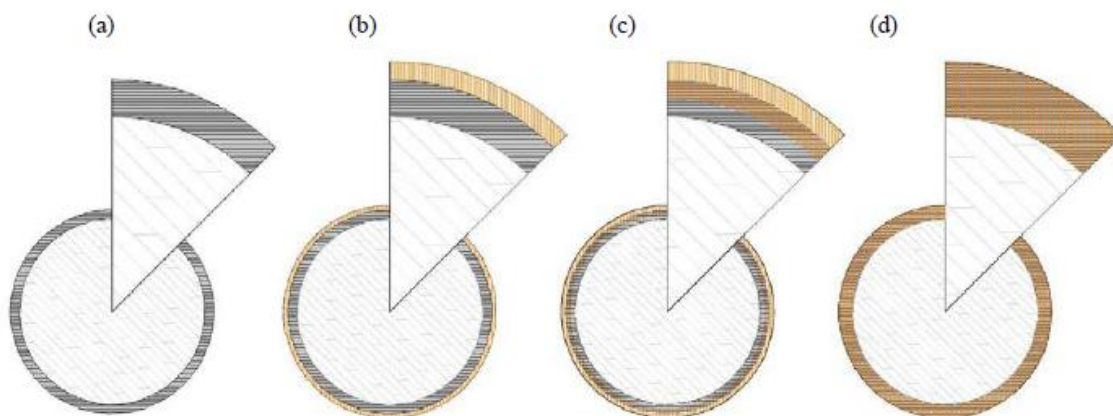
Obrázek 18: Působení fluxační a rejuvenační přísady [7]

2.3.2 MĚKKÉ ASFALTY

Zestárlé pojivo lze obnovit přidáním nového měkkého pojiva s nižší viskozitou. Výpočtem je možno stanovit optimální dávkování pojiv na základě znalosti vlastností zestárlého pojiva a množství jeho dávkování do nové směsi. Při úplném promíchání může dojít nejen ke změkčení zestárlého pojiva, ale také ke zlepšení fyzikálních a chemických vlastností [9].

Předchozí studie ukázaly, že čerstvé pojivo a pojivo z R-materiálu se mísí jen částečně, ale není jasné, jaký to má vliv na vlastnosti směsi. Teoreticky se předpokládá, že vlastnosti smíchaného pojiva jsou výsledkem vlastností nového a zestárlého pojiva. Ve skutečnosti jsou tato pojiva smíchána jen částečně. Dřívější studie ukázaly, že nové pojivo vytvoří kolem zestárlého pojiva film. Během procesu míchání dochází díky třecím a smykovým silám ke

vzájemnému pronikání obou pojivových filmů. Výsledky laboratorních testů ukazují, že nedochází k úplnému promíchání pojiv. Na obrázku 19 jsou vidět různé fáze difúze pojivových filmů. V prvním případě se jedná pouze o pojivový film zestárlého pojiva. Ve druhém případě se jedná o film zestárlého a nezestárlého pojiva bez míchání. Ve třetím případě jsou pojiva smíchána částečně a v posledním případě jsou smíchána úplně [14].



Obrázek 19: Fáze difúze pojivových filmů [14]

2.3.3 DÁVKOVÁNÍ OŽIVOVACÍ PŘÍSADE BĚHEM VÝROBY

Výrobce by měl určit a vyhodnotit, jak přidat oživovací přísadu do zařízení. Postupy přidání a míchání závisí na spoustě faktorů jako je typ a vlastnosti oživovací přísady a také kompatibilita se zařízením, jeho fázováním a časem míchání. Oživovací přísada může být přidávána v závislosti na sestavě obalovny, např. přímo k R-materiálu během skladování, během drcení, před vstupem R-materiálu do paralelního bubnu nebo na jeho výstupu, do míchačky a podobně. Oživovací přísada lze také přidat přímo do sila asfaltového pojiva. Všechny způsoby mají své výhody i nevýhody [7].

Oživovací přísada by měla dostatečně vyreagovat se zestárlým pojivem. Stejněměrné rozložení přísady je podstatné pro získání regenerovaného asfaltového pojiva. Dávkování oživovací přísady při výstupu z paralelního bubnu, kdy je R-materiál přehřátý, pravděpodobně maximalizuje dobu potřebnou pro rozptýlení oživovací přísady do zestárlého pojiva. Tato metoda je možná použít pouze v případě, že oživovací přísada má vhodnou teplotu bodu vzplanutí a dobrou tepelnou stabilitu. V případě přidávání oživovací přísady během procesu míchání je potřeba vzít v úvahu krátkou dobu míchání (25–45 s) a proto je nutné důkladně zvážit její postupné přidávání, aby bylo docíleno požadovaného výsledku [7].

2.4 MÍCHÁNÍ POJIV Z R-MATERIÁLU A NOVÉHO POJIVA

V některých zemích se polymerem modifikovaný asfalt začal používat v polovině nebo na konci 80. let. Z důvodu vyšší životnosti těchto asfaltů se vrstvy z PMB začaly recyklovat teprve před pár lety, a proto není prozatím mnoho zkušeností s chováním znovupoužitého pojiva [15].

Aby bylo možné znovu použít regenerovaný polymerem modifikovaný asfalt je důležité, aby byl asfalt vyfrézován po vrstvách a jednotlivé vrstvy byly uloženy odděleně. Je nezbytné znát druh polymeru a jeho zbytkový obsah ve směsi, což závisí na metodě extrakce. Taktéž je nutné znát stáří asfaltu. Neupravený zestárý asfalt lze považovat za škodlivý pro trvanlivost nové asfaltové směsi kvůli jeho křehké povaze [15], [14].

Aby se dosáhlo vysoké kvality výsledné směsi, vyžaduje se použití nového měkčího pojiva nebo speciální přísady – omlazovače [14]. Vlastnosti směsí závisí na jednotlivých vlastnostech zestárleho pojiva, tuhost směsi se zvyšuje s narůstajícím obsahem R-materiálu [15].

2.4.1 EXTRAKCE A REGENERACE ASFALTOVÉHO POJIVA Z R-MATERIÁLU

Primárním zájmem v procesu extrakce asfaltového pojiva z R-materiálu je to, zda různé metody extrakce a regenerace, a také různé typy rozpouštědel, ovlivňují vlastnosti pojiva. Účinek rozpouštědla přítomného v extrahovaném asfaltovém pojivu nebo účinek přehřátí pojiva při procesu regenerace může změnit tuhost asfaltového pojiva [16].

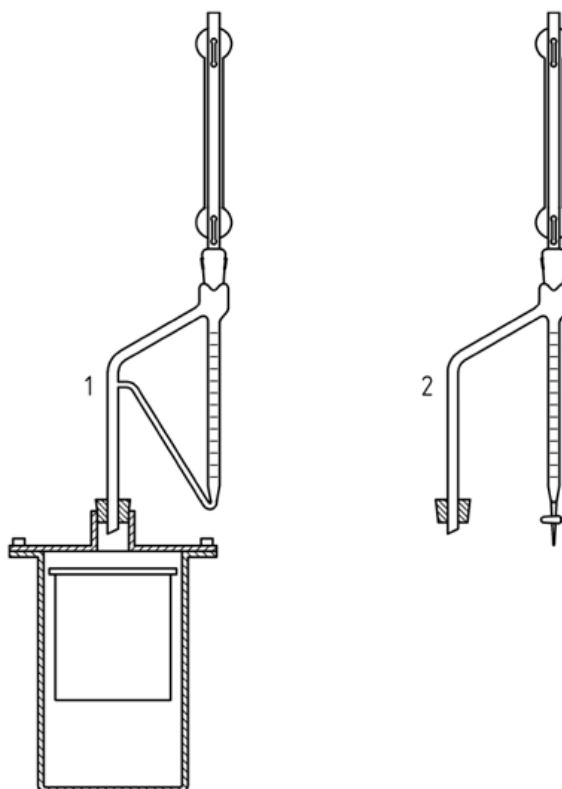
2.4.1.1 METODY EXTRAKCE POJIVA

- Za horka
 - Extraktor pro extrakci za horka (papírový filtr)
 - Extraktor pro extrakci za horka (drátěný filtr)
 - Soxhletův extraktor
 - Automatický extraktor
- Za studena
 - Extrakční odstředivka (filtrační papír)
 - Zařízení s rotujícími láhvemi
 - Rozpouštění asfaltu ze směsi za studena za míchání [17]

Extraktor pro extrakci za horka (papírový filtr)

Filtrační papír se vloží do válcového koše tak, aby úplně doléhal ke stěně a vysuší se. Dále se do koše umístí zkušební vzorek. Musí se postupovat rychle, aby vysušený filtrační papír nepohltil vlhkost ze vzduchu. Koš se zkušebním vzorkem se umístí do nádoby extraktoru a na vzorek se naleje takové množství rozpouštědla, aby byl umožněn zpětný tok. Extraktor se uzavře víkem, pod kterým je umístěno suché těsnění a připojí se jímadlo s chladičem. Extraktor se pomalu zahřívá. Je nutné zajistit stálou rychlost zpětného toku, což

znamená dvě až pět kapek za sekundu. Shromážděná voda v jímadle se odsává pipetou s balónkem při přerušené destilaci. Pokud je jímadlo opatřeno kohoutem, lze upustit vodu i bez přerušení destilace. Extrakce pokračuje až do doby, kdy se přestane shromažďovat voda v jímadle. K odstranění veškerého jemného materiálu z roztoku se na konci zkoušky musí roztok přefiltrovat přes filtrační papír nebo se musí odstředit [17]. Sestava pro extrakci za horka je vidět na obrázku 20.



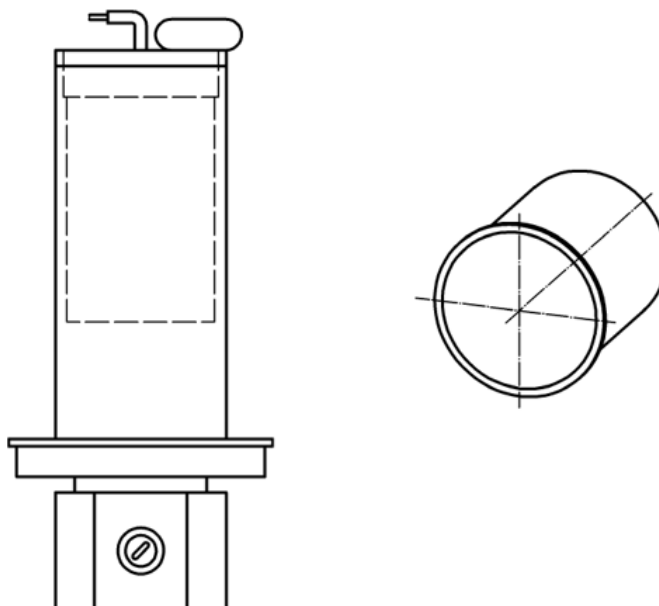
Obrázek 20: Extraktor pro extrakci za horka (papírový filtr)

1) hustota rozpouštědla > 1

2) hustota rozpouštědla < 1 [17]

Extraktor pro extrakci za horka (drátěný filtr)

Odvážený zkušební vzorek se umístí do vysušené extrakční patrony z vláknitého materiálu, která je umístěna v extrakční nádobě (obr. 21). Pojivo se extrahuje vařícím rozpouštědlem až do té doby, dokud není odtékající rozpouštědlo bezbarvé. I při této metodě je nutné na konci zkoušky roztok odstředit nebo přefiltrovat přes filtrační papír, aby se odstranil veškerý jemný materiál [17].



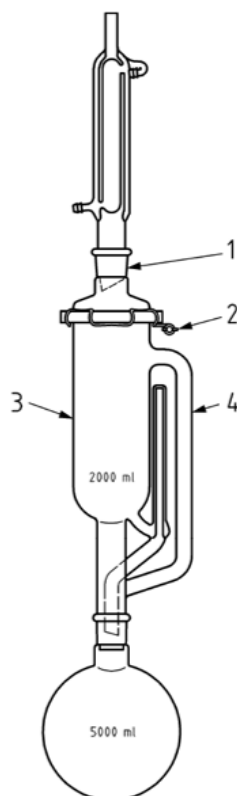
Obrázek 21: Extraktor pro extrakci za horka (drátěný filtr) [17]

Automatický extraktor

Metoda určená pro vzorky bez vody. Prázdňá nádoba odstředivky se zváží a umístí zpět do odstředivky. Prázdňý koš na vzorek se zváží a poté se zváží i naplněňý koš s vysušeným vzorkem. Koš se vzorkem se umístí do promývací komory a zapne se vhodňý extrakční program. Podle typu rozpouštědla, kameniva, pojiva a asfaltové směsi se zvolí vhodňý počet promývacích cyklů. Při posledňím cyklu se skrz skleněňý kryt ventilu zkontroluje, jestli není rozpouštědlo zbarveno pojivem. Promývací cykly se přidávají, dokud není rozpouštědlo bezbarvé. Po skončení promývacího programu se odebere vzorek a nádoba odstředivky. Zbýlý jemňý materiál v promývací komoře se kartáčem přemístí do nádoby odstředivky. Koš na vzorek s obsahem a nádoba odstředivky s filerem se zváží po vychladnutí na pokojovou teplotu. Na závěr se vypočítá hmotnosť minerálního materiálu a hmotnosť zkušebního vzorku [17].

Soxhletův extraktor

Zkušební vzorek se umístí do vysušené extrakční patrony, ta se umístí na sítku do nádoby extraktoru (obr. 22). Extraktor se naplní rozpouštědlem tak, aby byla zalita většina materiálu a překryje se další sítkou. Kohout extraktoru se otevře a zapne se topné těleso. Rozpouštědlo nesmí přetékat z extrakční patrony. Extrakce probíhá do té doby, dokud není rozpouštědlo v extraktoru bezbarvé. Opět se musí roztok odstředit nebo přefiltrovat přes filtrační papír [17].



Obrázek 22: Soxhletův extraktor [17]

Extrakční odstředivka

Metoda 1:

Do mísy se vloží přesné množství zkušební vzorku. Rozpouštědlo se přilije do mísy v takovém množství, aby byl vzorek zcela ponořen. Nechá se odstát, než se zkušební vzorek rozruší, nejdéle po dobu 1 hodiny. Poté se mísa umístí do extrakčního přístroje. Vysušený a vychladlý kruhový filtr se osadí na okraj mísy a těsně se utěsní víko na mísu. Pod odtok z mísy se umístí baňka nebo kádinka pro jímání extraktu. Při nízkých otáčkách se zahájí odstředování, otáčky se postupně zvyšují až na 3 600 otáček za minutu nebo do té doby, než přestane vytékat rozpouštědlo z odtoku. Po zastavení odstředivky se přilije cca 200 cm³ rozpouštědla a celý postup se opakuje, dokud rozpouštědlo není bezbarvé. Kruhový filtr z mísy se nechá na vzduchu vyschnout, zbytky minerálního materiálu se odstraní kartáčem a přidá se k extrahovanému kamenivu. Filtr se v sušárně vysuší do konstantní hmotnosti. Obsah mísy se důkladně přemístí do kovové nádoby a taktéž se vysuší do konstantní hmotnosti. Kruhové filtry a kamenivo se vysuší v čisté kovové nádobě. Vysušený a přeložený filtr umístěný na kamenivu se spálí. Extrahované kamenivo se po ochlazení ihned váží.

Metoda 2:

Postup této metody je totožný s předchozí metodou. V průběhu zkoušky se postupně vše váží a vypočítá se hmotnost nevysušené zkušební části a hmotnost minerálního podílu po extrakci [17].

Zařízení s rotujícími láhvemi

Obsah pojiva stanovený z rozdílu:

Do kovové láhve vhodné velikosti se umístí zkušební vzorek. Ke vzorku se přidá rozpouštědlo. Rozpouštědla by měla být tolik, aby roztok neobsahoval více než 4 % rozpuštěného pojiva. Například pro 800 gramů asfaltové směsi o obsahu asfaltu 4 % až 7 % se použije 300 cm³ rozpouštědla. V případě použití dichlormetanu nemá mít vzorek teplotu vyšší než 25 °C, aby nevznikala nebezpečně velká koncentrace par rozpouštědla. Zároveň může v láhvi vzniknout vysoký tlak, který by mohl způsobit explozi nebo zapříčinit vytrysknutí rozpouštědla při uvolnění zátky. Kovová láhev se uzavře a po dobu dle tabulky (obr. 23) se nechá otáčet na rotačním zařízení. Rychlost otáčení by neměla přesáhnout 20 otáček za minutu, aby nedošlo k rozbití lahví. Pokud po uplynutí minimální doby extrakce není pojivo dobře rozpuštěno prodlouží se doba extrakce. Pro usnadnění filtrace se láhve po dané době otáčení nechají minimálně 2 minuty odstát. Po vylití rozpouštědla k filtraci se kamenivo protřepá s dalším množstvím rozpouštědla a postup se opakuje až do té doby, dokud není roztok bezbarvý a v rozpouštědle není žádný rozptýlený materiál [17].

Typ materiálu	Minimální doba extrakce (min)
Asfaltový beton se silničním asfaltem	20
Asfaltový koberec drenážní	20
Asfaltový koberec mastixový	30
Litý asfalt	30
Asfaltová směs typu HRA	30
Měkká asfaltová směs	20
Předobalená dř pro vtlačování	10

Obrázek 23: Požadovaná doba extrakce na rotačním zařízení [17]

Obsah pojiva stanovený z části roztoku:

Vzorek asfaltové směsi se umístí do kovové láhve. Vhodnou odměrnou baňkou se odměří požadované množství rozpouštědla a přidá se ke vzorku. Koncentrace rozpustného pojiva je 2 % až 4 %. Podle vzorce se odhadne celkový požadovaný objem rozpouštědla:

$$V = \frac{M \times S_e}{C_s}$$

M hmotnost vzorku [g]
 S_e odhadnuté množství pojiva ve vzorku [%]
 C_s požadovaná koncentrace roztoku [%]

Na rotačním zařízení se uzavřená láhev nechá otáčet po dobu dle předchozí tabulky (obr. 17). Po skončení otáčení se láhev vyjme z rotačního zařízení a nechá se ustát po dobu

minimálně 2 minut, aby se minerální materiál rozptýlený v suspenzi usadil. Láhev se šetrně otevře a roztok se okamžitě přelije do čisté a suché zásobní láhve. Do odstředivky se nalije takové množství výluhu, aby po ukončení procesu odstředování bylo k dispozici dostatečné množství roztoku pro vzorky. Zbytek výluhu se uchová v zásobní láhvi. Po celou dobu extrakce je nutné co nejvíce omezit odpařování zajištěním těsného uzavření nádob a rychlému přilévání roztoků [17].

Rozpuštění asfaltu ze směsi za studena za míchání

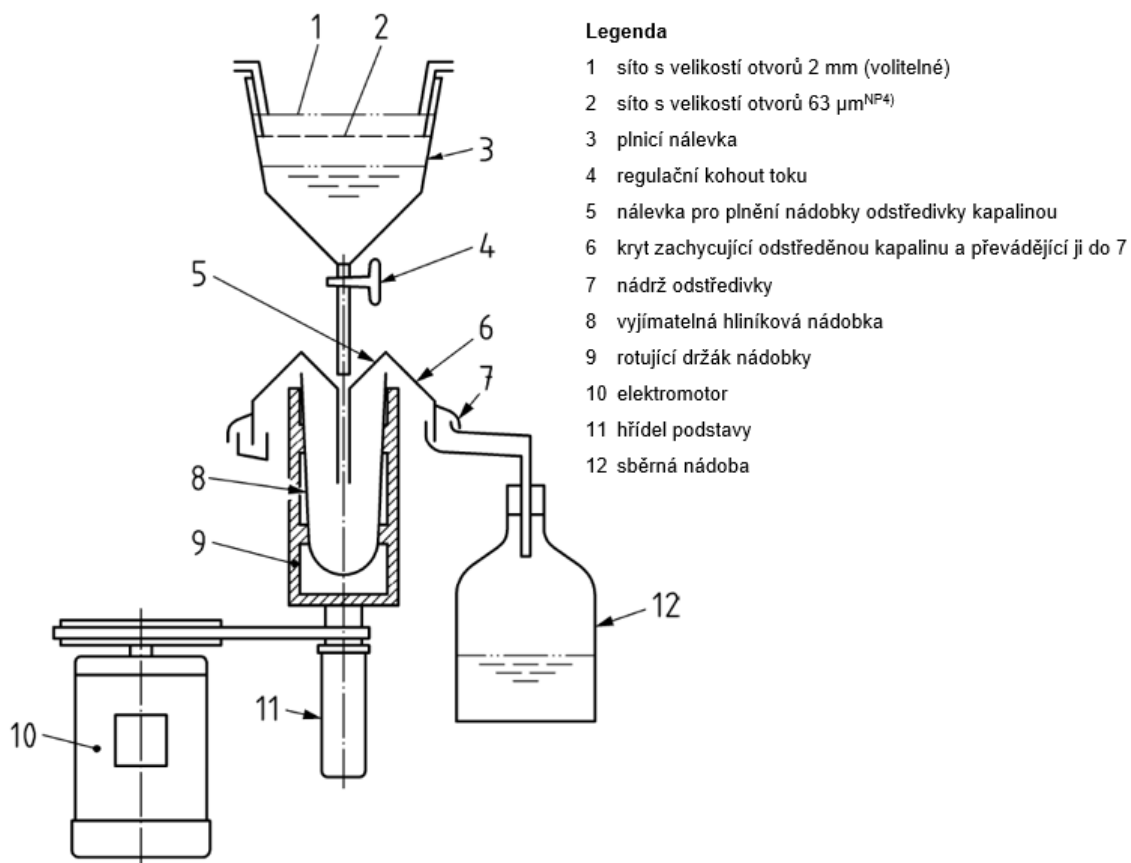
Zvážený zkušební vzorek s přesností na 1 gram se vloží do nádoby. Asfaltová směs nesmí překročit teplotu 90 °C. Odvážené množství rozpouštědla odpovídající 1,6 násobku hmotnosti zkušební vzorku při obsahu více než 5 % pojiva ve směsi nebo 0,8 násobku při obsahu méně než 5 % pojiva se přilije ke zkušebnímu vzorku. V případě litého asfaltu se odváží rozpouštědla trojnásobek až pětinasobek hmotnosti vzorku. Po dobu nejméně 30 minut se třepe nádobou a poté se nechá obsah usazovat alespoň 5 minut [17].

2.4.1.2 ODDĚLENÍ MINERÁLNÍHO MATERIÁLU

- Stanovení minerálního zbytku v znovuzískaném pojivu spálením
- Filtrační papír
- Odstředění
- Průtoková odstředivka
- Tlakový filtr
- Odstředivka s kyvetami – typ 1
- Odstředivka s kyvetami – typ 2

Průtoková odstředivka

Dvě vyčištěné a vysušené nádoby do odstředivky se jednotlivě zváží s přesností na 0,1 gramu a jedna z nich se vloží do odstředivky. Sítko, které se umísťuje do plnicí nálevky se taktéž zváží. Nad střed nálevky odstředivky se umístí plnicí nálevka, do které se opatrně nalije roztok pojiva získaný z extrakce. Otevře se kohout plnicí nálevky a rychlost toku se nastaví zhruba na $100 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{min}$. V nádobě odstředivky se propláchne nahromaděný filer minimálním množstvím rozpouštědla, dokud není rozpouštědlo bezbarvé. Nádoba s extrahovaným filerem se vysuší v sušárně při teplotě $110 \pm 5 \text{ °C}$. Postup se opakuje s druhou nádobkou, ale rychlost toku se nastaví na polovinu. Po dokončení procesu odstředování se druhá nádoba i se sítkem nálevky přidá k první nádobě do sušárny. Po vysušení nádob do konstantní hmotnosti se opět jednotlivě zváží a obsah fileru se stanoví výpočtem z rozdílu hmotností. Vysušené sítko se taktéž zváží a stanoví se množství zachyceného minerálního materiálu [17]. Sestava průtokové odstředivky je vidět na obrázcích 24 a 25.



