



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH POJIV ZE SMĚSÍ
TYPU SMA S R - MATERIÁLEM**

STONE MASTIC ASPHALTS WITH RECYCLED MATERIALS - BITUMINOUS BINDERS
PROPERTIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Veronika Dzurková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | B3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Bakalářský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby |
| Pracoviště | Ústav pozemních komunikací |

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|------------------------|---|
| Student | Veronika Dzurková |
| Název | Vlastnosti asfaltových pojiv ze směsí typu SMA s R - materiálem |
| Vedoucí práce | Ing. Petr Hýzl, Ph.D. |
| Datum zadání | 30. 11. 2017 |
| Datum odevzdání | 25. 5. 2018 |

V Brně dne 30. 11. 2017

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

Specifikační a zkušební normy z oblasti asfaltových poživ

ČSN EN 13108-8 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 8:R-materiál

ČSN EN 13108-5 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály -

Část 5: Asfaltový koberec mastixový

ČSN 73 6121 Stavba vozovek - Vrstvy z hutněných asfaltových směsí - Provádění a kontrola shody

Zkušební normy pro asfaltové směsi řady EN 12697

Firemní materiály

Internetové zdroje

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V bakalářské práci budou sledovány vlastnosti asfaltových poživ zpětně získaných z asfaltových směsí typu SMA (asfaltový koberec mastixový) s R - materiálem, které byly odebrány při budování pokusného úseku na komunikaci II/227.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku přidávání R-materiálu do asfaltových směsí typu asfaltový koberec mastixový (SMA). Materiál byl získán z obalovny, která dané směsi položila v rámci zkušebního úseku na komunikaci II/227. V teoretické části je popsána problematika recyklace asfaltových vozovek, teorie asfaltových pojiv a problematika spojená s přidáváním R-materiálu za horka do asfaltových směsí. V praktické části byla vyextrahována asfaltová pojiva ze směsí s různým procentuálním zastoupením R-materiálu. Na těchto pojivech byly provedeny empirické a funkční zkoušky. Cílem práce je zjištění vlivu přítomnosti R-materiálu na asfaltovou směs SMA z pohledu vlastností asfaltového pojiva.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltové pojivo, recyklace asfaltových vozovek, R-materiál, rejuvenátor, SMA, znovuzískání extrahovaného pojiva, vakuová destilace, síťový rozbor, křivka zrnitosti, penetrace, bod měknutí, DSR, komplexní smykový modul, fázový úhel, MSCR

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on the issue of adding R-material to stone mastic asphalt mixtures (SMA). The material was obtained from a plant that put the mixture in the test section on the road II/227. The theoretical part describes the problems of recycling of asphalt roads, bituminal binder theory and problems associated with the addition of R-material to hot asphalt mixtures. Bituminal binders from mixtures with different percentages of R-material were extracted in the practical part. Empirical and functional tests were performed on these binders. The aim of the thesis is to determine the influence of the presence of R-material on SMA asphalt mixture in terms of properties of asphalt binder.

KEYWORDS

Asphalt binder, recycling of asphalt roads, R-material, rejuvenator, SMA, extraction of asphalt binder, vacuum distillation, determination of particle size of the aggregate, particle size distribution curve, penetration, softening point, DSR, complex shear modulus, phase angle, MSCR

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Veronika Dzurková *Vlastnosti asfaltových pojiv ze směsí typu SMA s R - materiálem*. Brno, 2018. 92 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 23. 5. 2018

Veronika Dzurková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ:

Touto cestou by som chcela poďakovať Ing. Petrovi Hýzlovi, Ph.D. a Ing. Ive Coufalíkovej za venovaný čas, ústretovosť, cenné rady, pripomienky pri spracovaní bakalárskej práce a odbornú pomoc v cestných laboratóriách. Taktiež by som chcela poďakovať všetkým pracovníkom cestných laboratórií na ústave pozemných komunikácií FAST VUT v Brne za ich ochotu a ústretovosť.

OBSAH

| | |
|--|----|
| 1. ÚVOD | 10 |
| 2. CIELE PRÁCE | 13 |
| 3. TEORETICKÁ ČASŤ | 15 |
| 3.1 RECYKLÁCIA ASFALTOVÝCH VOZOVIEK | 15 |
| 3.1.1 Recyklácia na mieste | 15 |
| 3.1.1.1. Recyklácia krytu a podkladových vrstiev s použitím spojiva | 16 |
| 3.1.1.2. Recyklácia krytu a podkladových vrstiev bez použitia spojiva | 17 |
| 3.1.1.3. Recyklácia asfaltových vrstiev na mieste za tepla | 17 |
| 3.1.1.4. Recyklácia asfaltových vrstiev na mieste za studena | 19 |
| 3.1.1.5. Návrh zmesi pre recykláciu na mieste | 19 |
| 3.1.2 Recyklácia drvením a triedením demoličného odpadu | 20 |
| 3.1.2.1. Šaržové obalovne | 22 |
| 3.1.2.2. Kontinuálne obalovne | 24 |
| 3.1.3 R-materiál | 26 |
| 3.1.3.1. Získavanie R-materiálu | 27 |
| 3.1.3.2. Označenie R-materiálu | 29 |
| 3.1.3.3. Klasifikácia R-materiálu | 29 |
| 3.1.3.4. Dávkovanie R-materiálu do asfaltových zmesí | 30 |
| 3.1.3.5. Úprava R-materiálu | 31 |
| 3.2 ASFALTY A ASFALTOVÉ SPOJIVÁ | 31 |
| 3.2.1 Zloženie asfaltu | 32 |
| 3.2.2 Asfalty podľa pôvodu | 33 |
| 3.2.3 Výroba asfaltu | 35 |
| 3.2.4 Teplotná citlivosť asfaltov a asfaltových spojív | 35 |
| 3.2.5 Reologické vlastnosti asfaltu a asfaltových spojív | 37 |
| 3.2.6 Cestné asfalty | 39 |
| 3.2.7 Modifikované asfalty | 40 |
| 3.2.7.1. Modifikačné prísady | 40 |
| 3.2.7.2. Polymérom modifikované asfalty | 41 |
| 3.2.8 Asfaltový koberec mastixový | 42 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.8.1. | Označenie asfaltového koberca mastixového | 44 |
| 4. | PRAKTICKÁ ČASŤ | 45 |
| 4.1 | SKÚŠOBNÝ ÚSEK II/227 | 45 |
| 4.2 | POUŽITÉ ZMESI A ICH ZLOŽENIE | 47 |
| 4.2.1 | Celulózové vlákna | 48 |
| 4.2.2 | Prísada Storelastic | 49 |
| 4.2.3 | Rejuvenátor | 49 |
| 4.3 | SKÚŠKY NA SKÚMANÝCH ZMESIACH | 52 |
| 4.3.1 | Znovuzískanie extrahovaného spojiva | 52 |
| 4.3.1.1. | Postup skúšky znovuzískanie extrahovaného spojiva | 52 |
| 4.3.2 | Sitový rozbor | 57 |
| 4.3.2.1. | Postup skúšky sitového rozboru | 57 |
| 4.3.2.2. | Výsledky skúšky sitového rozboru | 59 |
| 4.3.3 | Stanovenie penetrácie ihlou | 64 |
| 4.3.3.1. | Postup skúšky penetrácie ihlou | 64 |
| 4.3.3.2. | Výsledky skúšky penetrácie ihlou | 67 |
| 4.3.4 | Stanovenie bodu mäknutia metódou kroužek a kulička | 68 |
| 4.3.4.1. | Postup skúšky stanovenie bodu mäknutia | 69 |
| 4.3.4.2. | Výsledky skúšky stanovenie bodu mäknutia | 71 |
| 4.3.5 | DSR – Dynamický šmykový reometer | 72 |
| 4.3.5.1. | Pomôcky a príprava vzoriek pre skúšky oscilačné meranie a MSCR | 74 |
| 4.3.6 | Oscilačné meranie | 75 |
| 4.3.6.1. | Postup skúšky oscilačné meranie | 76 |
| 4.3.6.2. | Výsledky skúšky oscilačné meranie | 77 |
| 4.3.7 | Skúška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test) | 79 |
| 4.3.7.1. | Postup skúšky MSCR | 80 |
| 4.3.7.2. | Výsledky skúšky MSCR | 81 |
| 5. | ZÁVER | 84 |
| 6. | ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY | 85 |
| 7. | ZOZNAM OBRÁZKOV | 89 |
| 8. | ZOZNAM TABULIEK | 91 |
| 9. | ZOZNAM GRAFOV | 92 |

1. ÚVOD

Pozemné komunikácie už od ich počiatku v staroveku zohrávali dôležitú úlohu v živote ľudí a ich význam neustále narastá. Zvyšujú sa nároky na rýchlu a bezpečnú prepravu osôb i materiálu, čo prirodzene vedie k potrebe skvalitňovať dopravnú infraštruktúru. Neustály nárast množstva dopravných prostriedkov, medzi nimi najmä ťažkých nákladných vozidiel a pomalej dopravy vyžaduje čoraz kvalitnejšie, dostatočne únosné pozemné komunikácie s čo najdlhšou životnosťou a to pri zachovaní čo najnižších nákladov pri ich budovaní a údržbe. Ohľad je pritom nutné brať i na životné prostredie a to z hľadiska čerpania zdrojov stavebných materiálov, zaobchádzania s vybraným materiálom pri rekonštrukciách ako aj minimalizácie skládok. Do popredia sa tak v cestnom staviteľstve, rovnako ako i v iných oblastiach, tlačí pojem „udržateľnosť“.

Práve neobnoviteľnosť cestných stavebných materiálov, ako napríklad prírodné ťažené kamenivo, drvené kamenivo či asfaltové spojivo vedie k nutnosti hľadať nové zdroje. Okrem ekologických dôvodov sú tu i dôvody ekonomické a to kvôli nárastu cien materiálov na svetovom trhu, kde sa aj naďalej predpokladá stúpajúci trend. V minulosti sa problém nedostatku materiálu ako aj vysokých cien materiálu riešil využívaním miestnych materiálov, vedľajších priemyselných produktov a vhodne upravovaného odpadu. V období svetovej energetickej krízy, ktorá sa prejavila v nedostatku a zvýšenej cene asfaltu sa začali riešiť mnohé vedecko-technické projekty s cieľom zaviesť opätovné použitie materiálu, najmä asfaltových zmesí. [1] [2] [3]



Graf č. 1: Vývoj ceny asfaltu [3]

Prínosy recyklácie sú zjavné:

- Zachovávanie prírodných materiálových zdrojov (kamenivo, ropa)
- Zachovanie energetických zdrojov (pohonné hmoty, výhrevné materiály)
- Obmedzenie nutnosti používať nové suroviny a možnosť ich využitia v iných odvetviach
- Zníženie znečistenia ovzdušia výfukovými plynmi a hlukom
- Redukcia skleníkových plynov
- Obmedzenie skládok
- Zníženie vstupných nákladov
- Kratšia doba výstavby
- Zníženie objemu prepravovaného materiálu
- Zníženie energetickej náročnosti

Otázka technológie samotnej recyklácie je v dnešnej dobe prekonaná a pokračuje riešením problémov spojených s využitím všetkého materiálu z existujúcich vozoviek. Všeobecne platí, že všetky materiály alebo stavebné zmesi použité v jednotlivých vrstvách vozoviek sú recyklovateľné. Recyklovaný materiál môže byť na základe laboratórnych prác a rozborov opätovne použitý v príslušných vrstvách vozoviek za predpokladu splnenia pevnostných a deformačných parametrov, dodržania príslušných postupov a platných technických noriem. [1] [2] [3]

Kvalita recyklovaných materiálov sa pri vhodnej technológii spracovania vyrovnáva kvalite nových materiálov. Stavebné dielo s využitím už raz zabudovaného materiálu tak nestráca na kvalite. [4]

Aj napriek faktom o výhodách a nutnosti využívania recyklovaných materiálov mylne prevláda u investorov i verejnosti v Českej republike opačný názor. Kým podľa štatistiky z roku 2012 sa spracovalo v Nemecku 97 % materiálu, v Českej republike to bolo iba 10 %. Požiadavka európskych smerníc je do roku 2020 zaistiť recyklovanie 70% stavebného odpadu. [3]

| Stát | R-materiál k dispozícii [tuny] | % využitého R-materiálu dle technológií | | | % použítí R-materiálu v nových směsích |
|-----------------|--------------------------------|---|------------|-------------------|--|
| | | za horka | za studena | nestmelené vrstvy | |
| Rakousko | 750 000 | 95 | 3 | 2 | - |
| Belgie | 1 500 000 | 61 | - | - | 49 |
| Česká republika | 1 400 000 | 22 | 30 | 15 | 10 |
| Dánsko | 580 000 | 77 | - | - | 2 |
| Francie | 6 500 000 | 62 | - | - | > 60 |
| Německo | 11 500 000 | 87 | - | 13 | 97 |
| Švédsko | 1 000 000 | 75 | 5 | 10 | 70 |
| Švýcarsko | 1 575 000 | 52 | 19 | 9 | 24 |
| Turecko | 3 816 000 | 2 | 5 | 93 | 1 |

Tabulka č. 1: Porovnanie využitia R-materiálu vo vybraných krajinách [3]

Dôvodov tak nízkeho používania R-materiálu je viacero. Pochybnosti o kvalite a nízka informovanosť o možnostiach použitia recyklovaných materiálov, ich prínosoch a nevhodný spôsob uvádzania recyklačných technológií do súvislosti s nakladaním s odpadmi vytvára mnoho umelo vytvorených zbytočných problémov a prekážok. Nezaujímajú investovateľov a nedostatočná motivácia pri zavádzaní týchto technológií, nedostatočné predpisy, nutnosť úprav zmesí, používania nových druhov spojív a prísad či obmedzenie použitia R-materiálu podľa typu vrstiev sú ďalšími možnými dôvodmi.

Posledným a zrejme najvýznamnejším faktorom je finančná náročnosť recyklácie. Výrobcovia asfaltových zmesí musia R-materiál pre recykláciu vykupovať a to spolu s vyššími nárokmi na technológiu recyklačných postupov a malých rozdielov cien v porovnaní s novým kamenivom bráni väčšiemu užívaniu R-materiálu. Z hľadiska ekonomického je tak pre nich výhodnejšie ho vôbec nepoužívať. [3]

2. CIELE PRÁCE

Cieľom bakalárskej práce je overenie vlastností asfaltových spojív obsiahnutých v zmesiach typu SMA 11S s dvojakým obsahovým zastúpením R-materiálu, ktoré boli položené v rámci skúšobného úseku. Zistené vlastnosti budem porovnávať s referenčnou zmesou bez obsahu R-materiálu. Skúmané zmesi obsahujú modifikovaný asfalt PMB a klasický cestný asfalt 50/70, u ktorého budem overovať modifikáciu pomocou prísady Storelastic.

Cieľom teoretickej časti je zoznámenie sa s problematikou recyklácie vozoviek, jej postupmi, využitia R-materiálu a správneho zaobchádzania s ním tak, aby bolo dosiahnuté požadovaných vlastností a kvality nezaostávajúcej za materiálom novým. V teórii sa venujem taktiež asfaltu a asfaltovým spojivám so zameraním na asfaltové zmesi a pojmy rozoberané v tejto práci.

V praktickej časti riešim štyri druhy asfaltových zmesí SMA 11S. Pôjde o dve zmesi s polymérom modifikovaným asfaltom PMB s obsahom 30 % a 50 % R-materiálu a dve zmesi s klasickým cestným asfaltom gradácie 50/70 s obsahom 30 % a 50 % R-materiálu s pridanou modifikačnou látkou Storelastic. U všetkých zmesí budem zisťovať vlastnosti, ktoré porovnam s referenčnou vzorkou s asfaltom PMB bez obsahu R-materiálu. U zmesi s asfaltom gradácie 50/70 navyše overím modifikáciu prísadou Storelastic.

Na vzorkách zmesí vykonám skúšky:

- Opätovné získanie extrahovaného spojiva pre oddelenie asfaltového spojiva od kameniva podľa ČSN EN 12697-3: *Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – část 3: znovuzískání extrahovaného pojiva*
- Sitový rozbor kameniva pre zistenie zastúpenia jednotlivých frakcií podľa ČSN EN 933-1: *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – část 1: stanovení zrnitosti – síťový rozbor*
- Penetrácia ihlou na asfaltovom spojive podľa ČSN EN 1426 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*
- Bod mäknutia metódou kroužek-kulička na asfaltovom spojive podľa ČSN EN 1427 *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička*
- Oscilačné meranie prístrojom DSR na asfaltovom spojive podľa ČSN EN 14770 - *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR)*

- Skúška MSCR na asfaltovom spojive podľa ČSN EN 16659 - *Asfalty a asfaltová pojiva*
– *Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test)*

Zo skúšok budú známe krivky zrnitosti kameniva, hodnoty penetrácie asfaltového spojiva, bodu mäknutia, komplexný šmykový modul a fázový uhol. Na základe výsledkov týchto veličín urobím vyhodnotenie vplyvu R-materiálu na použité asfaltové zmesi z hľadiska asfaltového spojiva a overím modifikáciu asfaltového spojiva v zmesiach s cestným asfaltom gradácie 50/70 prísadou Storelastic.

3. TEORETICKÁ ČASŤ

Znalosť problematiky technológie recyklácie vozoviek a vlastností používaných materiálov či zmesí je nevyhnutná pre aplikovanie R-materiálu do asfaltových vrstiev. Správnou úpravou asfaltového spojiva získaného z vybúraných zmesí je možné obnoviť jeho pôvodné vlastnosti a použiť ho v novo navrhnutých vrstvách.

3.1 RECYKLÁCIA ASFALTOVÝCH VOZOVIEK

Recyklácia vozoviek je technologický proces umožňujúci opätovné použitie už raz zabudovaného materiálu. Vzhľadom k udržateľnosti rozvoja a ochrany životného prostredia je nevyhnutné ju podporovať. Recykláciou môžeme znížiť objem odpadu, tvorbu a rozširovanie skládok, ušetriť prírodné zdroje, znížiť spotrebu energií a pohonných hmôt, prechádzať znečisteniu z ťažby kameniva a výroby stavebných materiálov. V prípade recyklácií na mieste sa môže skrátiť doba výstavby.

Na recykláciu sú kladené určité technologické a ekonomické požiadavky. Správnym technologickým prevedením sa docieli maximálne zhodnotenie materiálu. Opätovné použitie materiálu z jednotlivých vrstiev vyžaduje vhodnú úpravu, napríklad drvením, triedením, doplnením nestmelených materiálov a pridávaním regenerujúcich látok do zmesí s organickým spojivom. [5]

Spôsoby recyklácie môžeme rozdeliť:

- Podľa miesta:
 - Recyklácia na mieste
 - Recyklácia na obalovni drvením a triedením demoličného odpadu
- Podľa teploty:
 - Recyklácia za studena
 - Recyklácia za tepla [2]

3.1.1. Recyklácia na mieste

Je technologický proces, ktorý zahŕňa rozpojenie a úpravu vrstvy vozovky pomocou mobilného recyklačného zariadenia. Tak vznikne nová vrstva bez nutnosti prevážať väčšie objemy materiálu. Kamenivo v pôvodnej vrstve však musí spĺňať dané vlastnosti, s čím sa ráta a pri recyklácii ich nie je nutné overovať. Výnimkou sú vlastnosti ako zrnitosť či vlastnosti asfaltového spojiva, ktoré by sa mohli významne zmeniť.

Spôsoby recyklácie na mieste sú:

- Recyklácia krytu a podkladových vrstiev s použitím spojiva
- Recyklácia krytu a podkladových vrstiev bez použitia spojiva.
- Recyklácia asfaltových vrstiev na mieste za tepla.
- Recyklácia asfaltových vrstiev za studena

3.1.1.1 Recyklácia krytu a podkladových vrstiev s použitím spojiva

Používa sa cement, hydraulické cestné spojivo alebo kombinácia cementu s asfaltovým spojivom použiteľným za studena, ktorým je napríklad asfaltová emulzia alebo spenený asfalt. Pre upravenie zrnitosti je možné pridať kamenivo. Recyklácia prebieha pri teplotách nad +5 °C.

Pre rozpojenie pôvodných vrstiev do požadovanej hĺbky, jej premiešanie so spojivom, vodou a prípadne kamenivom sa používa recyklačná fréza. Ide o zariadenie vybavené rozprestieracím zariadením s hutniacou lištou vyvinuté pre túto stavebnú technológiu. Pred pojazdom frézy sa rozprestrú zložky ako kamenivo a cement slúžiace pre zlepšenie vrstvy. Dodávanie asfaltového spojiva zaisťuje prepravník idúci pred frézou, cez ktorú sa upravuje dávkovanie. Rozpojený a premiešaný materiál sa urovná a zhutní, pričom sa musí dbať na presah okrajov pod nadväzujúcimi vrstvami. [5]



Obrázok č. 1: Recyklácia na mieste s použitím recyklačnej frézy [5]



Obrázok č. 2: Recyklačná fréza Bomag [6]

3.1.1.2 Recyklácia krytu a podkladových vrstiev bez použitia spojiva.

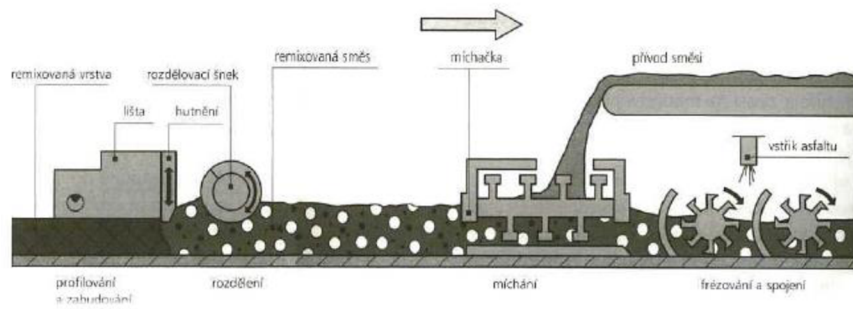
Účel tohto postupu je premiešanie a homogenizácia nestmelenej vrstvy, do ktorej sa pre zlepšenie zrnitosti prípadne pridá kamenivo. Postup je podobný: prídavné materiály sa rozprestrú, vozovka sa rozpojí a premieša, spojivo sa však nedávkuje. Takýmto spôsobom vzniká väčšinou zmes odpovedajúca parametrom štrkodrte.

3.1.1.3 Recyklácia asfaltových vrstiev na mieste za tepla

Týmto spôsobom sa asfaltové vrstvy určené k recyklácii ohrejú, rozpoja, premiešajú s prídavnými materiálmi (zmäkčovacie prísady, asfaltové spojivo, asfaltová zmes), položia sa naspäť a zhutnia.

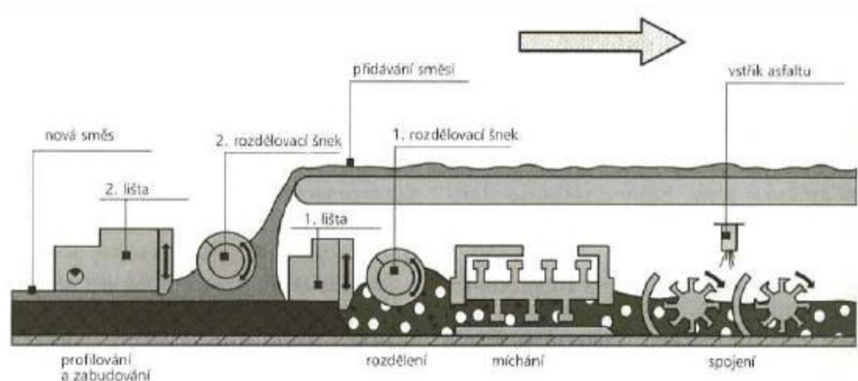
Rozoznávame tieto typy recyklácii za tepla:

- **Reshape.** Vrstva sa zohreje, rozpojí, urovná, nakyprí v priečnom a pozdĺžnom smere a zhutní.
- **Repave.** Podobný postup ako pri Reshape, no po zrovnaní a nakyprení asfaltovej vrstvy sa na ňu položí nová vrstva tak, aby nedošlo k ich vzájomnému premiešaniu. Obe vrstvy sa následne zhutnia súčasne.
- **Remix.** Na povrch vrstvy sa rozprestrie kamenivo pre úpravu zrnitosti, ktoré sa spolu s asfaltovou vrstvou zohreje. Vrstva sa rozpojí, pridajú sa do nej zmäkčujúce prísady alebo cestný asfalt. V prípade nerozprestrenia kameniva sa pre úpravu skladby zmesi použijú špeciálne asfaltové zmesi. Asfaltová vrstva so všetkými pridanými materiálmi sa premieša, spätne položí a zhutní. [5]



Obrázok č. 3: Princíp technológie Remix [7]

- **Remix plus.** Touto technológiou sa zrecykluje pôvodná obrusná vrstva podobne ako pri Remix s tým rozdielom, že po položení upravenej zmesi sa na ňu navyše položí nová asfaltová vrstva. Obe vrstvy sa následne zhutnia. [5]



Obrázok č. 4: Princíp technológie Remix Plus [7]

- **Recyklácia v mobilnom nízko kapacitnom zariadení.** Používa sa pre lokálne provízorne vysprávky technológiou rozohriatia, premiešania, položenia a zhutnenia asfaltovej zmesi.

Pre technológiu recyklácie za tepla Remix a Remix plus sa používa súprava strojov pozostávajúca z infražiaríčov, recyklačného zariadenia a šnekových rozhrňovačov s urovnávacími hutniacimi lištami.

Zohriatie recyklovanej asfaltovej vrstvy do hĺbky prebieha pomocou infražiaríčov tak, aby sa vrchná vrstva neprepaľovala. Počet a rýchlosť pojazdov sa volí na základe hĺbky vrstvy a klimatických podmienok v dobe vykonávania recyklácie. Teplota na povrchu vrstvy nesmie prekročiť hodnotu 160 °C. Recyklačné zariadenie zahŕňa frézu, ktorou sa nahriata zmes rozruší a hrázkovacie zariadenie pre upravenie vrstvy do hrázky, odkiaľ je zmes ďalej zbieraná a prepravená do miešačky. V miešačke sa dodajú pridávané materiály a zmes sa premieša. [5] [8]

3.1.1.4 Recyklácia asfaltových vrstiev na mieste za studena

Vykonáva sa technológiou podobnej technológii Remix. Na povrch sa rozprestrie pomalyštepna asfaltová emulzia, ktorá štiepením tvrdne, prilieha ku kamenivu a tým vytvára novú vrstvu. Postup prebieha za normálnej teploty bez nahrievania vrstvy, prípadne sa vykoná jemný ohrev asfaltovej emulzie. Návrh zmesi pre takúto recykláciu je náročný najmä z toho dôvodu, že recyklovanie asfaltových vrstiev za studena nevytvára zmesi na dostatočne kvalitatívnej úrovni ako sú zmesi recyklované za tepla. Použitie recyklácie na mieste za studena sa preto obmedzuje na ložné a podkladové vrstvy, prípadne obrusné vrstvy veľmi nízko zaťažovaných komunikácií dopravného zaťaženia V až VI. Doporučená je vhodná tenká povrchová úprava ako náter alebo emulzná kalová vrstva. [5]

Alternatívne je možné použiť hydraulické spojivá, zmes hydraulických spojív, alternatívne spojivá alebo spenený asfalt. [7]



Obrázok č. 5: Zostava strojov používaných pre recykláciu za studena [7]

3.1.1.5 Návrh zmesi pre recykláciu na mieste

Pre správny návrh asfaltovej zmesi je potrebné vopred získať čo najpresnejšie informácie o položenej vrstve, ktorá sa má recyklovať. Po odobratí skúšobnej vzorky zo zmesi predpísaným spôsobom sa prevedie séria skúšok podľa TP 209. [8]

| Vlastnosť | Zkušební norma |
|--|---------------------|
| Vlastnosti pôvodní asfaltové směsi | |
| Obsah rozpustného pojiva | ČSN EN 12697-1 |
| Zrinitost směsi kameniva | ČSN EN 12697-2 + A1 |
| Stanovení maximální objemové hmotnosti | ČSN EN 12697-5 + A1 |
| Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa | ČSN EN 12697-6 + A1 |
| Stanovení mezerovitosti asfaltové směsi | ČSN EN 12697-8 |
| Vlastnosti zpětně získaného asfaltu z původní asfaltové směsi : | |
| Penetrace jehlou | ČSN EN 1426 |
| Bod měknutí – Metoda kroužek a kulička | ČSN EN 1427 |
| Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR) ¹⁾ | ČSN EN 14770 |
| ¹⁾ Zkouška je pouze informativní, výsledek této zkoušky může doplnit kvalitativní zařídění asfaltového pojiva | |

Tabuľka č. 2: Požiadavky skúšok na zmesi pre recykláciu na mieste [8]

3.1.2. Recyklácia drvením a triedením demoličného odpadu

Spôsobom recyklácie drvením a triedením na obalovni sa materiál plnohodnotne využije a výsledkom je rovnaký produkt ako produkt bez recyklácie. Všeobecne platí, že akýkoľvek recyklovaný materiál musí byť správne použitý a jeho vlastnosti musia byť známe a v súlade s požiadavkami.

Výsledkom drvenia a triedenia je:

- Recyklované kamenivo
- Recyklát
- R-materiál

Recyklované kamenivo je získavané zo starého betónu či podkladových vrstiev. Používa sa namiesto prírodného kameniva v nestmelených vrstvách, vrstvách stmelených hydraulickými spojivami alebo ako kamenivo do betónu.

Recyklát je získavaný z muriva, betónu a malty. Výsledným produktom je recyklát zmesový alebo betónový. Tento materiál nedosahuje požadované parametre pre kamenivo, preto sa používa ako náhrada zemín a sypanín pre výstavbu zemných telies alebo ako materiál do niektorých typov nestmelených a stmelených podkladových vrstiev vozovky.

Tretím typom je R-materiál, ktorý sa získava rozpojením starej vyfrézovanej alebo vybúranej a podrvenej asfaltovej zmesi. Túto zmes je nutné ďalej triediť. Najefektívnejšie využitie R-materiálu je ako náhrada časti kameniva a spojiva pri výrobe asfaltových zmesí

na obalovníach. Použitie do nestmelených vrstiev ako náhrada za štrkodrť či mechanicky spevnené kamenivo by mala byť obmedzená na krátke úseky. [2] [5]



Obrázok č. 6: *Betónový recyklát frakcii 0/8, 8/32, 32/64 mm [9]*



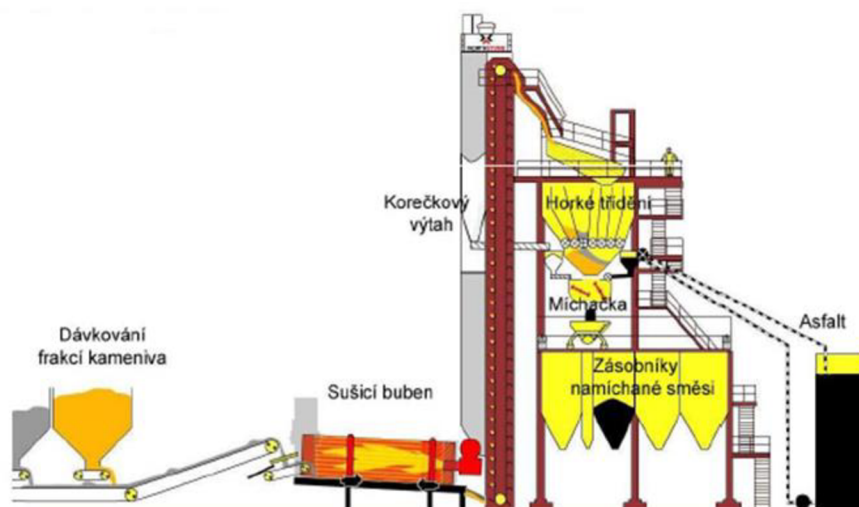
Obrázok č. 7: *Zmesný recyklát frakcii 0/8, 8/32, 32/64 mm [9]*



Obrázok č. 8: *R-materiál (asfaltový recyklát) frakcii 0/8, 8/32, 32/64 mm [9]*

3.1.2.1 Šaržové obalovne

Postup výroby v šaržových obalovniach začína prepravou kameniva pomocou nakladačov z bunkrov určených pre jednotlivé frakcie do násypiek pre studené dávkovanie. Cez pásovú váhu sa príslušné množstvo jednotlivých frakcií odváži a následne je dopravníkom prepravené do sušiaceho bubnu, kde sa frakcie premiešajú. Kamenivo sa otáčaním lopatiek optimálne vysuší a pokračuje do prednej časti bubnu, kde sa pomocou prúdu horúceho vzduchu odstráni jemné častice. Vysušené kamenivo je ďalej transportované korčekomým výťahom do veže obalovne, odkiaľ pokračuje do vibračných sít na horúce triedenie. Sítá sú umiestnené v určitom sklone, aby sa väčšie zrná kameniva odvalili preč a menšie zrná nimi prepadli do jednotlivých priehradiek. Podľa výrobného predpisu sú ďalej vážené a prepustené do miešačky vybavenej miešacími lopatkami pre dokonalé premiešanie zmesi. Miešačka je zvnútra opatrená plechmi z materiálu odolnému voči oteru a vyhrievaním pláštú a vypúšťacieho uzáveru. V hornej časti sa nachádza váha, prívod spojiva, vpuste pre dávkovanie pretriedeného kameniva, R-materiálu a fileru. [5]



Obrázok č. 9: Schéma šaržovej obalovne [2]

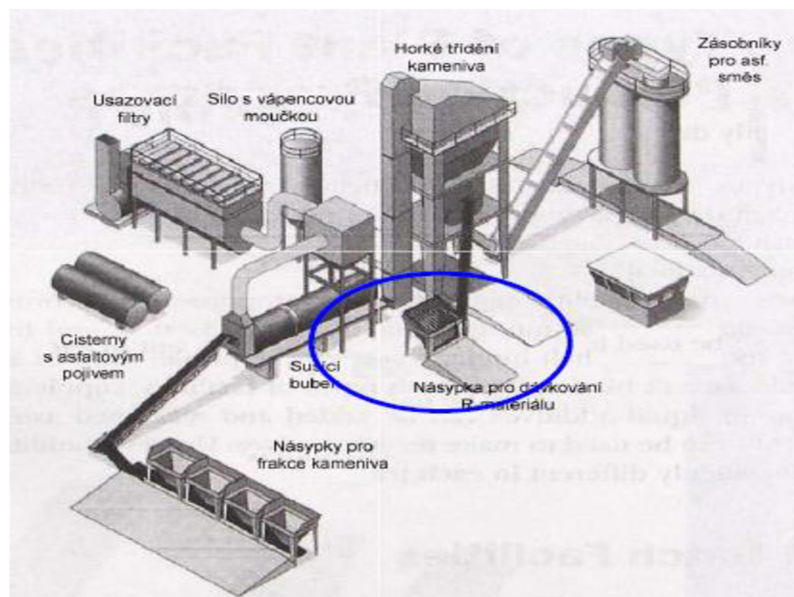
Časy miešania zmesi, ako aj minimálne a maximálne teploty kameniva, asfaltu a asfaltovej zmesi musia spĺňať výrobné predpisy a počas výroby musia byť neustále kontrolované. Miešanie prebieha najprv nasucho, kedy je po dobu 5 až 10 sekúnd premiešavané samostatné kamenivo. Následne sa naváži a vstrekuje zahriaty asfalt, ktorý je ďalej zmiešavaný s asfaltovým spojivom po dobu prislúchajúcu druhu asfaltovej zmesi podľa výrobného postupu. Miešací čas má byť čo najkratší, pretože vplyvom vysokej teploty vzduchu asfalt rýchlo starne. Bezprostredne po obalení kameniva

asfaltovým filmom sa kamenivo vysype do vozíku, ktorý ho odvezie a umiestni do zásobníku. [5]

Pridávanie R-materiálu do asfaltovej zmesi na šaržovej obalovni je možné dvomi spôsobmi:

- Dávkovaním priamo do miešačky šaržovej obalovne
- Predhrievaním R-materiálu v paralelnom bubne

Dávkovanie studeného R-materiálu priamo do miešačky vyžaduje podrobenie na frakcie. Pridáva sa jemnejšia aj hrubšia frakcia podľa druhu zmesi. Prírodné kamenivo musí byť predhriate na vyššiu teplotu. Maximálne množstvo pridaného R-materiálu je približne 25 %, nad touto hodnotou sa odporúča výpočet gradácie pridaného spojiva. Kvôli nezastrešeniu skládok nastávajú problémy s vlhkosťou, celý výrobný cyklus tak musí byť odvetrávaný. [2]

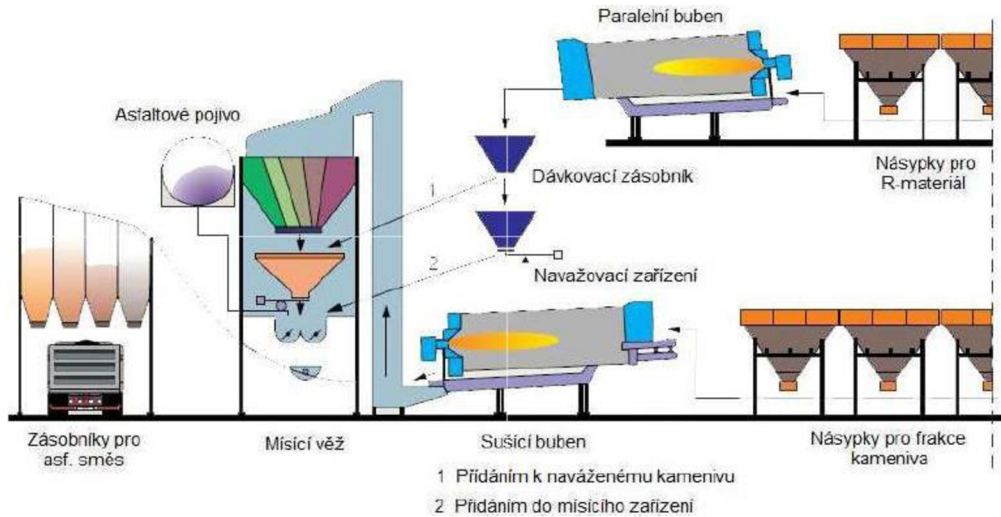


Obrázok č. 10: Šaržová obalovňa s pridávaním R-materiálu priamo do miešačky [2]

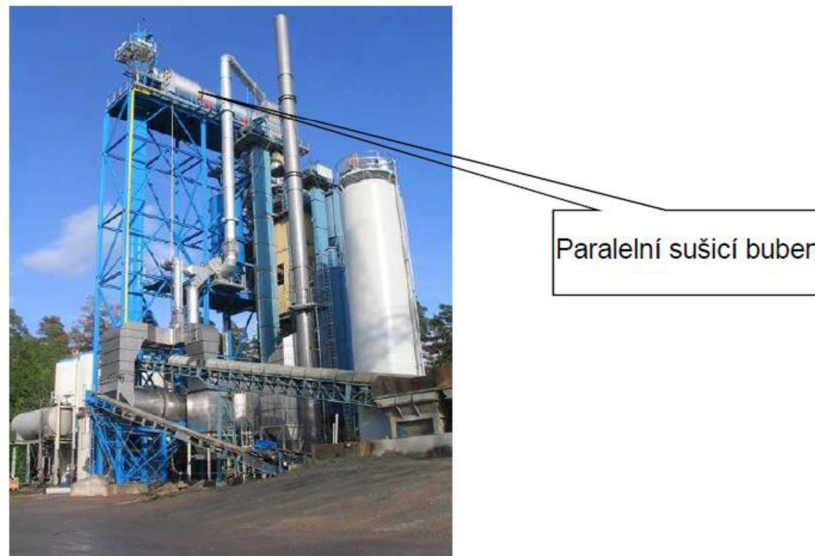


Obrázok č. 11: Nezastrešené skládky kameniva [2]

Pri predhrievaní R-materiálu v paralelnom sušiacom bubne je možné použiť výrazne vyššie množstvo než pri dávkovaní za studena, do podkladových vrstiev až 80 %. Vďaka nahriatiu na približne 135 °C sa dosiahne nižšej vlhkosti R-materiálu. [2]



Obrázok č. 12: Schéma šaržovej obalovne s predhrievaním R-materiálu [2]

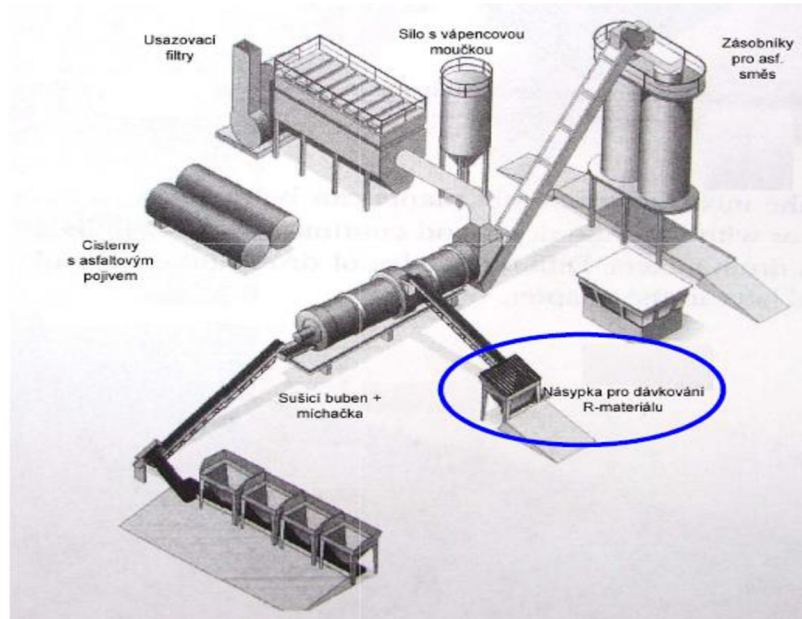


Obrázok č. 13: Paralelný sušiaci bubon pre pridávanie R-materiálu [2]

3.1.2.2 Kontinuálne obalovne

Použitie týchto obalovní je vhodné pre výstavbu väčších líniových stavieb, kde sa po určitú dlhšiu dobu mieša jeden druh zmesi. Hlavný rozdiel oproti šaržovým obalovniam tkvie v absencii horúceho triedenia. Vysušený materiál je premiešavaný v spodnej časti bubnu alebo prídavnej miešačke. Kamenivo prichádza do sušiaceho

bubnu už v predpísanom zložení a jeho parametre musia byť čo najviac konštantné. Kvalita vstupných materiálov musí byť permanentne kontrolovaná. [5]

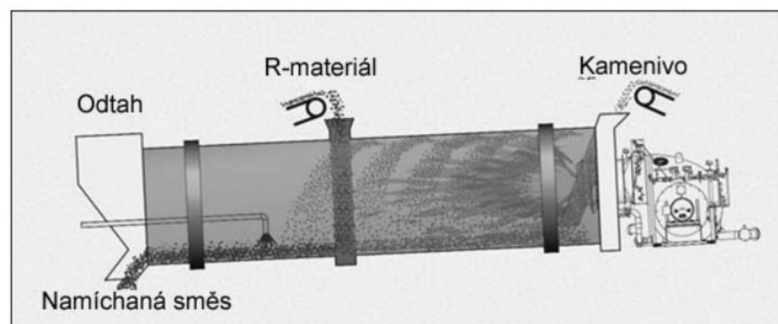


Obrázok č. 14: Schéma kontinuálnej obalovne s pridávaním R-materiálu [2]

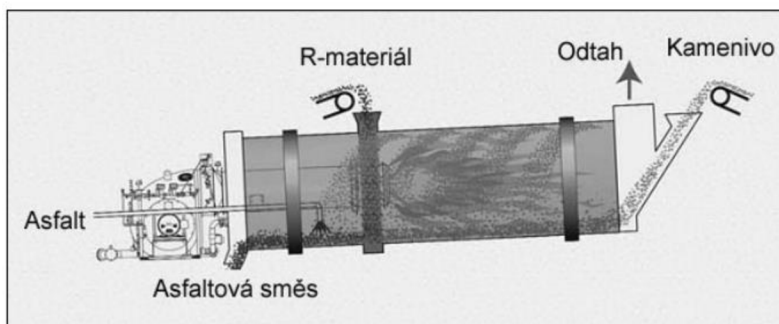
Najznámejším systémom kontinuálnych obalovní je Drum-mix systém s dvojrámovou miešačkou skladajúci sa z ohrievacej a miešacej zóny. [5]

Touto metódou je možné pridávať R-materiál v množstve do 50 %. Pridávanie R-materiálu prebieha za pridávania horúceho vzduchu a to tromi možnými spôsobmi:

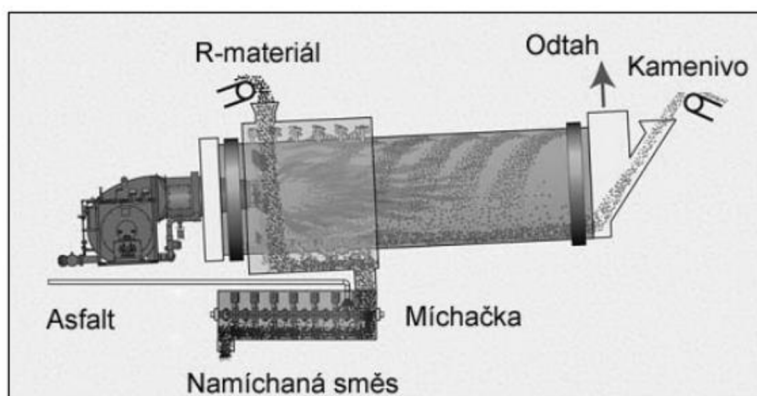
- Súbežne s prúdom horúceho vzduchu
- Proti prúdu horúceho vzduchu
- Separátne vysušenie R-materiálu [10]



Obrázok č. 15: Pridávanie R-materiálu súbežne s prúdom horúceho vzduchu [10]



Obrázok č. 16: Pridávanie R-materiálu proti prúdu horúceho vzduchu [10]



Obrázok č. 17: Separátne vysušenie R-materiálu a premiešanie v miešačke [10]

3.1.3. R-materiál

Je definovaný technickými podmienkami *TP 210 Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací*. R-materiál zahŕňa asfaltovú zmes získanú vyfrézovaním vrstiev asfaltových vozoviek, podrvením vybúraných asfaltových vozoviek alebo veľkých kusov dosiek a asfaltovú zmes z nadbytočnej či nevyhovujúcej výroby. Materiál môže byť označený ako R-materiál za predpokladu, že obsahuje viac ako 95 % asfaltových materiálov (Ra) a maximálne 5 % ostatných recyklovaných materiálov, medzi ktoré patrí:

- Recyklát z betónu (Rc) – vzniká zrecyklovaním kameniva získaného podrvením a triedením betónu a betónových výrobkov
- Recyklát z muriva (Rb) – materiál z podrvenia a triedenia pálených a nepálených murovacích prvkov (tehly, tvárnice, obkladačky)
- Recyklát z vozoviek (Ru) – ide o recyklované kamenivo získané podrvením a triedením betónu, stmelých asfaltových vrstiev, vrstiev stmelých hydraulickým spojivom alebo nestmelých vrstiev, či hrubozrnných zemín

- Iné častice (X) – zahŕňa príľnavé častice ako jemnozrnné ílovité zeminy a nečistoty, rôznorodé častice ako kovy, neplávajúce drevo, stavebné plasty, pryž, stavebnú omietku a iné
- Ostatné častice (Y) – častice nestavebného charakteru (papier, textíliá, plast, organické materiály – humus, rašelina)
- Plávajúce častice (F) – častice plávajúce na vode ako sú plávajúce drevo a polystyrén [3]

3.1.3.1 Získavanie R-materiálu

R-materiál sa získava vybúraním vo forme krých alebo vyfrézovaním konštrukcie vozovky. Po vybúraní sa materiál ďalej drví a triedi na základné frakcie (napríklad 0/8, 0/11, 0/22). Je výhodné vykonávať drvenie a triedenie v jesennom a zimnom období, kedy vďaka nižším teplotám nie je R-materiál natolko lepkavý a vhodnejšie sa spracováva. [11]

Búranie konštrukcie celej pôvodnej vozovky alebo jednotlivých vrstiev sa uskutočňuje pomocou rýpadla so zbíjacím kladivom. Získaný materiál je následne podrvený a vytriedený. V rámci jedného záberu je možné vybúrať vrstvy stmelené asfaltovým spojivom a v druhom ostatné vrstvy. Takýto separovaný spôsob vybúrania umožňuje opätovne zabudovať asfaltom stmelené vrstvy v asfaltových zmesiach. [7]



Obrázok č. 18: Búranie konštrukcie vozovky vo forme krých [3]

Frézovaním konštrukcie sa pomocou cestnej frézy získa asfaltový materiál buď za tepla alebo za studena. Je možné tiež použiť recyklér a získať materiál z vozovky hĺbkovou

recykláciou na mieste za studena. Frézovanie by malo prebiehať po jednotlivých vrstvách, pretože vrstvy môžu byť rôznej kvality a zrnitosti. [7]



Obrázok č. 19: Frézovanie konštrukcie vozovky [12]

Frézovanie možno uplatniť tam, kde je obrusná vrstva na konci svojej životnosti alebo na miestnych komunikáciach, na ktorých nie je možná zmena nivelety vozovky kvôli náväznosti na chodníky a odvodnenie. Ďalej je výhodné použitie frézy na mostných objektoch, kde kvôli zväčšeniu stáleho zaťaženia nie je možné klásť ďalšie asfaltové vrstvy. Taktiež sa dá uplatniť v prípade úpravy priečného profilu za predpokladu odstránenia malých nerovností a deformácii neprevyšujúcich 10mm s následným prevedením náteru alebo mikrokoberca.