Obrázek 24: Schéma průtokové odstředivky [17]



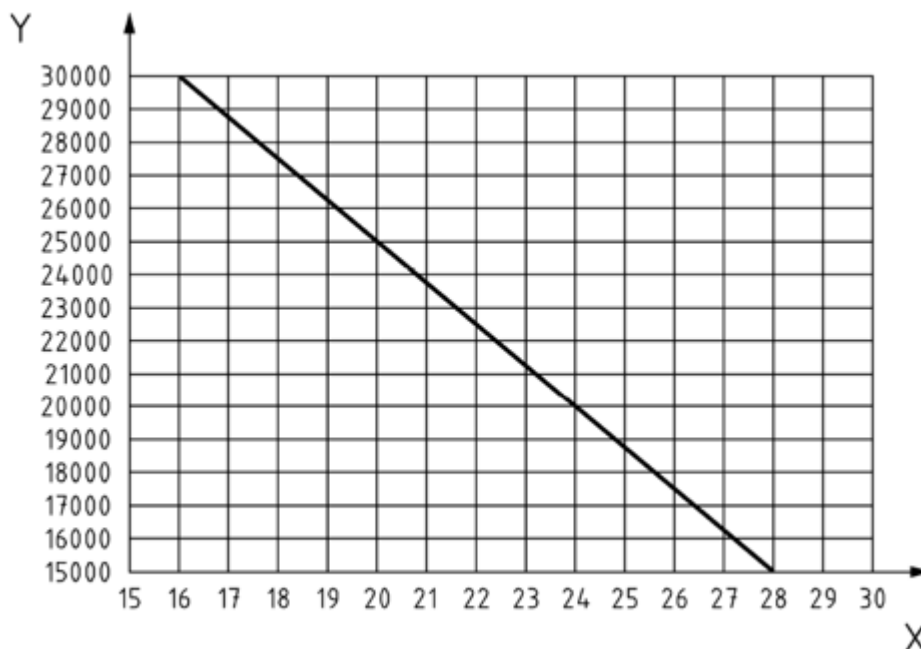
Obrázek 25: Průtoková odstředivka

Tlakový filtr

S přesností na 0,1 gramu se zváží vysušený filtrační papír a vloží se do tlakového filtru. Sada vhodných kontrolních sít se upevní nad nálevku nad tlakovým filtrem, je-li to požadováno. Velikost oka nejmenšího kontrolního síta musí mít 0,063 mm. Extrakcí získaný roztok pojiva se přelije přes sadu kontrolních sít do tlakového filtru. Přes filtrační papír se roztok protlačí tlakovým vzduchem. Postupně se vymývá jímací nádoba obsahující extrahované kamenivo, aby se vymylo co nejvíce minerálního materiálu, až je rozpouštědlo bezbarvé. Promyté a čisté kamenivo se přemístí na misku a zváží. Veškeré rozpouštědlo z kameniva, sít a jímací nádoby se nechá odpařit. Všechny minerální materiál z jímací nádoby se přidá ke zbývajícím kamenivům. Z tlakového filtru se vyjme filtrační papír s minerálním materiálem, vysuší se do konstantní teploty, zváží se a odečte se hmotnost filtračního papíru [17].

Odstředivka s kyvetami – typ 1

Z procesu extrakce se přibližně 500 cm³ roztoku pojiva přelije do čisté a suché zásobní láhve. Do zkumavky odstředivky se nalije takové množství výluhu, aby po ukončení procesu odstředování bylo k dispozici dostatečné množství roztoku pro vzorky. Zbytek výluhu se uchová v zásobní láhvi. Odstředivka a zkumavka odstředivky se musí utěsnit na odpovídající dobu dle obrázku 26. Po celou dobu extrakce je nutné co nejvíce omezit odpařování zajištěním těsného uzavření nádob a rychlému přilévání roztoků [17].



Obrázek 26: Y – zrychlení [m/s²], X – doba odstředování [min] [17]

Odstředivka s kyvetami – typ 2

Směsi asfaltu se odstřeďují minimálně 15 minut. V případě litého asfaltu se odstřeďuje minimálně 30 minut při více než 40 000 m/s².

2.5 RECYPMA – VÝZKUM VLASTNOSTÍ ZESTÁRLÉHO PMB

Projekt RECYPMA se zabýval v letech 2011 až 2013 výzkumem možností kvalitní recyklace polymerem modifikovaných asfaltů. Cílem je zabránit snížení kvalitních vlastností PMB v R-materiálu. Z technologického pohledu se zdá, že oxidačnímu stárnutí podléhá pouze základní asfalt, kdežto polymer je vůči němu inertní. Pokud by bylo možné recyklovat starý asfalt na nový bez nadměrného tepelného působení na polymer (degradace), dosáhlo by se pozitivního dopadu na vlastnosti obnoveného pojiva. Značný přínos by byl i z ekonomického a ekologického hlediska, kdy by se zkrátily rozvozní vzdálenosti (menší uhlíková stopa) a zmenšila by se spotřeba primárních surovin jako je kamenivo. To je důležité zejména pro země, které jsou závislé na dovozu těchto surovin [18].

Výsledky části WP3 projektu RECYPMA naznačují, že přestože polymer během své životnosti degraduje, zanechává si část svých charakteristických vlastností. Reologické vlastnosti se mohou obnovit při smíchání s novým měkkým asfaltovým pojivem. To tedy znamená, že polymer z R-materiálu může působit i v nové směsi [19].

Pro návrh směsi obsahující R-materiál a nové pojivo lze použít k přibližné predikci hodnoty penetrace při 25 °C. Díky lineární korelaci mezi hodnotou komplexního modulu ve smyku (při 0,4 Hz a 25 °C) a hodnotou penetrace (při 25 °C) je možno použít hodnotu komplexního modulu ve smyku k predikci hodnoty penetrace pro účely hodnocení účinku recyklace. Model Grunberg-Nissan umožňuje popsat zásadní reologické vlastnosti smíchaného pojiva, jako je viskozita při různých teplotách nebo komplexní modul ve smyku v širokém frekvenčním spektru. Na základě údajů o viskozitě se navrhuje doporučené teploty a metody míchání a zhutňování asfaltových směsí. Z důvodu modifikace polymerem a zestárnutí pojiva jsou požadovány vysoké teploty míchání, v některých případech nad 180 °C. Je však potřeba se vyhnout takovým teplotám, které by způsobily degradaci polymeru. Gelová permeační chromatografie (GPC) může přímo popsat degradační chování polymeru [19].

3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce je popsat vliv přidání různého množství zestárlého pojiva znovuzískaného z R-materiálu na změnu vlastností polymerem modifikovaného asfaltu třídy 45/80-65. Bude využít R-materiál obsahující nemodifikované asfaltové pojivo i R-materiál získaný z asfaltové směsi, u které lze předpokládat, že obsahuje PMB. Zestárlé pojivo získané z R-materiálu bude do čerstvého pojiva dávkováno v množství 0 %, 15 %, 30 % a 50 %.

Pro vyhodnocení vlastností pojiv budou využity následující laboratorní zkoušky:

- Stanovení penetrace jehlou – ČSN EN 1426
- Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička – ČSN EN 1427
- Stanovení vratné duktility – ČSN EN 13398
- Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse – ČSN EN 12593
- Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu v dynamickém smykovém reometru – ČSN EN 14770

Na základě výsledků výše uvedených laboratorních zkoušek bude vyhodnocen vliv různého poměru zestárlého a nezestárlého asfaltového pojiva na vlastnosti výsledného směsného pojiva.

4 POUŽITÉ MATERIÁLY

Pro přípravu směsí pojiv byly dodány dva R-materiály, jeden R-materiál obsahoval modifikovaný asfalt a druhý nemodifikovaný. Jako nové pojivo pro míchání bylo dodáno pojivo OMV Starfalt PmB 45/80-65. Pro lepší manipulaci bylo pojivo ve velké plechové nádobě rozehráno v sušárně a odlito do menší plechovky.

Před mícháním směsí asfaltových pojiv byla extrahována pojiva z R-materiálů a provedeny základní zkoušky, uvedené v tabulce 1:

Označení	Typ materiálu	Penetrace	Bod měknutí	Vratná duktilita	Bod lámavosti
		[0,1 mm]	[°C]	[%]	[°C]
RN	R-mat. – nemodif. pojivo	14	68,4	-	-
RM	R-mat. – modif. pojivo	16	74,0	-	-
PMB	OMV PMB	47	76,3	88	-16

Tabulka 1: Vlastnosti výchozích materiálů

4.1 EXTRAHOVÁNÍ POJIVA Z R-MATERIÁLU

Před započítím zkoušek je potřeba získat asfaltové pojivo z dodaných směsí R-materiálů. Extrakce pojiva je popsána v předchozí kapitole 2.4.1 a řídí se normou ČSN EN 12697-1: Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 1: Obsah rozpustného pojiva.

K oddělení pojiva z asfaltové směsi se použije tetrachlorethylen neboli perchlorethylen. Asfaltová směs v uzavíratelné nádobě se zalije rozpouštědlem a za občasného promíchání se nechá rozpustit, jak je vidět na obrázku 27.



Obrázek 27: Rozpouštění asfaltové směsi v perchlorethylenu

Pro oddělení kameniva se obsah nádoby vylije přes síta s velikostí ok 2 mm a 0,063 mm do průtokové odstředivky. Odstředěný roztok se vypustí do připravené nádoby a pojivo se destiluje podle normy ČSN EN 13697-3: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení.

4.1.1 ROTAČNÍ VAKUOVÉ DESTILAČNÍ ZAŘÍZENÍ

4.1.1.1 PODSTATA METODY

Z extrahovaného asfaltového roztoku se pojivo získá vakuovou destilací pomocí rotačního vakuového destilačního zřízení [20].

4.1.1.2 PŘÍSTROJE A POMŮCKY

- Přístroj pro extrakci rozpustného asfaltu
- Přístroj na přečištění asfaltového roztoku
- Destilační přístroj (obr. 28)
- Rozpouštědlo a další materiály
 - Vhodné rozpouštědlo (tetrachlorethylen)
 - Žlutá vazelína nebo glycerin na těsnění zábrusových spojů
 - Silikagel [20]



Obrázek 28: Rotační vakuové destilační zařízení

4.1.1.3 POSTUP ZKOUŠKY

Sestaví se přístroj a k utěsnění zábrusových spojů se použije malé množství vazelíny nebo glycerinu. Destilační a jímací baňka se upevní svorkami. Dále se zkontroluje, zda tlak v přístroji zůstává v rámci předepsaných hodnot $1,3 \text{ kPa} \pm 0,2 \text{ kPa}$ alespoň po dobu 2 minut. Studená voda protéká chladičem. Do olejové lázně se ponoří destilační baňka, která rotuje rychlostí $75 \text{ ot.} \pm 15 \text{ otáček}$ za minutu. Dle tabulky se zvýší teplota ($110 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) olejové lázně a sníží tlak ($40 \text{ kPa} \pm 5 \text{ kPa}$), obě hodnoty závisí na typu použitého rozpouštědla. Do destilační baňky se nasaje přes otevřený kohout asfaltový roztok v množství ne větším než 400 ml. Dle potřeby se v průběhu vyprazdňuje jímací baňka. Po přidání veškerého asfaltového roztoku se nechá odpařovat až do doby, kdy se v pojivu přestanou tvořit bublinky. Nakonec se opět zvýší teplota ($160 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$), odpojí se vývěva a tlak se nechá vzrůst na hodnotu atmosférického tlaku nebo se tlak sníží ($2,0 \text{ kPa} \pm 5 \text{ kPa}$). V destilaci se pokračuje, dokud neskončí odpařování rozpouštědla a nepřestanou se tvořit bubliny na asfaltu. Pokud se bubliny tvoří i po 10 minutách zvýší se teplota ($180 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$). Jestliže po dalších 10 minutách ustane tvoření bublin, zastaví se rotace baňky. Destilační baňka se uvolní z přístroje a obsah se vylije do vhodné nádoby (obr. 29) [20].



Obrázek 29: Přelití pojiva do vhodné nádoby

4.2 MÍCHÁNÍ SMĚSÍ POJIV

Směsi asfaltových pojiv byly namíchány v přesně určených poměrech. Pojiva byla nejprve v laboratorní sušárně rozežhátá a následně namíchána do jednotlivých plechovek (obr. 30) v následujících poměrech:

- 85 % PMB (85 g) + 15 % R-materiál, nemodifikované pojivo (15 g)
- 70 % PMB (70 g) + 30 % R-materiál, nemodifikované pojivo (30 g)
- 50 % PMB (50 g) + 50 % R-materiál, nemodifikované pojivo (50 g)
- 85 % PMB (85 g) + 15 % R-materiál, modifikované pojivo (15 g)
- 70 % PMB (70 g) + 30 % R-materiál, modifikované pojivo (30 g)
- 50 % PMB (50 g) + 50 % R-materiál, modifikované pojivo (50 g)



Obrázek 30: Míchání směsí pojiv

5 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

V diplomové práci budou provedeny na směsích asfaltových pojiv vybrané zkoušky. Mezi vybrané zkušební metody patří zkoušky empirické (základní), a to penetrace jehlou, bod měknutí, vratná duktilita a bod lámavosti. Dále budou provedeny zkoušky funkční (Superpave®) za pomoci dynamického smykového reometru.

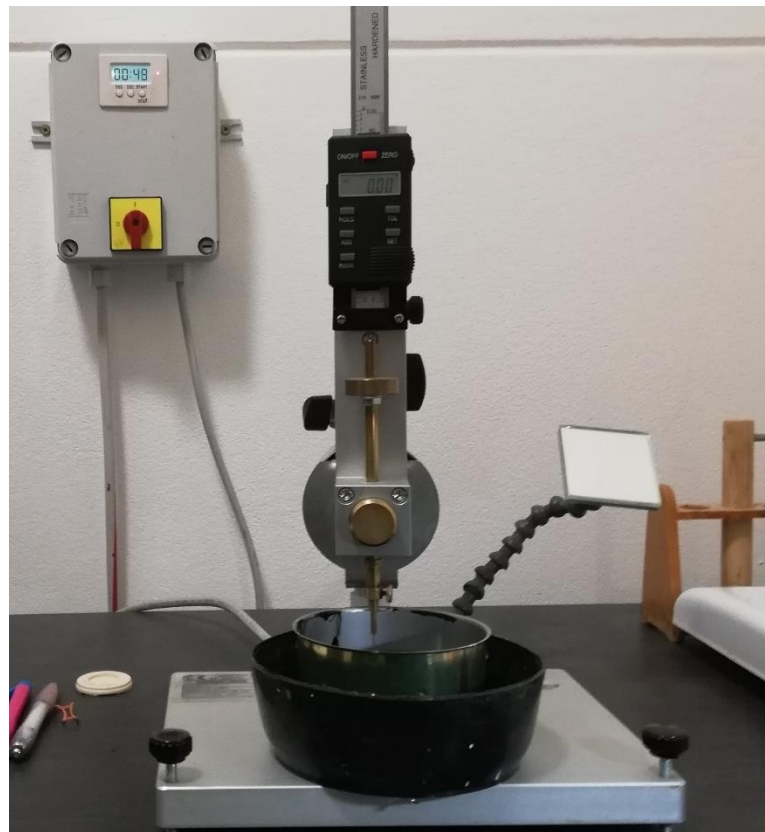
5.1 ZKOUŠKY EMPIRICKÉ

Základní empirické zkoušky jsou jednoduché a rychlé, ale problémem je zkušební teplota. Při provádění zkoušek není dosahováno takových teplot, které by byly v reálném provozu v asfaltových vrstvách. Zároveň výroba směsí a jejich stárnutí nelze těmito zkouškami blíže specifikovat. Taktéž modifikované asfalty se špatně charakterizují, protože jejich elastické vlastnosti nemusí být lineární [21].

5.1.1 PENETRACE JEHLOU PODLE ČSN EN 1426

5.1.1.1 PODSTATA METODY

Analytický vzorek vytemperovaný na teplotu 25 °C je podroben zátěži 100 g jehlou po dobu 5 s. Měří se hloubka průniku jehly. Na jednom zkušební vzorku se provedou tři měření průniku [22].



Obrázek 31: Penetrometr

5.1.1.2 PŘÍSTROJE A POMŮCKY

- Penetrometr (obr. 31)
- Penetrační jehla
- Kelímek na zkušební vzorek
- Vodní lázeň
- Přenosná miska

- Zařízení na měření času
- Zařízení na měření teploty

Zařízení pro stanovení penetrace jehlou se kalibruje a ověřuje alespoň jednou ročně [22].

5.1.1.3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Materiál, ze kterého má být odebrán zkušební vzorek se ohřeje na teplotu 180 °C až 200 °C a naplní se jím dva čisté kelímky. Po zchladnutí by výška odlitého pojiva měla být minimálně o 10 mm výš, než je předpokládaná hloubka průniku jehly. Ihned po nalití vzorků se musí nádoba přikrýt, aby se zamezilo kontaminaci nečistot a eliminaci vzduchových bublin. Takto připravené zkušební vzorky se nechají vychladnout. Teplota zkušební vzorku má významný vliv na výsledky [22].

5.1.1.4 POSTUP ZKOUŠKY

Analytické vzorky se umístí do vodní lázně o konstantní teplotě 25 °C na dobu stejnou, jakou vzorky chladly. Dále se zkontroluje držák jehly a jeho vodící zařízení a případně se očistí. Vhodným rozpouštědlem se očistí také penetrační jehla, osuší se a upne do držáku. Celková hmotnost zatížení má být 100 g ± 0,10 g. Pokud se provádí zkoušení mimo vodní lázeň, musí se vzorek umístit do přenosné misky tak, aby byl celý ponořen ve vodě z lázně. Přenosná miska spolu se zkušebním vzorkem se umístí na podstavec penetrometru. Začátek zkoušky musí být zahájen do 1 minuty od vyjmutí vzorku z řízené lázně. Kelímek se zkušebním vzorkem se umístí do své pozice a opatrně se snižuje jehla, dokud se hrot jehly nedotkne svého odrazu na povrchu vzorku. Doba zatěžování se nastaví na 5 s a uvolní se držák jehly. Hodnota penetrace se odečte a zaznamená. Provedou se nejméně tři platná měření, která jsou od sebe i od stěn kelímku nejméně 10 mm [22].

5.1.1.5 VYJÁDŘENÍ VÝSLEDKŮ

Pokud rozdíl jednotlivých měření nepřekročí hodnoty uvedené v tabulce v normě (obr. 32) jsou výsledky akceptovatelné. Aritmetický průměr platných měření v desetinách milimetru se zaokrouhlí na nejbližší celé číslo [22].

Čím je nižší hodnota penetrace, tím je pojivo tvrdší. Je nutné dodržovat přesně předepsané postupy, neboť jen nepatrná odchylka od měření může způsobit velké rozdíly ve výsledku.

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

Obrázek 32: Maximální rozdíl platných měření [22]

5.1.2 BOD MĚKNUTÍ – KROUŽEK A KULIČKA, PODLE ČSN 1427

5.1.2.1 PODSTATA METODY

Dva odlité vzorky pojiva v mosazných kroužcích s osazením a ocelovými kuličkami se zahřívají řízenou rychlostí v kapalinové lázni. Teplota, při které pojivo změkne natolik, že se kuličky propadnou o $25 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$ se zprůměruje a zaznamená jako bod měknutí [23].

5.1.2.2 PŘÍSTROJE A POMŮCKY

- Kapalinová lázeň
 - Deionizovaná voda – do $80 \text{ }^\circ\text{C}$
 - Glycerin – nad $80 \text{ }^\circ\text{C}$
- Separační prostředek
- Mosazné kroužky
- Odlévací destička
- Ocelové kuličky
- Středící prstence pro kuličky
- Držák kroužků a sestava
- Lázeň – skleněná kádinka
- Zařízení na měření teploty
- Míchadlo
- Poloautomatické nebo automatické zařízení (obr. 33)

Celé zařízení se musí kalibrovat a ověřovat minimálně jednou za rok [23].



Obrázek 33: Zařízení určené pro provedení zkoušky bodu měknutí

5.1.2.3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Odlévací destička se opatří separačním prostředkem a umístí se na ni dva mosazné kroužky. Do obou kroužků se odlije rozehřáté asfaltové pojivo s mírným přebytkem a nechají se vychladnout při laboratorní teplotě. Po zchladnutí zkušebních vzorků se přebytké pojivo odřízne nahřátým nožem nebo čepelí [23].

5.1.2.4 POSTUP ZKOUŠKY

Naplněné kroužky se umístí do sestavy, osadí se středící prstence a skleněná kádinka se zalije kapalinou. Celá sestava se umístí do ledové vody nebo termostátové lázně, aby se vytemperovala na teplotu $5\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Při této teplotě se sestava udržuje minimálně 15 minut. Poté se sestava umístí do zkušebního přístroje. Pomocí chemických kleští se umístí ocelové kuličky do středících prstenců a začne se s ohříváním lázně rychlostí 5 °C/min . Asfaltové pojivo s rostoucí teplotou měkne. Až ocelové kuličky protáhnou asfaltovou vrstvu a dotknou se základní desky nebo paprsku světla, zkouška končí.

5.1.2.5 VYJÁDŘENÍ VÝSLEDKŮ

Výsledky zkoušky se zprůměrují a zaokrouhlí na $0,2\text{ °C}$ při použití deionizované vody nebo na $0,5\text{ °C}$ při použití glycerinu. Pokud rozdíl dvou teplot přesahuje 1 °C pro bod měknutí pod 80 °C nebo 2 °C pro bod měknutí nad 80 °C a pro modifikované asfalty, musí se zkouška opakovat [23].

5.1.3 VRATNÁ DUKTILITA PODLE ČSN EN 13398

5.1.3.1 PODSTATA METODY

Asfaltové tělísko se konstantní rychlostí při zkušební teplotě natahuje na předem určené prodloužení a poté se přestřihne. Po uplynutí předem určené doby se změří zkrácení polovláken. Touto metodou zjišťujeme schopnost asfaltového pojiva vrátit se do původní délky [24].