Cestné frézy sa rozlišujú podľa veľkosti:

- **Malé cestné frézy.** Majú šírka frézovacieho valca do 500 mm a záberovú hĺbku pod 100 mm
- **Stredné cestné frézy.** Šírka frézovacieho valca je medzi 500 – 1000 mm a záberová hĺbka do 180 mm.
- **Veľké cestné frézy.** Frézovací valec nad 1000 mm a záberová hĺbka pod 350 mm.
- **Špeciálne cestné frézy.** Šírka frézovacieho valca je do 350 mm a záberová hĺbka do 100 mm. Ich použitie je výhodné pri sanačných prácach pre odfrézovanie poškodených krytových vrstiev v blízkosti kanalizačných poklopov, uličných vpustí, rigolov a podobne. [7]



Obrázok č. 20: Cestná fréza Wirtgen WR2200CR [13]

3.1.3.2 Označenie R-materiálu

R-materiál sa zapisuje v tvare:

U RA d/D mm

Kde „U“ označuje najmenšiu veľkosť sita, ktorým prepadne 100 % zrn z asfaltovej zmesi, ide o maximálnu veľkosť zrna. „D“ značí veľkosť horného sita kameniva. Hodnoty sú udávané v milimetroch. Označenie **40 RA 0/8 mm** hovorí o R-materiáli obsahujúcom kamenivo s veľkosťou horného sita 8 mm a maximálnou veľkosťou zrna 40 mm. [14]

3.1.3.3 Klasifikácia R-materiálu

Akékoľvek znečisťujúce látky obsiahnuté v R-materiáli sa musia zaznamenať – ich prítomnosť, obsah a druh sa zaradí do príslušnej kategórie. Postup stanovenia obsahu týchto látok je uvedený v norme *ČSN EN 12697-42: Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 42: Obsah cizorodých látek v asfaltovém recyklátu*.

Medzi znečisťujúce látky sa radia materiály iné ako prírodné kamenivo. Nie sú získané z asfaltových zmesí a rozdeľujeme ich do dvoch skupín.

- Skupina 1:
 - Cementový betón a výrobky z cementového betónu
 - Tehly
 - Materiál spodnej podkladovej vrstvy s výnimkou prírodného kameniva
 - Cementová malta
 - Kovy
- Skupina 2:
 - Syntetické materiály
 - Drevo

- o Plasty

Klasifikácia R-materiálu sa vykonáva na základe obsahu znečisťujúcich cudzorodých látok.

- Kategória F1 – obsah materiálov skupiny 1 do 1 %, skupiny 2 maximálne 0,1 %
- Kategória F5 – obsah materiálov skupiny 1 do 5 %, skupiny 2 maximálne 0,1 %
- Kategória Fdec – deklaruje sa povaha a obsah všetkých znečisťujúcich látok [14]

3.1.3.4 Dávkovanie R-materiálu do asfaltových zmesí

Dávkovanie R-materiálu v Českej republike je dané normou ČSN EN 13108-1 *Asfaltové smesi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton*. Podľa tejto normy je možné R-materiál pridávať iba do zmesí typu Asfaltový betón AC. Množstvo R-materiálu sa pritom riadi typom vrstvy. Použitie do zmesí typu SMA, PA a BBTM nie je povolené. Do zmesí typu VMT je možné pridávať R-materiál v množstve maximálne 30 %. [15]

| Obrusné vrstvy | | Ložní vrstvy | | Podkladní vrstvy | |
|----------------|----------------|--------------|-----------------------|------------------|------------------|
| Druh směsi | R-materiál [%] | Druh směsi | R-materiál [%] | Druh směsi | R-materiál [%] |
| ACO 8 | 25 | ACL 16 S | 30/15 ¹⁾²⁾ | ACP 16 S | 50 ¹⁾ |
| ACO 8 CH | 25 | ACL 16 + | 30 ¹⁾ | ACP 16 + | 60 |
| ACO 11 S | - | ACL 16 | 40 | ACP 22 S | 50 ¹⁾ |
| ACO 11 + | - | ACL 22 S | 30/15 ¹⁾²⁾ | ACP 22 + | 60 |
| ACO 11 | 25 | ACL 22 + | 30 ¹⁾ | | |
| ACO 16 S | - | ACL 22 | 40 | | |
| ACO 16 + | - | | | | |
| ACO 16 | 25 | | | | |

1) Množství přidávaného R-materiálu při výrobě asfaltových směsí z modifikovaných asfaltů opravuje poznámka v normě ČSN EN 13108:2008 článek 5.3.1.1. Na základě národních zkušeností je však možné použít i jiných limitních hodnot v této tabulce

2) Při výrobě asfaltových směsí z nemodifikovaných asfaltů je možné použít R-materiál v množství do 30 %, v případě použití modifikovaných asfaltů v množství do 15 %. Použitý R-materiál musí být získán z krytů vozovek

Tabuľka č. 3 : Povolené množstvo R-materiálu do vrstiev typu AC [15]

Použitie do zmesí typu SMA, PA a BBTM nie je povolené. Do zmesí typu VMT je možné pridávať R-materiál v množstve maximálne 30 %. [15]

| Dávkovanie R-materiálu do ostatných asfaltových smesí | |
|--|--------------|
| SMA | 0 % |
| PA | 0 % |
| BBTM | 0 % |
| VMT | 25 % až 30 % |

Tabuľka č. 4: Povolené množstvo R-materiálu do ostatných typov zmesí [15]

Obsah R- materiálu obmedzuje tiež typ použitej obalovne a to nasledovne:

- Bežné šaržové obalovné do 25 %
- Šaržové obalovne s paralelným bubnom do 80 %
- Kontinuálne obalovne metódou Drum Mix do 50 % [10]

3.1.3.5 Úprava R-materiálu

Keďže asfaltové spojivo v priebehu času starne a tým tvrdne, je nutné R-materiál obsahujúci zostarnuté asfaltové spojivo pred jeho opätovným použitím dostatočne upraviť. Po vyfrézovaní materiálu z vozovky sa stanovia hodnoty obsiahnutého asfaltového spojiva. Ide najmä o hodnoty bodu mäknutia a hodnoty penetrácie. Tieto dve vlastnosti poskytujú dostatočné vedomosti o stave asfaltového spojiva a na základe ich výsledkov je možné na mieru zostarnutého spojiva reagovať a zistiť optimálnu tvrdosť v novo navrhutej zmesi. [16]

R-materiál sa pred použitím v asfaltových zmesiach upraví:

- Použitím mäkšieho asfaltového spojiva
- Použitím špeciálneho spojiva s prísadami
- Použitím rejuvenátorov [10]

3.2 ASFALTY A ASFALTOVÉ SPOJIVÁ

Asfalt patrí medzi základné stavebné materiály. Používa sa pre aplikáciu cestnú a priemyslovú, podľa čoho sa aj rozlišuje jeho zloženie. V cestnom stavitelstve sa používa predovšetkým ako spojivo do asfaltových zmesí, do prelievaných podkladových vrstiev alebo ako základný materiál pre výrobu asfaltových emulzií. V anglickej a nemeckej terminológii sa s asfaltom stretáme pod pojmom „bitumen“. [5]

3.2.1. Zloženie asfaltu

Asfalt patrí medzi skupinu živíc zloženú z prírodných uhľovodíkov a ich nekovových derivátov, ktoré sa môžu nachádzať v stave plynnom, kvapalnom, viskóznom alebo tuhom. Podľa pôvodu sa asfalty delia na prírodné a ropné. Na zloženie asfaltu sa môžeme pozerať z hľadiska fyzikálneho a chemického.

Z fyzikálneho hľadiska je asfalt visko-elastický materiál, ktorého správanie závisí predovšetkým od teplotných zmien.

Z chemického hľadiska ide o koloidnú zmes pozostávajúcu z približne tisícky rôznych vysokomolekulárnych uhľovodíkov s elasticko-viskóznym správaním, ktoré sa mení v závislosti od teploty. Asfalt obsahuje prvky ako vodík, uhlík, kyslík, dusík, niektoré kovy a rôzne nečistoty. Skutočné množstva jednotlivých chemických látok tvoriacich asfalt je obtiažne určiť. Preto sa v praxi stanovuje skupinové zloženie asfaltov z hľadiska zastúpenia uhľovodíkových skupín, pričom zložky sú nerovnomerne rozmiestnené a teda nevytvárajú homogénnu zmes.

Koloidnú štruktúra asfaltov tvoria:

- **Asfaltény.** Pevné zložky tvoriace základnú súčasť asfaltov. Podmieňujú jeho teplotnú stálosť, viskozitu, tmeliace a lepiace vlastnosti. Sú to tvrdé krehké netaviteľné látky rozpustné v sírouhlíku a benzéne, ale nerozpustné v alkohole. Zahrievaním sa topia na karbeny a karboidy. Nepodliehajú oxidácii.
- **Maltény.** Tekuté zložky (saturáty, aromáty, živice) dodávajúce asfaltu jeho mäkkosť. Sú to olejovité, polotekuté a polotuhé viskózne látky rozpustné v nízkomolekulárnych parafinických rozpúšťadlách. Sú nositeľmi plastických a elastických vlastností. Na rozdiel od asfalténov podliehajú oxidácii. Tým, že sa mení pomer asfalténov k malténom asfalt tuhne a tým dochádza k jeho starnutiu.
- **Asfaltové a olejové živice.** Ovplyvňujú plastické a pružné vlastnosti asfaltu, jeho ťažnosť, lepivosť a spojivové vlastnosti. Sú to tuhé látky rozpustné vo väčšine organických rozpúšťadiel.
- **Asfaltogénne kyseliny.** Viskózne chemicky nestabilné látky tmavohnedej farby rozpustné vo väčšine organických rozpúšťadiel.
- **Parafíny.** Tuhé vysokomolekulárne uhľovodíky rozpustné v chloroforme, etyléteri, sírouhlíku a v minerálnych olejoch. Sú odolné voči účinkom chemických činidiel.

V rámci zloženia sa pozeráme najmä na zastúpenie nerozpustných asfalténov a rozpustných malténov. Tieto dve zložky dodávajú asfaltu jeho charakteristické vlastnosti. [5] [17] [18]



Obrázok č. 21: Komponenty asfaltu [17]

3.2.2. Asfalty podľa pôvodu

Asfalt ako hydroizolačný a tmeliaci materiál bol používaný už v starovekých civilizáciách. Ide o látku vznikajúcu odparovaním z ropy. Pokiaľ tento proces prebehne v prírode samovoľne, ide o asfalty prírodné. Spracovaním ropy získavame ropné asfalty.

Prírodné asfalty sú polotuhej až tuhej konzistencie so značnou prímiesou minerálnych látok. Takýchto zdrojov je málo a na účely výstavby pozemných komunikácií sa nepoužívajú. Prírodných nálezísk asfaltu je vo svete málo. Najznámejším asfaltovým jazerom je Trinidad o rozlohe približne 35 ha a hĺbke okolo 90 m. Čistý asfalt sa získava ťažením a je čistený zahriatím na 160 °C a nasledovným prelievaním cez sitá zachycujúce hrubé nečistoty a organické zvyšky. Výsledný produktom je asfalt s názvom Trinidad Epuré. Je však príliš tvrdý na použitie ako spojivo do asfaltových zmesí, preto sa dodatočne mieša s mäkkým ropným asfaltom bežne používaným v cestnom stavitelstve. Medzi ďalšie známe prírodné náleziská patria Bermudy, Venezuela a v Európe albánska Selenica. V cestnom stavitelstve sa však používajú predovšetkým asfalty ropné.



Obrázok č. 22: Asfaltové jazero Trinidad: Pitch Lake [20]



Obrázok č. 23: Prírodný asfalt z jazera Trinidad [21]

Ropné asfalty sú posledným produktom pri spracovaní surovej ropy. Získavajú sa postupom skladajúcim sa z frakčnej destilácie ropy, vákuovej destilácie mazutu a prípadnou oxidáciou vákuových zvyškov.

Ropa je olejovitá kvapalina tmavej farby a hustoty menšej než voda skladajúca sa zo zmesi rôzne štruktúrovaných uhľovodíkov. V kvapalnej časti sú rozpustené plynné a tuhé uhľovodíky spolu s organickými zlúčeninami, vysokomolekulárnymi zlúčeninami a organo-kovovými zlúčeninami. Z chemického hľadiska tvorí prevažnú časť ropy uhlík

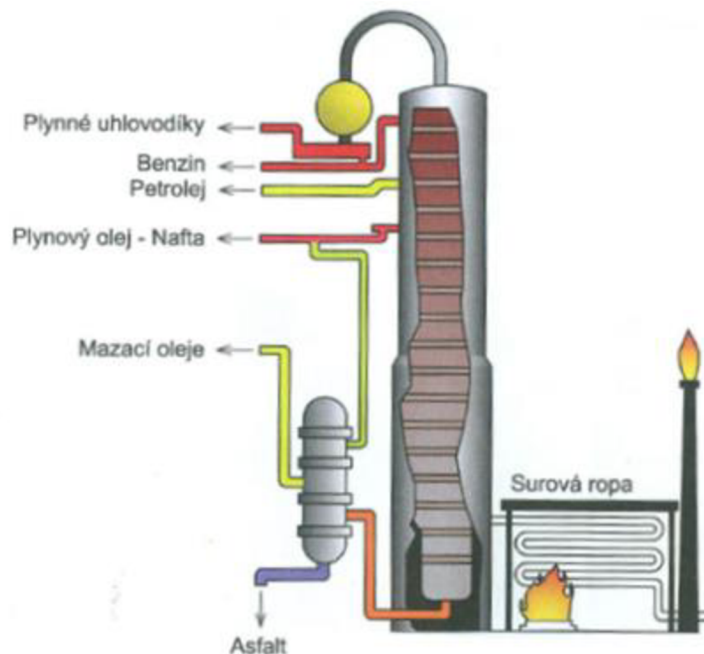
(84-87 %), ďalej vodík (11-14 %), síra (4 %), dusík (1 %) a kyslík. Ďalšie látky sú obsiahnuté v stopových množstvách.

Ropy podľa obsahu asfaltických látok delíme na:

- ropy asfaltické s väčším množstvom asfaltických látok
 - ropy poloasfaltické (poloparafinické) s menším množstvom asfaltických látok
 - ropy neasfaltické (parafinické) so zanedbateľným množstvom asfaltických látok
- [5] [19]

3.2.3. Výroba asfaltov

Postup výroby asfaltov je trojstupňový. V prvom stupni sa ropa zo skladovacích nádrží prečerpá cez výmenníky do odsolovacej stanice, kde je prevažný obsah solí elektrostaticky odstránený. Následne sa v odparovacej kolóne odstránia najľahšie podiely. Po ďalšom predhriatí v peci sa asfalt nastrekuje do atmosférickej destilačnej kolóny, kde dôjde k oddestilovaniu kerozínu, benzínu, petroleja a oleja. Oстане destilačný zvyšok zvaný mazut, z ktorého ďalej vo vákuovej destilačnej kolóne pri podtlaku oddestilujú tri olejové frakcie s rôznou viskozitou. Konečným produktom celého procesu je vákuový asfalt. Týmto postupom dostaneme z jednej tony ropy približne 40 kg asfaltu.



Obrázok č. 24: Schéma frakčnej destilácie ropy [5]

Takto vzniknutý asfalt sa ďalej môže upravovať dofúkaním vzduchu (oxidáciou) alebo modifikáciou prísadami.

Kontinuálna oxidácia je proces prebiehajúci vo vertikálnych oxidačných reaktoroch. Po predhriatí na 220 °C sa privádza k hornej časti reaktoru a nastrekuje sa pomocou trubice na spodnú časť reaktoru, kde dochádza k ďalšiemu ohrevu až do 250 °C. Oxidáciou sa štruktúra jednotlivých zložiek uhľovodíkov mení, čím sa cielene menia i vlastnosti asfaltového spojiva. Zvyšuje sa množstvo asfalténov, čo vedie k zvyšovaniu bodu mäknutia a poklesu hodnoty penetrácie a bodu lámavosti.

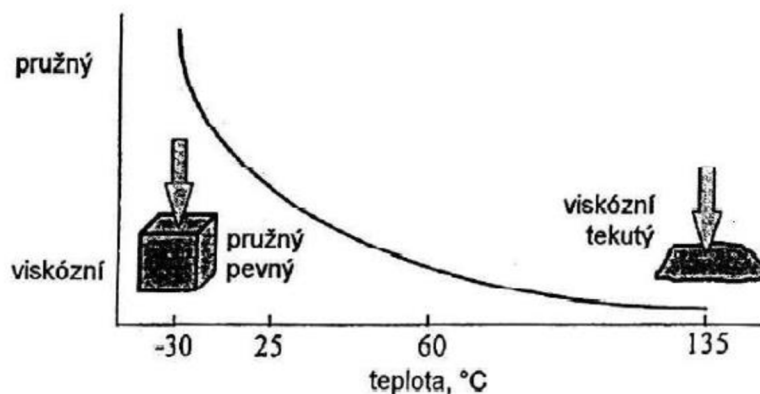
Podľa spracovania sú asfalty delené na:

- **Destilačné asfalty** získané destiláciou, dodatočne neupravované, vhodné pre cestné stavitelstvo
- **Polofúkané asfalty** vyrábané z asfaltov destilačných procesom umelého starnutia, kontinuálnej oxidácie vákuového zvyšku
- **Fúkané asfalty** získané z destilačných asfaltov oxidáciou s cieľom získať vysoko viskózne asfalty pre použitie v izolácii proti vlhkosti a vode
- **Modifikované asfalty** vyrábané z destilačných alebo polofúkaných asfaltov upravovaných prísadami k docieleniu vysoko namáhaných asfaltových zmesí používaných v cestnom stavitelstve. [5] [19]

3.2.4. Teplotná citlivosť asfaltov a asfaltových spojív

Najdôležitejšou a najtypickejšou vlastnosťou asfaltov je jeho teplotná citlivosť. Správanie asfaltového spojiva je priamo závislé od teploty a preto akákoľvek skúška spojiva musí byť vždy udávaná s príslušnými tepelnými údajmi. Pri nízkych teplotách sa správanie asfaltu podobá pružnej pevnej látke, kým za teplôt vysokých viskózne kvapaline, pričom úroveň viskozity je závislá na teplote. Za bežných teplôt vykazuje asfalt visko-elastické vlastnosti.

Viskozita vyjadruje silový odpor voči deformácii v závislosti na rýchlosti deformácie a dĺžke zaťaženia. Práve rýchlosť zaťaženia je faktor, ktorý berieme do úvahy pri návrhu vrstiev vozovky pre dosiahnutie požadovanej odolnosti. Pri nízkych rýchlostiach alebo státi vozidiel (autobusové zastávky, parkovacie plochy) vznikajú veľké deformácie, kým pri vysokej rýchlosti vozidiel sú deformácie malé. [5]



Obrázok č. 25: Teplotná závislosť visko-elastických vlastností asfaltu [19]

Praktické použitie asfaltu v daných klimatických podmienkach je vymedzené teplotným rozsahom zvaným obor použiteľnosti. Jeho vrchnú hranicu definuje teplota bodu mäknutia zo skúšky *Stanovení bodu mäknutí metódou kroužek a kulička*, spodná hranica je určená teplotou bodu lámavosti, ktorú možno určiť metódou *Stanovení bodu lámavosti dle Fraasse*. [5]



Obrázok č. 26: Obor použiteľnosti asfaltových spojív [5]

3.2.5. Reologické vlastnosti asfaltu a asfaltových spojív

Akékoľvek usporiadané štruktúry organických zlúčenín, asfalty nevynímajúc, podliehajú starnutiu. Starnutie spôsobuje zhoršovanie vlastností asfaltu. Spôsobuje to vzdušný kyslík, pôsobenie zvýšenej teploty a ultrafialového žiarenia. Starnutie ovplyvňuje výsledky skúšok, hodnota penetrácie a bodu mäknutia sa zvyšuje, kým penetračný index sa znižuje.

Rozoznávame tri typy starnutia podľa prevažujúceho vplyvu:

- Starnutie odparovaním
- Oxidačné starnutie
- Štruktúrne starnutie

Starnutie odparovaním je spôsobené nevratným odparovaním ľahkých olejových komponentov pri spracovaní asfaltu za tepla. Odparovanie týchto podielov je tým väčší, čím je asfalt mäkkší, pôsobiaca teplota vyššia a povrch väčší. Zastúpenie ľahkých uhľovodíkov je u bežných cestných asfaltov malé, tým pádom dochádza k malej strate tekavých olejov. Starnutie odparovaním vzhľadom k celkovému procesu starnutia tak tvorí minimálnu časť celkových zmien asfaltu.

Oxidačné starnutie je z hľadiska posudzovania vlastností významnejšie. Dochádza k nemu pri styku asfaltu so vzduchom. Jeho priebeh je zo začiatku pomalý a so zvyšujúcou sa teplotou sa oxidačný účinok zvyšuje. Každé zvýšenie teploty o 10 °C reakčnú rýchlosť zdvojnásobí. Vplyvom slnečného žiarenia dochádza k urýchleniu absorpcie kyslíka na povrchu asfaltu a tým k urýchleniu starnutia. Naopak, oxidácia bez prístupu svetla postupuje pomaly. Tento typ starnutia spôsobuje nezvratné zmeny a stratu spojivových vlastností asfaltu.

Štruktúrne starnutie súvisí so zmenou koloidnej štruktúry asfaltov. Koloidné rozptýlené častice asfalténov sa spájajú do väčších zoskupení (agregátov). Ich merný povrch klesá, uvoľňujú sa oleje vsakujúce do kameniva a celá sústava sa nevratne mení smerom ku gélovej rôsolovitej starnúcej štruktúre. Asfalt tvrdne, pevne, krehne a stráca plastické a elastické vlastnosti. V priebehu času za spolupôsobenia vzduchu a svetla sa štruktúrne starnutie prejavuje tvorbou trhlín.

Podľa zmeny vlastností spojív rozlišujeme medzi starnutím:

- Krátkodobým
- Dlhodobým

Krátkodobé starnutie zahŕňa pôsobenie teploty a času pri spracovaní, manipulácií, skladovaní a pokládke asfaltu. Napriek tomu, že obaľovanie je krátkodobý proces, asfalt je rozprestieraný na veľký povrch obaľovaných zŕn. To vedie k odpareniu tekavých podielov asfaltu, oxidácii a ďalším reakciám spôsobujúcim zmeny vlastností asfaltu. Z praxe sa uvádza, že pri obaľovaní do teploty 180 °C dôjde k zvýšeniu bodu mäknutia približne o 3,4 °C. Pri obaľovaní nad 180 °C môže toto zvýšenie dosiahnuť hodnotu až 6 °C. Asfalt tak pri obaľovaní stvrdne o jednu gradáciu. Ďalším vplyvom na krátkodobé starnutie je skladovanie v zásobných silách na obaľovniach. Doba skladovania má byť do 15 hodín, pričom vstupné dvere musia byť vodotesné, inak dochádza k oxidácii a ochladzovaniu zmesi a tým k stvrdnutiu spojiva, čomu je snaha

zabrániť. Pri preprave asfaltovej zmesi na stavbu a pokládke tak už k ďalšiemu tvrdnutiu nedochádza.

Dlhodobé starnutie počína pokládkou vrstvy a definuje zmenu vlastností asfaltu v priebehu jeho užívania. Najvýznamnejším vplyvom je oxidatívne starnutie, čiže vplyv vzduchu, ktorý je v kontakte s asfaltom cez povrch obrusnej vrstvy, ale aj cez póry v medzerovitej zmesi.

Na dlhodobé starnutie asfaltových vrstiev má vplyv:

- Medzerovitosť
- Hrúbka asfaltového filmu
- Modifikačná prísada.

Väčšia medzerovitosť a menšia hrúbka asfaltového filmu obalujúceho kamenivo zväčšujú rýchlosť oxidácie, kým modifikačné prísady pridávajúce sa do asfaltového spojiva starnutie spomaľujú a zmierňujú jeho účinky. [5]

3.2.6. Cestné asfalty

Pre cestné stavitelstvo majú hlavný význam asfalty cestné. Označujú sa na základe hornej a dolnej hranice intervalu zistenej zo skúšky penetrácie ihlou pri teplote 25 °C udávanej v penetračných jednotkách (1 p.j. = 0,1 mm). Ide o asfalty gradácie 20/30, 30/45, 35/50, 40/60, 50/70, 70/100, 100/150 a 160/220. Najväčší podiel vo výrobe tvoria polofúkané asfalty gradácie 20/30, 30/45, 50/70 a 70/100. Asfalty gradácie 40/60, 50/70 a 70/100 sa používajú najmä vo výrobe asfaltových zmesí obaloovaných za tepla alebo do úprav ako sú nátery a prísady do asfaltových emulzií či riedených a modifikovaných asfaltov. Tvrdé asfalty gradácie 20/30 a 30/45 nájdu využitie pri príprave zmesí liatych asfaltov.

Označenie a technické požiadavky na kvalitu cestných asfaltov rieši norma ČSN EN 12591: *Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty*. Podľa tejto normy sa asfalty delia do troch skupín.

- Asfalty definované hodnotou penetrácie pri 25 °C v rozmedzí 20 p.j. - 330 p.j. a bodom mäknutia. Tieto asfalty sú bežne používané v oblasti strednej Európy.
- Asfalty definované hodnotou penetrácie pri 25 °C v rozmedzí 250 p.j. - 800 p.j., penetráciou pri 15 °C a dynamickou viskozitou pri 60 °C.

- Asfalty definované a špecifikované kinetickou viskozitou pri 60 °C pre mäkké asfalty [18].

Najčastejšie používanými cestnými asfaltmi sú asfalty s penetráciou 35-100 jednotiek. Požiadavky na ne sú uvedené v **tabuľke č. 5**.

| Vlastnosť | Jednotka | Druh | | | |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | | 20/30 | 30/45 | 50/70 | 70/100 |
| Penetrácia pri 25 °C | 0,1 mm | 20 až 30 | 30 až 45 | 50 až 70 | 70 až 100 |
| Bod mäknutí | °C | 55 až 63 | 52 až 60 | 46 až 54 | 43 až 51 |
| Odolnosť ke stárnutiu pri 163 °C | | | | | |
| - zbylá penetrácia, min. | % | 55 | 53 | 50 | 46 |
| - zvýšenie bodu mäknutí, max. | °C | 10 | 11 | 11 | 11 |
| - zmena hmotnosti max. | % | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,8 |
| Bod lámavosti dle Fraasse, max. | °C | - | -5 | -8 | -10 |
| Bod vzplanutí, min. | °C | 240 | 230 | 230 | 230 |
| Rozpustnosť, min. | % hm. | 99,0 | 99,0 | 99,0 | 99,0 |

Tabuľka č. 5: Požiadavky na najbežnejšie používané cestné asfalty [22]

3.2.7. Modifikované asfalty

Zvyšujúce sa dopravné zaťaženie a požiadavky na kvalitu asfaltových zmesí vyžadujú zmenu vlastností asfaltov smerom k vyššej kvalite. Bežne vyrábané asfalty nie sú dostačujúce, čo vedie k používaniu aditív (modifikátorov). Modifikátory sú organické, obvykle makromolekulárne látky, ktoré po pridaní malého množstva k základnému asfaltu menia chemické alebo fyzikálno-mechanické vlastnosti ako sú:

- Zlepšenie príľnavosti asfaltu ku kamenivu
- Zníženie teplotnej citlivosti
- Zníženie krehkosti v oblasti nízkych teplôt (zníženie bodu lámavosti)
- Zvýšenie bodu mäknutia, čím sa zväčší obor plasticity
- Zvýšenie odolnosti voči vzniku trvalých deformácií
- Zvýšenie kohézie, súdržnosti a lepivosti asfaltu za vyšších teplôt
- Zníženie náchylnosti asfaltu voči stárnutiu [18] [19]

3.2.7.1 Modifikačné prísady

Pre modifikáciu asfaltov sa najčastejšie používajú polyméry. Ide o makromolekuly s opakujúcou sa skupinou atómov, najmä o jednorozmerné polyméry na báze elastomerov alebo plastomerov. Medzi plastomery patrí termoplastický kaučuk typu SBS alebo SIS výrobného označenia Cariflex. Približné množstvo modifikačnej prísady závisí od druhu asfaltu, približne sa však pohybuje v intervale 2 – 10 % hmotnosti asfaltu.

Plastomery nepolárneho charakteru, ako napríklad EVA (etylénvinylacetát), možno pridávať do ropného asfaltu v množstve 2 – 5 % hmotnosti. Vlastnosti asfaltov je možné ovplyvňovať i látkami ako je polyetylén, polypropylén, drvená odpadová pryž alebo rôznymi typmi typy prírodných či umelých voskov. [18]

3.2.7.2 Polymérom modifikované asfalty

Sú najbežnejším typom modifikovaných asfaltov. Požiadavky na polymérom modifikované asfalty definuje norma *ČSN EN 14023: Asfalty a asfaltová pojiva - Systém špecifikácie pro polymerem modifikované asfalty*. Cestné asfalty modifikované pryžovým granulátom ďalej definuje norma *ČSN 65 7222-1: Asfalty a asfaltová pojiva - Silniční modifikované asfalty - Část 2: Asfalty modifikované pryžovým granulátom*.

Pridaním polymérov sa menia najmä reologické vlastnosti asfaltových spojív a zlepšuje sa ich správanie v oblasti nízkych a vysokých teplôt. Za nižších teplôt sú modifikované asfaltové spojivá menej tvrdé ako bežné asfaltové spojivá a naopak za teplôt vyšších sú menej mäkké. Polyméry ďalej zlepšujú priľnavosť ku kamenivu a znižujú náchylnosť voči starnutiu. Modifikované asfalty sú trvanlivejšie, odolnejšie voči tvorbe mrazových trhlin a voči deformácii pri vyšších teplotách.

Polyméry rozdeľujeme na:

- **Termosetické polyméry**, ktoré sa nepoužívajú pri modifikácii, pretože pri zahriatí nevratne tvrdnú.
- **Termoplastické polyméry**, ktoré sa vmiešavajú do asfaltu za účelom modifikácie za vysokých teplôt, kedy sa stávajú plastickými. Výsledná zmes má vysokú viskozitu. Termoplastické polyméry môžeme ďalej rozdeliť na elastomery a plastomery.

Iné modifikačné prísady sú napríklad pryžový granulát zrnitosti 0/1 mm až 0/2 mm, po ktorého pridaní do asfaltu dostávame modifikované spojivo CRmB (Crumb Rubber Modified Bitumen). [5] [19]

Požadované výsledky základných skúšok na polymérom modifikovaných asfaltoch podľa *ČSN EN 14023* sú uvedené v tabuľke.

| Vlastnosť | Metóda zkušenia | Jednotka | Triedy pro všechny polymerem modifikované asfalty | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|----------------------------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | | | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | |
| Penetrace při 25 °C | EN 1426 | 0,1 mm | 10–40 | 25–55 | 45–80 | 40–100 | 65–105 | 75–130 | 90–150 | 120–200 | 200–300 | | |
| Bod měknutí | EN 1427 | °C | ≥ 80 | ≥ 75 | ≥ 70 | ≥ 65 | ≥ 60 | ≥ 55 | ≥ 50 | ≥ 45 | ≥ 40 | | |
| Koheze ^a | Silová duktilita ^a (Protahování 50 mm/min) nebo | EN 13589 následně EN 13703 | J/cm ² | ≥ 3 při 5 °C | ≥ 2 při 5 °C | ≥ 1 při 5 °C | ≥ 2 při 0 °C | ≥ 2 při 10°C | ≥ 3 při 10°C | ≥ 0,5 při 15°C | ≥ 2 při 15°C | ≥ 0,5 při 20°C | ≥ 0,5 při 25°C |
| | Zkouška v tahu ^a (Protahování 100 mm/min) nebo | EN 13587 následně EN 13703 | J/cm ² | ≥ 3 při 5 °C | ≥ 2 při 5 °C | ≥ 1 při 5 °C | ≥ 3 při 0 °C | ≥ 3 při 10°C | | | | | |
| | Zkouška kyvadlem Vialit ^a (rázová zkouška) | EN 13588 | J/cm ² | ≥ 0,7 | | | | | | | | | |
| Odolnost proti stárnutí ^b | Zbýlá penetrace | EN 12607-1 | % | ≥ 35 | ≥ 40 | ≥ 45 | ≥ 50 | ≥ 55 | ≥ 60 | | | | |
| | Zvýšení bodu měknutí | | °C | ≤ 8 | ≤ 10 | ≤ 12 | | | | | | | |
| | Změna hmotnosti ^c | | % | ≤ 0,3 | ≤ 0,5 | ≤ 0,8 | ≤ 1,0 | | | | | | |
| Bod vzplanutí | EN ISO 2592 | °C | ≥ 250 | ≥ 235 | ≥ 220 | | | | | | | | |

^a Vybírá se jedna metoda koheze podle konečného použití. Pro poliva nátěrových technologií vozovek se použije pouze zkouška kyvadlem Vialit (EN 13588).

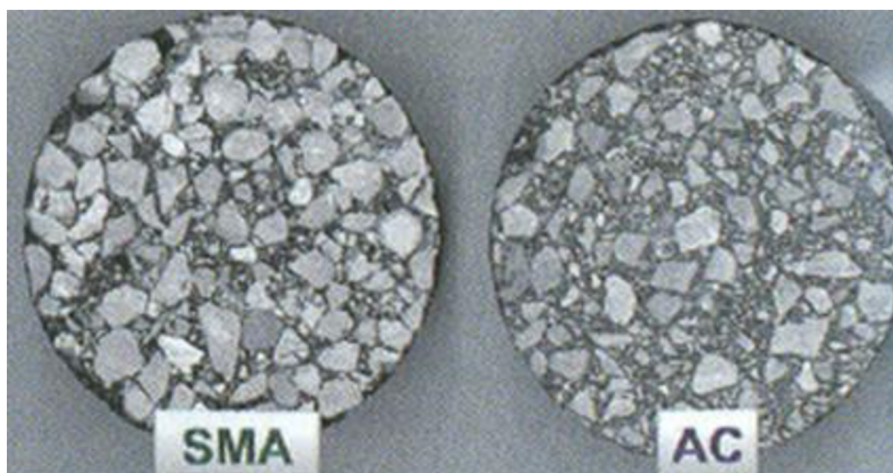
^b Hlavní zkouškou je RTFOT při 163°C. Pro některé výše viskózní polymerem modifikované asfalty, u nichž je viskozita příliš vysoká pro vznik pohyblivého filmu, nelze provádět zkoušku RTFOT při referenční teplotě 163 °C. V těchto případech se postup provádí při 180 °C podle EN 12607-1.

^c Změna hmotnosti může být kladná nebo záporná.

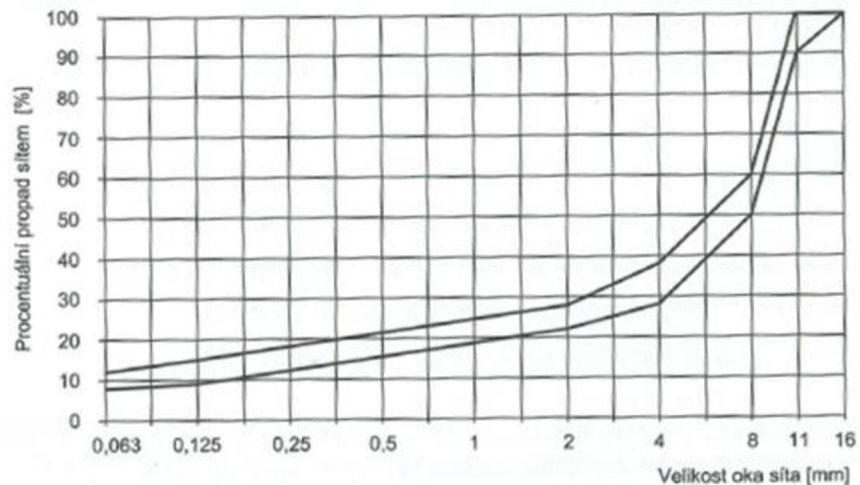
Tabuľka č. 6: Požiadavky na modifikované asfalty [23]

3.2.8. Asfaltový koberec mastixový

Asfaltový koberec mastixový označovaný ako SMA (Stone Mastix Asphalt) je určený pre použitie do obrusných vrstiev vysoko zaťažených cestných a diaľničných vozoviek a križovatiek. Špecifická je preň neplynulá čiara zrnitosti, kde kostru kameniva tvorí najhrubšia frakcia. Kamenivo do veľkosti 2 mm slúži ako výplň a spoločne s kamennou múčkou a asfaltovým spojivom tvorí asfaltovú maltu zvanú mastix. Takýmto spôsobom sú zrná nosnej kostry vzájomne stmelené. Medzerovitosť asfaltovej zmesi sa pohybuje medzi 2,5 – 4,5 %, pri dodržaní tejto medzerovitosti sa považuje vrstva za nepriepustnú.



Obrázok č. 27: Porovnanie zrnitosti zmesí typu SMA a AC [5]



Obrázok č. 28: Typická čiara zrnitosti zmesi SMA 11 S [5]

Výhody asfaltového koberca mastixového sú:

- Vyššia odolnosť voči tvorbe trvalých deformácií
- Vyššia odolnosť voči tvorbe mrazových trhlin
- Pomalý proces starnutiu
- Vyššia priľnavosť k podkladu
- Makrotextúra tlmíaca hluk z dopravy

V Českej republike sa pre výrobu SMA používajú iba modifikované asfalty spolu so stabilizačnými prísadami zabraňujúcimi stekaniu asfaltového spojiva (overuje sa skúškou stekavosti). Takýmito prísadami sú napríklad celulózoové alebo akrylátové vlákna. [5]

V **tabulke č.7** je uvedená vhodnosť použitia asfaltových spojív podľa triedy dopravného zaťaženia a typu zmesi.

| Označení směsi | Tloušťky vrstev | Třída dopravního zatížení ²⁾ | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|---|---|--|-----|--|---|
| | | S | I | II | III | IV | V |
| Obrusné vrstvy³⁾ | | | | | | | |
| SMA 4 SMA 5 | 15–30 | | | | | 50/70, 70/100; PMB 45/80-50, 55,-60, 60/105-45 | |
| SMA 8 S | 25–40 | PMB 25/55-55, -60, -65; 45/80-50, -55, -60; 60/105-45, -70; speciální modifikovaný asfalt ⁴⁾ ; 50/70 | | | | | |
| SMA 8 + | 20–40 | | | 50/70; PMB 25/55-55, -60, -65; 45/80-50, -55, -60; 60/105-45; speciální modifikovaný asfalt ⁴⁾ | | | |
| SMA 8 | 20–40 | | | | | 50/70, 70/100 | |
| SMA 11 S | 35–45 | PMB 25/55-55, -60, -65; 45/80-50, -55, -60; 60/105-70 speciální modifikovaný. asfalt ⁴⁾ ; 50/70 | | | | | |
| SMA 11 + | 30–50 | | | 50/70; PMB 25/55-55, -60, -65; 45/80-50, -55, -60; 60/105-70, -45; speciální modifikovaný asfalt ⁴⁾ | | | |
| SMA 11 | 30–50 | | | | | 50/70, 70/100 | |
| SMA 16 + | 40–60 | | | PMB 25/55-55, -60, -65; 45/80-50, -55, -60; 60/105-70, -45; speciální modifikovaný asfalt ⁴⁾ ; 50/70 | | | |
| SMA 16 | 40–60 | | | | | 50/70, 70/100 | |

¹⁾ K dosažení technických požadavků asfaltových směsí lze použít u uvedených asfaltů podle ČSN EN 12591 jejich kombinace s přírodními asfalty, vosky, pigmentovými složkami a polymerními nebo dalšími chemickými přísadami.

²⁾ V případě pravých jízdních pruhů ve stoupání nebo jiných úseků zatížených těžkými nákladními vozidly, kde rychlost klesne pod 50 km/h, se dopravní zatížení uvažuje podle předpisu – viz poznámka¹⁾.

³⁾ Použití nemodifikovaných asfaltových pojiv s penetrací menší než 50 p.j. a modifikovaných pojiv s penetrací menší než 45 p.j. se nedoporučuje v nadmořské výšce vyšší než 450 m.n.m. s ohledem na možné nebezpečí vzniku mrazových trhlin.

⁴⁾ Speciální modifikovaný asfalt představuje silniční asfalt podle ČSN EN 12591 modifikovaný přísadami podle článku 4.1 této normy, které nejsou předmětem ČSN EN 14023 a jejichž vlastnost byla prokázána výzkumem nebo praxí.

– Jako vyrovnávací vrstvu pod nově pokládanou ložní nebo obrusnou vrstvu lze použít uvedené směsi příslušné kvality (též ACO 8, ACO 11S, ACO 11+, ACO 11) deklarované jako obrusné vrstvy, avšak s ohledem na tuhost se doporučuje upravit mezerovitost směsi tak, aby odpovídala požadavkům na ložní vrstvu. Vyrovnávací vrstvy jsou pokládány v minimální tloušťce 2D s druhem pojiva odpovídajícího umístění v konstrukci vozovky a TDZ. V případě použití vyrovnávací vrstvy pod litý asfalt (MA), může být maximální mezerovitost až $V_{max} = 7\%$ obj. (8,5 % pro kontrolní zkoušky).

Tabuľka č. 7: Doporučený typ zmesi podľa intenzity dopravy vozidiel [24]

3.2.8.1 Označenie asfaltového koberca mastixového

Základné označenie je **SMA D**, kde SMA označuje asfaltový koberec mastixový a D je veľkosť oka horného sita najhrubšej frakcie použitého kameniva udaného v milimetroch. Označenie sa ďalej dopĺňa o druh použitého spojiva:

- SMA D S spojivo
- SMA D + spojivo
- SMA D spojivo

Napríklad **SMA 11 S PMB 25/55-55** označuje asfaltový koberec mastixový s hodnotou veľkosti maximálneho zrna 11mm pre obrusné vrstvy vozoviek triedy dopravného zaťaženia napríklad I a s použitím polymérom modifikovaného asfaltu 25/55-55.

Označenie **SMA 8 + 50/70; 40 mm** vypovedá o asfaltovom koberci mastixovom s veľkosťou zrna maximálne 8 mm, pri triede dopravného zaťaženie napríklad III, s cestným asfaltom 50/70 a hrúbkou vrstvy 40 mm. [24]

4. PRAKTICKÁ ČASŤ

Keďže norma povoľuje použitie R-materiálu iba do určitých typov zmesí, skúma sa vplyv jeho použitia v zmesiach typu asfaltový koberec mastixový SMA. Tomu je venovaná praktická časť, v ktorej sú vybrané vzorky s rôznym zastúpením R-materiálu podrobené sérii skúšok. Na základe zistených vlastností môžeme posúdiť vplyv R-materiálu na kvalitu asfaltových zmesí z hľadiska asfaltového spojiva.

4.1 SKÚŠOBNÝ ÚSEK II/227

Cesta II. triedy číslo II/227 sa nachádza v Stredočeskom kraji v okrese Rakovník. Vedie z mesta Žatec odbočením z kruhového objazdu smerom na juh a končí v obci Křivoklát pod hradom napojením na cestu II/201. Jej celková dĺžka je približne 48 km. Cesta II/227 sa križuje s rýchlostnou cestou R6 a približne v polovici úseku so železničnou traťou. Cesta je dôležitou súčasťou miestnej infraštruktúry a je využívaná počas neprejazdnosti rýchlostnej cesty R6 z dôvodu opráv a havárii. V roku 2016 sa navyše zahájila výstavba obchvatu obce Řevničov a taktiež rozširovanie úseku vedúceho z Nové Strašecí do Řevničova na štvorpruhové usporiadanie.

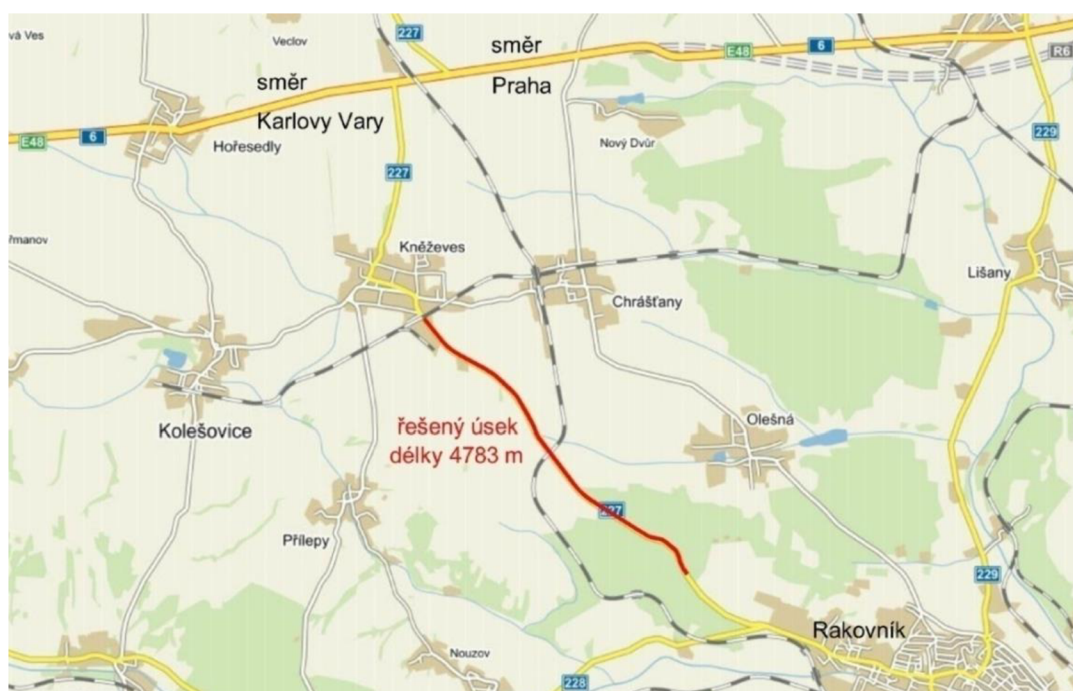
Daná cesta bola teda už v čase návrhu rekonštrukcie značne vyťažovaná a na základe uvedených faktov bolo predpokladané značné zvýšenie intenzít dopravy. Pri vyhodnocovaní sa použili informácie zo sčítania dopravy podľa ŘSD v roku 2010 s hodnotami: priemerné denné intenzity 2059 vozidiel, orientačná skladba dopravy 352 TV, 1688 OV, 9 M podľa hodnoty RPD1 voz / 24 hod. [25]

Na základe uvedených faktov sa v roku 2016 v rámci projektu „Nové technológie“ financovaným SFDI pristúpilo k rekonštrukcii danej cesty s použitím asfaltového koberca mastixového SMA s R-materiálom pridaným do obrusnej vrstvy vozovky.