5.1.3.2 PŘÍSTROJE A POMŮCKY

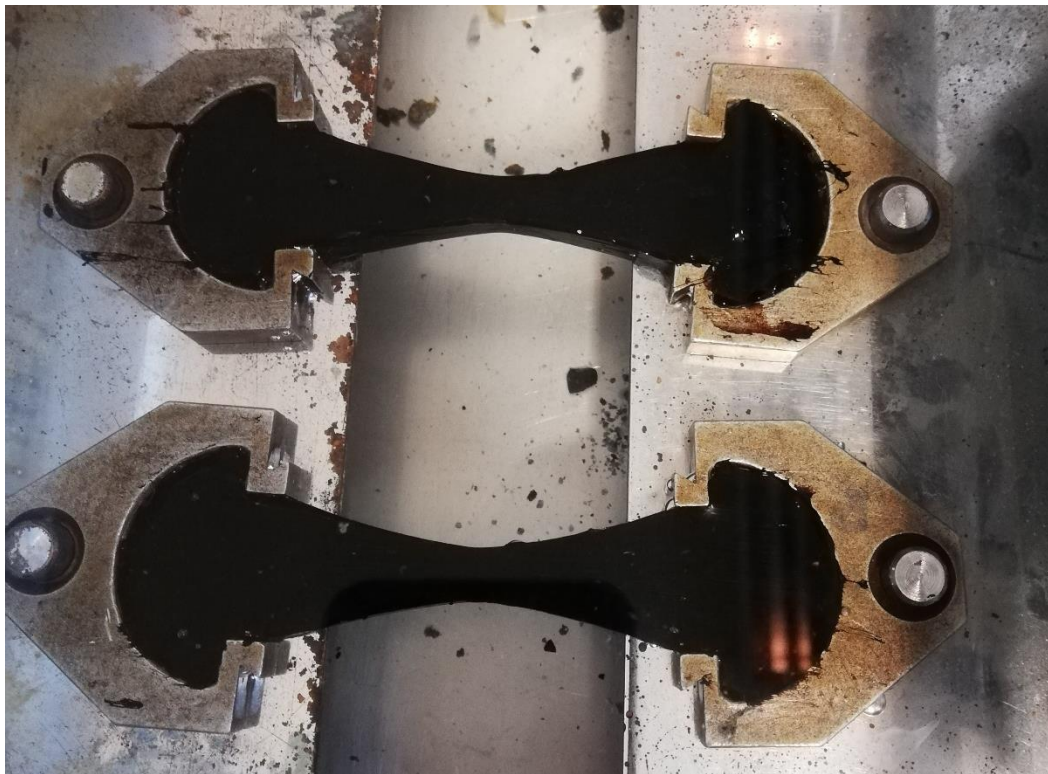
- Formovací souprava
- Duktilometr
 - Vodní lázeň
 - Protahovací zařízení
 - Regulace teploty
- Nůž
- Separací prostředek
- Nůžky
- Pravítko

5.1.3.3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

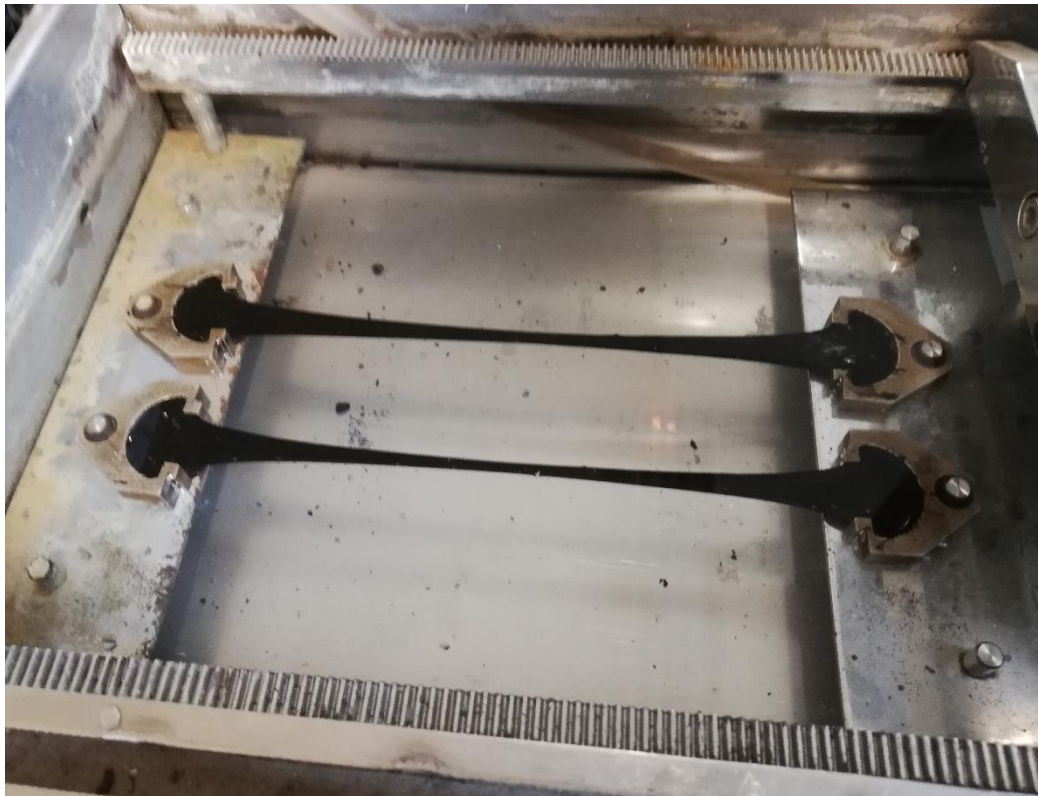
Podkladní destička a boční díly formy se opatří tenkou vrstvou separačního prostředku a sestaví se forma pro odlití vzorku. Rozehřáté asfaltové pojivo se odlije do formy s mírným přebytkem. Po dobu asi 60 minut necháme vzorek chladnout při laboratorní teplotě a poté nahřátým nožem odřízneme přebytek pojiva [24].

5.1.3.4 POSTUP ZKOUŠKY

Seříznuté vzorky se umístí do vodní lázně, kde se temperují po dobu 90 ± 10 min při teplotě $25 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ °C}$. Po uplynutí doby potřebné pro vytemperování se vzorek sejme z podkladní destičky, odstraní se bočnice a upne se na vodící desky (obr. 34). Vzorky se protahují při zkušební teplotě rychlostí 50 mm/min na prodloužení $200 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (obr. 35). Bezprostředně po zastavení protahování se musí vzorek uprostřed přestříhnout (obr. 36). Po 30 minutách se pomocí pravítka změří vzdálenost mezi konci polovláken [24].



Obrázek 34: Upnutí vzorků na vodící lišty



Obrázek 35: Protahování asfaltového pojiva na délku $200 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$



Obrázek 36: Vzorky asfaltového pojiva bezprostředně po přestříhnutí

5.1.3.5 VYJÁDŘENÍ VÝSLEDKŮ

Výsledek vratné duktility se vyjádří jako procento z délky prodloužení podle vzorce:

$$R_E = \frac{d}{L} 100; \text{ kde } d \text{ je vzdálenost mezi polovláknky [mm] a } L \text{ je délka protažení [mm] [24].}$$

5.1.4 BOD LÁMOVOSTI PODLE FRAASSE PODLE ČSN 12593

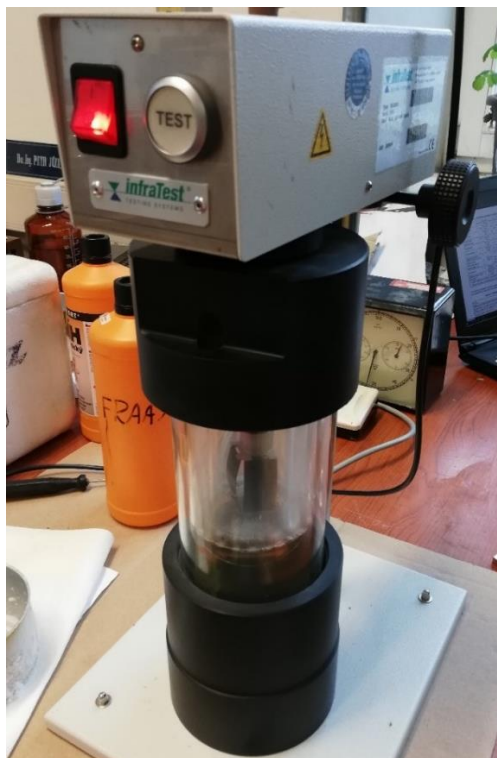
5.1.4.1 PODSTATA METODY

Na kovový plíšek se nanese takové množství asfaltového pojiva, aby bylo rovnoměrně rozprostřeno a mělo stejnou tloušťku vrstvy. Plíšek se upne do přístroje a stálou rychlostí se ochlazuje a zároveň opakovaně ohýbá, dokud vrstva asfaltového pojiva nepraskne [25].

5.1.4.2 PŘÍSTROJE A POMŮCKY

- Plíšky
- Zařízení pro přípravu plíšků
- Magnetický blok
- Kovový podstavec
- Přístroj pro lámavost podle Fraasse (obr. 37)
- Ohýbací zařízení
- Chladicí zařízení
- Zařízení na měření teploty nebo teploměr
- Manipulační kleště
- Váhy

Nejméně jednou ročně se musí zařízení zkalibrovat a ověřit. Při pravidelném používání se doporučuje kontrolovat teploměr, rychlost ochlazování a zařízení pro detekci pohybu každý měsíc [25].



Obrázek 37: Přístroj pro bod lámavosti podle Fraasse

5.1.4.3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Tři zkušební plíšky se odmastí vhodným rozpouštědlem, vysuší a položí na váhu, která se vytáruje s přesností $\pm 0,01$ g. Ocelové plíšky se vyrábí tak, aby se ohnuly vždy jen jedním a tím stejným směrem, tato strana se nazývá konvexní. Vzorek pojiva se nanáší vždy na konvexní stranu plíšku. Je důležité všechny zkoušky provádět se stejnou vrstvou pojiva.

Na plíšek se odváží $410 \text{ g} \pm 10 \text{ g}$ asfaltového pojiva a plíšek se přesune na magnetický blok, který se položí na vyhřívanou část kovového podstavce (obr. 38). Teplota by měla být u polymerem modifikovaných asfaltů v rozmezí $180 \text{ }^\circ\text{C}$ až $200 \text{ }^\circ\text{C}$, v žádném případě ale nesmí překročit $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Po rozehřátí asfaltového pojiva se zajistí rovnoměrné roztečení pojiva po celém plíšku (obr. 39). Vzorek se nechá asi 2 minuty v klidu a poté pomocí jehly nebo plamene se odstraní vzduchové bublinky.

Plíšek se přesune na chlazenou část stojanu a přikryje se snímatelným krytem, aby se vzorek ochránil od prachu. Takto se plíšek nechá ležet při laboratorní teplotě ve vodorovné poloze [25],



Obrázek 38: Nahřátí asfaltového pojiva na plíšku



Obrázek 39: Rovnoměrné rozlití pojiva

5.1.4.4 POSTUP ZKOUŠKY

Zkouška by měla proběhnout mezi 30 až 240 minutami po nanesení pojiva na plíšek. Výchozí teplota zkoušky před dalším ochlazováním má být nejméně 15 °C nad očekávaným bodem lámavosti. Rychlost ochlazování je 1 °C/min. Ohýbání vzorku se provádí při každém klesnutí teploty o 1 °C (tedy po minutě). Začíná se ohýbat při teplotě o 8 °C až 12 °C vyšší, než je předpokládaný bod lámavosti.

Zkušební vzorek se za pomoci manipulačních kleští opatrně umístí mezi patky ohýbacího zařízení tak, aby nedošlo ke zlomení vrstvy pojiva. Ohýbací zařízení se zkušebním plíškem se vloží do vnitřní zkumavky chladicího zařízení. Teploměr se vloží za plíšek a do středu mezi ohýbací patky. Zahájí se ochlazování, teplota musí klesat o 1 °C každých 60 s ± 5 sekund. Prostor mezi vnitřní a vnější zkumavkou musí být vyplněn minimálně do výšky 100 mm kapalinou, jejíž teplota se může regulovat pomocí přidávání malých kousků tuhého oxidu uhličitého (suchý led).

Při teplotě 10 °C ± 2 °C nad očekávaným bodem lámavosti se zahájí ohýbání rychlostí 1 s⁻¹ každou minutu. V okamžiku, kdy vrstva asfaltového pojiva praskne se zaznamená teplota s přesností na 1°C [25].

5.1.4.5 VYJÁDŘENÍ VÝSLEDKŮ

Průměr ze dvou (nebo čtyř) platných měření je výsledný bod lámavosti podle Fraasse zaokrouhlený na nejbližší celé číslo [25].

5.2 ZKOUŠKY FUNKČNÍ (SUPERPAVE®)

Z důvodu omezené spolehlivosti a vypovídající schopnosti empirických zkoušek byl v Americe v letech 1987 až 1993 proveden výzkum Strategic Highway Research Program. Tento výzkum vedl k vývoji nových metod ke zkoušení a charakterizaci asfaltových pojiv. Jednou z nových metod je právě zkouška na dynamickém smykovém reometru, která slouží k charakterizování viskoelastického chování asfaltových pojiv a stanovení odolnosti proti vyjíždění kolejí. Mezi další funkční zkoušky patří Stanovení modulu tuhosti za ohybu pomocí průhybového trámečkového reometru (BBR), Multiple Stress Creep and Recovery test (MSCRT), Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) a Urychlené dlouhodobé stárnutí v tlakové nádobě (PAV) [21].

5.2.1 DYNAMICKÝ SMYKOVÝ REOMETR PODLE ČSN EN 14770

5.2.1.1 PODSTATA METODY

Dynamický smykový reometr se používá ke zkoušení lineárního viskoelastického chování. Na zkušební vzorek asfaltu se aplikuje oscilující smykové napětí a měří se odezva deformace pojiva nebo se aplikuje smykové přetvoření a měří se vzniklé napětí [26].

5.2.1.2 PŘÍSTROJE A POMŮCKY

- Dynamický smykový reometr (obr. 40)
- Formy, podložky nebo nádoby – ze silikonu
- Sušárna [26]



Obrázek 40: DSR

5.2.1.3 PŘÍPRAVA REOMETRU

Dynamický smykový reometr se připraví podle příručky od výrobce. Postup a výběr správné geometrie a její mezery se taktéž připraví dle doporučení a normy ČSN EN 14770 [26].

5.2.1.4 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ

Rozehřáté asfaltové pojivo na požadovanou teplotu se rozlije do silikonových forem a překryje se vhodnou nádobou z důvodu zamezení kontaminace vzorku nečistotami [26].

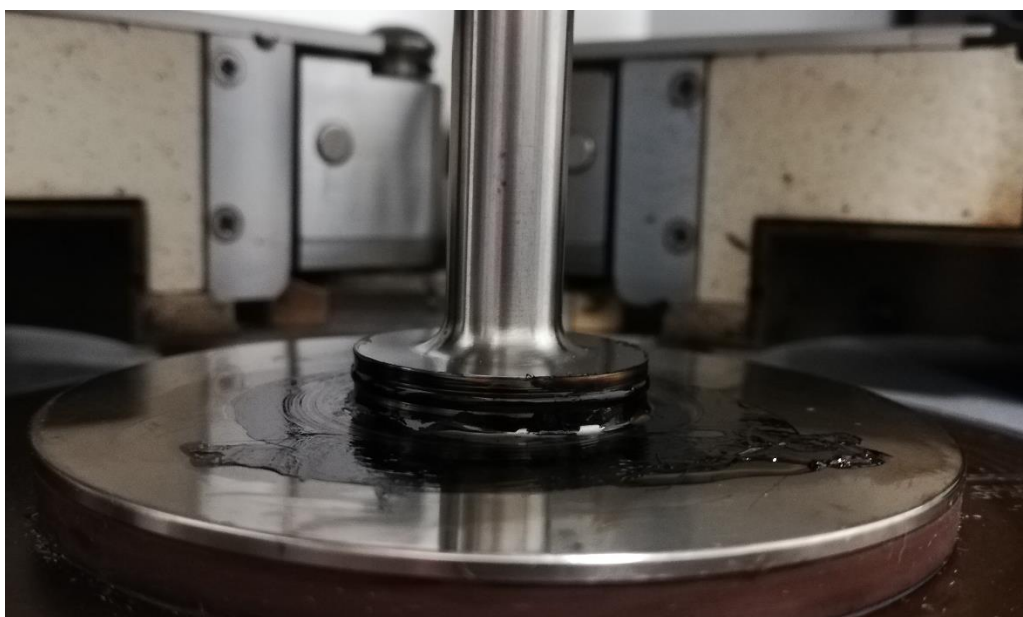
5.2.1.5 POSTUP ZKOUŠKY

Vzorek se uvolní z formy a umístí do reometru na přibližný střed soupravy určené k měření (obr. 41). Destičky reometru jsou předehřáty na teplotu 70 °C, aby došlo spojení destiček s pojivem. Poté se nastaví mezera o 0,025 mm až 0,050 mm větší, než je požadovaná mezera a přebývající pojivo se odřízne (obr. 42) nožem, stěrkou nebo ořezávacím nástrojem a mezera se sníží na požadovanou hodnotu zkoušky. Z nabídky softwaru se zvolí vhodný

program oscilace a nechá se vzorek ustálit na počáteční teplotu zkoušky. Zkouška se zahájí při zvolené počáteční teplotě 70 °C, začíná se na nejnižší frekvenci a postupně se pokračuje k nejvyšší. Zkouška se provádí v celém rozsahu teplot (70 °C až 40 °C s krokem 5 °C) s jednou zkušební geometrií. Po ukončení zkoušky se z počítačového softwaru převezmou výsledky [26].



Obrázek 41: Vzorek umístěný do přibližného středu reometru



Obrázek 42: Odříznutí pojiva a nastavení mezery

5.2.1.6 VYJÁDŘENÍ VÝSLEDKŮ

Při jednotlivých zkušebních teplotách a frekvencích se do tabulky zaznamená absolutní hodnota komplexního modulu ve smyku $|G^*|$ v [Pa] na tři platná čísla a úhel fázového posunu δ [°] na nejbližší 0,1° [26].

6 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK

V této kapitole jsou zaznamenány výsledky všech provedených zkoušek. Výsledky, porovnání a vzájemné vztahy jsou znázorněny v tabulkách a grafech.

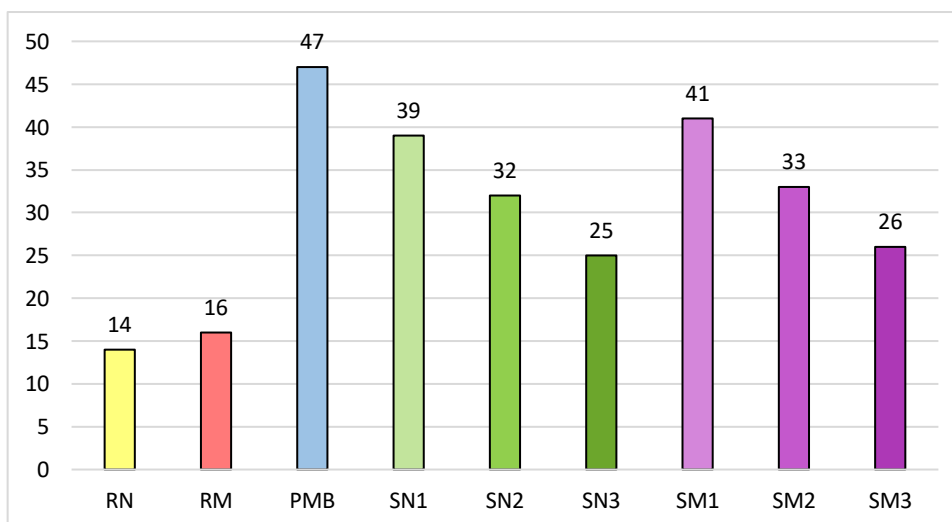
6.1 PENETRACE JEHLOU

Postup stanovení penetrace jehlou je podrobně popsán v kapitole 5.1.1. Penetrace byla provedena na dvou pojivech z R-materiálů, novém čerstvém pojivu a šesti směsích pojiv. U každého vzorku byla provedena 3 měření. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 2 a grafu 1.

Vzorek	RN	RM	PMB
Penetrace [0,1 mm]	14	16	47
Vzorek	SN1	SN2	SN3
Penetrace [0,1 mm]	39	32	25
Vzorek	SM1	SM2	SM3
Penetrace [0,1 mm]	41	33	26

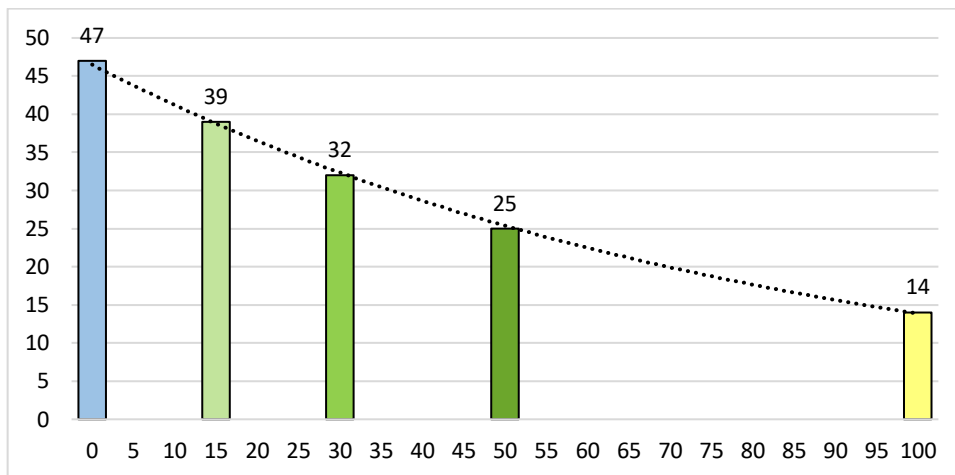
Tabulka 2: Naměřené hodnoty penetrace

Z grafu 1 je patrné, že hodnoty penetrace jsou po přidání pojiva z R-materiálu k novému čerstvému pojivu nižší. To znamená, že u namíchaných směsí pojiv se zvyšuje viskozita s vyšším podílem pojiva získaného z R-materiálu.

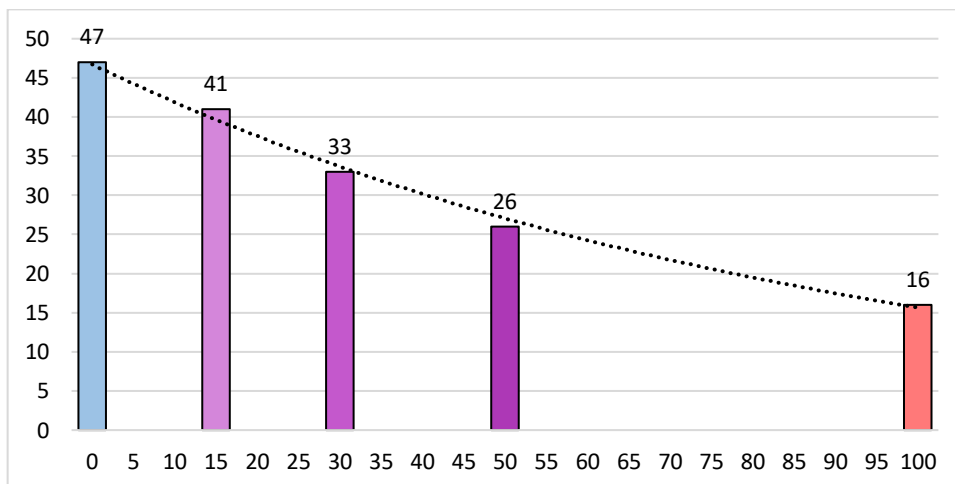


Graf 1: Naměřené hodnoty penetrace [0,1 mm]

Na grafu 2 a 3 je vidět, že hodnoty penetrace klesají exponenciálně s rostoucím množstvím pojiva z R-materiálu.



Graf 2: Exponenciální klesání penetrace směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu

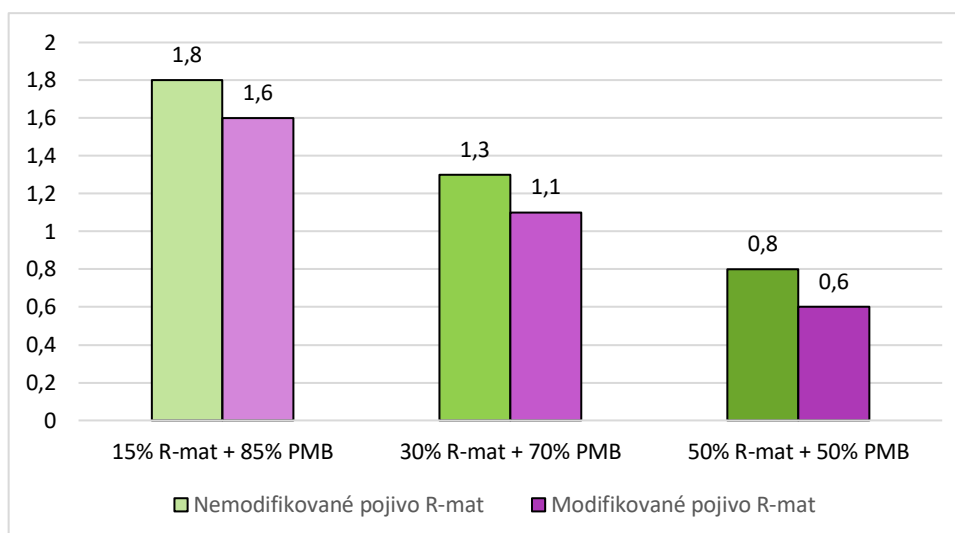


Graf 3: Exponenciální klesání penetrace směsí pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu

Chceme-li zjistit, do jaké míry nové pojivo ovlivňuje penetraci pojiva získaného z R-materiálu, je míra zvýšení penetrace pojiva z R-materiálu definována jako: [19]

$$Pen_{\text{míra zvýšení}} = \frac{Pen_{\text{směsi}} - Pen_{R\text{-mat}}}{Pen_{R\text{-mat}}} \quad [19]$$

Dle grafu 4 je patrné, že míra zvýšení penetrace je vyšší u nemodifikovaného pojiva z R-materiálu. Modifikované pojivo z R-materiálu je méně ovlivněno novým pojivem, důvodem může být horší kompatibilita pojiv nebo to, že obě pojiva jsou modifikovaná.



Graf 4: Míra zvýšení penetrace pojiv z R-materiálů

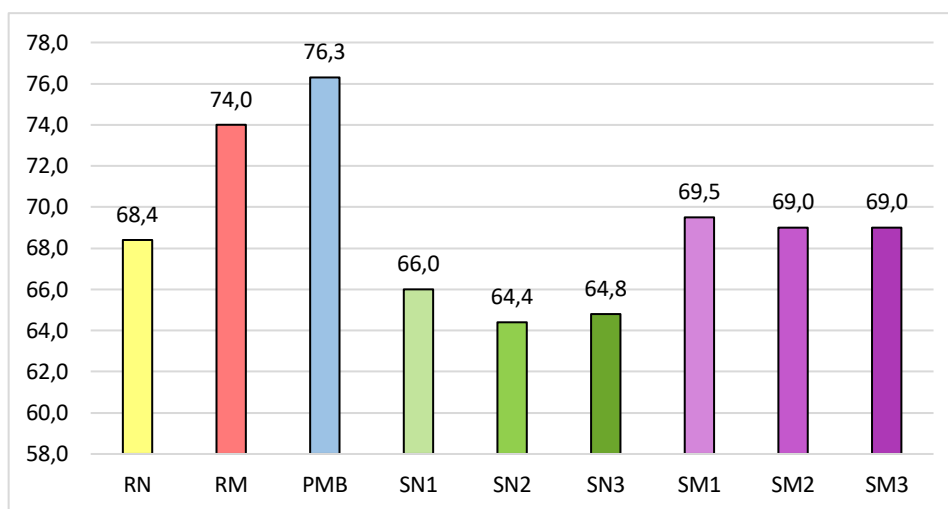
Penetrace všech vzorků vyhovuje požadavkům normy ČSN 7222-1. Čistá pojiva z R-materiálů mají nízkou hodnotu penetrace a spadají do třídy 10/40. Vzorek nového polymerem modifikovaného asfaltu odpovídá třídě 45/80 jak uvádí výrobce. Vzorkům SN1, SN2, SN3, SM1, SM2 a SM3 klesla v závislosti na přidání pojiva z R-materiálu hodnota penetrace, a tak spadají do třídy 25/55.

6.2 BOD MĚKNUTÍ – KROUŽEK A KULIČKA

Zkouška stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička je podrobně popsána v kapitole 5.1.2. Z důvodu přesnější korelace, nebyly výsledky zaokrouhleny podle normy ČSN EN 1427, ale na 0,1 °C.

Vzorek	RN	RM	PMB
Bod měknutí [°C]	68,4	74,0	76,3
Vzorek	SN1	SN2	SN3
Bod měknutí [°C]	66,0	64,4	64,8
Vzorek	SM1	SM2	SM3
Bod měknutí [°C]	69,5	69,0	69,0

Tabulka 3: Naměřené hodnoty bodu měknutí [°C]



Graf 5: Naměřené hodnoty bodu měknutí [°C]

Bod měknutí pojiva získaného z R-materiálu obsahujícího modifikovaný asfalt vyšel podle očekávání vyšší než bod měknutí pojiva získaného z R-materiálu obsahujícího nemodifikovaný silniční asfalt. Bod měknutí polymerem modifikovaného asfaltu je o 11,3 °C vyšší, než je požadováno v normě ČSN 65 7222-1 pro pojiva třídy 45/80-65. Hodnoty bodu měknutí směsí pojiv se překvapivě neumístily mezi bodem měknutí pojiv, ze kterých byly tyto směsi pojiv vyrobeny, ale vždy došlo k poklesu hodnoty bodu měknutí směsi pojiva oproti hodnotě bodu měknutí pojiva získaného z R-materiálu. To je velice překvapivý výsledek, neodpovídající údajům z odborné literatury a tento jev by bylo vhodné ověřit dalším výzkumem.

Z výsledků penetrace a bodu měknutí lze určit penetrační index dle vzorce: [19]

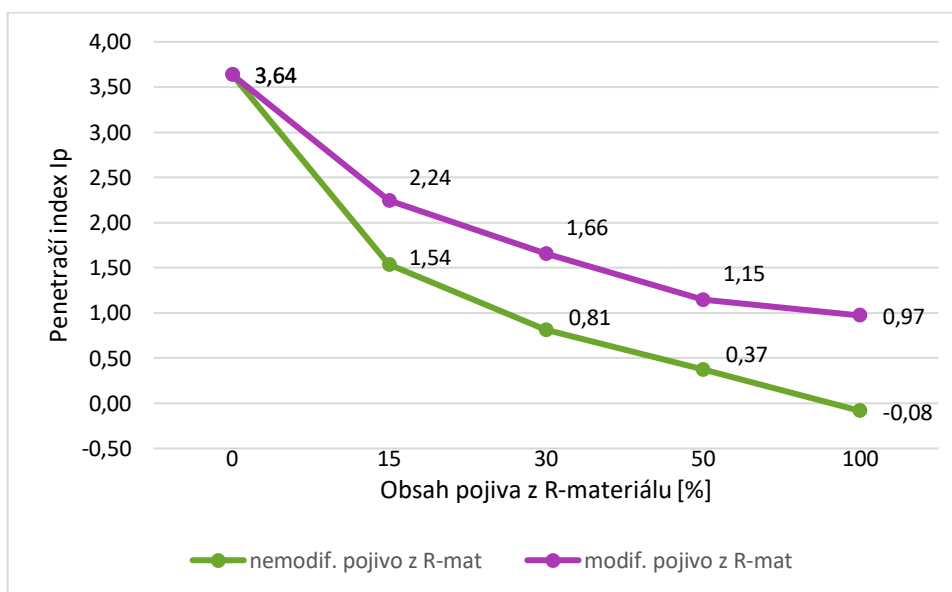
$$I_p = \frac{1950 - 500 \log Pen - 20SP}{50 \log Prn - DP - 120} \quad [19]$$

Penetrační index I_p udává teplotní náchylnost a obvykle se používá pouze pro hodnotu penetrace. Hodnota I_p se může pohybovat v rozmezí -3 (velmi citlivé na teplotu) a +7 (téměř žádná teplotní náchylnost). Pro polymerem modifikované asfalty se obvykle nepoužívá. Při smíchání pojiva z R-materiálu s novým čerstvým pojivem bez modifikace polymerem hodnota I_p klesá, v případě PMB je to zcela naopak, tzn. že má vyšší penetrační index [19].

V tabulce 4 je proveden výpočet penetračního indexu I_p . Výsledky jsou znázorněny v grafu 6. Teplotní citlivost se zvyšuje s vyšším množstvím pojiva získaného z R-materiálu.

Obsah R-mat [%]		0	15	30	50	100
Nemodif. pojivo z R-mat	Vzorek	PMB	SN1	SN2	SN3	RN
	Penetrace [0,1 mm]	47	39	32	25	14
	Bod měknutí [°C]	76,3	66,0	64,4	64,8	68,4
	Penetrační index	3,64	1,54	0,81	0,37	-0,08
Modif. pojivo z R-mat	Vzorek	PMB	SM1	SM2	SM3	RM
	Penetrace [0,1 mm]	47	41	33	26	16,0
	Bod měknutí [°C]	76,3	69,5	69,0	69,0	74,0
	Penetrační index	3,64	2,24	1,66	1,15	0,97

Tabulka 4: Výpočet penetračního indexu



Graf 6: Hodnoty penetračního indexu Ip

Bod měknutí byl porovnán s požadavky normy ČSN 65 722-1. Všechny vzorky kromě SN2 a SN3 měly bod měknutí >65 °C. Přidaná pojiva z R-materiálů značně ovlivňují hodnotu bodu měknutí.

6.3 ZAŘAZENÍ DO TŘÍD

Podle zkoušky penetrace a bodu měknutí můžeme určit třídy směsí pojiv podle normy ČSN 65 7222-1 (obr. 43). Zatřídění do kategorií je uvedeno v tabulkách 5 a 6.

Vzorek	PMB	SN1	SN2	SN3	RN
Penetrace [0,1 mm]	47	39	32	25	14
Bod měknutí [°C]	76,3	66,0	64,4	64,8	68,4
Kategorie	45/80-65	25/55-65	25/55-60	25/55-60	10/40-65

Tabulka 5: Zařazení směsí s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu

Vzorek	PMB	SM1	SM2	SM3	RM
Penetrace [0,1 mm]	47	41	33	26	16
Bod měknutí [°C]	76,3	69,5	69,0	69,0	74,0
Kategorie	45/80-65	25/55-65	25/55-65	25/55-65	10/40-65

Tabulka 6: Zařazení směsí s modifikovaným pojivem z R-materiálu

Vlastnost	jednotky	zkušební metoda	10/40-65	25/55-60	25/55-65	45/80-55	45/80-65	45/80-75	40/100-65
penetrace, 25 °C	0,1 mm	ČSN EN 1426	10-40	25-55	25-55	45-80	45-80	45-80	40-100
bod měknutí	°C	ČSN EN 1427	≥ 65	≥ 60	≥ 65	≥ 55	≥ 65	≥ 75 ^{b)}	≥ 65
silová duktilita teplota zkoušky ^{a)}	J/cm ² °C	ČSN EN 13589	≥ 1 15	≥ 2 10	≥ 3 10	≥ 1 5	≥ 3 5	≥ 3 5	≥ 3 5
bod lámavosti	°C	ČSN EN 12593	≤ -5	≤ -12	≤ -12	≤ -15	≤ -15	≤ -18	≤ -18
vratná duktilita, 25 °C	%	ČSN EN 13398	≥ 50	≥ 60	≥ 70	≥ 60	≥ 70	≥ 80	≥ 70
odolnost proti stárnutí RTFOT změna hmotnosti zbylá penetrace	%	ČSN EN 12607-1	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
změna bodu měknutí	%		≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60
vratná duktilita, 25 °C	°C		-2/+8	-2/+8	-5/+10	-2/+8	-5/+10	-5/+10 ^{b)}	-5/+10
bod vzplanutí	%		≥ 50	≥ 50	≥ 60	≥ 50	≥ 60	≥ 70	≥ 60
bod vzplanutí	°C	ČSN EN ISO 2592	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235	≥ 235
skladovací stabilita rozdíl bodu měknutí	°C	ČSN EN 13399	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5

^{a)} Dojde-li k předčasnému přetržení, je dovoleno zvýšit zkušební teplotu o 5 °C.
^{b)} Zkouška bodu měknutí se provede v glycerinové lázni.

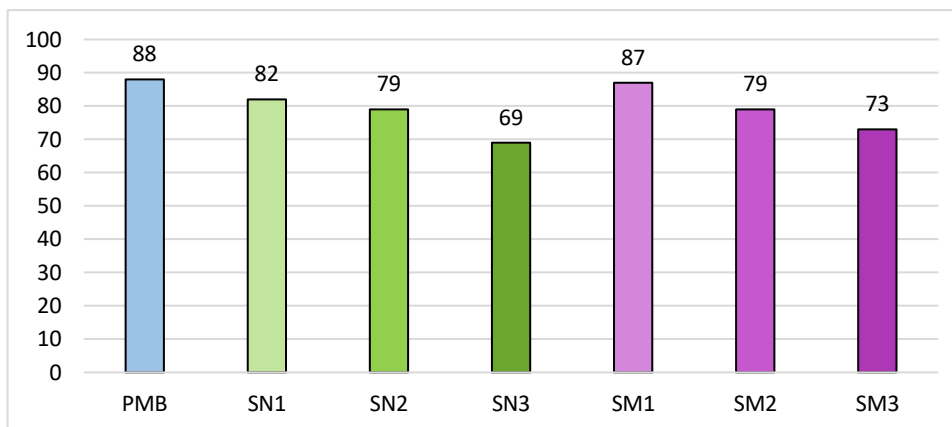
Obrázek 43: Specifikace PMB podle normy ČSN 65 7222-1 [27]

6.4 VRATNÁ DUKTILITA

Stanovení vratné duktility je podrobně popsáno v kapitole 5.1.3. U každého vzorku bylo z důvodu malého množství směsí pojiv provedeno 1 měření. Výsledky vratné duktility jsou uvedeny v tabulce 7 a grafu 7.

Vzorek	PMB	SN1	SN2	SN3	SM1	SM2	SM3
Vratná duktilita [%]	88	82	79	69	87	79	73

Tabulka 7: Výsledky vratné duktility [%]



Graf 7: Výsledky vratné duktility [%]

S množstvím přidaného pojiva z R-materiálu klesá hodnota vratné duktility. Je zřejmé, že hodnoty vratné duktility jsou ovlivněny modifikací. U nemodifikovaného pojiva získaného z R-materiálu klesla hodnota vratné duktility o trochu více, ačkoli v případě vzorků SN2 a SM2, které mají obsah pojiva z R-materiálu 30% klesla hodnota stejně. Vzorky s modifikovaným pojivem z R-materiálu jsou nepatrně pružnější.

Všechny vzorky vyhovují požadavkům normy ČSN 65 7222-1 podle zatřídění, viz tabulka 8.

Vzorek	PMB	SN1	SN2	SN3	SM1	SM2	SM3
Vratná duktilita [%]	88	82	79	69	87	79	73
Kategorie	45/80-65	25/55-65	25/55-60	25/55-60	25/55-65	25/55-65	25/55-65
ČSN 65 7222-1	≥ 70	≥ 70	≥ 60	≥ 60	≥ 70	≥ 70	≥ 70

Tabulka 8: Srovnání s požadavky normy ČSN 65 7222-1

6.5 BOD LÁMAVOSTI PODLE FRAASSE

Stanovení bodu lámavosti podle Fraasse je podrobně popsáno v kapitole 5.1.4. U každého vzorku byla provedena dvě měření. V tabulce 9 a grafu 8 jsou uvedeny zprůměrované výsledky této zkoušky. Z důvodu viditelnosti nepatrných rozdílů nebyly výsledky zaokrouhleny na celé číslo.

Vzorek	PMB	SN1	SN2	SN3	SM1	SM2	SM3
Bod lámavosti [°C]	-16,0	-11,5	-9,0	-6,5	-12,5	-9,0	-7,0

Tabulka 9: Výsledky bodu lámavosti [°C]



Graf 8: Výsledky bodu lámavosti [°C]

Z grafu 8 je zřejmé, že použité pojivo v R-materiálu nepatrně ovlivňuje bod lámavosti výsledného směsného pojiva. Všem směsím pojiv vzrostl (zhoršil se) bod lámavosti s množstvím přidaného pojiva získaného z R-materiálu. Směsi pojiv obsahující nemodifikované pojivo získané z R-materiálu mají téměř shodné hodnoty bodu lámavosti jako směsi pojiv obsahující pojivo získané z R-materiálu, který obsahoval modifikované pojivo.

Zjištěné hodnoty bodu lámavosti byly porovnány s požadavky normy ČSN 65 7222-1. Normě vyhovuje pouze od výrobce dodaný polymerem modifikovaný asfalt a směs s 15 % modifikovaného pojiva získaného z R-materiálu SM1.

Vzorek	PMB	SN1	SN2	SN3	SM1	SM2	SM3
Bod lámavosti [°C]	-16,0	-11,5	-9,0	-6,5	-12,5	-9,0	-7,0
Kategorie	45/80-65	25/55-65	25/55-60	25/55-60	25/55-65	25/55-65	25/55-65
ČSN 65 7222-1	≤ -15	≤ -12	≤ -12	≤ -12	≤ -12	≤ -12	≤ -12

Tabulka 10: Srovnání s požadavky normy ČSN 65 7222-1

6.6 DYNAMICKÝ SMYKOVÝ REOMETR

Stanovení komplexního smykového modulu $|G^*|$ a fázového úhlu δ je podrobně popsáno v kapitole 5.2.1. Zkouška byla provedena na dynamickém smykovém reometru při teplotním rozsahu 40 °C až 70 °C a frekvenci zatěžování 0,1 Hz až 10 Hz, viz tabulky 11, 12 a 13. Byla použita geometrie o průměru 25 mm. Pro vyhodnocení byly použity hodnoty při frekvenci zatěžování 1,59 Hz, což odpovídá úhlové rychlosti 10 rad/s.

Vzorek		PMB	
Obsah R-mat [%]		0	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ (°)
1,59	70	3,432	61,8
	65	5,483	60,7
	60	8,916	60,0
	55	14,868	59,7
	50	26,449	59,7
	45	50,230	59,7
	40	99,763	59,3

Tabulka 11: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu PMB z DSR při frekvenci zatěžování 1,59 Hz

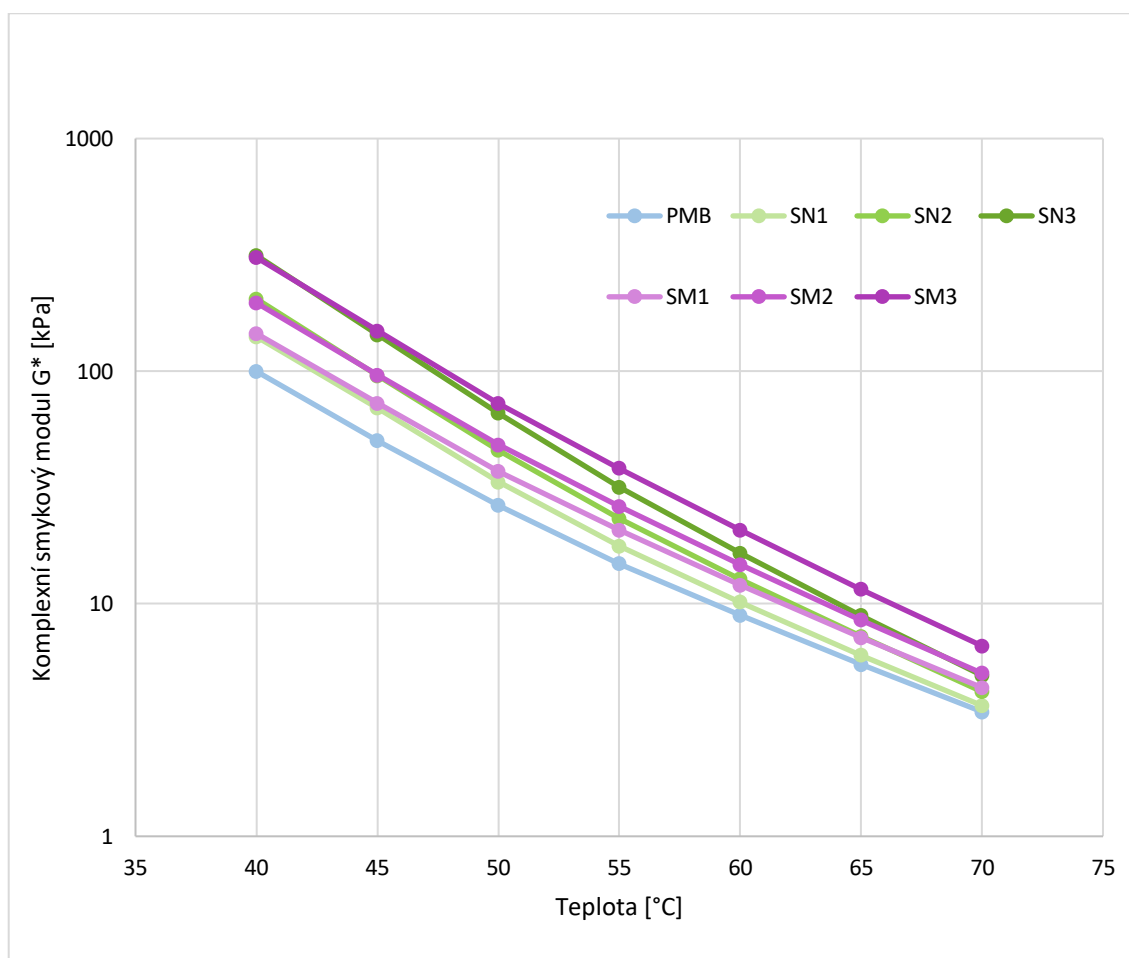
Vzorek		SN1		SN2		SN3	
Obsah R-mat [%]		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ (°)	G* [kPa]	δ (°)	G* [kPa]	δ (°)
1,59	70	3,648	65,4	4,185	69,1	4,918	72,7
	65	6,012	64,0	7,234	67,2	8,894	70,7
	60	10,154	63,1	12,785	65,9	16,510	69,0
	55	17,678	62,6	23,214	65,1	31,669	67,5
	50	33,352	62,4	45,710	64,3	66,035	66,0
	45	69,458	61,6	95,605	63,1	143,288	63,8
	40	140,604	60,5	204,565	61,2	314,458	60,8

Tabulka 12: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem získaného z R-materiálu z DSR při frekvenci zatěžování 1,59 Hz

Vzorek		SM1		SM2		SM3	
Obsah R-mat [%]		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ (°)	G* [kPa]	δ (°)	G* [kPa]	δ (°)
1,59	70	4,356	63,8	5,023	66,0	6,588	68,0
	65	7,158	62,3	8,517	64,3	11,534	66,0
	60	12,009	61,5	14,745	63,1	20,713	64,6
	55	20,751	61,1	26,257	62,3	38,194	63,4
	50	37,052	60,8	48,224	61,6	72,526	62,1
	45	72,709	60,4	96,095	60,6	149,158	60,3
	40	145,090	59,6	196,615	59,1	307,960	58,0

Tabulka 13: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu směsí pojiv s modifikovaným pojivem získaného z R-materiálu z DSR při frekvenci zatěžování 1,59 Hz

Z tabulek 11, 12 a 13 je vidět, že vlivem vysokých teplot dochází k poklesu komplexního smykového modulu. Při vysokých teplotách je také vidět, že elastická složka komplexního smykového modulu je vyšší u směsí pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-materiálu, a to zejména u směsi SM3, která má 50 % pojiva z R-materiálu. To znamená, že pojivo je více elastické a dokáže lépe odolávat trvalým deformacím.