Obrázok č. 29: Rekonštrukcia cesty II/227 v roku 2016

V rámci pokládky tejto komunikácie bol zavedený skúšobný úsek o dĺžke 4783m nachádzajúcim sa medzi mestom Rakovník a obcou Kněževes.



Obrázok č. 30: Predmetný úsek skúmania [26]

Na predmetnom úseku bolo do obrusnej vrstvy skúšobne položených viacerô rôznych zmesí. Pre účely tejto bakalárskej práce boli vybrané štyri zmesi s použitím asfaltového koberca mastixového SMA s R-materiálom označované číslami 5, 6, 17 a 18.

Zmesou číslo 1 budeme označovať referenčnú zmes bez obsahu R-materiálu, s ktorou budú vlastnosti vybraných zmesí porovnávané.

4.2 POUŽITÉ ZMESI A ICH ZLOŽENIE

Pri rekonštrukcii daného úseku bol vyfrézovaný povrch vozovky do hĺbky 110 mm. Novo položené vrstvy sú:

- Asfaltový betón pre ložné vrstvy (ACL 22 S) v hrúbke 70mm
- Asfaltový koberec mastixový s obsahom R-materiálu ako obrusná vrstva SMA 11 S v hrúbke 40mm

Zmesi boli experimentálne navrhnuté na VUT v Brne v rámci projektu TAČR. Overené boli súborom štandardných parametrov (odolnosť proti vzniku trvalých deformácií, stiekavosť spojiva) a súborom funkčných charakteristík (tuhosť a správanie pri nízkych teplotách).

Použité bolo tradičné asfaltové spojivo 50/70 so zlepšujúcou prísadou Storelastic a modifikované asfaltové spojivo PMB 45/80-55 s celulóзовými vláknami S-CEL 7G, bežne používanými v ČR v zmesiach typu SMA.

R-materiál zabudovaný do vozovky môže byť dvojakého typu. Prvý z nich je v ČR bežne dostupný R-materiál – vyfrézované asfaltové zmesi z obrusnej, ložnej i podkladnej vrstvy s obsahom prevažne cestného asfaltu. Dávkovanie tohto R-materiálu je v rozmedzí 20 až 30 %. Druhý typ R-materiálu je frézovaný iba zo zmesí typu SMA. Obsahuje teda modifikovaný asfalt a kamenivo má prerušenú čiaru zrnitosti. Tento R-materiál je preto možné dávkovať vo väčšom množstve a to 30 % až 50 %. V tejto bakalárskej práci skúmam iba zmesi s druhým uvedeným typom R-materiálu.

| Obrusná vrstva SMA 11S, 40 mm | | | | |
|-------------------------------|--------|----------------|----------|-------------|
| Zmes | Asfalt | R-materiál [%] | S-CEL 7G | Storelastic |
| 1 | PMB | - | áno | - |
| 5 | PMB | 30 | áno | - |
| 6 | PMB | 50 | áno | - |
| 17 | 50/70 | 30 | - | áno |
| 18 | 50/70 | 50 | - | áno |

Tabuľka č. 8: Skúmané zmesi a ich zloženie

4.2.1. Celulóзовé vlákna

Použitie boli vlákna S-CEL 7G od firmy CIUR, a.s., ktorá sa zaoberá recyklovaním papiera na celulóзовé vlákna používané pre izoláciu, priemysel a TZB.

Vlákna S-CEL 7G obsiahnuté v skúšobných zmesiach s polymérom modifikovaným asfaltom sa dodávajú v podobe vláknitého granulátu s priemerom granúl do 6 mm. Dávkujú sa v množstve 3 – 4 kg na 1 t zmesi. Výhody uvádzané výrobcom sú:

- Zvýšenie obsahu asfaltu v obaľovaných zmesiach vďaka vlastnostiam nosiču spojiva
- Zníženie stekavosti asfaltu
- Zlepšenie spracovateľnosti zmesi pri jej pokládke
- Zlepšenie tepelnej odolnosti zmesi
- Zlepšenie fyzikálne-mechanických vlastností asfaltových zmesí
- Zlepšenie vlastností zmesí za nízkych teplôt
- Zvýšenie životnosti komunikácií
- Zvýšenie odolnosti proti prieniku vody
- Zlepšenie tvarovej stálosti pri vysokom dopravnom zaťažení (znižuje vyjazdenie koľají)
- Zvýšenie odolnosti voči obrusu [27]



Obrázok č. 31: Skúška stekavosti pre rôzne dávkovanie celulóзовých vlákien [5]



Obrázok č. 32: *Celulózové vlákna S-CEL 7G* [27]

4.2.2. Prísada Storelastic

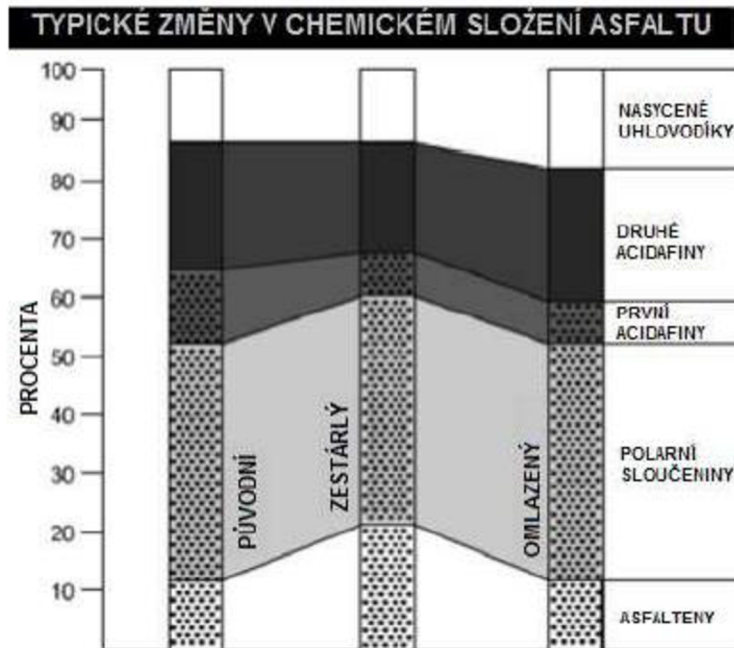
Storelastic je upravený gumový prášok používaný na modifikáciu asfaltu v suchom či mokrom procese. Použitie prísady Storelastic zlepšuje nízko-teplotné správanie asfaltov a tepelnú stabilitu modifikovaných asfaltov. Asfalty modifikované prísadou Storelastic majú podľa výrobcu v porovnaní s asfaltom modifikovaným polymérmi výrazne vyššiu odolnosť voči klimatickým vplyvom, vyššiu životnosť a zredukované emisie hlukom. Prísada taktiež zlepšuje príľnavosť asfaltového spojiva ku kamenivu. Storelastic je možné pridávať do všetkých bežných typov asfaltových zmesí.

Storelastic je kombináciou prísad z pryžového granulátu, Fischer-Tropsch vosku a rejuvenátoru Storflux. Ako alternatíva k polymérom modifikovanému asfaltu má zrovnateľný účinok. Vzniká špeciálnym výrobným procesom, kedy sú z pryžového granulátu získané vlastnosti podobné ako u polymérov, pričom vosk slúži ako ztužidlo a rejuvenátor ako zmäkčovadlo spojiva. Pryžový granulát sa vyrába z použitých pneumatík pre nákladné automobily, ktoré majú vysoký podiel prírodného kaučuku. Veľkosť zrna granulátu je do 0,8 mm. [28] [29]

4.2.3. Rejuvenátor

Rejuvenátory sú zmäkčujúce oživujúce látky (plastifikátory), ktoré boli špeciálne vyvinuté pre opätovné použitie rekultivovaného asfaltu. Obnovujú reologické vlastnosti zostarnutého asfaltového spojiva tým, že oživia jeho fyzikálne a chemické vlastnosti. Týmto procesom je možné zhodnotiť aj silne stvrdnuté spojivo do takej miery, že oživené asfaltové spojivo získa vlastnosti pôvodného nezostarnutého materiálu. R-materiál

obsahujúci zostarnuté spojivo sa tak po zmäkčení môže používať na výrobu vysoko kvalitných zmesí.



Obrázok č. 33: Účinok rejuvenátoru na zostarnuté asfaltové spojivo [30]

Medzi výhody rejuvenátorov patrí:

- Regenerácia staršieho spojiva
- Zníženie teploty bodu mäknutia
- Zvýšenie hodnoty penetrácie
- Úspora nákladov
- Úspora asfaltového spojiva
- Zachovanie prírodných zdrojov

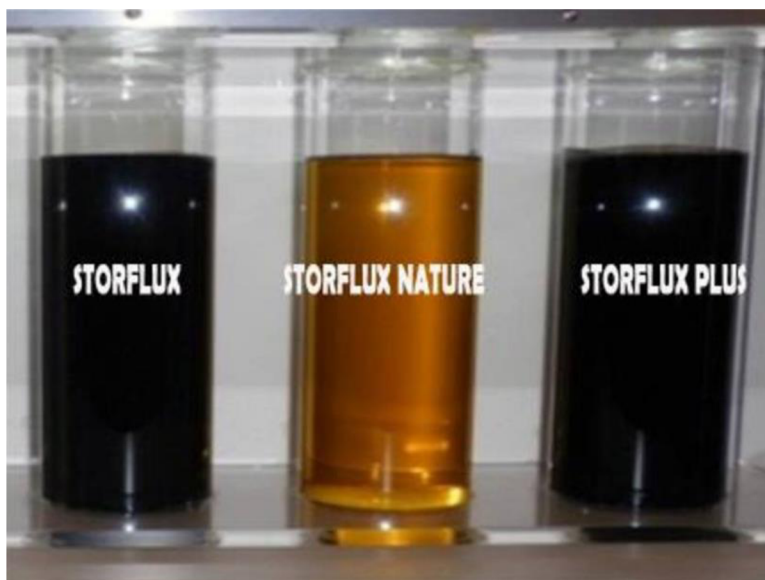
Rejuvenátory sa používajú do zmesí s R-materiálom v množstve vyššom ako 20 %. Použitie môžu byť aj do polymérom modifikovaných asfaltových zmesí. Dávkovanie tekutého rejuvenátoru alebo rejuvenátoru v pevnom stave v podobe peletiek prebieha najčastejšie v miešacom centre priamo do pridávaného R-materiálu. [3] [28]

V tejto bakalárskej práci bol použitý rejuvenátor Storflux od nemeckej firmy Storimpex. Ide o látku získanú sekundárnou rafináciou ropy patriacu medzi fluxačné oleje, rovnako ako ostatné výrobky značky Storimpex: Storflash, Storbit, Storelastic. Množstvo zmäkčovadla sa dávkuje na základe týchto troch faktorov:

- množstva asfaltového spojiva, ktoré sa má zregenerovať
- hodnoty bodu mäknutia daného spojiva
- technologického minima pre dobrú spracovateľnosť na obalovni

Technologické minimum značí také množstvo rejuvenátoru, aby R-materiál neostával prichytený na stenách paralelného bubna obalovne, kde sa rejuvenátor vstrekuje. Podľa skúsenosti bolo stanovené na 2 kg Storfluxu na 1 tonu R-materiálu, čiže 0,2 % hmotnosti.

Podľa výrobcu je potrebné dávkovať 1 % rejuvenátoru z obsahu asfaltového spojiva v R-materiáli, pokiaľ sa bod mäknutia má znížiť o 1 °C. Skúšané zmesi 5 a 6 obsahujú 0,4 % rejuvenátoru, v zmesiach 17 a 18 bolo použité technologické minimum 0,2 % rejuvenátoru. Bolo tak učené z toho dôvodu, že prísada Storelastic obsiahnutá v zmesiach 17 a 18 už obsahuje olej s rejuvenačnými účinkami. [28] [29] [31]



Obrázok č. 34: Rejuvenátory od firmy Storimpex [32]

| Veličina | Jednotka | Hodnota |
|-------------------------------|--------------------|------------------|
| Hustota pri 15°C | g/L | 890 – 915 |
| Viskozita pri 40°C | mm ² /s | 80 – 120 |
| Bod vzplanutí | °C | > 220 |
| Obsah síry | % | 0,45 |
| Obsah vody | % | < 0,1 |
| Obsah popílku | % | < 1,5 |
| Bod tuhnutí | °C | -15 |
| PCB (polychlorované bifenyly) | mg/kg | není zjistiteľný |
| Polyaromatické uhlovodíky | mg/kg | < 100 |
| Benzo[a]pyren | mg/kg | < 1 |

Tabuľka č. 9: Požiadavky na vlastnosti zmäkčovadla Storflux podľa EN 932-2 [33]

4.3 SKÚŠKY NA SKÚMANÝCH ZMESIACH

Na uvedených zmesiach som vykonala súbor skúšobných metód, ktorými som zisťovala vybrané vlastnosti asfaltových zmesí. Ide o skúšky:

- Znovuzískanie extrahovaného spojiva podľa ČSN EN 12697-3: *Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – část 3: znovuzískání extrahovaného pojiva*
- Sitový rozbor kameniva podľa ČSN EN 933-1: *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – část 1: stanovení zrnitosti – síťový rozbor*
- Konvenčné skúšky
 - Penetrácia ihlou podľa ČSN EN 1426 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*
 - Stanovenie bodu mäknutia metódou kroužek-kulička podľa ČSN EN 1427 *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička*
- Funkčné (reologické) skúšky
 - Oscilačné meranie podľa ČSN EN 14770 - *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR)*
 - MSCR podľa ČSN EN 16659 - *Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test)*

Funkčné skúšky sa aplikujú v čoraz väčšej miere popri skúškach konvenčných. Vďaka simulácii dopravného zaťaženia ťažkou nákladnou dopravou lepšie vypovedajú o reologických vlastnostiach asfaltového spojiva. [3]

4.3.1. Znovuzískanie extrahovaného spojiva

Podstatou skúšky je oddelenie asfaltovej zmesi pomocou vhodného rozpúšťadla, v prípade tejto práce sa použil tetrachloretylén. Z asfaltového roztoku sa odstránia nerozpustné pevné časti (kamenivo) a metódou vákuovej destilácie sa oddelí čisté asfaltové spojivo od použitého rozpúšťadla.

4.3.1.1 Postup skúšky znovuzískanie extrahovaného spojiva

V prvom kroku skúšky sa pripraví vhodná nádoba s uzáverom, do ktorej sa vloží vzorka asfaltovej zmesi a dostatočné množstvo rozpúšťadla tak, aby bola celá zmes

ponorená pod jeho hladinou. Snahou je použiť počas celého procesu čo najmenej rozpúšťadla, aby výsledná zmes na následnú destiláciu bola čo najmenšieho množstva. Vzorka asfaltovej zmesi má obsahovať medzi 120 až 150 g spätne získateľného asfaltového spojiva. Asfaltová zmes pritom nesmie byť umiestnená v rozpúšťadle dlhšie ako 24 hodín. [34]



Obrázok č. 35: *Váženie jednotlivých vzoriek R-materiálu*

V druhom kroku sa oddelí nerozpustná časť od asfaltovej zmesi. Extrahovanie prebieha v odvetrávanom digestore kvôli odvádzaniu silných výparov z rozpúšťadla. Použitý prístroj je prietoková laboratórna odstredivka, okrem nej je potrebné pripraviť filtračnú patrónu, filtračný papier, vhodné nádoby, separačný gél a nádobu s rozpúšťadlom. [34]



Obrázok č. 36: *Umiestnenie patróny s filtračným papierom [35]*

Všetky do seba dosadajúce súčasti sady sa potrujú vhodným mazadlom (žltou vazelínou) pre následné uľahčenie ich oddeľovania po ukončení skúšky. Do odstredivky

sa umiestni patróna s filtračným papierom na zachytenie jemných častíc. Nad lievik umiestnime vopred určenú sadu sít, pričom sito s najväčším okom je umiestnené hore a smerom nadol sa veľkosť oka znižuje. Do odtoku sa pripraví prázdna nádoba na zachytávanie asfaltového roztoku. Následne sa spustí odstreďovanie a po dosiahnutí požadovaných otáčok sa asfaltová zmes s rozpúšťadlom začne prelievať cez vrchné sito. Nádoba sa vyplachuje dočista rozpúšťadlom tak, aby na jej stenách ani dne neostali zvyšky zmesi. Všetok obsah nádoby musí prejsť sitami. Po vyprázdnení nádoby sa vezme horné sito a kamenivo sa rozpúšťadlom dočista umýva od asfaltového spojiva a menšieho kameniva dovedty, kým vytekajúci obsah je číry. Tento proces sa zopakuje so všetkými jednotlivými sitami. [34]



Obrázok č. 37: Prietoková laboratórna odstredivka pre oddelenie kameniva [35]

Asfaltový roztok oddelený od kameniva zachytený v odtokovej nádobe sa v treťom kroku ďalej spracuje vákuovou destiláciou v rotačnom vákuovom destilačnom zariadení, kde sa oddelí rozpúšťadlo od asfaltového spojiva vďaka rozdielnej teplote varu oboch zložiek. Zariadenie musí byť vybavené motorom s riadenou rýchlosťou otáčok, riadením tlaku vzduchu a možnosťou pripojenia destilačnej banky.

Predpripravený olejový kúpeľ umožňuje zahriatie oleja na teplotu T_3 uvedenú v **tabuľke č.10** podľa typu rozpúšťadla. Skúška prebieha v prvej fáze skúšky pri teplote olejového kúpeľa T_1 a tlaku P_1 a v druhej fáze pri teplote T_2 a tlaku P_2 . Hodnoty sú uvedené v **tabuľke č.10**.

Pre skúšku sa používa vysokoteplotný silikónový olej, u ktorého na rozdiel od iných olejov nehrozí trvalé poškodenie pri teplote nad 150 °C. Rýchlosť odparovania musí byť najmenej 1,5 l/h rozpúšťadla pri teplote olejového kúpeľa ($T_1 \pm 5$) °C. Teplota je kontrolovaná teplomerom s možnosťou merania teploty 100 až 200 °C s presnosťou na 0,5 °C. Súčasťou zariadenia je vákuová výveva, ktorá umožňuje zníženie absolútneho tlaku v uzavretom systéme na tlak P_2 . Meranie podtlaku v destilačnom prístroji je uskutočňované dvoma nanometrami s rozsahmi (0 až 100 ± 5) kPa a (0 až 5 ± 0,1) kPa. [34]

| Rozpouštedlo | | První fáze | | Druhá fáze | | Mezní teplota T_3 °C |
|--------------------|----------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|
| Popis | Bod varu °C | Teplota T_1 °C | Tlak P_1 kPa | Teplota T_2 °C | Tlak P_2 kPa | |
| Dichlorometan | 40,0 | 45 | 85 | 150 | 1,3 | 175 |
| 1.1.1 Trichloreťan | 74,1 | 80 | 30 | 160 | 2,0 | 185 |
| Benzen | 80,1 | 80 | 30 | 160 | 2,0 | 185 |
| Trichloretylen | 87,0 | 90 | 40 | 160 | 2,0 | 185 |
| Xylen | 140 | 120 | 30 | 180 | 2,0 | 205 |
| Toluen | 110,6 | 110 | 40 | 160 | 2,0 | 185 |
| Tetrachloretylen | 121 | 110 | 40 | 160 | 2,0 | 180 |

Tabuľka č. 10: Predpísané skúšobné podmienky podľa typu rozpúšťadla [34]

Asfaltový roztok sa destiluje v tlakovej destilačnej banky, ktorá sa uchyťí do prístroja pomocou svoriek. Objem nádoby je 1 liter, maximálne množstvo roztoku by malo byť 400 ml. V prípade destilácie väčšieho množstva roztoku sa postup opakuje až do predestilovania celého objemu. Pre zachytenie oddestilovaného rozpúšťadla sa použije čistá banka, ktorá sa taktiež upevní do prístroja. Rotácia banky s asfaltovým spojivom sa nastaví na 75 ± 15 otáčok za minútu a zapne sa prívod studenej vody do chladiča prístroja. Banka sa ponorí do olejového kúpeľa s teplotou (110 ± 5)°C pri tlaku (40 ± 5) kPa pre použité rozpúšťadlo tetrachlóretylén. V druhej fáze, keď sa predestiluje podstatná časť rozpúšťadla, sa teplota zvýši na hodnotu 160 °C pri pozvoľne znižujúcom sa tlaku na 2,0 kPa. Tieto podmienky sa podržia až do vyparenia zvyšnej časti rozpúšťadla, čo je možné spoznať podľa ukončenia tvorby bubliniek na hladine asfaltového roztoku.

Po nastavení normálního tlaku sa banka s čistým asfaltovým spojivom vyberie a čo najrýchlejšie sa preleje do pripravených skúšobných misiek a foriem. [3] [34]



Obrázok č. 38: Skúšobné formy a misky [3]



Obrázok č. 39: Rotačné vákuové destilačné zariadenie



Obrázok č. 40: Zmes asfaltového spojiva a rozpúšťadla v banke v olejovom kúpeli

4.3.2. Sitový rozbor

Skúškou sitového rozboru roztriedime a oddelíme od seba jednotlivé frakcie materiálu pomocou sady sít so zostupnou veľkosťou otvorov. Sada sít – ich počet a veľkosti otvorov – je vyberaná podľa druhu vzorky a požadovanej presnosti. Skúška sa vykonáva metódou prania a preosievania za sucha (výnimkou je pórovité kamenivo, kedy pranie môže ovplyvniť jeho fyzikálne vlastnosti a pristupuje sa teda iba k preosievaniu za sucha).

4.3.2.1 Postup skúšky sitového rozboru

V prípade tejto bakalárskej práce sa postup prepierania kameniva vykonal v rámci skúšky *Znovuzískanie extrahovaného spojiva*, kedy sa tetrachloretylénom premývalo kamenivo na jednotlivých sitách až dokiaľ roztok nebol číry. Kamenivo zachytené na jednotlivých sitách sa následne nechalo vysušiť. Použité sitá sú zhora nadol zostupne: 11,2 mm; 8 mm; 5,6 mm; 4 mm; 2 mm; 1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,125 mm; 0,063 mm. Spodok a vrch sady je opatrený pevným doliehajúcim vekom a dnom. Pre zisťovanie hmotnosti potrebujeme váhu s presnosťou $\pm 0,1$ % hmotnosti skúšobnej navážky. Na čistenie sady sa použijú štetce a pre umiestnenie materiálu budeme potrebovať dostatočný počet nádob.

Sada sít sa umiestni do vibračného prístroja, kde sa nechá preosievať po určitú dobu. Sitá sa následne zhora jednotlivo odoberajú a postupne sa s každým sitom ručne dorobí dôkladné ručné preosievanie. Prepadnutý materiál sa vysype na nasledujúce sito a postup sa opakuje až po sito 0,063 mm. Dbá sa na to, aby žiaden materiál neunikol mimo sady. Hmotnosť zostatku na každom site sa zváži v miske, pričom sito s najväčšími otvormi sa označí ako R_1 a najspodnejšie R_n . Prepad sitom 0,063mm sa zaznamená ako P. Hmotnosti zostatkov na každom site sa vypočíta ako percento hmotnosti pôvodnej vysušenej navážky M_1 . Ďalej sa u každého sita vypočítajú súčtové percentá hmotnosti prepadnutých častíc s výnimkou sita 0,063mm a stanoví sa hodnota M_2 ako hmotnosť vysušeného zostatku na site 0,063mm.