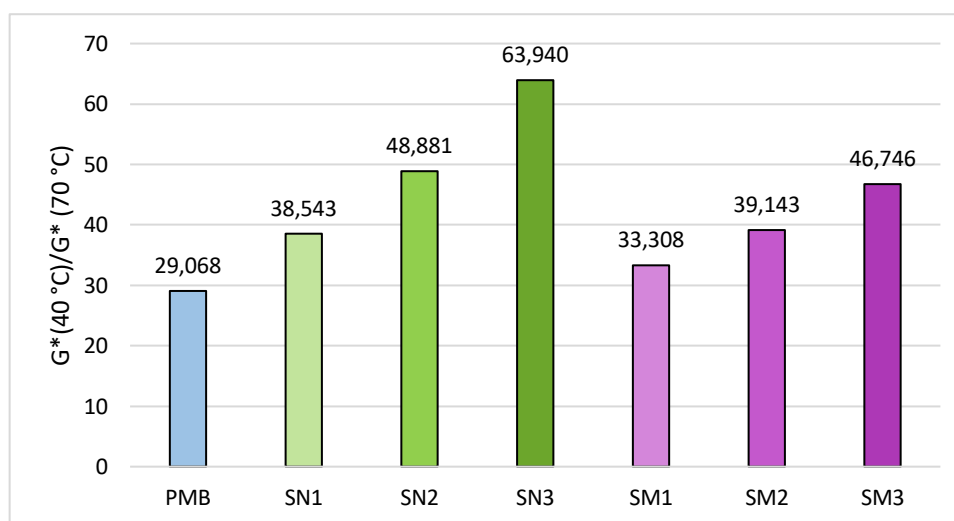


Graf 9: Isochrony při frekvenci 1,59 Hz

V grafu 9 jsou vyobrazeny isochrony komplexního smykového modulu pro jednotlivá pojiva při frekvenci 1,59 Hz. Isochrony jsou křivky, které vyjadřují chování asfaltových pojiv při konstantní frekvenci. Z grafu je patrné, že při zvyšující se teplotě klesají hodnoty komplexního smykového modulu. Vlivem snižující se teploty asfaltové pojivo tuhne a začíná se uplatňovat elastická část asfaltového pojiva před částí viskózní. S rostoucím obsahem pojiva získaného z R-materiálu se zvyšuje hodnota komplexního smykového modulu, přičemž nejnižší komplexní smykové moduly dosahoval čerstvý polymerem modifikovaný asfalt 45/80-65. Směsi pojiv, obsahující pojivo získané z R-materiálu, který obsahoval modifikovaný asfalt, dosahovaly většinou vyšších hodnot komplexního smykového modulu než směsi pojiv, obsahující pojivo z R-materiálu, které nebylo modifikované. Výjimkou jsou pouze některé hodnoty při nejnižších zkušebních teplotách, při kterých jsou hodnoty komplexního smykového modulu vzájemně přibližně srovnatelné.

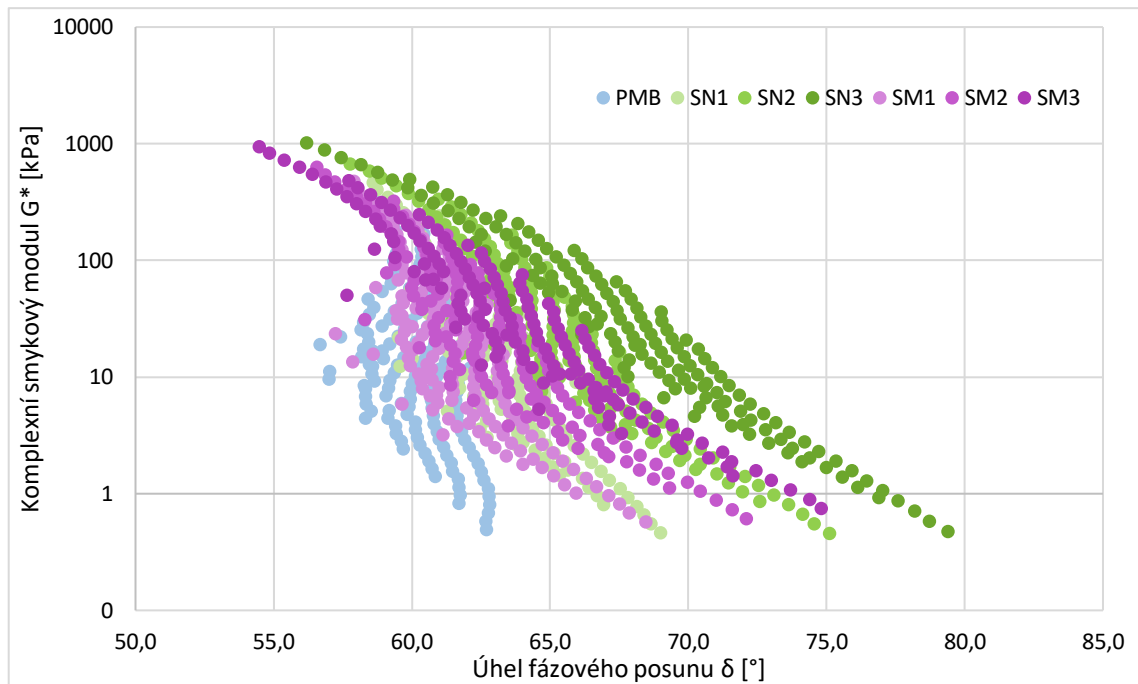
Vzorek	PMB	SN1	SN2	SN3	SM1	SM2	SM3
T [°C]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]
40	99,763	140,604	204,565	314,458	145,090	196,615	307,960
70	3,432	3,648	4,185	4,918	4,356	5,023	6,588
Podíl	29,068	38,543	48,881	63,940	33,308	39,143	46,746

Tabulka 14: Výpočet teplotní citlivosti – podíl $G^*(40\text{ °C}) / G^*(70\text{ °C})$



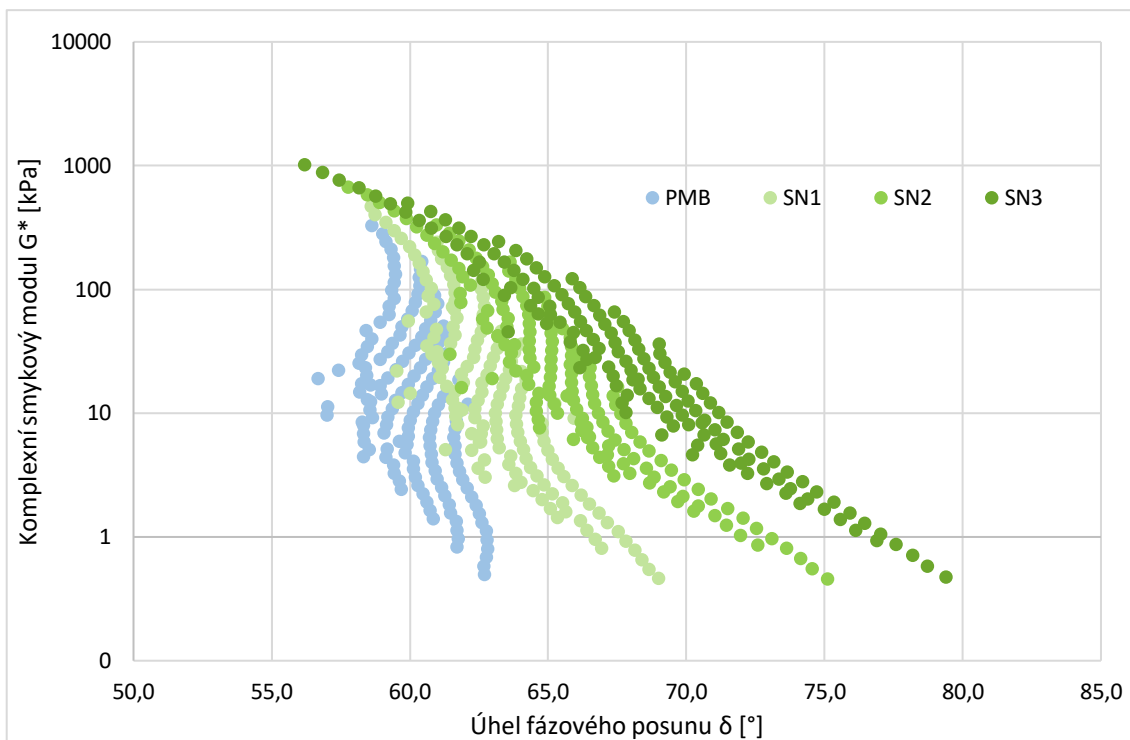
Graf 10: Teplotní citlivosti – podíl $G^*(40\text{ °C}) / G^*(70\text{ °C})$

Sloupcový graf 10 popisuje teplotní citlivost asfaltových pojiv vyjádřenou podílem komplexního smykového modulu měřeného při teplotě 40 °C a 70 °C. Teplotní citlivost vzrostla značně u směsí pojiv s pojivem získaného z R-materiálů oproti původnímu pojivu PMB. U směsí s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu vzrostla o něco více. Pojiva s nižším číslem mají nižší teplotní citlivost, tzn. že v létě netečou a v zimě nepraskají.

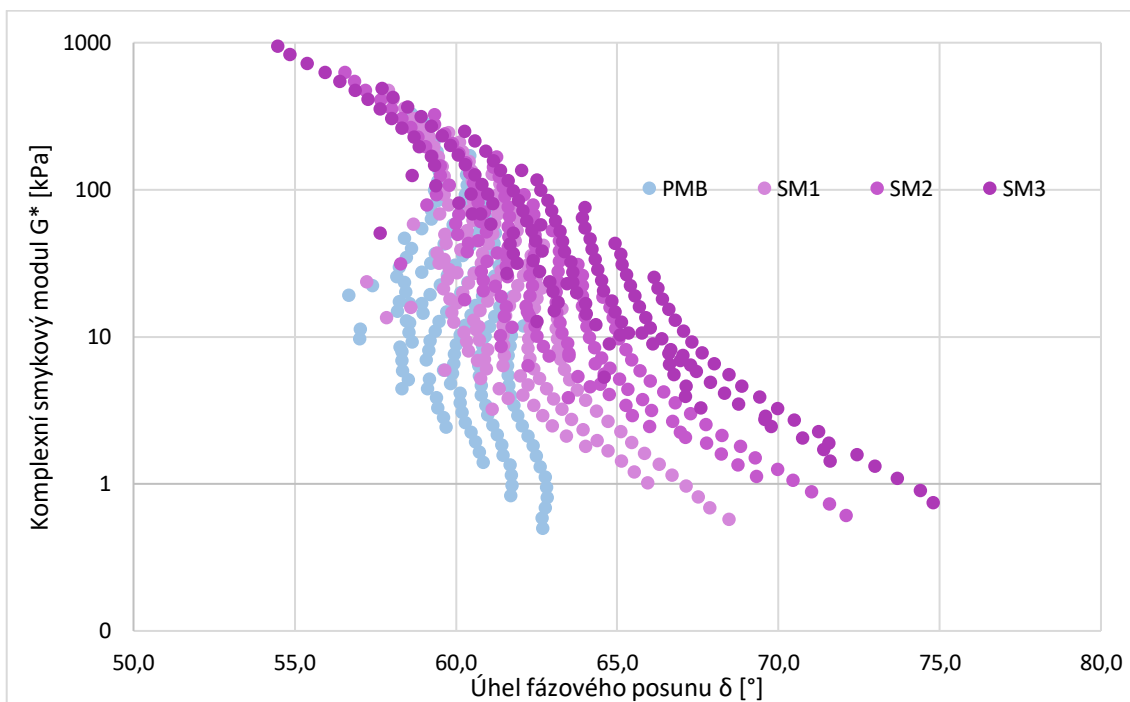


Graf 11: Blackův diagram – všechna pojiva

Dalším grafickým znázorněním jsou Blackovy diagramy, které vyjadřují závislost mezi komplexním smykovým modulem a úhlem fázového posunu, viz grafy 11, 12 a 13. Z grafů je vidět, že všechna asfaltová pojiva vykazují podobný průběh, ačkoliv směsi s vyšším obsahem pojiva získaného z R-materiálu mají průběh protáhlejší. To může být způsobeno tím, že polymer nezačne v pojivu reagovat při nižších hodnotách smykového modulu, a tedy se nevrací do nižších hodnot fázového úhlu, tzn. že se pojivo chová viskózněji. S rostoucím dávkováním pojiva získaného z R-materiálů se průběh Blackova diagramu posunuje směrem doprava, tzn. k vyšším hodnotám fázového úhlu a pojivo se svým chováním (a umístěním v Blackově diagramu) blíží chování silničních asfaltů.



Graf 12: Blackův diagram – PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu



Graf 13: Blackův diagram – PMB a směsi pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu

6.7 SOUHRNNÁ TABULKA VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK

V následujících tabulkách 15 a 16 jsou uvedeny zprůměrované a zaokrouhlené hodnoty zkoušek všech pojiv dle norem.

ozn.	R-mat	Penetrace	Bod měknutí	Duktilita	Bod lámavosti
	[%]	[0,1 mm]	[°C]	[%]	[°C]
RN	100	14	68,4	-	-
RM	100	16	74,0	-	-
PMB	0	47	76,3	88	-16,0
SN1	15	39	66,0	82	-11,5
SN2	30	32	64,4	79	-9,0
SN3	50	25	64,8	69	-6,5
SM1	15	41	69,5	87	-12,5
SM2	30	33	69,0	79	-9,0
SM3	50	26	69,0	73	-7,0

Tabulka 15: Výsledky empirických zkoušek

Vzorek	PMB	SN1	SN2	SN3	SM1	SM2	SM3
G* [kPa]	8,916	10,154	12,785	16,510	12,009	14,745	20,713
δ [°]	60,0	63,1	65,9	69,0	61,5	63,1	64,6

Tabulka 16: Výsledky funkční zkoušky z DSR (60 °C; 1,59 Hz)

6.8 VZÁJEMNÉ KORELACE

V následujících kapitolách jsou vyobrazené a popsány vybrané vzájemné korelace mezi zkouškami. Na závěr je souhrnná tabulka koeficientů determinace všech korelací pro směsi pojiv.

6.8.1 PENETRACE JEHLOU – BOD MĚKNUTÍ

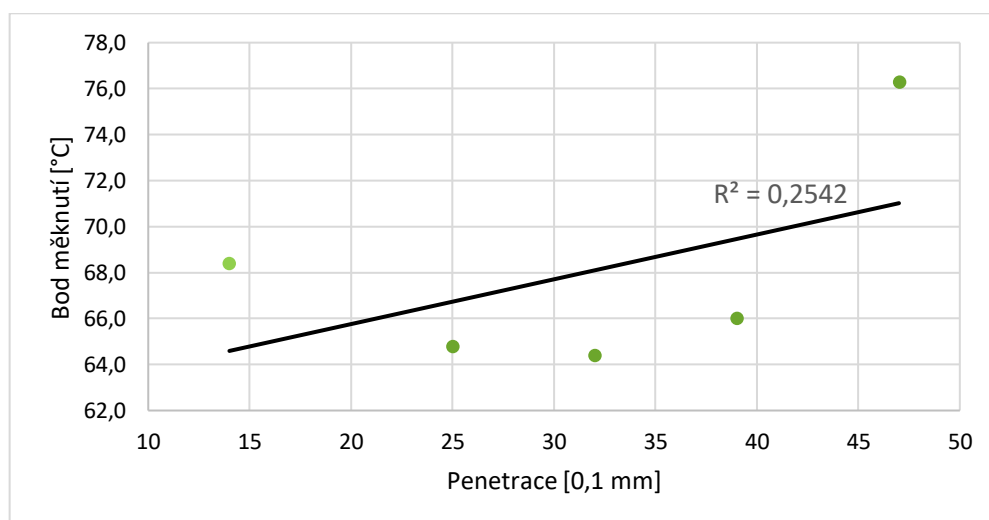
Na grafech 14 a 15 je vyjádřena vzájemná závislost mezi bodem měknutí a penetrací jehlou na směsích pojiv s nemodifikovaným a modifikovaným pojivem získaných z R-materiálů.

6.8.1.1 NEMODIFIKOVANÉ POJIVO ZÍSKANÉ Z R-MATERIÁLU

Z grafu 14 lze vyzorovat jen malou závislost mezi penetrací jehlou a bodem měknutí na vzorcích nového čerstvého polymerem modifikovaného asfaltu, nemodifikovaného pojiva z R-materiálu a jejich směsí s různým podílem. Závislost je vyjádřena spojnicí trendu s koeficientem determinace 0,254. Dalo by se předpokládat, že s rostoucí hodnotou penetrace by měla klesat hodnota bodu měknutí. To ovšem u polymerem modifikovaných asfaltů nemusí platit.

Vzorek	PMB	SN1	SN2	SN3	RN
Obsah R-mat [%]	0	15	30	50	100
Penetrace [0,1 mm]	47	39	32	25	14
Bod měknutí [°C]	76,3	66,0	64,4	64,8	68,4

Tabulka 17: Hodnoty penetrace a bodu měknutí u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem získaného z R-materiálu



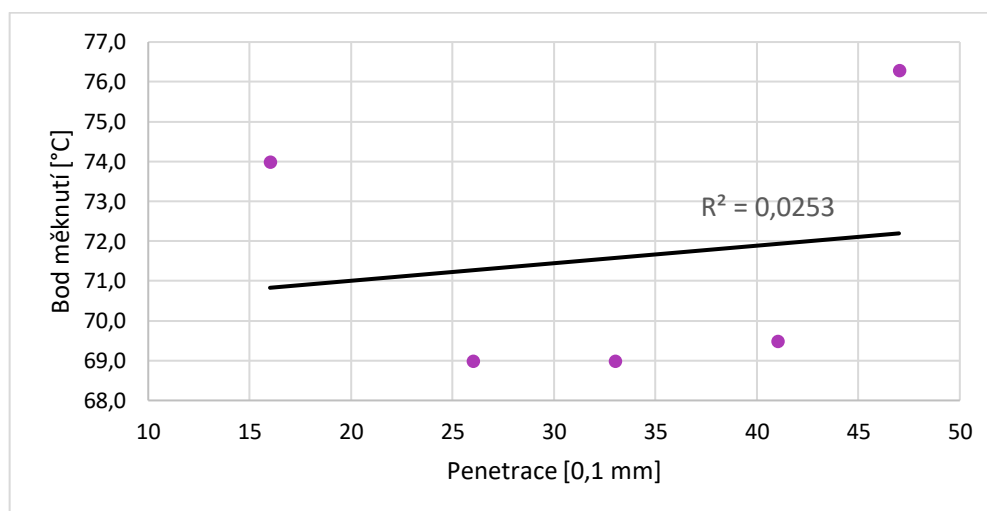
Graf 14: Závislost penetrace a bodu měknutí u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem získaného z R-materiálu

6.8.1.2 MODIFIKOVANÉ POJIVO ZÍSKANÉ Z R-MATERIÁLU

Na grafu 15 je vyobrazena velmi malá vzájemná závislost mezi penetrací jehlou a bodem měknutí na vzorcích nového čerstvého polymerem modifikovaného asfaltu, modifikovaného pojiva z R-materiálu a jejich směsí s různým podílem. Závislost je vyjádřena spojnicí trendu s koeficientem determinace 0,025. Ani zde nemá spojnice trendu sklon, který by se dal předpokládat.

Vzorek	PMB	SM1	SM2	SM3	RM
Obsah R-mat [%]	0	15	30	50	100
Penetrace [0,1 mm]	47	41	33	26	16
Bod měknutí [°C]	76,3	69,5	69,0	69,0	74,0

Tabulka 18: Hodnoty penetrace a bodu měknutí u směsí pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu



Graf 15: Závislost penetrace a bodu měknutí u směsí pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu

6.8.2 VRATNÁ DUKTILITA – BOD LÁMAVOSTI

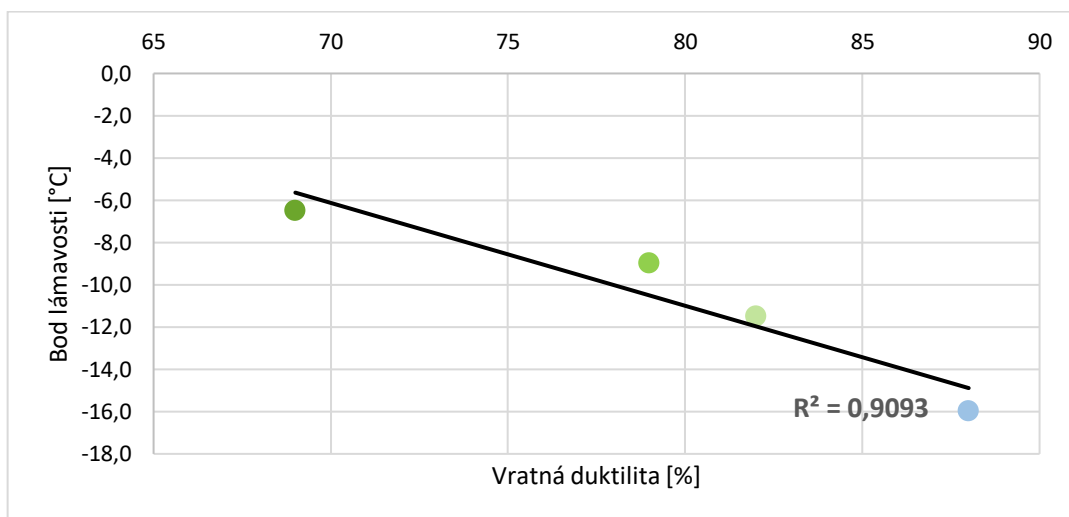
Na grafech 16 a 17 je vyjádřena vzájemná závislost mezi vratnou duktilitou a bodem lámavosti na směších pojiv s nemodifikovaným a modifikovaným pojivem získaných z R-materiálů.

6.8.2.1 NEMODIFIKOVANÉ POJIVO ZÍSKANÉ Z R-MATERIÁLU

Z grafu 16 lze vyzorovat silnou závislost mezi vratnou duktilitou a bodem lámavosti na vzorcích nového čerstvého polymerem modifikovaného asfaltu, nemodifikovaného pojiva z R-materiálu a jejich směsí s různým podílem. Závislost je vyjádřena spojnicí trendu s koeficientem determinace 0,909.

Vzorek	PMB	SN1	SN2	SN3
Obsah R-mat [%]	0	15	30	50
Vratná duktilita [%]	88	82	79	69
Bod lámavost [°C]	-16,0	-11,5	-9,0	-6,5

Tabulka 19: Hodnoty vratné duktility a bodu lámavosti u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu



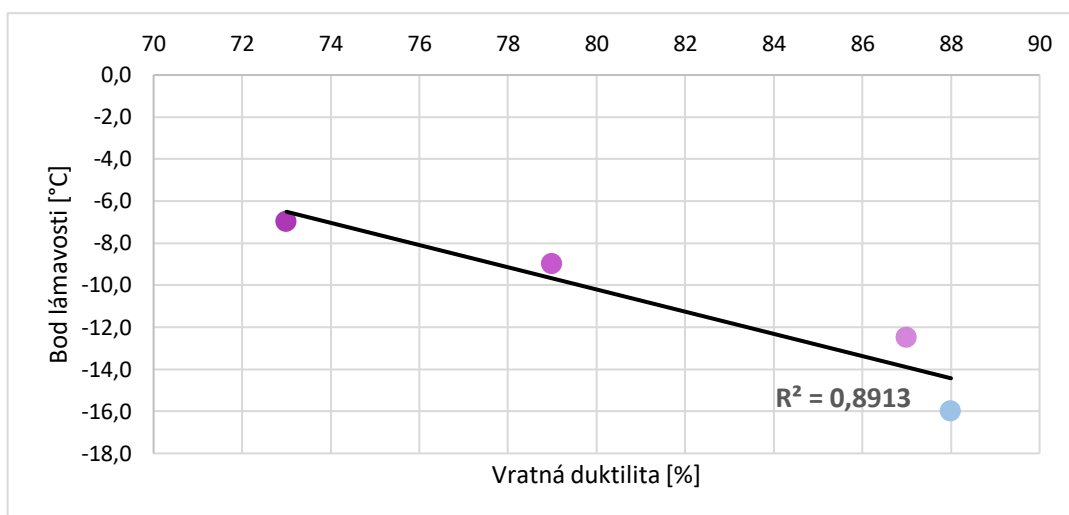
Graf 16: Závislost vratné duktility a bodu lámavosti u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem získaného z R-materiálu

6.8.2.2 MODIFIKOVANÉ POJIVO ZÍSKANÉ Z R-MATERIÁLU

I v tomto případě lze z grafu 17 vypočítat silnou závislost mezi vratnou duktilitou a bodem lámavosti na vzorcích nového čerstvého polymerem modifikovaného asfaltu, modifikovaného pojiva z R-materiálu a jejich směsí s různým podílem. Závislost je vyjádřena spojnicí trendu s koeficientem determinace 0,891.

Vzorek	PMB	SM1	SM2	SM3
Obsah R-mat [%]	0	15	30	50
Vratná duktilita [%]	88	87	79	73
Bod lámavost [°C]	-16,0	-12,5	-9,0	-7,0

Tabulka 20: Hodnoty vratné duktility a bodu lámavosti u směsí pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu



Graf 17: Závislost vratné duktility a bodu lámavosti u směsí pojiv s modifikovaným pojivem získaného z R-materiálu

6.8.3 KOMPLEXNÍ SMYKOVÝ MODUL VE SMYKU – FÁZOVÝ ÚHEL

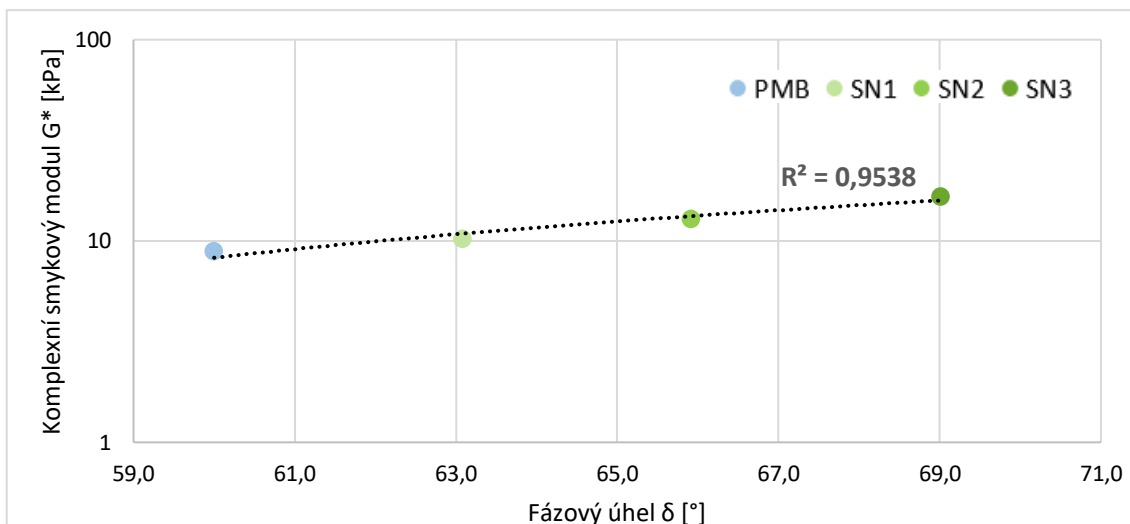
V následujících grafech je znázorněn vzájemný vztah mezi komplexním smykovým modulem a fázovým úhlem na směsích pojiv s nemodifikovaným a modifikovaným pojivem získaných z R-materiálů. Hodnoty uvedené v grafech jsou při základní teplotě 60 °C a frekvenci zatěžování 1,59 Hz.

6.8.3.1 NEMODIFIKOVANÉ POJIVO ZÍSKANÉ Z R-MATERIÁLU

Na grafu 18 je viditelná velmi silná závislost mezi komplexním smykovým modulem a fázovým úhlem na vzorcích nového čerstvého polymerem modifikovaného asfaltu, nemodifikovaného pojiva z R-materiálu a jejich směsí s různým podílem. Koeficient determinace, kterým je vyjádřena vzájemná korelace je 0,954.

Vzorek	PMB	SN1	SN2	SN3
Obsah R-mat [%]	0	15	30	50
G* [kPa]	8,916	10,154	12,785	16,510
δ [°]	60,0	63,1	65,9	69,0

Tabulka 21: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu



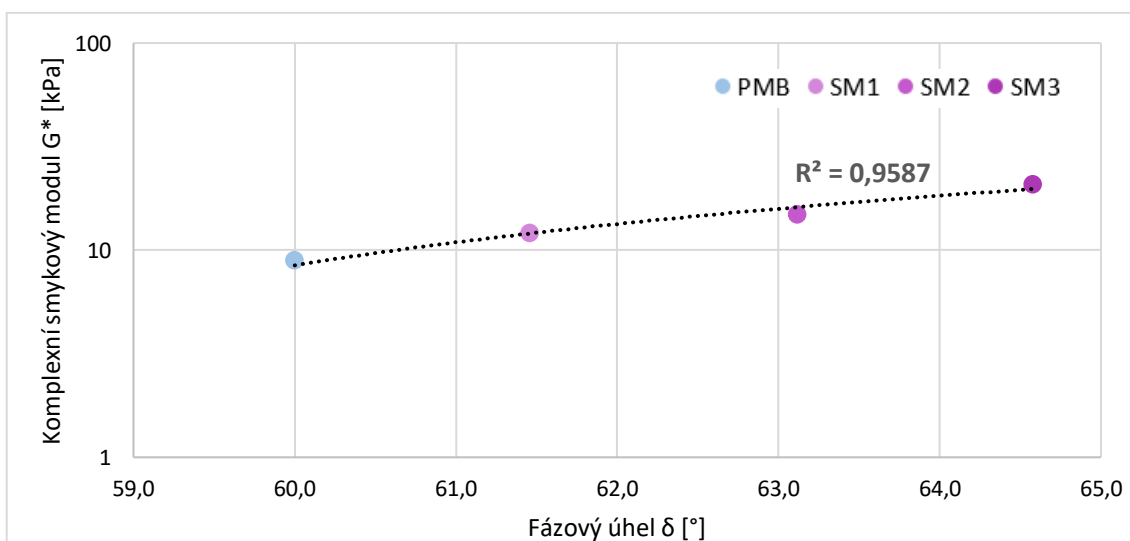
Graf 18: Závislost komplexního smykového modulu a fázového úhlu u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu

6.8.3.2 MODIFIKOVANÉ POJIVO ZÍSKANÉ Z R-MATERIÁLU

Na grafu 19 je viditelná taktéž velmi silná závislost mezi komplexním smykovým modulem a fázovým úhlem na vzorcích nového čerstvého polymerem modifikovaného asfaltu, modifikovaného pojiva z R-materiálu a jejich směsí s různým podílem. Koeficient determinace, kterým je vyjádřena vzájemná korelace je 0,959.

Vzorek	PMB	SM1	SM2	SM3
Obsah R-mat [%]	0	15	30	50
G^* [kPa]	8,916	12,009	14,745	20,713
δ [°]	60,0	61,5	63,1	64,6

Tabulka 22: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu u směsí pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu



Graf 19: Závislost komplexního smykového modulu a fázového úhlu u směsí pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu

6.8.4 SOUHRNNÁ TABULKA KOEFICIENTŮ DETERMINACE

V tabulce 22 a 23 jsou souhrnně vypsány vzájemné korelace zkoušek vyjádřené koeficientem determinace R^2 . Komplexní smykový modul G^* a úhel fázového posunu jsou srovnány při teplotě 60 °C a při frekvenci zatížení 1,59 Hz. Nejsilnější závislost pro směsi pojiv obsahující nemodifikované i modifikované pojivo získané z R-materiálu je mezi penetrací jehlou a fázovým úhlem. Koeficient determinace se v tomto případě téměř rovná 1,00. V opačném případě korelace mezi penetrací jehlou a bodem měknutí je zanedbatelná, pro směsi pojiv obsahující nemodifikované pojivo z R-materiálu se koeficient determinace rovná skoro 0,00. To je pravděpodobně způsobeno tím, že se srovnávají vlastnosti modifikovaných pojiv. Pokud by se srovnávaly vlastnosti nemodifikovaných silničních asphaltů, závislosti by bylo pravděpodobně možné nalézt i pro tyto veličiny. Závislost mezi bodem měknutí a vratnou duktilitou je taktéž nízká.

	Penetrace [0,1 mm]	Bod měknutí [°C]	Vratná duktilita [%]	Bod lámavosti [°C]	G^* [kPa]	δ [°]
Penetrace [0,1 mm]	-	0,254	0,947	0,985	0,940	0,999
Bod měknutí [°C]		-	0,575	0,828	0,492	0,703
Vratná duktilita [%]			-	0,909	0,965	0,958
Bod lámavosti [°C]				-	0,872	0,977
G^* [kPa]					-	0,954
δ [°]						-

Tabulka 23: Tabulka koeficientů determinace pro směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu

	Penetrace [0,1 mm]	Bod měknutí [°C]	Vratná duktilita [%]	Bod lámavosti [°C]	G^* [kPa]	δ [°]
Penetrace [0,1 mm]	-	0,025	0,955	0,980	0,964	0,999
Bod měknutí [°C]		-	0,438	0,759	0,550	0,678
Vratná duktilita [%]			-	0,891	0,934	0,939
Bod lámavosti [°C]				-	0,872	0,988
G^* [kPa]					-	0,959
δ [°]						-

Tabulka 24: Tabulka koeficientů determinace pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu

7 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla sledována změna vlastností směsných pojiv v závislosti na obsahu pojiva získaného z R-materiálu. Pro směsi pojiv bylo výrobcem dodáno čerstvé pojivo třídy 45/80-65 a asfaltová pojiva získána ze dvou různých R-materiálů. Jedno pojivo získané z R-materiálu bylo nemodifikované a u druhého pojiva je možné předpokládat modifikaci polymerem. Zestárlá pojiva z R-materiálů byla do čerstvého pojiva přidávána v množství 0 %, 15 %, 30 % a 50 % z hmotnosti výsledného směsného pojiva.

V teoretické části bylo cílem seznámit se s danou problematikou. Zpočátku byly popsány polymerem modifikované asfalty. Dále byla popsána recyklace netuhých vozovek a náležitosti s ní spojené. Byl definován R-materiál, jak se získává a možnosti jeho uskladnění. Způsoby recyklace byly popsány podle teploty a místa provádění, na místě nebo na obalovně, za horka nebo za studena. Bylo vysvětleno znovuzískání asfaltového pojiva z R-materiálu a oživení jeho vlastností. V závěru teoretické části byl představen projekt RECYPMA, který se v letech 2011 až 2013 zabýval výzkumem možností kvalitní recyklace polymerem modifikovaných asfaltů.

V další části diplomové práce byly uvedeny použité materiály a poměry míchání směsí pojiv. Na těchto směsích pojiv byly v laboratoři provedeny zkoušky empirické a zkoušky funkční. Ze zkoušek empirických byla provedena penetrace jehlou, bod měknutí metodou kroužek a kulička, vratná duktilita a bod lámavosti podle Fraasse. Ze zkoušek funkčních byl stanoven komplexní smykový modul a úhel fázového posunu v dynamickém smykovém reometru. Veškeré zkoušky byly prováděny podle platných norem.

Obsahem praktické části bylo vyhodnotit vlastnosti těchto zkoušek a zjistit jak pojivo získané z R-materiálu a jeho množství ovlivňuje vlastnosti čerstvého modifikovaného pojiva. Z naměřených výsledků a jejich vyhodnocení bylo možné učinit následující závěry:

- Ze zkoušky penetrace jehlou je patrné, že všechna namíchaná pojiva se stala viskóznější oproti čerstvému polymerem modifikovanému asfaltu, tzn. stala se tvrdšími. Čím víc bylo použito pojiva z R-materiálu, tím viskóznější směs pojiva byla. Zvláště se tak stalo při použití nemodifikovaného pojiva z R-materiálu. Hodnoty penetrace klesaly exponenciálně, což může být zapříčiněno špatnou kompatibilitou pojiv nebo špatným promícháním směsí pojiv.
- U směsí pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-materiálu vyšla hodnota bodu měknutí vyšší než u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu. Zdá se, že množství přidaného pojiva z R-materiálu k čerstvému pojivu nemá značný vliv na hodnotu bodu měknutí. Při obsahu zestárlého pojiva 30 % a 50 % ve směsi pojiv vyšel bod měknutí téměř shodně, avšak při obsahu 15 % byla hodnota bodu měknutí nepatrně vyšší. Z naměřených hodnot je překvapivé, že hodnoty bodu měknutí směsí pojiv nejsou mezi hodnotami čerstvého pojiva a 100 % pojiva z recyklátu, jak by se

dalo očekávat. Tato skutečnost by stála za pozornost a bylo by vhodné to prověřit navazujícím výzkumem.

- Z výsledků penetrace jehlou a bodu měknutí byl zjištěn penetrační index, který udává teplotní citlivost asfaltových pojiv. Směsi pojiv s vyšším obsahem pojiva z R-materiálu byly teplotně citlivější, nemodifikovaná pojiva z R-materiálu o trochu více.
- Dále se díky výsledkům penetrace a bodu měknutí mohly směsi pojiv zařadit do tříd podle normy ČSN 65 7222-1. Polymerem modifikovaný asfalt dodaný výrobcem odpovídal třídě, jakou výrobce uváděl a to 45/80-65. Zestárlá pojiva, nemodifikované i modifikované pojivo, odpovídala třídě 10/40-65. Všechny směsi pojiv s modifikovaným asfaltem získaným z R-materiálu SM1, SM2 a SM3, stejně jako směs pojiva SN1 odpovídaly třídě 25/55-65. Směsi pojiv SN2 a SN3 s pojivem nemodifikovaným získaným z R-materiálu odpovídaly kvůli nižší hodnotě bodu měknutí třídě 25/55-60.
- Další vyhodnocovanou zkouškou byla vratná duktilita. Směsi pojiv, které obsahovaly modifikované pojivo získané z R-materiálu byly pružnější. Při obsahu 15 % modifikovaného pojiva byla hodnota vratné duktility téměř shodná jako hodnota čistého čerstvého polymerem modifikovaného asfaltu od výrobce. Všechny směsi pojiv vyhovovaly podle zařazení požadavkům normy ČSN 65 7222-1.
- Poslední empirickou zkouškou bylo stanovení bodu lámavosti podle Fraasse. Směsím pojiv vzrostl bod lámavosti (zhoršil se) s množstvím přidaného pojiva získaného z R-materiálu. V této zkoušce se téměř nelišily výsledky u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem a u směsí s modifikovaným pojivem, získaným z R-materiálu. Směsi pojiv byly porovnány s požadavky normy 65 7222-1 podle zařazení a všechny vzorky normě vyhovovaly.
- Zkouškou na dynamickém smykovém reometru byly zjištěny komplexní smykové moduly a fázové úhly. Vlivem rostoucí teploty zkoušky dochází k poklesu komplexního smykového modulu a ke zvýšení fázového úhlu. S rostoucím obsahem pojiva získaného z R-materiálu se zvyšuje hodnota komplexního smykového modulu, přičemž nejnižší komplexní smykové moduly dosahoval čerstvý polymerem modifikovaný asfalt 45/80-65. Směsi pojiv, obsahující pojivo získané z R-materiálu, který obsahoval modifikovaný asfalt, dosahovaly většinou vyšších hodnot komplexního smykového modulu než směsi pojiv, obsahující pojivo z R-materiálu, které nebylo modifikované. Výjimkou jsou pouze některé hodnoty při nejnižších zkušebních teplotách, při kterých jsou hodnoty komplexního smykového modulu vzájemně přibližně srovnatelné.
- Teplotní citlivost pojiv, vyjádřená podílem komplexního smykového modulu, určeným při teplotě 40 °C a 70 °C, rostla značně u směsí pojiv, které obsahovaly pojiva získaná z R-materiálů oproti původnímu polymerem modifikovanému asfaltu. U směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu byla teplotní citlivost o něco

vyšší (horší), než v případě směsí pojiv, obsahujících pojivo z R-materiálu, který obsahoval modifikované pojivo.

- V závěru lze říct, že množství zestárlého pojiva má na čerstvé pojivo značný vliv. Při obsahu 15 % zestárlého pojiva se výsledky zkoušek blíží hodnotám zkoušek na čerstvém pojivu dodaným výrobcem. Při obsahu 30 % a 50 % pojiva získaného z R-materiálu jsou už výsledky značně ovlivněny a vlastnosti těchto směsných pojiv jsou viditelně zhoršeny.

8 CITOVANÁ LITERATURA

- [1] Recyklace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Recyklace>
- [2] CHU, Jennifer. *Researchers find no evidence of an overall reduction in the world's consumption of materials* [online]. 2017 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://techxplore.com/news/2017-01-evidence-reduction-world-consumption-materials.html>
- [3] JAN, Kudrna, ed. *Recyklace a využití druhotných surovin při stavbě a opravě pozemních komunikací*. První. Brno: Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, 2004. ISBN 80-214-3178-4.
- [4] MĚŠŤANOVÁ, Bc. Petra. *Vliv skladování polymerem modifikovaných asfaltů na jejich vlastnosti*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [5] MICHAL, Varaus. *Recyklace netuhých vozovek: úvod do problematiky* [online]. , 57 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: <https://www.sdruzeni-silnice.cz/>
- [6] MARTIN, Řehulka. *Recyklace netuhých vozovek za studena*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Michal Varaus.
- [7] BC. MARKÉTA, Čumíčková. *Dávkování oživovacích přísad do asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu*. Brno, 2018. Diplomová práce. Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [8] *ČSN EN 13108-8 Asfaltové směsi - specifikace pro materiály: R-materiál*. První. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [9] ŠTĚPÁNEK, Petr. *Využití vyšších množství R-materiálu v kombinaci s měkkými asfaltovými pojivy*. Praha, 2019. Bakalářská práce. Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Petr Mondschein, Ph.D.
- [10] TUHÁČEK, Martin. *Recyklace asfaltových směsí - variabilita vstupních parametrů R-materiálu*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Michal Varaus.
- [11] ELIÁŠ, Radim. *Sledování vývoje vlastností asfaltového pojiva získaného z asfaltové směsi s R-materiálem*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Michal Varaus.

- [12] TP 209 - RECYKLACE ASFALTOVÝCH VRSTEV NETUHÝCH VOZOVEK NA MÍSTĚ ZA HORKA. První. Praha: Ministerstvo dopravy - OSI, 2009.
- [13] TP 208 - RECYKLACE KONSTRUKČNÍCH VRSTEV NETUHÝCH VOZOVEK ZA STUDENA. První. Olomouc: Ministerstvo dopravy - OSI, 2009.
- [14] LIPHART, Adam, Piotr RADZISZEWSKI a Jan KRÓL. Binder blending estimation method in hot mix asphalt with reclaimed asphalt. *Procedia Engineering* [online]. 2015, 2015(111), 502-509 [cit. 2020-12-13]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815013727?via%3Dihub>
- [15] NIELSEN, Erik. State of the Art – Recycling Polymer Modified Asphalt. *RECYPMA*. 2012, , 43.
- [16] MIKHAILENKO, Peter, Parinaz ATAEIANB a Hassan BAAJ. Extraction and recovery of asphalt binder: a literature review. *International Journal of Pavement Research and Technology* [online]. 2020, , 20-31 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42947-019-0081-5>
- [17] ČSN EN 12697-1: Asfaltové směsi – Zkušební metody: Část 1: Obsah rozpustného pojiva. První. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2020.
- [18] RECYPMA: Possibilities for high quality RECYcling of Polymer Modified Asphalt [online]. [cit. 2020-12-30]. Dostupné z: <https://trimis.ec.europa.eu/project/possibilities-high-quality-recycling-polymer-modified-asphalt>
- [19] LIU, Gang, Martin VAN DE VEN a Greet LEEGWATER. *Research Report of WP3: Properties of Aged Polymer Modified Binder*. the Netherlands, 2013, , 1-57.
- [20] ČSN EN 12697-3: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení. První. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2006.
- [21] KUDLÍK, Bc. Jiří. *Vliv dlouhodobého stárnutí na vybraná asfaltová pojiva*. Praha, 2018. Diplomová práce. Fakulta dopravní, České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Otakar Vacín, Ph.D.
- [22] ČSN EN 1426: Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou. První. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [23] ČSN EN 1427: Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička. První. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2015.
- [24] ČSN EN 13398: Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení vratné duktility modifikovaných asfaltů. První. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2010.

- [25] *ČSN EN 12593: Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovená bodu lámavosti podle Fraasse*. První. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2015.
- [26] *ČSN EN 14770: Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)*. První. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.
- [27] *ČSN 65 7222-: Asfalty a asfaltová pojiva - silniční modifikované asfalty: Část 1: Polymerem modifikované asfalty*. První. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2017.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Životní cyklus asfaltové směsi [7].....	12
Obrázek 2: Skladování R-materiálu [10].....	13
Obrázek 3: Dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny [11].....	14
Obrázek 4: Předehřívání R-materiálu v paralelním bubnu [6].....	15
Obrázek 5: Přidávání R-materiálu souběžně s proudem horkého vzduchu [10]	15
Obrázek 6: Přidávání R-materiálu proti proudu horkého vzduchu [10]	16
Obrázek 7: Separátní vysoušení R-materiálu a kameniva [10]	16
Obrázek 8: Mobilní míchací jednotka [6]	17
Obrázek 9: Metoda Repave – před a po [9].....	18
Obrázek 10: Metoda Remix – před a po [9].....	18
Obrázek 11: Metoda Remix Plus – před a po	19
Obrázek 12: Recyklace na místě za studena [11]	20
Obrázek 13: Dávkování R-materiálu společně s kamenivem [11].....	21
Obrázek 14: Dávkování R-materiálu do horkého zásobníku [11].....	21
Obrázek 15: Dávkování R-materiálu do navažovacího zásobníku [11].....	22
Obrázek 16: Dávkování R-materiálu z vlastního dávkovacího zásobníku [11].....	22
Obrázek 17: Dávkování R-materiálu s vlastním paralelním bubnem [11].....	23
Obrázek 18: Působení fluxační a rejuvenační přísady [7].....	24
Obrázek 19: Fáze difúze pojivových filmů [14].....	25
Obrázek 20: Extraktor pro extrakci za horka (papírový filtr).....	27
Obrázek 21: Extraktor pro extrakci za horka (drátěný filtr) [17].....	28
Obrázek 22: Soxhletův extraktor [17]	29
Obrázek 23: Požadovaná doba extrakce na rotačním zařízení [17].....	30
Obrázek 24: Schéma průtokové odstředivky [17]	32
Obrázek 25: Průtoková odstředivka	32
Obrázek 26: Y – zrychlení [m/s^2], X – doba odstředování [min] [17]	33
Obrázek 27: Rozpouštění asfaltové směsi v perchlorethylenu.....	36
Obrázek 28: Rotační vakuové destilační zařízení.....	37
Obrázek 29: Přelití pojiva do vhodné nádoby	38
Obrázek 30: Míchání směsí pojiv	39
Obrázek 31: Penetrometr	40
Obrázek 32: Maximální rozdíl platných měření [22]	41
Obrázek 33: Zařízení určené pro provedení zkoušky bodu měknutí.....	42
Obrázek 34: Upnutí vzorků na vodící lišty	44
Obrázek 35: Protahování asfaltového pojiva na délku 200 mm \pm 1 mm	45
Obrázek 36: Vzorky asfaltového pojiva bezprostředně po přestříhnutí.....	45
Obrázek 37: Příklad pro bod lámavosti podle Fraasse.....	46
Obrázek 38: Nahřátí asfaltového pojiva na plíšku.....	47

Obrázek 39: Rovnoměrné rozlití pojiva.....	47
Obrázek 40: DSR.....	49
Obrázek 41: Vzorek umístěný do přibližného středu reometru	50
Obrázek 42: Odříznutí pojiva a nastavení mezery.....	50
Obrázek 43: Specifikace PMB podle normy ČSN 65 7222-1 [27].....	56