Skúška sa zopakuje pokiaľ sa súčet hmotností R_i a P líši o viac ako 1 % od hmotnosti M_2 . [36]



Obrázok č. 41: Prístroj na vibračné preosievanie kameniva [37]



Obrázok č. 42: Váženie zostatku na jednotlivých sitách

| Typ | S | | + | | | | | | | |
|---|----------------------------------|----------|---------------------------------------|----------|----------|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| Označení směsi SMA | 8 S, 11 S | | 8 +, 11 +, 16 + | | | 4, 5, 8, 11, 16 | | | | |
| Počet úderů Marshallova pěchu | 2 x 50 | | | | | | | | | |
| Všeobecné požadavky | | | | | | | | | | |
| Zrnitost / síto (mm) ¹⁾ | SMA 8 S | SMA 11 S | SMA 8 + | SMA 11 + | SMA 16 + | SMA 4 | SMA 5 | SMA 8 | SMA 11 | SMA 16 |
| 22,4 | - | - | - | - | 100 | - | - | - | - | 100 |
| 16 | - | 100 | - | 100 | 90-100 | - | - | - | 100 | 90-100 |
| 11,2 | 100 | 90-100 | 100 | 90-100 | 50-75 | - | - | 100 | 90-100 | 48-77 |
| 8 | 90-100 | 45-60 | 90-100 | 45-70 | 35-60 | - | 100 | 90-100 | 45-70 | 35-58 |
| 5,6 | - | - | - | - | - | 100 | 90-100 | - | - | - |
| 4 | 28-42 | 26-38 | 26-48 | 26-42 | 24-40 | 90-100 | - | 26-48 | 26-42 | 24-40 |
| 2 | 20-30 | 20-28 | 20-32 | 20-30 | 18-28 | 30-42 | 26-40 | 20-32 | 20-30 | 18-28 |
| 0,125 | 9-15 | 9-15 | 9-16 | 9-16 | 9-15 | 9-18 | 9-18 | 9-16 | 9-16 | 9-15 |
| 0,063 | 8-12 | 8-12 | 7-12 | 7-12 | 7-11 | 7-12 | 7-12 | 7-12 | 7-12 | 7-11 |
| Minimální mezerovitost V_{min} (%) ²⁾ | 3,0 (2,0) | | 2,5 (1,5) | | | 2,0 (1,0) | | | | |
| Maximální mezerovitost V_{max} (%) ²⁾ | 4,5 (6,0) | | 4,5 (6,0) | | | 4,0 (5,5) | | | | |
| Maximální poměrná hloubka koteže PRD_{akt} (%) ³⁾ po 5 000 cyklech | 5,0 | | PRD_{akt} deklarovaná ⁸⁾ | | | - | | | | |
| Maximální přírůstek hloubky koteže WTS_{akt} (mm/10 ³ cyklů) ³⁾ | 0,07 | | WTS_{akt} deklarovaná ⁸⁾ | | | - | | | | |
| Mezní teploty asfaltové směsi pro silniční asfalty (°C) ⁴⁾ | 50/70 a 70/100 = 140 °C – 180 °C | | | | | | | | | |
| Podíl těžného kameniva (%) | jen drobné kamenivo | | | | | | | | | |
| Maximální množství stěčeného materiálu D (% hm.) | 0,3 | | 0,3 | | | 0,6 | | | | |
| Minimální obsah rozpustného pojiva B_{min} (% hm.) ⁵⁾ | 6,8 | 6,2 | 6,6 | 6,2 | 5,8 | 6,8 | 6,8 | 6,6 | 6,2 | 5,8 |
| Minimální obsah rozpustného pojiva B_{vel} (% obj.) ⁶⁾ | 14,0 | 13,5 | 14,0 | 13,5 | 13,0 | - | - | - | - | - |
| Minimální stupeň vyplnění mezer VFB_{min} (%) ⁷⁾ | 74 | 74 | 74 | 74 | 74 | - | - | - | - | - |
| Maximální stupeň vyplnění mezer VFB_{max} (%) ⁷⁾ | 83 | 83 | 83 | 83 | 83 | - | - | - | - | - |

1) Při různé objemové hmotnosti HDK a DDK (SDK) lze čáru zrnitosti vyhodnocovat v % objemu.
2) Mezerovitost ztuhlé asfaltové směsi a stupeň vyplnění mezer směsi se stanoví podle ČSN EN 13108-20:2008, tabulka B.5, řádek 3. Hodnoty v závorkách platí pro kontrolní zkoušky.
3) Zkouška odolnosti proti tvorbě trvalých deformací se provede podle ČSN 13108-20:2008, tabulka D.1, řádek 4.
4) Uvedené minimální a maximální teploty nemají být překročeny na žádném místě obalovny. Teploty pro modifikované asfalty se řídí podle údajů výrobce.
5) Minimální hodnota obsahu asfaltu se násobí korekčním faktorem $\alpha = 2,65D/\rho_b$, kde ρ_b je objemová hmotnost kameniva v Mg/m^3 stanovená podle EN 1097-6.
6) Obsah asfaltu v % objemu se vypočítá podle vzorce $B_{vel} = \rho_b \times B/1,020$ (%), kde ρ_b je objemová hmotnost ztuhlé směsi (Mg/m^3), B je obsah asfaltu v % hmotnosti, 1020 je objemová hmotnost asfaltového pojiva (Mg/m^3).
7) Doporučené hodnoty.
8) Hodnota se deklaruje pouze pro třídu dopravního zatížení II nebo pro pomalou a zastavující dopravu, v obou případech pouze při použití nemodifikovaného pojiva

Tabuška č. 11: Požadavky na kamenivo pre zmesi typu SMA [24]

4.3.2.2 Výsledky skúšky sitového rozboru

| ZMES 5 | R ₁ | R ₂ | R ₃ | R ₄ | R ₅ | R ₆ | R ₇ | R ₈ | R ₉ | R ₁₀ |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| veľkosť sita [mm] | 11,2 | 8 | 5,6 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,063 |
| hmotnosť zostatku na site [g] | 32,3 | 359,6 | 194,5 | 66,0 | 66,6 | 42,7 | 27,6 | 20,1 | 21,0 | 20,8 |
| percentá zostatku materiálu $R_i/M_1 \times 100$ [%] | 3,4 | 38,3 | 20,7 | 7,0 | 7,1 | 4,5 | 2,9 | 2,1 | 2,2 | 2,2 |
| súčtové percento prepadu $100 - (R_i/M_1 \times 100)$ [%] | 96,6 | 58,3 | 37,6 | 30,5 | 23,4 | 18,9 | 16,0 | 13,8 | 11,6 | 9,4 |

Tabuška č. 12: Zastúpenie jednotlivých frakcií zmesi číslo 5

| ZMES 5 | | | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|------------|---------|
| Celková vysušená hmotnosť M1 [g] | Vysušená hmotnosť po vypraní M2 [g] | $\Sigma Ri + P$ | porovnanie | |
| 939,2 | 874,45 | 872,4 | 0,23% | < 1,00% |

Tabuľka č. 13: Posúdenie zmesi číslo 5 podľa ČSN EN 933-1

| ZMES 6 | R ₁ | R ₂ | R ₃ | R ₄ | R ₅ | R ₆ | R ₇ | R ₈ | R ₉ | R ₁₀ |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| veľkosť sita [mm] | 11,2 | 8 | 5,6 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,063 |
| hmotnosť zostatku na site [g] | 67,3 | 354,8 | 195,6 | 61,1 | 71,3 | 46,3 | 28,9 | 20,5 | 19,6 | 18,8 |
| percentá zostatku materiálu $Ri/M_1 \times 100$ [%] | 6,9 | 36,3 | 20,0 | 6,3 | 7,3 | 4,7 | 3,0 | 2,1 | 2,0 | 1,9 |
| súčtové percento prepadu $100 - (Ri/M_1 \times 100)$ [%] | 93,1 | 56,8 | 36,8 | 30,5 | 23,2 | 18,5 | 15,5 | 13,4 | 11,4 | 9,5 |

Tabuľka č. 14: Zastúpenie jednotlivých frakcií zmesi číslo 6

| ZMES 6 | | | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|------------|---------|
| Celková vysušená hmotnosť M1 [g] | Vysušená hmotnosť po vypraní M2 [g] | $\Sigma Ri + P$ | porovnanie | |
| 976,8 | 894,95 | 894,4 | 0,06% | < 1,00% |

Tabuľka č. 15: Posúdenie zmesi číslo 6 podľa ČSN EN 933-1

| ZMES 17 | R ₁ | R ₂ | R ₃ | R ₄ | R ₅ | R ₆ | R ₇ | R ₈ | R ₉ | R ₁₀ |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| veľkosť sita [mm] | 11,2 | 8 | 5,6 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,063 |
| hmotnosť zostatku na site [g] | 36,9 | 405,7 | 218,9 | 39,9 | 76,6 | 56,2 | 31,1 | 23,3 | 23,3 | 18,1 |
| percentá zostatku materiálu $Ri/M_1 \times 100$ [%] | 3,6 | 39,2 | 21,2 | 3,9 | 7,4 | 5,4 | 3,0 | 2,3 | 2,3 | 1,8 |
| súčtové percento prepadu $100 - (Ri/M_1 \times 100)$ [%] | 96,4 | 57,2 | 36,0 | 32,2 | 24,7 | 19,3 | 16,3 | 14,0 | 11,8 | 10,0 |

Tabuľka č. 16: Zastúpenie jednotlivých frakcií zmesi číslo 17

| ZMES 17 | | | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|------------|---------|
| Celková vysušená hmotnosť M1 [g] | Vysušená hmotnosť po vypraní M2 [g] | $\Sigma Ri + P$ | porovnanie | |
| 1033,8 | 953,5 | 945,6 | 0,83% | < 1,00% |

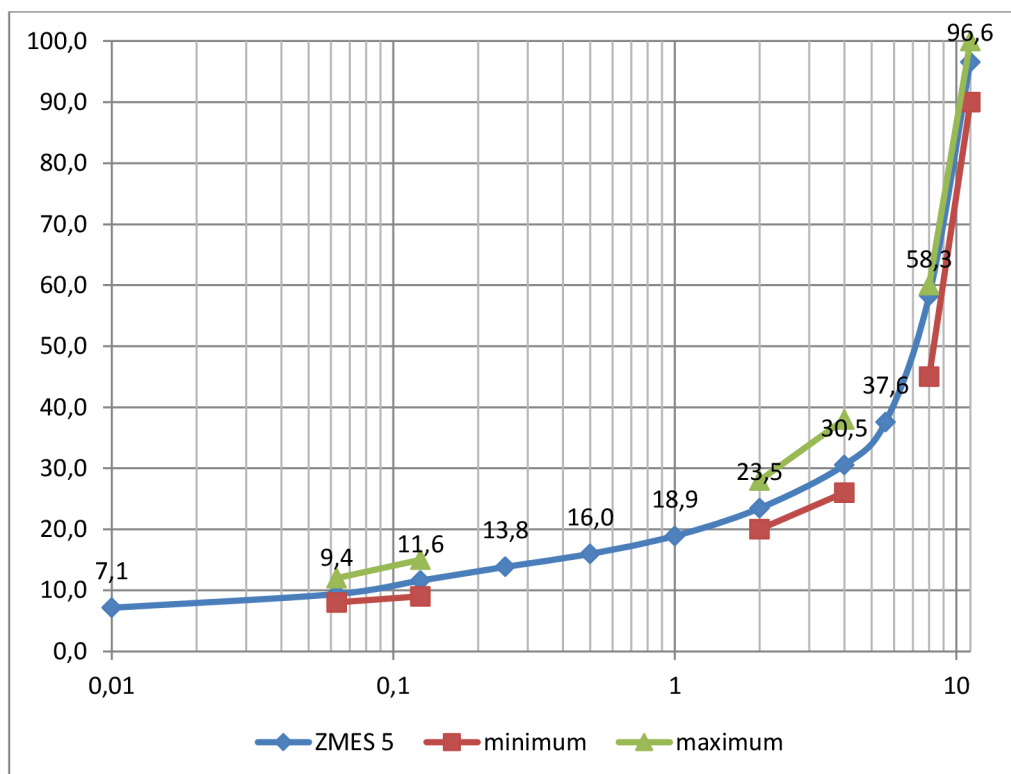
Tabuľka č. 17: Posúdenie zmesi číslo 17 podľa ČSN EN 933-1

| ZMES 18 | R ₁ | R ₂ | R ₃ | R ₄ | R ₅ | R ₆ | R ₇ | R ₈ | R ₉ | R ₁₀ |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| veľkosť sita [mm] | 11,2 | 8 | 5,6 | 4 | 2 | 1 | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,063 |
| hmotnosť zostatku na site [g] | 56,4 | 381,6 | 215,5 | 52,7 | 88,4 | 50,9 | 28,5 | 19,1 | 17,2 | 14,7 |
| percentá zostatku materiálu $R_i/M_1 \times 100$ [%] | 5,6 | 37,8 | 21,3 | 5,2 | 8,7 | 5,0 | 2,8 | 1,9 | 1,7 | 1,5 |
| súčtové percento prepadu $100 - (R_i/M_1 \times 100)$ [%] | 94,4 | 56,7 | 35,3 | 30,1 | 21,4 | 16,3 | 13,5 | 11,6 | 9,9 | 8,5 |

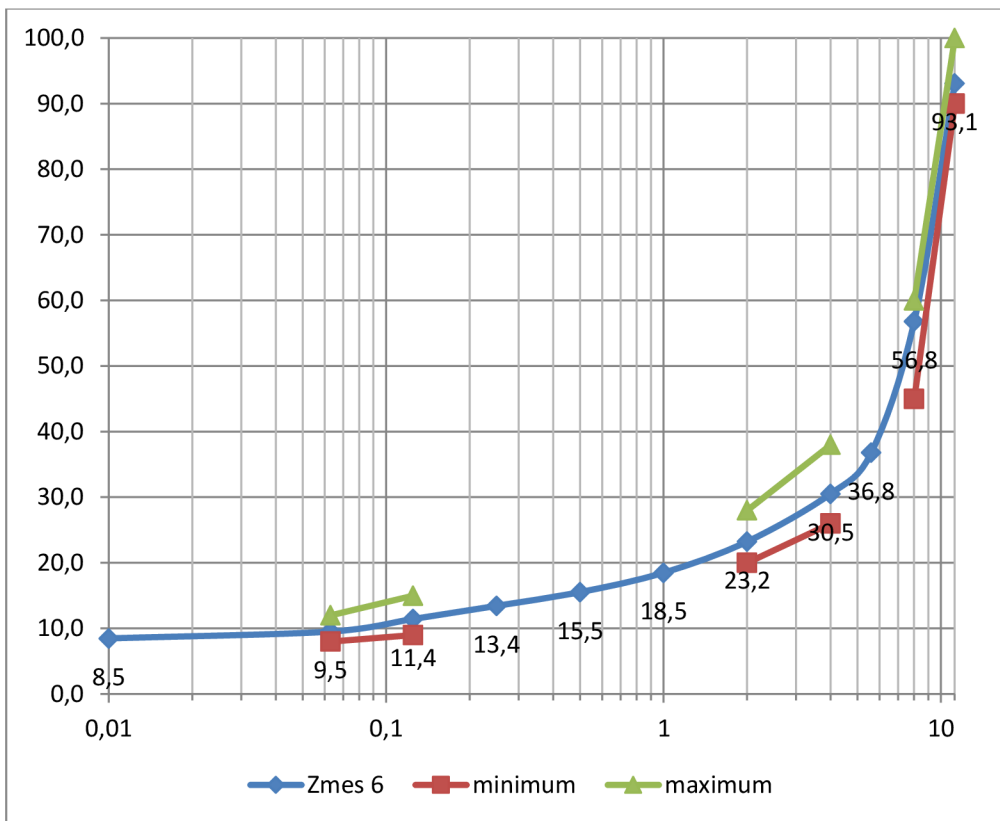
Tabuľka č. 18: Zastúpenie jednotlivých frakcií zmesi číslo 18

| ZMES 18 | | | | |
|----------------------------------|-------------------------------------|------------------|------------|---------|
| Celková vysušená hmotnosť M1 [g] | Vysušená hmotnosť po vypraní M2 [g] | $\Sigma R_i + P$ | porovnanie | |
| 1010,7 | 930,55 | 931,2 | -0,07% | < 1,00% |

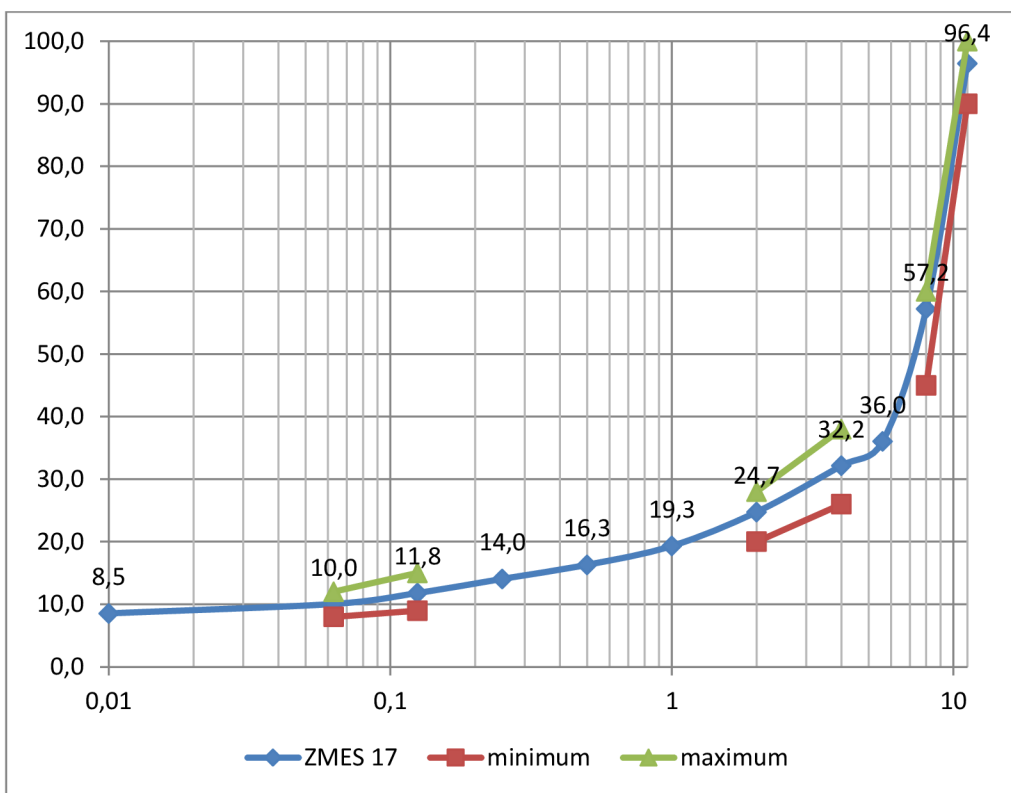
Tabuľka č. 19: Posúdenie zmesi číslo 18 podľa ČSN EN 933-1



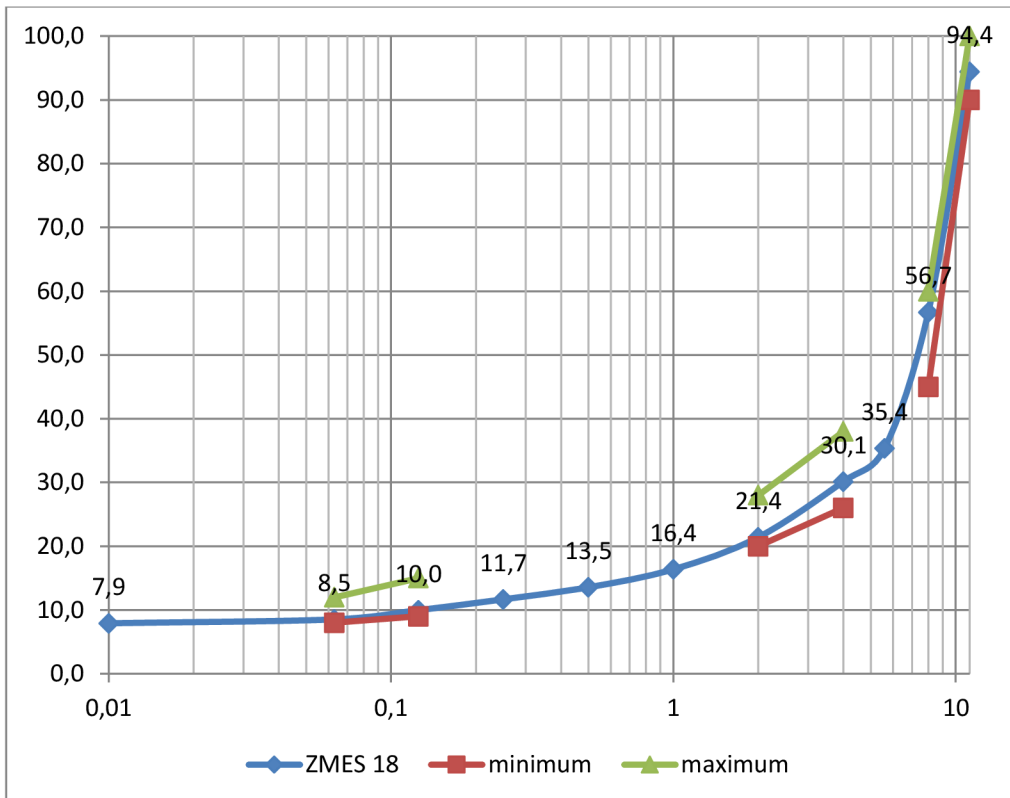
Graf č. 2: Zrnitosť zmesi 5 s limitnými hodnotami pre SMA 11 S podľa EN 13108-5



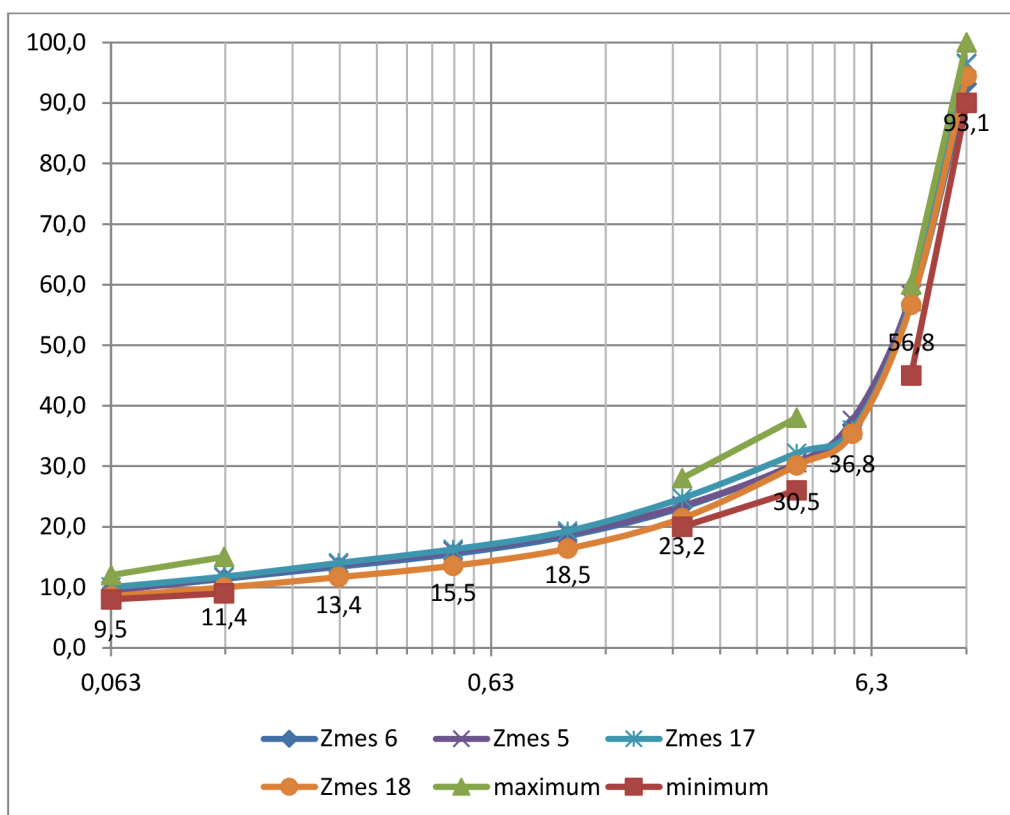
Graf č. 3: Zrniť zmesi 6 s limitnými hodnotami pre SMA 11 S podľa EN 13108-5



Graf č. 4: Zrniť zmesi 17 s limitnými hodnotami pre SMA 11 S podľa EN 13108-5



Graf č. 5: Zrnitost zmesi 18 s limitnými hodnotami pre SMA 11 S podľa EN 13108-5

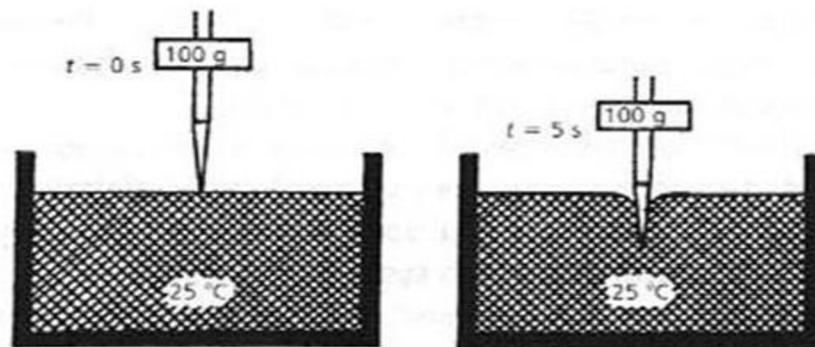


Graf č. 6: Zrnitost zmesí s limitnými hodnotami pre SMA 11 S podľa EN 13108-5

Zo zistených kriviek zrnitosti jednotlivých zmesí, ohraničených limitnými hodnotami pre zmesi typu SMA 11 S podľa **tabuľky č. 11** môžeme v **grafe č.6** vidieť, že dodávateľ zmesi namiešal správne a pri všetkých štyroch vzorkách sa skutočne jedná o asfaltový koberec mastixový SMA.