10 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Naměřené hodnoty penetrace [0,1 mm].....	51
Graf 2: Exponenciální klesání penetrace směsí pojiv s nemodif. pojivem z R-materiálu	52
Graf 3: Exponenciální klesání penetrace směsí pojiv s modif. pojivem z R-materiálu	52
Graf 4: Míra zvýšení penetrace pojiv z R-materiálů.....	53
Graf 5: Naměřené hodnoty bodu měknutí [°C]	54
Graf 6: Hodnoty penetračního indexu I_p	55
Graf 7: Výsledky vratné duktility [%].....	57
Graf 8: Výsledky bodu lámavosti [°C].....	58
Graf 9: Isochrony při frekvenci 1,59 Hz.....	60
Graf 10: Teplotní citlivosti – podíl $G^*(40\text{ °C}) / G^*(70\text{ °C})$	61
Graf 11: Blackův diagram – všechna pojiva.....	62
Graf 12: Blackův diagram – PMB a směsí pojiv s nemodif. pojivem z R-materiálu	63
Graf 13: Blackův diagram – PMB a směsí pojiv s modif. pojivem z R-materiálu.....	63
Graf 14: Závislost penetrace a bodu měknutí u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem získaného z R-materiálu.....	65
Graf 15: Závislost penetrace a bodu měknutí u směsí pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu.....	66
Graf 16: Závislost vratné duktility a bodu lámavosti u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem získaného z R-materiálu.....	67
Graf 17: Závislost vratné duktility a bodu lámavosti u směsí pojiv s modifikovaným pojivem získaného z R-materiálu.....	68
Graf 18: Závislost komplexního smykového modulu a fázového úhlu u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu.....	69
Graf 19: Závislost komplexního smykového modulu a fázového úhlu u směsí pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu	69
Graf 20: Isotermy – PMB	96
Graf 21: Isotermy – SN1	96
Graf 22: Isotermy – SN2	97
Graf 23: Isotermy – SN3	97
Graf 24: Isotermy – SM1	98
Graf 25: Isotermy – SM2.....	98
Graf 26: Isotermy – SM3.....	99

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vlastnosti výchozích materiálů.....	36
Tabulka 2: Naměřené hodnoty penetrace.....	51
Tabulka 3: Naměřené hodnoty bodu měknutí [°C]	53
Tabulka 4: Výpočet penetračního indexu	55
Tabulka 5: Zařazení směsí s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu.....	55
Tabulka 6: Zařazení směsí s modifikovaným pojivem z R-materiálu	56
Tabulka 7: Výsledky vratné duktility [%].....	56
Tabulka 8: Srovnání s požadavky normy ČSN 65 7222-1	57
Tabulka 9: Výsledky bodu lámavosti [°C].....	57
Tabulka 10: Srovnání s požadavky normy ČSN 65 7222-1	58
Tabulka 11: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu PMB z DSR při frekvenci zatěžování 1,59 Hz	59
Tabulka 12: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu směsí pojiv s nemodif. pojivem získaného z R-materiálu z DSR při frekvenci zatěžování 1,59 Hz.....	59
Tabulka 13: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu směsí pojiv s modifikovaným pojivem získaného z R-materiálu z DSR při frekvenci zatěžování 1,59 Hz ...	60
Tabulka 14: Výpočet teplotní citlivosti – podíl $G^*(40\text{ °C}) / G^*(70\text{ °C})$	61
Tabulka 15: Výsledky empirických zkoušek.....	64
Tabulka 16: Výsledky funkční zkoušky z DSR (60 °C; 1,59 Hz).....	64
Tabulka 17: Hodnoty penetrace a bodu měknutí u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem získaného z R-materiálu	65
Tabulka 18: Hodnoty penetrace a bodu měknutí u směsí pojiv s modif. pojivem z R-materiálu	66
Tabulka 19: Hodnoty vratné duktility a bodu lámavosti u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu.....	67
Tabulka 20: Hodnoty vratné duktility a bodu lámavosti u směsí pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu.....	67
Tabulka 21: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu u směsí pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu.....	68
Tabulka 22: Hodnoty komplexního smykového modulu a fázového úhlu u směsí pojiv s modifikovaným pojivem z R-materiálu	69
Tabulka 23: Tabulka koeficientů determinace pro směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem z R-materiálu	70
Tabulka 24: Tabulka koef. determinace pro směsi pojiv s modif. pojivem z R-materiálu.....	70
Tabulka 25: Záznamy zkoušek pojiv získaných z R-materiálů pro zatřídění do tříd dle ČSN 65 7222-1	81
Tabulka 26: Záznamy zkoušek PMB a směsí pojiv s pojivy získaných z R-materiálů	81

Tabulka 27: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 70 °C	82
Tabulka 28: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 70 °C	83
Tabulka 29: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 65 °C	84
Tabulka 30: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 65 °C	85
Tabulka 31: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 60 °C	86
Tabulka 32: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 60 °C	87
Tabulka 33: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 55 °C	88
Tabulka 34: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 55 °C	89
Tabulka 35: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 50 °C	90
Tabulka 36: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 50 °C	91
Tabulka 37: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 45 °C	92
Tabulka 38: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 45 °C	93
Tabulka 39: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 40 °C	94
Tabulka 40: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 40 °C	95

12 PŘÍLOHY

12.1 ZÁZNAMY ZKOUŠEK

POJIVO R – MATERIÁLU	PENETRACE [0,1 mm]			KROUŽEK KULIČKA [°C]			
	NEMODIFIKOVANÝ	15,5	12,8	13,1	69,1	69,1	67,6
MODIFIKOVANÝ	16,8	15,2	14,4	74,5	74,2	73,8	73,6

Tabulka 25: Záznamy zkoušek pojiv získaných z R-materiálů pro zařazení do tříd dle ČSN 65 7222-1

	PENETRACE [0,1 mm]			KROUŽEK A KULIČKA [°C]		VRATNÁ DUKTILITA		BOD LÁMAVOSTI [°C]			
						[mm]	[%]	počát.	naměřené	výsl.	
PMB	47,6	47,0	46,7	75,7	76,9	17,6	88	-5	-15	-17	-16
SN1	38,2	39,0	39,4	65,6	66,3	16,4	82	-2	-11	-12	-11,5
SN2	31,8	32,7	32,8	64,2	64,5	15,7	78,5	0	-8	-10	-9
SN3	25,7	26,3	25,8	64,7	64,8	13,8	69	0	-6	-7	-6,5
SM1	40,4	40,8	40,6	70,0	69	17,3	86,5	-3	-11	-14	-12,5
SM2	33,0	32,1	32,7	68,7	69,4	15,8	79	0	-9	-9	-9
SM3	26,1	27,0	26,0	68,9	69,0	14,6	73	2	-6	-7	-7

Tabulka 26: Záznamy zkoušek PMB a směsí pojiv s pojivy získaných z R-materiálů

12.2 KOMPLETNÍ VÝSLEDKY Z DSR

Vzorek		PMB		SN1		SN2		SN3	
Obsah R-mat [%]		0		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	70	11,983	62,1	12,139	65,2	16,555	67,5	20,895	69,9
7,94		10,258	61,7	11,155	61,7	13,969	67,4	17,470	70,4
6,31		8,779	61,7	9,147	65,9	11,780	67,4	14,624	70,6
5,01		7,506	61,6	8,311	64,8	9,936	67,6	12,235	70,9
3,98		6,419	61,6	7,058	64,8	8,365	67,8	10,212	71,2
3,16		5,495	61,6	5,994	64,9	7,049	68,0	8,526	71,5
2,51		4,697	61,6	5,085	65,0	5,935	68,3	7,112	71,9
2,00		4,016	61,7	4,310	65,1	4,988	68,6	5,920	72,2
1,59		3,432	61,8	3,648	65,4	4,185	69,1	4,918	72,7
1,26		2,934	61,9	3,092	65,6	3,515	69,5	4,095	73,2
1,00		2,503	62,1	2,617	65,9	2,944	69,9	3,394	73,7
0,79		2,135	62,2	2,212	66,2	2,463	70,4	2,812	74,2
0,63		1,821	62,4	1,868	66,5	2,057	70,9	2,324	74,7
0,50		1,551	62,5	1,575	66,9	1,715	71,5	1,920	75,4
0,40		1,320	62,6	1,326	67,2	1,429	72,0	1,583	75,9
0,32		1,123	62,8	1,117	67,5	1,188	72,5	1,302	76,5
0,25		0,956	62,8	0,938	67,8	0,985	73,1	1,070	77,0
0,20		0,813	62,8	0,788	68,1	0,817	73,6	0,878	77,6
0,16		0,691	62,8	0,662	68,4	0,676	74,1	0,719	78,2
0,13		0,587	62,7	0,555	68,6	0,559	74,6	0,588	78,7
0,10	0,500	62,7	0,466	69,0	0,463	75,1	0,482	79,4	

Tabulka 27: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 70 °C

Vzorek		SM1		SM2		SM3	
Obsah R-mat [%]		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	70	15,686	63,3	18,772	64,6	25,490	66,2
7,94		13,366	63,1	15,928	64,8	21,555	66,3
6,31		11,403	63,1	13,532	64,9	18,253	66,4
5,01		9,722	63,1	11,473	65,0	15,413	66,6
3,98		8,268	63,2	9,749	65,1	13,021	66,8
3,16		7,060	63,3	8,264	65,3	11,003	67,1
2,51		6,013	63,4	7,005	65,5	9,279	67,3
2,00		5,122	63,5	5,934	65,7	7,820	67,6
1,59		4,356	63,8	5,023	66,0	6,588	68,0
1,26		3,712	64,0	4,255	66,4	5,551	68,5
1,00		3,152	64,4	3,593	66,8	4,661	68,9
0,79		2,674	64,7	3,028	67,3	3,911	69,4
0,63		2,270	65,1	2,553	67,8	3,278	70,0
0,50		1,920	65,5	2,149	68,3	2,745	70,5
0,40		1,625	65,9	1,804	68,8	2,286	71,2
0,32		1,373	66,3	1,513	69,3	1,909	71,6
0,25		1,158	66,7	1,269	70,0	1,590	72,4
0,20		0,976	67,1	1,061	70,4	1,322	73,0
0,16		0,821	67,5	0,886	71,0	1,097	73,7
0,13		0,691	67,9	0,738	71,6	0,906	74,4
0,10	0,580	68,5	0,614	72,1	0,752	74,8	

Tabulka 28: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat.
pro teplotu 70 °C

Vzorek		PMB		SN1		SN2		SN3	
Obsah R-mat [%]		0		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	65	18,860	61,8	21,960	64,1	27,887	66,2	36,498	69,0
7,94		16,144	61,4	18,694	64,2	23,559	66,5	30,644	69,0
6,31		13,839	61,2	15,871	64,0	19,916	66,5	25,758	69,2
5,01		11,848	61,0	13,516	64,0	16,839	66,6	21,589	69,4
3,98		10,149	60,9	11,479	63,9	14,211	66,6	18,128	69,6
3,16		8,703	60,8	9,772	63,8	12,022	66,7	15,177	69,8
2,51		7,458	60,8	8,307	63,9	10,150	66,8	12,709	70,1
2,00		6,394	60,7	7,068	63,9	8,566	67,0	10,629	70,3
1,59		5,483	60,7	6,012	64,0	7,234	67,2	8,894	70,7
1,26		4,706	60,8	5,110	64,1	6,105	67,4	7,445	71,0
1,00		4,030	60,8	4,345	64,2	5,149	67,8	6,210	71,3
0,79		3,448	60,9	3,684	64,4	4,335	68,1	5,172	71,9
0,63		2,955	61,0	3,136	64,6	3,650	68,6	4,307	72,3
0,50		2,530	61,2	2,657	64,9	3,069	68,8	3,594	72,8
0,40		2,163	61,3	2,251	65,2	2,573	69,4	2,972	73,3
0,32		1,849	61,4	1,906	65,5	2,148	69,9	2,468	73,8
0,25		1,577	61,5	1,614	65,6	1,807	70,4	2,038	74,4
0,20		1,349	61,7	1,363	66,2	1,499	71,0	1,691	75,0
0,16		1,150	61,7	1,150	66,4	1,254	71,5	1,395	75,6
0,13		0,981	61,7	0,971	66,7	1,044	72,0	1,149	76,1
0,10	0,837	61,7	0,817	66,9	0,868	72,6	0,941	76,9	

Tabulka 29: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 65 °C

Vzorek		SM1		SM2		SM3	
Obsah R-mat [%]		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	65	25,309	62,5	31,112	63,8	43,338	64,9
7,94		21,583	62,6	26,434	63,9	36,806	65,1
6,31		18,445	62,5	22,514	63,9	31,179	65,1
5,01		15,750	62,4	19,131	63,9	26,486	65,3
3,98		13,442	62,3	16,271	63,9	22,427	65,4
3,16		11,486	62,3	13,854	64,0	19,020	65,5
2,51		9,807	62,3	11,776	64,1	16,082	65,7
2,00		8,371	62,2	10,008	64,1	13,614	65,9
1,59		7,158	62,3	8,517	64,3	11,534	66,0
1,26		6,122	62,4	7,238	64,5	9,749	66,4
1,00		5,223	62,6	6,147	64,8	8,251	66,7
0,79		4,457	62,8	5,212	65,1	6,958	67,0
0,63		3,795	63,0	4,422	65,3	5,847	67,5
0,50		3,244	63,3	3,750	65,8	4,955	67,9
0,40		2,759	63,6	3,177	66,1	4,173	68,3
0,32		2,346	63,9	2,684	66,7	3,500	68,8
0,25		1,989	64,4	2,255	67,0	2,907	69,6
0,20		1,696	64,7	1,911	67,8	2,484	69,8
0,16		1,434	65,1	1,605	68,2	2,062	70,7
0,13		1,213	65,5	1,349	68,8	1,724	71,4
0,10	1,025	65,9	1,130	69,3	1,435	71,6	

Tabulka 30: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat.
pro teplotu 65 °C

Vzorek		PMB		SN1		SN2		SN3	
Obsah R-mat [%]		0		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	60	30,478	61,3	36,806	64,1	48,610	65,5	66,013	67,4
7,94		26,125	61,2	31,328	63,8	41,159	65,8	55,625	67,7
6,31		22,397	61,0	26,678	63,7	34,867	65,8	46,880	67,9
5,01		19,185	60,8	22,702	63,6	29,488	65,8	39,406	68,1
3,98		16,429	60,6	19,301	63,5	24,941	65,8	33,122	68,3
3,16		14,109	60,5	16,440	63,4	21,128	65,8	27,874	68,5
2,51		12,092	60,3	13,988	63,3	17,856	65,9	23,396	68,7
2,00		10,388	60,1	11,909	63,2	15,101	65,9	19,665	68,8
1,59		8,916	60,0	10,154	63,1	12,785	65,9	16,510	69,0
1,26		7,659	59,9	8,649	63,1	10,809	66,0	13,832	69,3
1,00		6,582	59,9	7,380	63,1	9,165	66,2	11,635	69,6
0,79		5,653	59,9	6,283	63,2	7,740	66,4	9,737	69,9
0,63		4,847	59,8	5,332	63,2	6,519	66,5	8,147	70,1
0,50		4,155	60,1	4,554	63,7	5,498	67,2	6,766	70,7
0,40		3,584	60,1	3,885	63,6	4,673	67,2	5,714	71,1
0,32		3,074	60,2	3,307	63,8	3,936	67,7	4,754	71,3
0,25		2,637	60,3	2,793	64,0	3,304	68,0	3,976	72,0
0,20		2,254	60,5	2,383	64,5	2,766	68,7	3,284	72,2
0,16		1,934	60,6	2,019	64,8	2,329	69,2	2,738	72,9
0,13		1,656	60,7	1,714	65,1	1,958	69,7	2,274	73,6
0,10	1,416	60,9	1,453	65,3	1,641	70,3	1,889	74,1	

Tabulka 31: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 60 °C

Vzorek		SM1		SM2		SM3	
Obsah R-mat [%]		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	60	42,187	62,7	53,091	63,0	76,081	64,0
7,94		36,028	62,3	45,264	63,2	64,736	63,9
6,31		30,800	62,2	38,602	63,2	55,165	64,0
5,01		26,301	62,1	32,861	63,2	46,853	64,2
3,98		22,455	61,9	27,987	63,2	39,798	64,2
3,16		19,203	61,8	23,849	63,2	33,850	64,3
2,51		16,411	61,7	20,329	63,1	28,721	64,4
2,00		14,025	61,5	17,284	63,1	24,389	64,5
1,59		12,009	61,5	14,745	63,1	20,713	64,6
1,26		10,270	61,5	12,547	63,2	17,567	64,8
1,00		8,807	61,5	10,707	63,3	14,878	64,9
0,79		7,534	61,5	9,128	63,5	12,650	65,1
0,63		6,434	61,5	7,732	63,5	10,676	65,3
0,50		5,481	62,0	6,571	64,3	9,047	66,1
0,40		4,726	62,2	5,641	64,6	7,735	66,6
0,32		4,037	62,1	4,793	64,5	6,556	66,6
0,25		3,457	62,4	4,086	64,8	5,565	66,8
0,20		2,929	62,7	3,426	65,3	4,640	67,1
0,16		2,509	63,0	2,932	65,5	3,963	67,1
0,13		2,136	63,4	2,473	66,0	3,297	67,6
0,10	1,815	64,0	2,091	67,1	2,773	69,6	

Tabulka 32: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat.
pro teplotu 60 °C

Vzorek		PMB		SN1		SN2		SN3	
Obsah R-mat [%]		0		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	55	50,915	61,2	20,340	30,0	87,166	64,9	122,879	65,9
7,94		43,587	61,2	72,823	61,6	73,894	65,0	103,988	66,1
6,31		37,351	61,0	46,287	63,3	62,784	65,1	87,973	66,4
5,01		31,958	60,8	39,431	63,3	53,127	65,1	74,387	66,7
3,98		27,403	60,6	33,576	63,2	45,049	65,1	62,703	66,9
3,16		23,512	60,4	28,593	63,0	38,175	65,2	52,941	67,1
2,51		20,141	60,1	24,333	62,9	32,305	65,1	44,602	67,3
2,00		17,325	59,9	20,711	62,8	27,451	65,1	37,578	67,4
1,59		14,868	59,7	17,678	62,6	23,214	65,1	31,669	67,5
1,26		12,757	59,5	15,066	62,6	19,632	65,1	26,650	67,8
1,00		10,993	59,4	12,842	62,5	16,668	65,0	22,400	68,0
0,79		9,470	59,2	10,984	62,4	14,182	65,1	18,866	68,1
0,63		8,145	59,2	9,344	62,4	11,999	65,2	15,870	68,3
0,50		6,984	59,1	8,001	62,7	10,137	65,3	13,332	68,6
0,40		6,001	59,6	6,869	62,6	8,568	66,2	11,206	68,9
0,32		5,205	59,2	5,892	62,6	7,321	66,2	9,407	69,3
0,25		4,470	59,1	5,050	62,2	6,168	65,9	8,013	69,5
0,20		3,868	59,4	4,254	62,7	5,292	66,6	6,710	69,1
0,16		3,310	59,4	3,639	62,5	4,419	66,9	5,559	70,4
0,13		2,847	59,6	3,085	62,7	3,741	67,2	4,644	70,2
0,10	2,449	59,7	2,634	63,8	3,149	67,4	3,859	71,6	

Tabulka 33: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 55 °C

Vzorek		SM1		SM2		SM3	
Obsah R-mat [%]		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	55	72,643	62,0	93,063	62,1	136,663	62,0
7,94		62,043	62,0	79,511	62,4	116,855	62,5
6,31		53,105	61,9	68,030	62,4	99,796	62,6
5,01		45,320	61,8	57,970	62,5	85,107	62,8
3,98		38,743	61,7	49,457	62,5	72,606	63,0
3,16		33,109	61,6	42,248	62,5	61,858	63,1
2,51		28,314	61,4	36,028	62,4	52,687	63,2
2,00		24,219	61,2	30,734	62,4	44,807	63,3
1,59		20,751	61,1	26,257	62,3	38,194	63,4
1,26		17,716	61,0	22,387	62,4	32,471	63,6
1,00		15,177	60,7	19,057	62,3	27,598	63,6
0,79		13,056	60,5	16,305	62,2	23,539	63,6
0,63		11,199	60,6	13,966	62,3	20,113	63,7
0,50		9,580	60,7	11,901	62,5	17,024	64,0
0,40		8,234	61,0	10,163	62,5	14,446	64,0
0,32		7,086	60,9	8,656	62,7	12,206	64,3
0,25		6,096	60,9	7,460	62,9	10,365	65,1
0,20		5,259	60,8	6,417	62,2	8,979	64,8
0,16		4,454	61,3	5,390	63,8	7,496	67,0
0,13		3,824	61,6	4,614	64,2	6,453	67,3
0,10	3,251	61,1	3,866	63,5	5,344	64,6	

Tabulka 34: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat.
pro teplotu 55 °C

Vzorek		PMB		SN1		SN2		SN3	
Obsah R-mat [%]		0		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	50	90,469	60,9	118,923	62,6	167,446	63,6	244,728	63,2
7,94		77,536	61,0	101,576	62,6	142,811	63,6	208,421	63,8
6,31		66,485	60,9	86,848	62,7	121,751	63,8	177,559	64,2
5,01		56,923	60,8	73,935	62,7	103,407	64,0	150,842	64,6
3,98		48,816	60,6	63,026	62,6	87,918	64,1	128,125	64,9
3,16		41,838	60,4	53,779	62,6	74,740	64,2	108,627	65,2
2,51		35,865	60,2	45,819	62,6	63,418	64,3	92,015	65,5
2,00		30,810	60,0	39,090	62,5	53,890	64,3	77,825	65,7
1,59		26,449	59,7	33,352	62,4	45,710	64,3	66,035	66,0
1,26		22,647	59,5	28,386	62,3	38,718	64,3	55,612	66,2
1,00		19,526	59,2	24,244	62,1	32,982	64,3	47,128	66,4
0,79		16,859	58,9	20,797	61,9	28,061	64,3	39,807	66,6
0,63		14,525	59,0	17,807	61,9	23,818	64,5	33,654	66,8
0,50		12,522	58,6	15,180	61,6	20,353	64,2	28,597	66,7
0,40		10,760	58,6	12,965	61,5	17,189	64,3	23,929	67,2
0,32		9,300	58,6	11,092	61,6	14,617	64,7	20,174	67,3
0,25		8,020	58,3	9,471	61,7	12,423	64,6	16,924	67,5
0,20		6,908	58,3	8,152	61,7	10,475	64,6	14,107	67,9
0,16		5,939	58,4	6,894	62,2	8,992	64,7	12,248	67,7
0,13		5,144	58,5	5,950	62,5	7,653	64,7	10,230	67,8
0,10	4,487	58,3	5,141	61,3	6,422	66,4	8,477	70,6	

Tabulka 35: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 50 °C

Vzorek		SM1		SM2		SM3	
Obsah R-mat [%]		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	50	128,409	61,1	167,640	61,3	250,799	60,3
7,94		110,019	61,4	143,746	61,2	215,331	60,6
6,31		94,311	61,3	123,410	61,3	184,996	60,9
5,01		80,654	61,4	105,481	61,5	158,345	61,2
3,98		68,997	61,3	90,283	61,5	135,662	61,4
3,16		59,069	61,2	77,200	61,6	116,094	61,6
2,51		50,575	61,2	66,020	61,7	99,250	61,8
2,00		43,258	61,0	56,373	61,6	84,948	61,9
1,59		37,052	60,8	48,224	61,6	72,526	62,1
1,26		31,705	60,8	41,126	61,6	61,810	62,2
1,00		27,113	60,6	35,240	61,6	52,970	62,4
0,79		23,310	60,4	30,174	61,6	45,167	62,5
0,63		20,067	60,2	25,819	61,6	38,612	62,7
0,50		17,171	60,0	22,236	61,2	33,212	62,4
0,40		14,725	59,9	18,878	61,4	28,060	62,6
0,32		12,622	59,9	16,158	61,6	23,929	62,9
0,25		10,798	60,3	13,805	61,5	20,406	63,0
0,20		9,343	60,3	11,680	61,7	17,250	63,2
0,16		8,028	60,4	10,230	61,4	15,131	63,0
0,13		6,945	60,7	8,694	61,4	12,827	62,5
0,10	5,957	59,7	7,414	63,5	10,669	65,8	