4.3.3. Stanovenie penetrácie ihlou

Podstata metódy spočíva v prieniku normalizovanej ihly do vytemperovanej vzorky pri daných skúšobných podmienkach, ktorými sú: trikrát aplikovanie zaťaženia 100 g pri teplote 25 °C po dobu 5 s. Pri penetrácii nad 330 p.u. sa skúška vykonáva pri teplote 15 °C. Čím vyššia je hodnota penetrácie, tým mäkší je asfalt a naopak. Hodnoty penetrácie je udávaná v penetračných jednotkách – jedna penetračná jednotka (p.u.) je rovná 0,1 mm. Postup stanovuje norma *ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. Popísaný postup sa dá aplikovať pre penetráciu do 330 penetračných jednotiek. [38]



Obrázok č. 43: Podstata skúšky penetrácie ihlou [39]

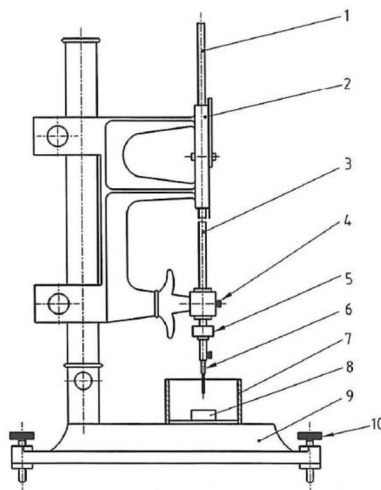
4.3.3.1 Postup skúšky penetrácie ihlou

Pre vykonanie skúšky sa používa prístroj penetrometer s presnosťou stanovenia penetrácie na 0,1 mm. Penetračná ihla je vyrobená z tvrdenej, popúšťanej, leštenej, koróziivzdornej oceli o predpísaných rozmeroch. Priemer tela ihly je 1,00 mm - 1,02 mm, pričom jeden jej koniec je symetricky zbrúsený do tvaru kužela o priemere 0,14 mm - 0,16 mm. Dĺžka ihly pre penetráciu do 330 p.u. je približne 50 mm. V prípade penetrácie nad 330 p.u. sa používajú dlhšie normalizované ihly. Penetračná ihla sa uchycuje na držiak, ktorý musí byť ľahko snímateľný z prístroja a jeho hmotnosť musí odpovedať 47,50 g ± 0,05 g. Ďalšou potrebnou súčasťou skúšky je závažie o hmotnosti 50,00 g ± 0,05 g vhodne pripevnené k držiaku ihly. Pre správnu kontrolu počiatočného umiestnenia ihly nad

vzorkou je vhodné použiť osvetlenie. Potrebujeme tiež stopky a vhodnú misku pre umiestnenie a vytemperovanie vzorku. [38]



Obrázok č. 44: Príklad penetrometru [40]



Legenda

- 1 vřeteno
- 2 stupnice
- 3 držák jehly
- 4 uvolňovací zařízení
- 5 50 g závaží
- 6 jehla a koncovka
- 7 přemísťovací miska s plochým dnem
- 8 nádoba se zkušebním vzorkem
- 9 podkladní deska
- 10 stavěcí šroub

Obrázok č. 45: Schéma usporiadania skúšky penetrácie [38]

Pred začiatkom samotného merania je nutné pripraviť vzorku. Asfaltové spojivo zohrejeme nad predpokladaný bod mäknutia na teplotu 80 °C - 90 °C a prelejeme potrebnú časť do vhodnej čistej nádoby. Množstvo vzorky odhadujeme tak, aby po preniknutí ihly bol povrch vzorky minimálne o 10 mm vyššie ako hrot ihly. Po naliatí sa dá vzorka schlaďiť po dobu 90 minút pri teplote 15°C - 30 °C a následne sa umiestni na ďalších 90 min do vodného kúpeľa o konštantnej teplote 25°C.

Po vytemperovaní daného vzorku prejdeme k samotnej skúške. Pripravíme si penetrometer a upevníme doň pevne meraciu ihlu dôkladne očistenú rozpúšťadlom.

Bezprostredne po vybratí vzorky z vodného kúpeľa umiestnime nádobku pod hrot ihly. Vzorku osvetlíme pripraveným svetlom a pomaly sa približujeme hrotom ihly k povrchu vzorky až do momentu, kedy sa hrot dotkne svojho tieňa od osvetlenia. Po kontrole vynulovania hodnôt a správneho nastavenia časového intervalu spustíme skúšku, ktorú zopakujeme trikrát.



Obrázok č. 46: Penetrácia ihlou do vytemperovaného vzorku [41]

Vzdialenosti jednotlivých vpichov od seba a stien nádoby musia pritom byť minimálne 10 mm. Skúšku vykonávame čo najrýchlejšie, aby bola zachovaná teplota $25\text{ °C} \pm 0,15\text{ °C}$. Po dokončení merania vyhodnotíme výsledky skúšky podľa požiadaviek na opakovateľnosť uvedených v **tabuľke č.20**. Pokiaľ je maximálny rozdiel prekročený, skúška sa opakuje až dovtedy, kým sa netískajú tri platné merania. Z nich urobíme aritmetický priemer a zaokrúhlime ho na celé číslo penetračnej jednotky. Po ukončení skúšky očistíme penetračnú ihlu rozpúšťadlom, aby sa zabránilo jej poškodeniu. [38]

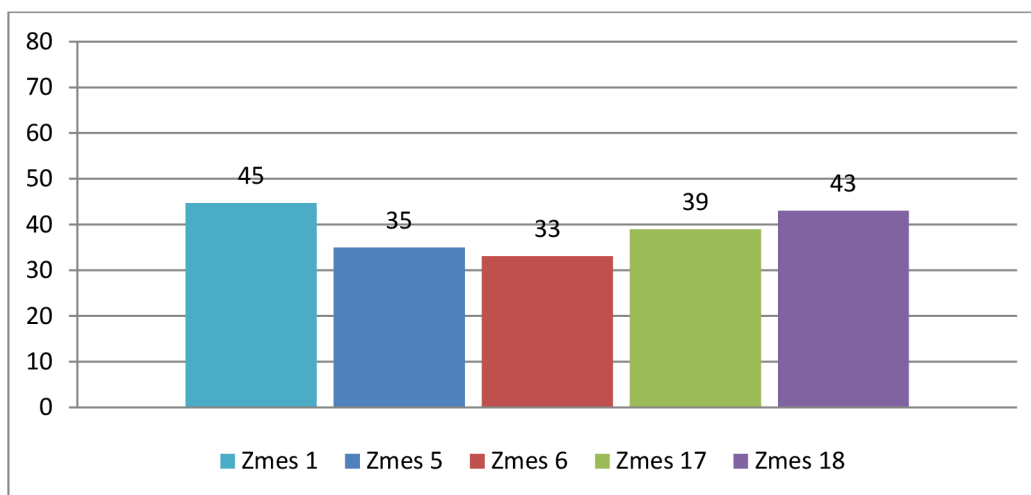
| Penetrace v 0,1 mm | do 49 | 50 až 149 | 150 až 249 | 250 a výše |
|--|-------|-----------|------------|------------|
| Maximální rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším stanovením | 2 | 4 | 6 | 8 |

Tabuľka č. 20: Požiadavky na opakovateľnosť skúšky penetrácie ihlou [38]

4.3.3.2 Výsledky skúšky penetrácie ihlou

| ZMES | | penetrácia ihlou | | | | | |
|------|---------------------------------|------------------|------------|------------|-------------------|------------------------------|---------|
| | | 1. meranie | 2. meranie | 3. meranie | maximálny rozdiel | podmienka pre opakovateľnosť | priemer |
| | | [p.u.] | [p.u.] | [p.u.] | [p.u.] | [p.u.] | [p.u.] |
| 1 | PMB + S-CEL 7G | 45,1 | 44,8 | 44,3 | 0,8 | 2,0 | 45 |
| 5 | PMB + S-CEL 7G + 30% R-mat | 36,0 | 35,0 | 34,5 | 1,5 | 2,0 | 35 |
| 6 | PMB + S-CEL 7G + 50% R-mat | 33,8 | 31,8 | 33,7 | 2,0 | 2,0 | 33 |
| 17 | 50/70 + Storelastic + 30% R-mat | 39,2 | 38,8 | 39,1 | 0,4 | 2,0 | 39 |
| 18 | 50/70 + Storelastic + 50% R-mat | 43,7 | 42,9 | 43,0 | 0,8 | 2,0 | 43 |

Tabuľka č. 21: Výsledky merania penetrácie ihlou v p.u.



Graf č. 7: Grafické znázornenie výsledkov merania penetrácie ihlou v p.u.

Pri porovnaní skúmaných zmesí so zmesou referenčnou môžeme vidieť, že pridanie R-materiálu spôsobilo nepatrný pokles hodnoty penetrácie. Udialo sa tak z toho dôvodu, že zostarnuté asfaltové spojivo obsiahnuté v R-materiáli v zmesiach číslo 5, 6, 17 a 18 pridalo výslednej zmesi na tvrdosti.

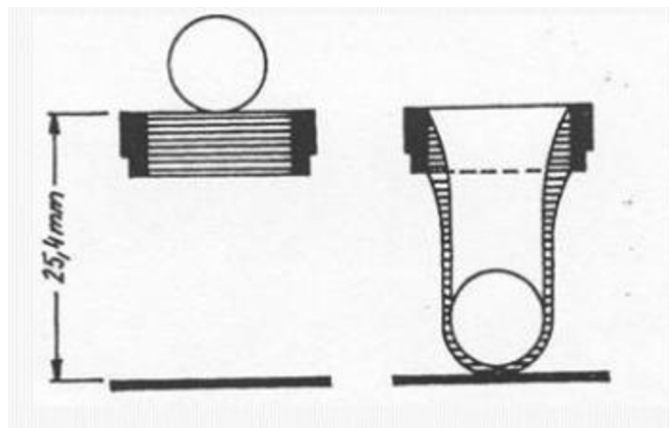
U zmesí číslo 5 a 6 s modifikovaným asfaltom môžeme pozorovať, že hodnota penetrácie je v podstate rovnaká, čo znamená, že rozdiel v dávkovaní R-materiálu tu nezohral rolu. Rovnaký trend možno pozorovať u zmesí číslo 17 a 18 s cestným asfaltom gradácie 50 a 70.

Celkovo sa žiadna z nameraných hodnôt sa výrazne nelíši od vzorky číslo 1 bez obsahu R-materiálu. Výsledky skúšky penetrácie ihlou ukazujú, že prítomnosť R-materiálu má minimálny vplyv na vlastnosti skúmaných asfaltových zmesí.

4.3.4. Stanovenie bodu mäknutia metódou kroužek a kulička

Postup je daný normou ČSN EN 1427 *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička (skrácene KK)*. Táto norma sa môže používať na určenie bodu mäknutia asfaltu a asfaltových spojív od 28 °C do 150 °C.

Podstata metody spočíva v zmeraní teploty, pri ktorej sa dva kotúčiky z asfaltového spojiva odliate v mosadzných krúžkoch umiestnené v kvapalinovej alebo glycerínovej kúpeli prepadnú pod váhou guľôčok o vzdialenosť $25,0 \text{ mm} \pm 0,4 \text{ mm}$. Táto teplota sa nazýva bod mäknutia a zodpovedá hornej hranici oboru plasticity asfaltového spojiva. V praxi to znamená teplotu, pri ktorej začínajú vznikať trvalé deformácie vo vozovke. Ohrev kúpeľa prebieha v automatickom skúšobnom zariadení s teplomerom konštantnou rýchlosťou 5 °C za minútu. [42]



Obrázok č. 47: Podstata skúšky stanovenia bodu mäknutia metódou KK [41]



Obrázok č. 48: Prístroj pre skúšku stanovenie bodu mäknutia metódou KK

4.3.4.1 Postup skúšky stanovenie bodu mäknutia

Pre skúšku sa používa glycerín alebo prevarená, prípadne deionizovaná voda. Voľba kvapaliny závisí na predpokladanej hodnote bodu mäknutia. Pre teplotný interval 28 °C – 80 °C sa použije vodný kúpeľ. Pri teplote blížiacej sa bodu varu vody začínajú unikať bublinky, ktoré by meranie mohli znehodnotiť. Preto sa pre predpokladané hodnoty bodu mäknutia nad 80 °C až do 150 °C používa glycerín.

K skúške potrebujeme dva mosadzné krúžky, do ktorých sa odlejú vzorky asfaltového spojiva. Krúžky sa usadzujú do strediacich prstencov a upevňujú pomocou držiaku. Použité guľôčky majú priemer 9,50 mm ± 0,05 mm a hmotnosť 3,50 g ± 0,05 g. Sklenená kadička, určená na zahrievanie, má mať minimálny vnútorný priemer 85 mm a výšku najmenej 120 mm od dna. Pre prípravu vzoriek potrebujeme odlievaciu doštičku, separačný prostriedok (napríklad zmes glycerínu a dextrínu), špachtľu na zrezanie vzoriek a zahrievacie zariadenie (napríklad elektrickú platňu). K zaisteniu rovnomerného rozdelenia tepla v kúpeli budeme potrebovať miešadlo a to vrtulové alebo magnetické. Umiestňuje sa tak, aby neovplyvnilo vzorky a rýchlosť jeho otáčania má byť približne 100 otáčok za minútu.

Pred prípravou vzoriek naplníme kadičku zvolenou tekutinou a spoločne s oceľovými guľôčkami umiestnime do chladničky, kde sa vytemperujú na teplotu (5,0 ± 1,0) °C. Odlievaciu doštičku potrieme tenkou vrstvou separačného prostriedku, aby po vychladnutí bolo možné od nej spojivo jednoduchšie oddeliť. Na doštičku položíme dva čisté mosadzné krúžky zahriate na teplotu o 90 °C vyššiu než je predpokladaný bod mäknutia spojiva. Do oboch krúžkov nalejeme asfaltové spojivo tak, aby prečnievalo nad rovinou krúžkov.

Následne necháme vzorky ochladiť pri laboratórnej teplote po dobu minimálne 30 minút. Pomocou zahrievacieho zariadenia nahrejeme špachtľu a zrežeme ňou povrch vzoriek tak, aby bol zarovno s okrajmi krúžkov. Krúžky umiestnime do držiaku, položíme na ne strediace prstence a do nich umiestnime vytemperované guľôčky položíme. Pripravenú zostavu vložíme do kadičky tak opatrne, aby sme zamedzili vzniku bubliniek, ktoré by mohli skúšku znehodnotiť. Kadičku umiestnime na platničku meracieho prístroja a vložíme do nej teplomer tak, aby spodný koniec teplomerovej nádoby bol v rovnakej úrovni so spodnou hranou krúžkov a vo vzdialenosti do 13 mm od krúžkov bez toho, aby sa ich dotýkal.

Spustíme zahrievanie konštantnou rýchlosťou 5 °C za minútu, pričom po celú dobu je kvapalina premiešavaná aby sa dosiahlo rovnomerného zohrievania. Skúška končí keď zabudované laserové zariadenie zaregistruje prepád vzorky spojiva a dotknutie s plieškom. U každého krúžku a guľôčky sa automaticky zaznamená teplota. [42]



Obrázok č. 49: *Prepad guľôčok asfaltovým spojivom*

Pri spracovaní výsledkov je nutné zohľadniť nasledovné faktory.

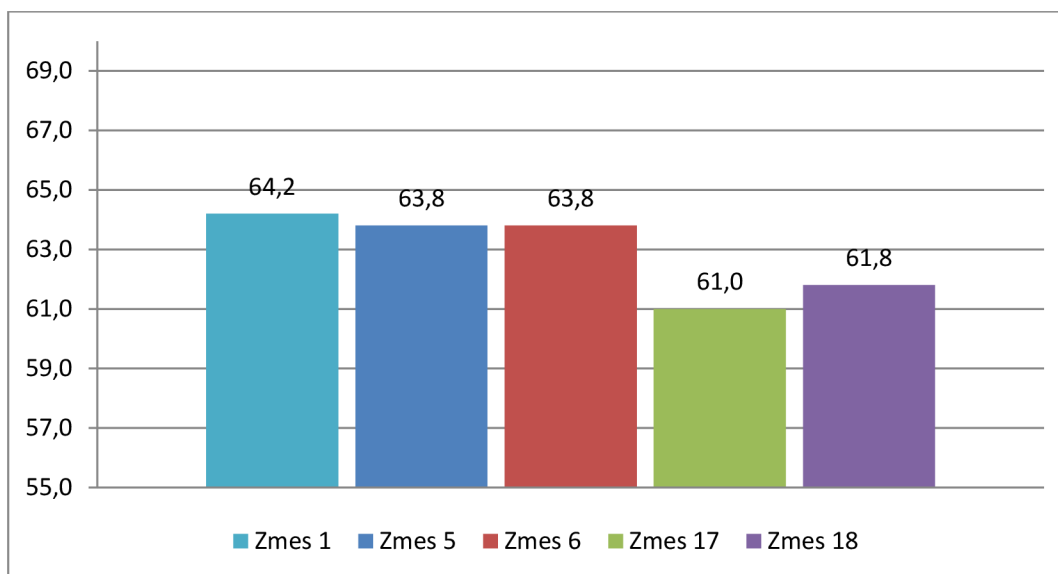
- Skúška sa opakuje, ak je rozdiel medzi dvoma teplotami väčší ako 1 °C pre bod mäknutia pod 80 °C alebo väčší ako 2 °C pre bod mäknutia nad 80 °C.
- U modifikovaných asfaltov je nutné skúšku opakovať pokiaľ je rozdiel medzi dvoma teplotami väčší ako 2 °C alebo ak guľôčka poruší vrstvu, ktorou je obalená pred dotknutím sa základnej dosky.
- V prípade použitia vodného kúpeľa je bod mäknutia asi o 4 °C nižší než bod mäknutia stanovený v glyceríne. Ak sa teploty pohybujú okolo 80 °C, je odporúčané definovať spôsob skúšania arbitrážnym protokolom.
- Pri stanovovaní bodu mäknutia vo vodnom kúpeli sa v prípade obdržania hodnoty medzi 28 až 80°C zaznamenajú, pri teplote nad 80 °C sa výsledok považuje za neplatný a skúška sa opakuje v glyceríne.
- V prípade výsledku bodu mäknutia do 84 °C v glycerínovom kúpeli sa stanovenie opakuje vo vodnom kúpeli, kde má výsledok vyjsť pod 80 °C, v opačnom prípade sa uznáva za platný výsledok v glyceríne. Výsledky nad 84 °C sa zaznamenajú.

Výsledok sa vyjadrí spôsobom takým, že pre bod mäknutia do 80b°C sa zaznačí priemer teplôt dvoch guľôčok na najbližších 0,2 °C, pre bod mäknutia nad 80 °C sa priemer teplôt guľôčok zaokrúhli na najbližšie 0,5 °C. [42]

4.3.4.2 Výsledky skúšky stanovenie bodu mäknutia

| ZMES | | bod mäknutia KK | | | | |
|------|---------------------------------|-----------------|--------------|---------|------------------------------|---------|
| | | Ľavá guľôčka | Ľavá guľôčka | rozdiel | podmienka pre opakovateľnosť | priemer |
| | | [°C] | [°C] | [°C] | [°C] | [°C] |
| 1 | PMB + S-CEL 7G | 64,3 | 63,9 | 0,4 | 1,0 | 64,2 |
| 5 | PMB + S-CEL 7G + 30% R-mat | 63,8 | 63,7 | 0,1 | 2,0 | 63,8 |
| 6 | PMB + S-CEL 7G + 50% R-mat | 63,9 | 63,5 | 0,2 | 2,0 | 63,8 |
| 17 | 50/70 + Storelastic + 30% R-mat | 60,7 | 61,0 | 0,3 | 2,0 | 61,0 |
| 18 | 50/70 + Storelastic + 50% R-mat | 61,6 | 61,9 | 0,3 | 1,0 | 61,8 |

Tabuľka č. 22: Výsledky merania bodu mäknutia metódou KK v °C

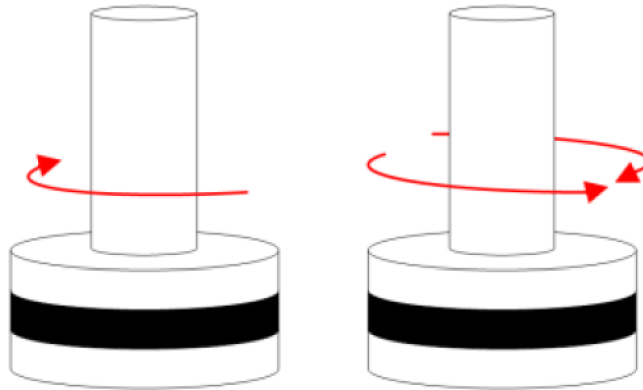


Graf č. 8: Grafické znázornenie skúšky bodu mäknutia metódou KK v °C

Hodnoty bodu mäknutia u zmesí číslo 5 a 6 s modifikovaným asfaltom dosahujú rovnakej hodnoty a od referenčnej vzorky číslo 1 sa nelíšia. U vzoriek číslo 17 a 18 s cestným asfaltom dochádza k minimálnemu rozdielu v bode mäknutia. Prakticky môžeme usúdiť, že všetky hodnoty sú rovnaké a prítomnosť R-materiálu nemá vplyv na výsledky skúšok.