Tabulka 36: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat.
pro teplotu 50 °C

Vzorek		PMB		SN1		SN2		SN3	
Obsah R-mat [%]		0		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	45	171,093	60,4	242,179	61,0	336,886	61,0	501,183	59,9
7,94		146,722	60,4	207,437	61,0	289,005	61,4	430,986	60,7
6,31		126,501	60,3	178,280	61,2	248,185	61,8	370,914	61,3
5,01		108,222	60,4	152,049	61,4	211,708	62,1	316,471	61,8
3,98		93,077	60,3	130,353	61,5	180,970	62,4	271,382	62,2
3,16		79,531	60,2	111,178	61,6	154,531	62,6	231,730	62,7
2,51		68,323	60,1	95,228	61,6	131,912	62,8	196,710	63,1
2,00		58,386	59,9	80,988	61,6	112,151	63,0	168,078	63,4
1,59		50,230	59,7	69,458	61,6	95,605	63,1	143,288	63,8
1,26		43,039	59,6	59,320	61,7	81,082	63,3	121,238	64,1
1,00		37,125	59,4	50,616	61,6	69,233	63,4	103,321	64,5
0,79		31,847	59,2	43,262	61,6	59,005	63,6	87,580	64,7
0,63		27,582	58,9	37,184	61,5	50,269	63,5	74,312	65,1
0,50		23,677	58,4	31,700	61,0	42,829	63,2	63,606	65,1
0,40		20,302	58,4	26,959	61,2	36,229	63,4	53,468	65,0
0,32		17,506	58,3	23,161	61,2	30,982	63,7	45,149	65,9
0,25		15,016	58,2	19,685	61,1	26,142	63,6	38,045	65,8
0,20		12,937	58,5	16,749	61,3	22,281	63,8	32,616	66,3
0,16		11,362	57,0	14,636	60,0	19,308	63,0	27,424	66,4
0,13		9,757	57,0	12,441	59,6	16,240	61,9	23,499	66,1
0,10	8,548	58,3	10,771	61,9	14,007	65,7	19,121	68,3	

Tabulka 37: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 45 °C

Vzorek		SM1		SM2		SM3	
Obsah R-mat [%]		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	45	245,770	59,8	324,582	59,3	490,621	57,7
7,94		212,092	60,1	280,149	59,3	425,978	58,0
6,31		183,066	60,2	241,580	59,7	368,100	58,5
5,01		156,678	60,4	207,092	59,9	316,267	58,9
3,98		134,625	60,5	178,834	60,1	273,195	59,2
3,16		115,137	60,5	153,152	60,3	235,239	59,6
2,51		99,125	60,5	130,876	60,4	202,059	59,8
2,00		84,655	60,5	112,088	60,5	173,813	60,1
1,59		72,709	60,4	96,095	60,6	149,158	60,3
1,26		62,242	60,5	82,524	60,7	127,331	60,6
1,00		53,344	60,3	71,017	60,9	109,775	60,8
0,79		45,907	60,4	60,827	60,8	93,787	61,0
0,63		39,467	60,1	52,174	60,9	81,069	61,2
0,50		33,757	59,6	45,164	60,7	69,277	60,8
0,40		28,823	59,8	38,260	60,4	58,749	61,1
0,32		24,852	59,7	32,831	61,0	50,820	61,8
0,25		21,255	59,6	28,047	60,8	43,168	61,7
0,20		18,233	59,8	24,186	60,8	37,029	61,8
0,16		15,959	58,6	20,680	60,8	31,707	61,9
0,13		13,603	57,9	18,022	60,3	27,177	61,6
0,10	11,851	60,7	14,905	62,2	23,074	63,4	

Tabulka 38: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat.
pro teplotu 45°C

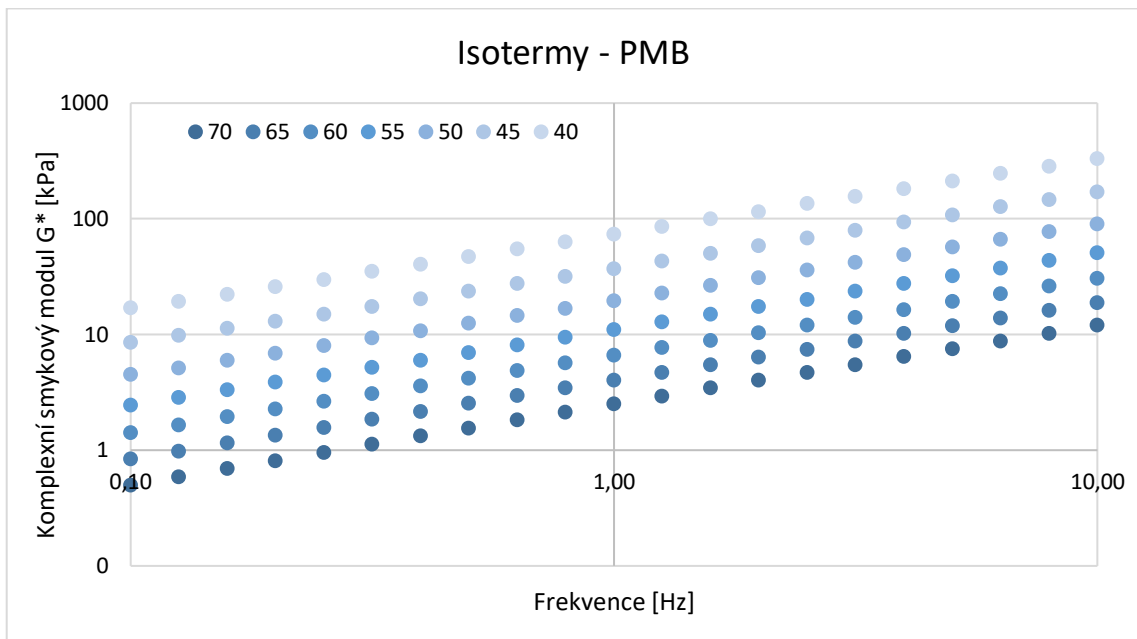
Vzorek		PMB		SN1		SN2		SN3	
Obsah R-mat [%]		0		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	40	330,451	58,6	471,546	58,6	681,047	57,8	1024,416	56,2
7,94		284,882	59,0	407,594	58,7	589,178	58,5	889,628	56,8
6,31		246,360	59,1	351,531	59,1	510,707	58,9	773,586	57,5
5,01		212,294	59,3	301,022	59,4	438,586	59,4	667,098	58,2
3,98		182,310	59,4	259,955	59,7	378,003	59,9	575,322	58,8
3,16		156,322	59,4	223,913	60,0	324,933	60,3	496,093	59,3
2,51		134,764	59,5	190,990	60,2	277,420	60,6	427,102	59,8
2,00		115,480	59,4	163,807	60,3	238,077	60,9	366,569	60,3
1,59		99,763	59,3	140,604	60,5	204,565	61,2	314,458	60,8
1,26		85,172	59,4	120,801	60,6	174,649	61,5	269,157	61,3
1,00		73,493	59,2	103,636	60,8	149,881	61,8	231,345	61,7
0,79		63,417	59,2	89,231	60,7	127,842	61,9	197,233	62,1
0,63		54,754	58,9	76,216	60,9	109,581	62,2	168,736	62,5
0,50		46,891	58,4	66,037	60,6	94,032	61,8	144,113	62,3
0,40		40,163	58,6	56,051	60,0	79,194	61,8	121,556	62,7
0,32		34,925	58,5	47,922	61,0	68,227	62,8	104,824	63,7
0,25		29,932	58,3	41,373	60,9	58,515	62,6	90,402	63,4
0,20		25,742	58,2	35,351	60,6	49,312	62,8	75,043	64,4
0,16		22,334	57,4	30,244	60,8	42,237	63,2	64,382	64,6
0,13		19,287	56,7	25,969	61,0	36,120	63,8	54,979	65,4
0,10	17,026	58,6	22,143	59,5	30,401	61,4	45,819	63,6	

Tabulka 39: Výsledky z DSR pro PMB a směsi pojiv s nemodifikovaným pojivem získaným z R-mat. pro teplotu 40 °C

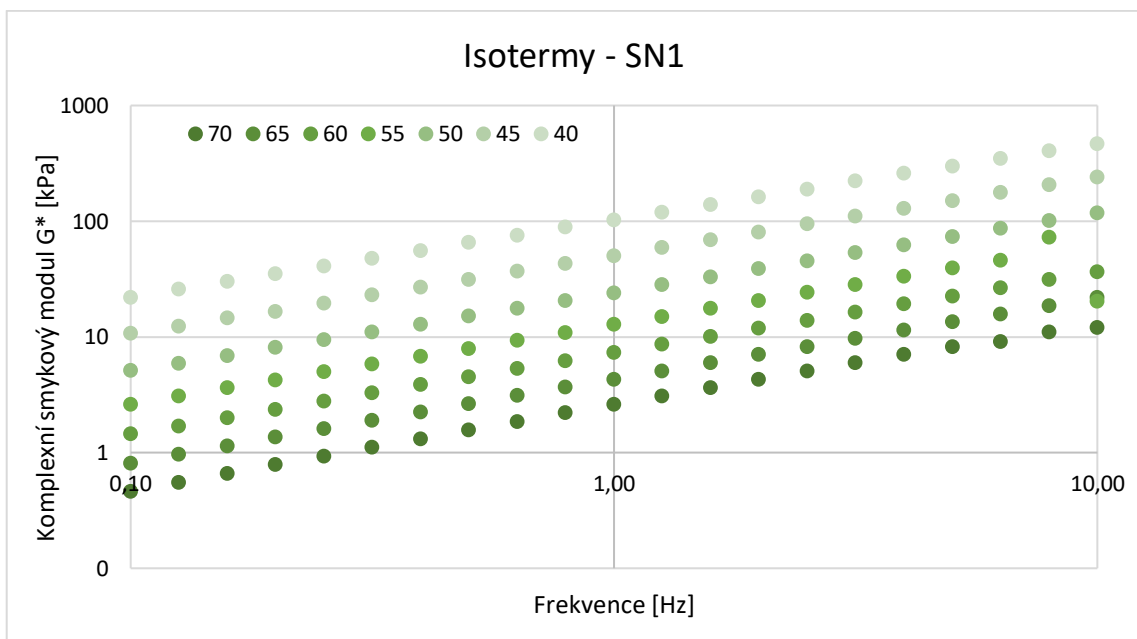
Vzorek		SM1		SM2		SM3	
Obsah R-mat [%]		15		30		50	
f [Hz]	T [°C]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
10,00	40	479,131	57,9	632,886	56,6	956,176	54,5
7,94		414,653	58,0	549,653	56,9	834,792	54,9
6,31		359,273	58,4	478,164	57,2	730,500	55,4
5,01		307,974	58,7	412,237	57,7	632,905	55,9
3,98		266,948	58,9	357,168	58,0	550,246	56,4
3,16		229,327	59,2	308,450	58,3	476,379	56,9
2,51		197,284	59,3	266,068	58,6	412,900	57,3
2,00		168,986	59,5	228,675	58,8	355,778	57,6
1,59		145,090	59,6	196,615	59,1	307,960	58,0
1,26		124,990	59,6	169,109	59,3	265,353	58,3
1,00		107,567	59,8	146,434	59,5	229,638	58,7
0,79		92,684	59,6	125,781	59,5	198,260	58,9
0,63		79,314	59,8	107,870	59,8	169,964	59,2
0,50		68,967	59,5	93,141	59,4	147,018	59,3
0,40		58,829	58,7	79,153	59,1	126,222	58,6
0,32		50,217	59,7	68,213	60,1	106,640	59,4
0,25		43,502	59,7	59,491	60,0	93,991	60,5
0,20		37,299	59,4	50,269	60,1	81,364	60,1
0,16		31,951	59,5	43,311	60,4	69,015	60,5
0,13		27,339	60,0	37,280	61,3	58,261	62,6
0,10	23,846	57,2	31,624	58,3	50,908	57,6	

Tabulka 40: Výsledky z DSR pro směsi pojiv s modifikovaným pojivem získaným z R-mat.
pro teplotu 40 °C

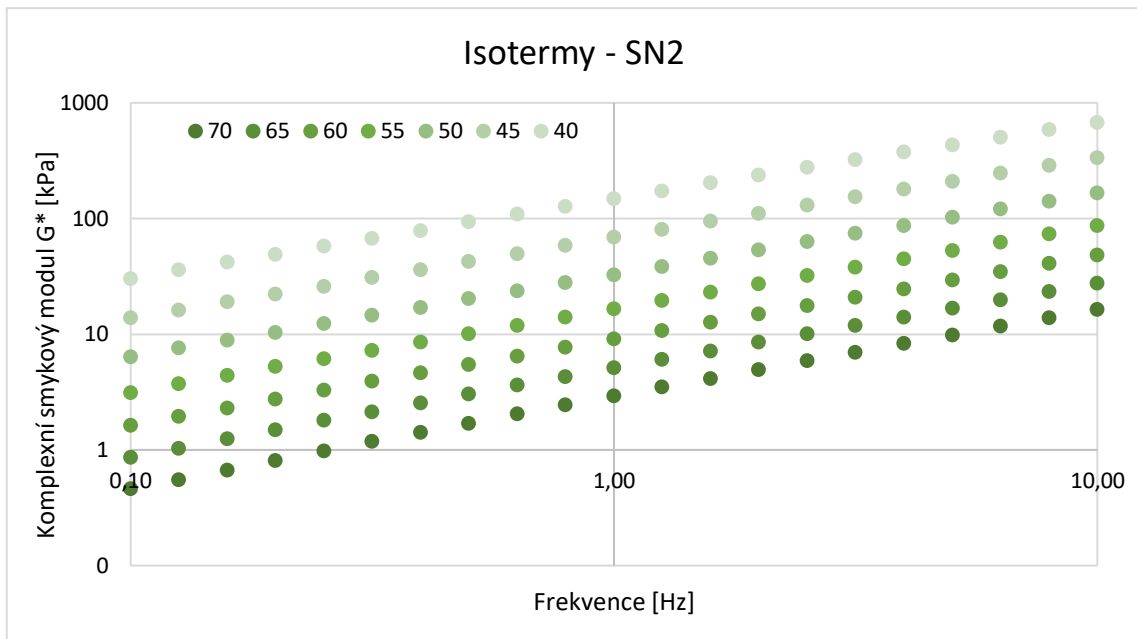
12.3 ISOTERMY



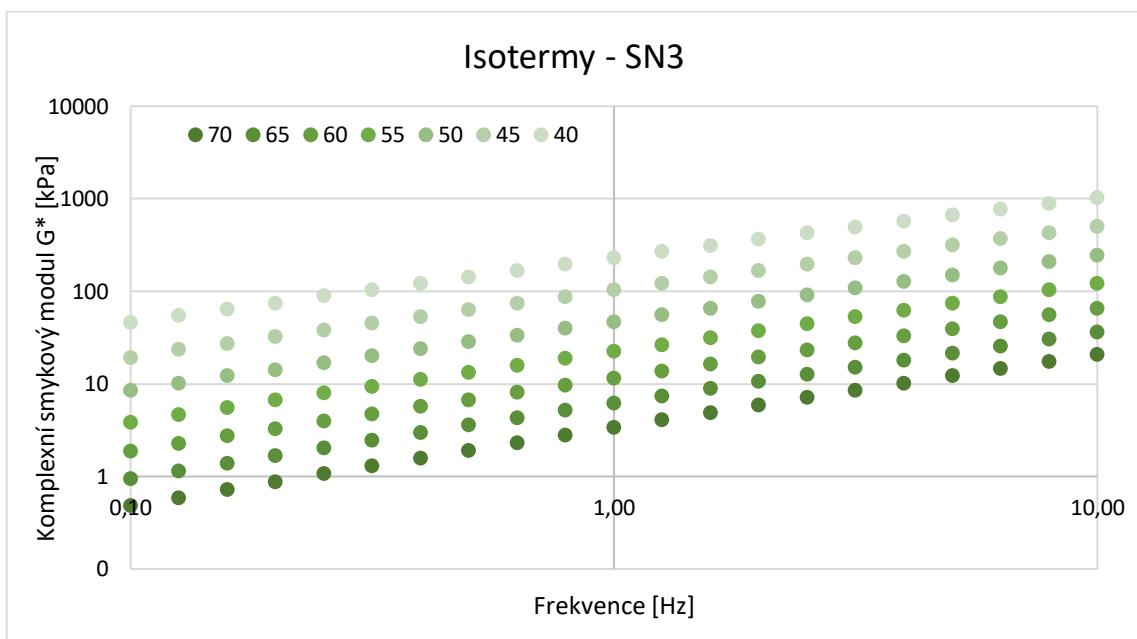
Graf 20: Isotermie - PMB



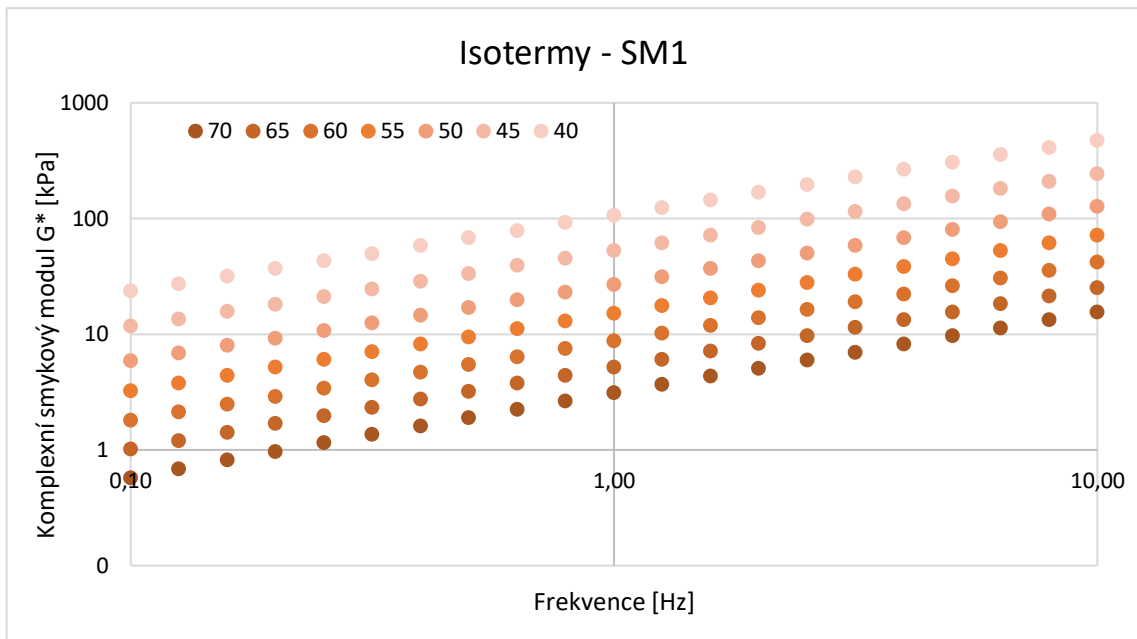
Graf 21: Isotermie - SN1



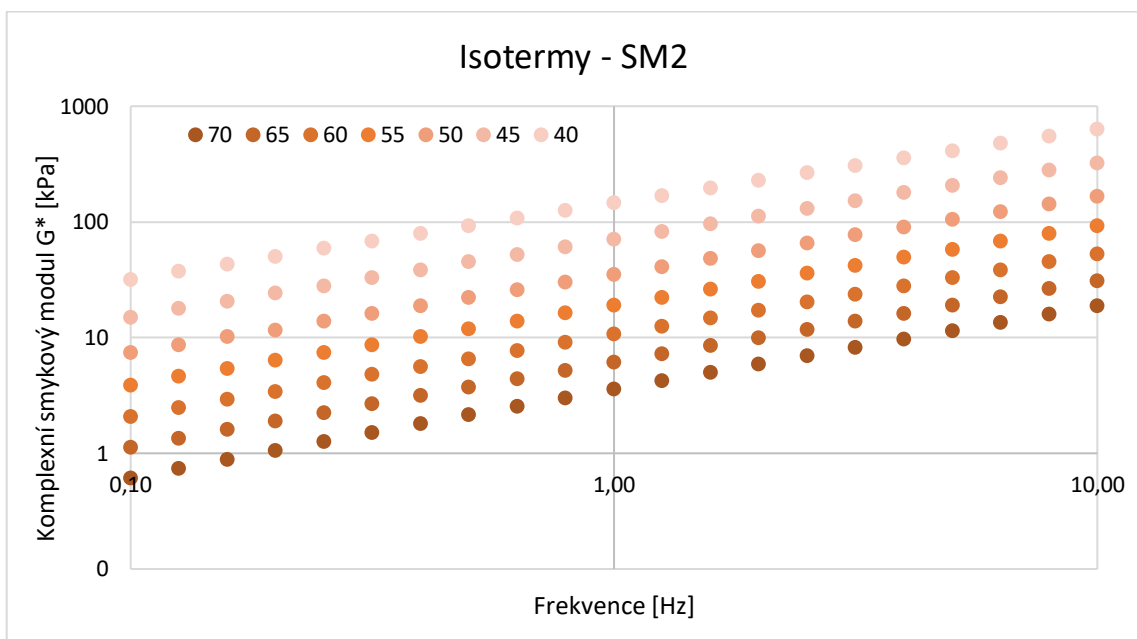
Graf 22: Isotermie - SN2



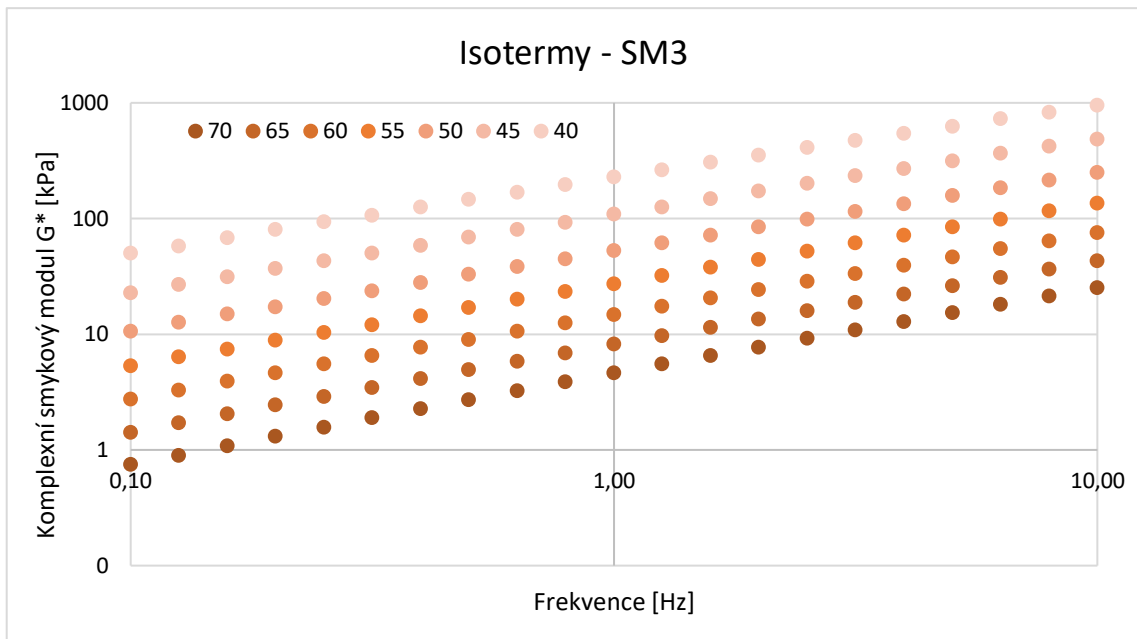
Graf 23: Isotermie - SN3



Graf 24: Isotermie - SM1



Graf 25: Isotermie - SM2



Graf 26: Isothermy - SM3