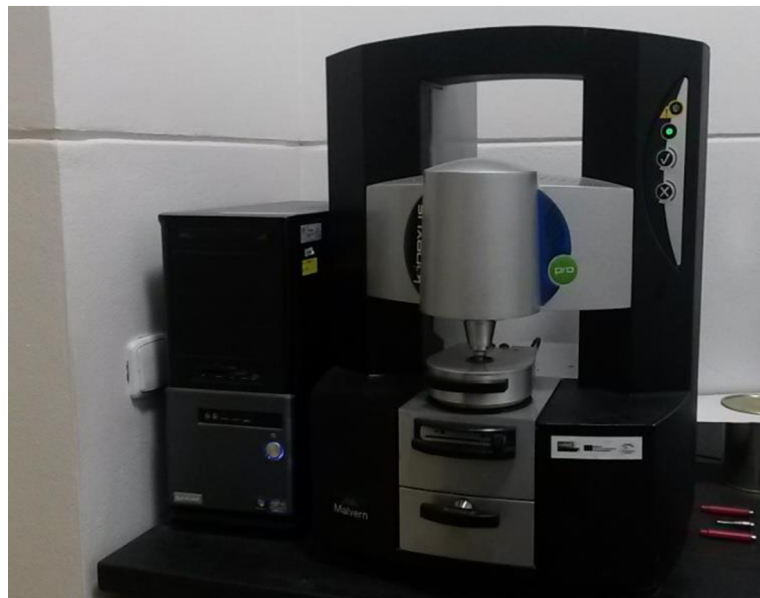
4.3.5. DSR – Dynamický šmykový reometer

Názov DSR pochádza z anglického Dynamic Shear Rheometr. Ide o zariadenie slúžiace pre určovanie reologických vlastností asfaltových spojív a to dvoma typmi pohybov – rotáciou a osciláciou. [43]



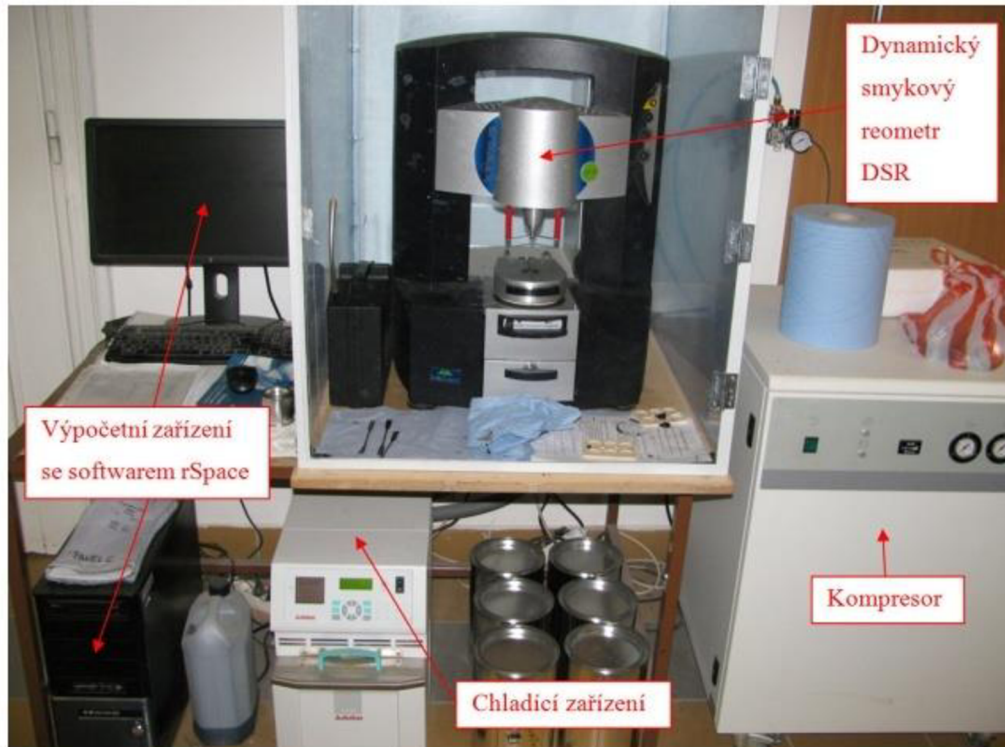
Obrázok č. 50: Znáznornenie pohybov reometra – rotácia a oscilácia [43]

Pre účely tejto bakalárskej práce bol použitý rotačný reometer KINEXUS pro + od britskej firmy Malvern. Prístroj musí umožňovať rozsah skúšobných teplôt $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a byť schopný vyvodíť krútiaci moment v rozsahu $0,05\text{ }\mu\text{Nm}$ až 200 mNm . Ďalej musí umožňovať stanovenie komplexného šmykového modulu G^* v rozmedzí 1 kPa až 10 MPa $\pm 2\%$ a uhol fázového posunu δ v hodnote 0° až $90^{\circ} \pm 0,1^{\circ}$. Rozsah reometra zahŕňa skúšobného frekvencie $1\text{ }\mu\text{Hz}$ až 150 Hz . [44] [45]



Obrázok č. 51: Reometer KINEXUS pro +

Ďalšie vybavenie reometru pozostáva z kompresoru, chladiaceho zariadenia a výpočtového zariadenia s príslušným program rSpace, v ktorom sa dá naprogramovať ľubovoľný priebeh skúšky. [43]

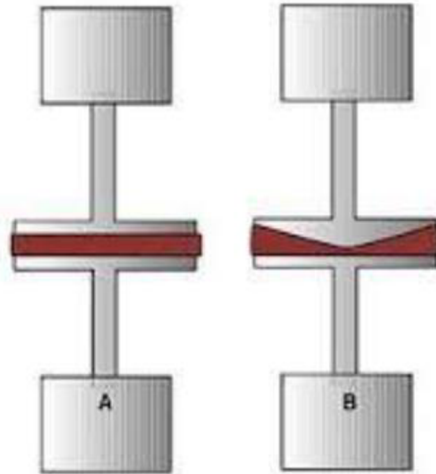


Obrázok č. 52: Vybavenie reometru [43]

Meriacia geometria je tvorená výmennou hornou a dolnou geometriou s paralelnými doštičkami s konštantnou medzerou cez celú plochu doštičiek. Typ geometrie sa volí podľa druhu skúšobnej metódy a vlastností skúšaného materiálu (najmä viskozity). Systém regulácie teploty musia mať obe doštičky pre vylúčenie teplotného gradientu medzi nimi. V prípade ponorenia vzorky do inej kvapaliny ako vody je nutné zaistiť, aby vlastnosti materiálu pre analýzu neboli ovplyvňované. [43] [44] [45]

Na reometri sa vykonali dva typy skúšok:

- **Oscilačné meranie.** Definované normou ČSN EN 14770. Vykonáva sa pre určenie *dynamickej viskozity v ustálenom šmykovom toku, komplexného šmykového modulu G^* a uhlu fázového posunu δ* [44]
- **MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test).** Podľa normy ČSN EN 16659. Prebieha pre zistenie veličín *dotvarovanie a zotavenie, percentuálne zotavenie a nevratná šmyková poddajnosť.* [45]



Obrázok č. 53: Typy geometrie: A – doska-doska, B – kužel-doska [5]

4.3.5.1 Pomôcky a príprava vzoriek pre skúšku oscilačné meranie a MSCR

V prípade oboch skúšok potrebujeme vetranú laboratórnu sušiareň s reguláciou teploty od 50 °C do 200 °C ± 5 °C a formy, podložky a nádoby z nepriľnavého materiálu (napríklad silikónu) na prípravu vzoriek. Mazadlá alebo iné separačné produkty nie je povolené použiť, pretože by mohli ovplyvniť meranie.

Pripraví sa správna geometria. Pre skúšku oscilačného merania je pre asfaltové spojivá vhodné použiť doštičky o priemere 8 mm až 25 mm s medzerou 0,5 mm až 2,0 mm. Priemer doštičky 25 mm je vhodný pre tuhosti rozsahu 1 kPa až 100 kPa a priemer 8 mm pre tuhosť od 100 kPa do 10 MPa. V tejto práci sa skúšajú vzorky priemeru 25 mm pri medzere 1 mm. Skúška MSCR sa vykonáva s doštičkami priemeru 25 mm a medzerou 1 mm. Pripravené vzorky sa vložia do chladničky, kde sa nechajú vytemperovať na teplotu približne 5 °C. Skúšobná vzorka sa vyberie maximálne 30 minút pred samotnou skúškou v reometri, aby mala dostatok času na dosiahnutie laboratórnej teploty. Vzorky by nemali byť staršie ako 7 dní, po zrezaní vo forme sa majú skúšať do 24 hodín.

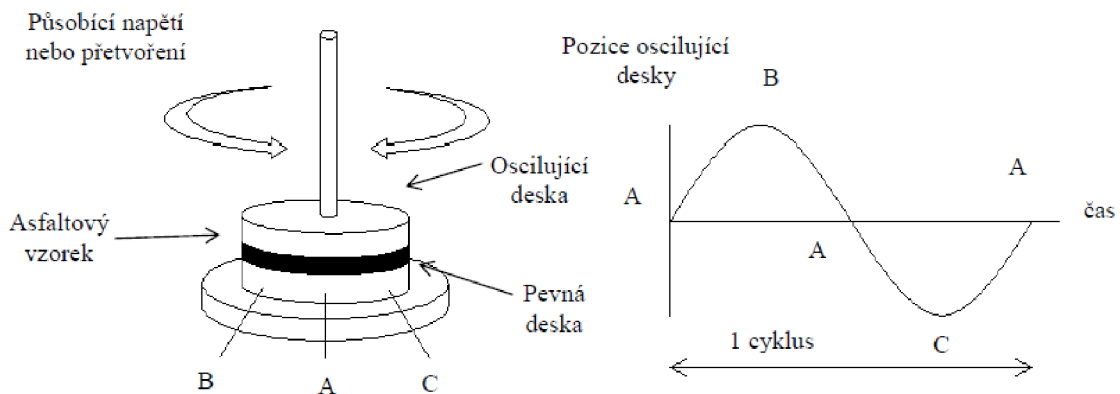
Doštičky sa očistia vhodným rozpúšťadlom a otrú handrou alebo papierom. Pri čistení sa treba vyvarovať poškrabaniu doštičiek kovovými či inými materiálmi a taktiež ohnutiu hornej doštičky.

V prípade, že konštrukcia reometru využíva vzduchových ložísk, je nevyhnutné zapnúť pred použitím prístroja prívod tlakového vzduchu, aby sa zabránilo ich

poškodeniu. Obe doštičky majú byť vertikálne vycentrované. Pokiaľ sa počas vizuálnej kontroly zistí opak, je nutné zariadenie kvalifikovanú opravu. [44] [45]

4.3.6. Oscilačné meranie

Podstatou metódy je pozorovanie pôsobenia oscilujúceho šmykového napätia danej veľkosti na vytemperovanú skúšobnú súpravu so skúšobnou vzorkou. Skúška je definovaná normou ČSN EN 14770: *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr (DSR)*. [44]



Obrázok č. 54: Znárodnenie oscilácie a jej pôsobenia [5]

Metóda môže byť uplatnená na nezostarnuté, zostarnuté a spätne získané spojivá, na spojivá získané z riedených a fluxovaných asfaltov. V rámci merania sa zisťujú hodnoty:

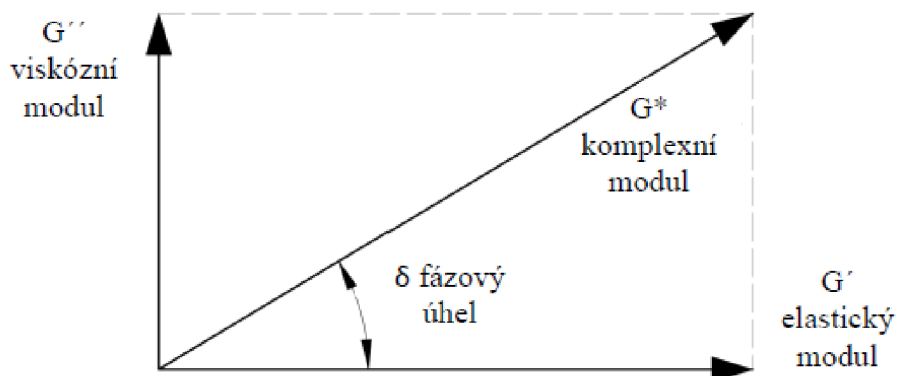
- Komplexný modul v šmyku G^* (zisťujeme v absolútnej hodnote $|G^*|$)
- Uhol fázového posunu δ
- Zložky G' , G'' , J' , J'' komplexného šmykového modulu a komplexnej poddajnosti

Absolútna hodnota komplexného modulu v šmyku $|G^*|$ je pomer maximálneho napätia k maximálnej deformácii pri harmonickej sínusoidnej oscilácii.

Uhol fázového posunu δ udáva fázový rozdiel medzi napätím a deformáciou pri harmonickej sínusoidnej oscilácii

Absolútna hodnota komplexnej šmykovej poddajnosti $|J'|$ je pomer maximálnej deformácie k maximálnemu napätiu pri harmonickej sínusoidnej oscilácii.

Komplexný šmykový modul a komplexná šmyková poddajnosť sa skladá z častí reálnej a imaginárnej. Reálna časť G' a J' vypovedá o elastickej časti správania materiálu, kým imaginárna časť G'' a J'' sa vzťahuje k viskóznejšej časti správania materiálu. Tangens uhlu fázového posunu δ predstavuje pomer viskóznejšej a elastickej zložky. Platí, že $\tan \delta = G'' / G' = J'' / J'$. [44]



Obrázok č. 55: Grafické znázornenie výsledkov merania oscilácie [5]

4.3.6.1 Postup skúšky oscilačné meranie

Tento postup platí pre všetky asfaltové spojivá s výnimkou riedených asfaltov a stabilizovaných spojív z emulzii pripravované pri teplote nad 100 °C. Postup pre spojivá pripravované pod teplotou 100 °C je popísaný v norme ČSN EN 14770.

DSR prístroj sa pred skúškou nechá nahriať na požadovanú teplotu a následne sa doň vloží skúšobná vzorka o priemere 8 mm. Medzera sa nastaví na 2 mm a prečnievajúce spojivo sa oreže vhodným prostriedkom, ideálne nahriatou stierkou. Vzorka môže prečnievať, no v prípade že nepokrýva celú doštičku, sa použije vzorka nová.

Nastaví sa skúšanie v oscilačnom režime tak, aby sa zaistila dynamická odozva vzorky pri skúške v lineárnej oblasti v rozsahu zvolených teplôt a frekvencií. Vzorka sa vytemperuje na teplotu skúšky po dobu minimálne 10 minút. Zvolí sa vhodná skúšobná teplota, respektíve dostatočný počet teplôt v intervale 25 °C až 80 °C tak, aby spojivo mohlo byť dostatočne charakterizované, no žiaden prírastok teploty nesmie byť väčší než 10 °C ± 0,1 °C. V tejto práci sledujeme osciláciu pri teplote 60 °C

Zvolí sa rozsah a počet frekvencií v rozsahu od 0,1 Hz do 10,0 Hz tak, aby vzorka pre zvolený obor teplôt bola skúšaná v lineárnej oblasti. Skúška začína pri prvej zvolenej teplote pri najnižšej alebo najvyššej frekvencií a podľa toho prechádza jednotlivé frekvencie buď vzostupne alebo zostupne. Po dokončení skúšania pri prvej teplote prejde

na ďalšiu a to maximálnou rýchlosťou ohrevu 5 °C za minútu. Skúška pokračuje do bodu, kedy sa nameria komplexný modul v šmyku mimo rozsahu zvolenej geometrie. Po dosiahnutí medze poddajnosti prístroja sa skúška automaticky zastaví.

Pre pokračovanie na ďalšie teploty je nutná nová geometria skúšobnej súpravy s novou nepoužitou vzorkou, ale rovnakého zloženia ako pri prvej teplote. Opäť sa pokračuje skúšaním mimo rozsah novej geometrie súpravy. Dĺžka skúšky pre akúkoľvek skúšobnú súpravu je maximálne 6 hodín, aby sa zabránilo väčším zmenám vo vlastnostiach spojív.

Všetky výsledky, kedy deformácie sú mimo lineárny obor spojiva alebo kde boli výsledky ovplyvnené poddajnosťou prístroja treba vylúčiť. Uvedú sa skúšobné frekvencie a teploty, pri ktorých boli zisťované skúmané veličiny. Teplota, pri ktorej sa vykonávala skúška s dvoma rozdielnymi geometriami sa nazýva prekrývajúca teplota. Pri tejto teplote musí byť splnené:

- Hodnoty $|G^*|$ oboch geometrií nesmú líšiť od priemeru $|G^*|$ z dvoch geometrií o viac ako 15 %.
- Hodnoty δ skúšobnej frekvencie sa od priemeru δ nesmú líšiť o viac ako 3 °

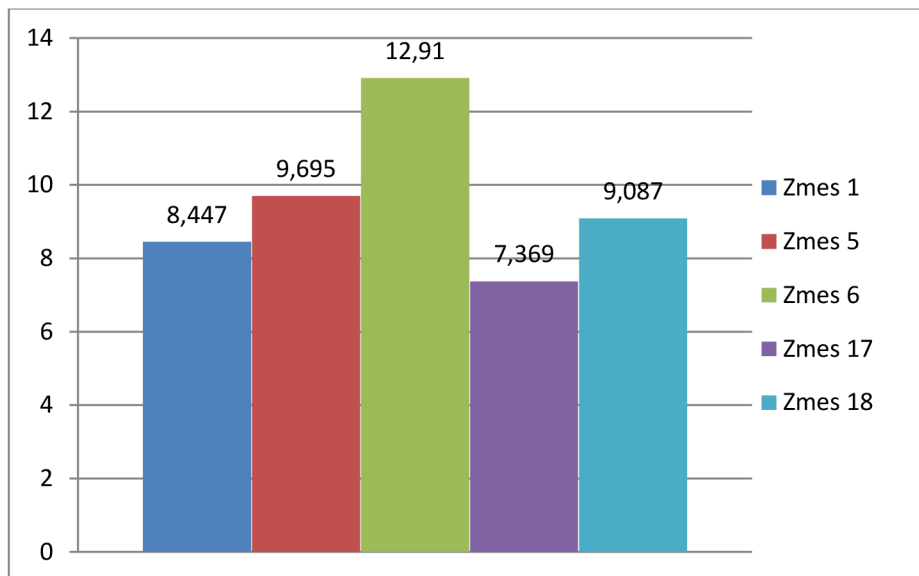
Pokiaľ niektorá z podmienok nie je splnená, skúška sa opakuje. V prípade viacerých prekrývajúcich teplôt musia byť dané podmienky splnené pre všetky takéto teploty.

Uvedú sa hodnoty komplexných modulov v šmyku $|G^*|$ v Pa na tri platné miesta a hodnoty uhlov fázového posunu v (°) zaokrúhlené na najbližšie 0,1 °. [44]

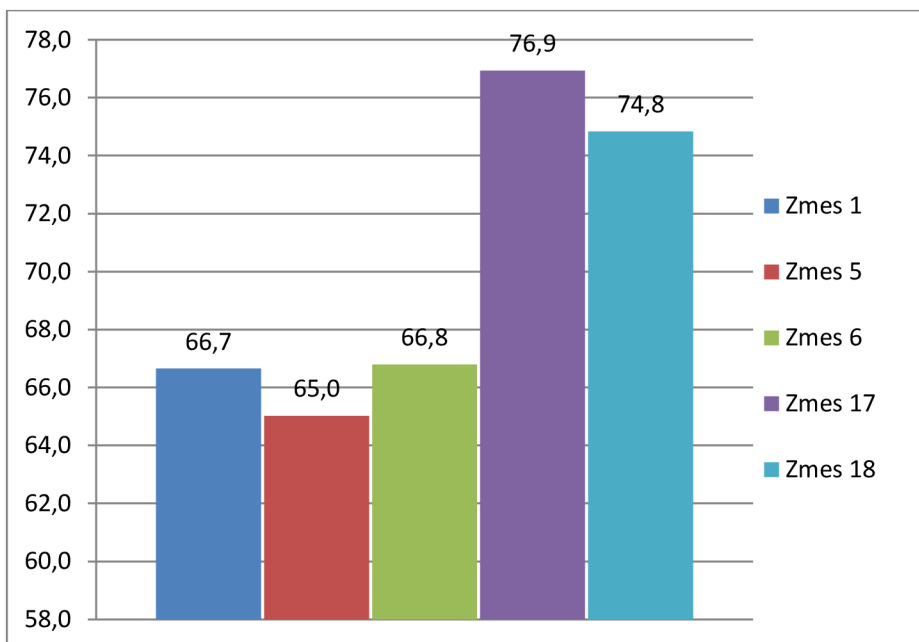
4.3.6.2 Výsledky skúšky oscilačné meranie

| ZMES | | oscilace | |
|------|---------------------------------|---------------|------------------|
| | | G^* (60 °C) | δ (60 °C) |
| | | [kPa] | [°] |
| 1 | PMB + S-CEL 7G | 8,447 | 66,7 |
| 5 | PMB + S-CEL 7G + 30% R-mat | 9,695 | 65,0 |
| 6 | PMB + S-CEL 7G + 50% R-mat | 12,91 | 66,8 |
| 17 | 50/70 + Storelastic + 30% R-mat | 7,369 | 76,9 |
| 18 | 50/70 + Storelastic + 50% R-mat | 9,087 | 74,8 |

Tabuľka č.23: Výsledky merania oscilácie pre teplotu 60 °C



Graf č. 9: Výsledky skúšky oscilácie - G^* v [kPa] pri 60 °C



Graf č. 10: Výsledky skúšky oscilácie - δ v [°] pri 60 °C

Výsledky oscilácie ukazujú výrazný rozdiel medzi zmesami s PMB a zmesami s cestným asfaltom. Komplexný modul v šmyku hovorí o tuhosti zmesi, vyššie číslo znamená väčšiu tuhosť. Zmesi číslo 1,5 a 6 s PMB sú medzi sebou zrovnateľné a vykazujú vyššiu tuhosť, kým zmesi 17 a 18 s cestným asfaltom sú menej tuhé.

Uhol fázového posunu vyjadruje pružnosť daného spojiva. Opäť môžeme zrovnat' medzi sebou zmesi s PMB, ktoré sú na základe výsledkov pružnejšie. Zmesi s cestným asfaltom vykazujú menšiu pružnosť.

4.3.7. Skúška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test)

MSCR je skúška definovaná normou ČSN 16659 – *Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test)*. Táto skúšobná metóda sa používa k stanoveniu prítomnosti elastickej odozvy asfaltu a asfaltových spojív za podmienok šmykového dotvarovania a následného zotavovania pri dvoch rôznych hodnotách šmykového napätia pri určitej teplote. Zistilo sa, že nevratná šmyková poddajnosť slúži ako indikátor odolnosti asfaltu alebo asfaltového spojiva voči tvorbe trvalých plastických deformácií pri opakovanom zaťažení.

Zisťované veličiny sú:

- Dotvarovanie (creep) a zotavenie (recovery)
- Percentuálne zotavenie
- Nevratná šmyková poddajnosť

Dotvarovanie a zotavenie je štandardným reologickým postupom. Vzorka je podrobená konštantnému zaťaženiu po stanovenú dobu a následnému umožneniu jeho návratu do pôvodného stavu po určitú dobu pri nulovom zaťažení.

Percentuálne zotavenie (%R) je veličina vyjadrená v percentách, ktorá má pri opakovanom zaťažení na rôznej úrovni šmykového napätia stanoviť prítomnosť elastickej odozvy (vratného pretvorenia) asfaltového spojiva behom zotavovacej fáze skúšobného cyklu a jej závislosť od napätia.

Nevratná šmyková poddajnosť (J_{nr}) je veličina určujúca plastické deformácie (zostatkové pretvorenie) vzorky po ukončení cyklu dotvarovania a zotavenia

Skúška prebieha pri teplote 50 °C, 60 °C, 70 °C alebo 80 °C, prípadne iných teplotách slúžiacich pre porovnávacie účely. V tejto práci boli zvolené teploty 50 °C a 60 °C. Prípravu vzoriek a skúšobný prístroj definuje ČSN EN 14770. Pre meranie sa použije geometria paralelnej dosky s priemerom 25 mm a medzerou nastavenou na 1 mm. Skúšobná vzorka je podrobená zaťaženiu konštantným napätím po dobu 1 sekundy a následne jej je umožnené zotavovanie po dobu 9 sekúnd. Vykoná sa 10 cyklov skúšky s fázou dotvarovania a zotavenia pri šmykovom napätí 0,1 kPa a 10 cyklov pri napätí 3,2 kPa.

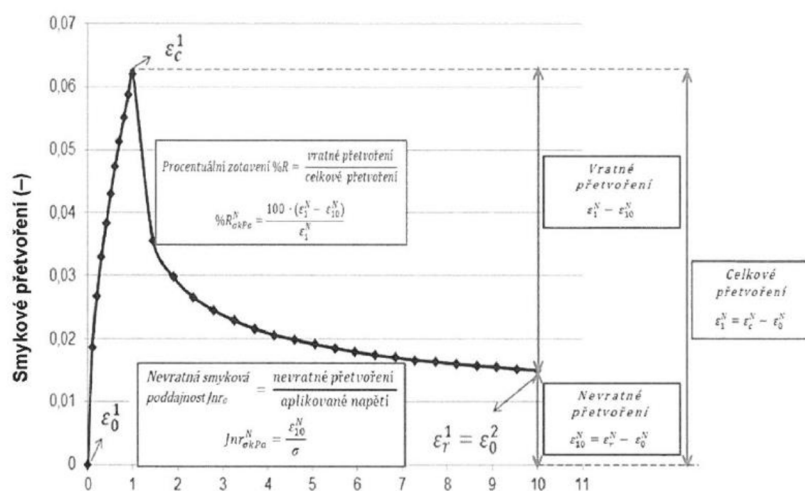
4.3.7.1 Postup skúšky MSCR

Reometer sa nastaví podľa postupu dodaného výrobcom. Po vybratí vzorky z formy sa skúška vykonáva najskôr po 30 minútach a najneskôr o 24 hodín. Doštičky sa vyčistia, po zahriatí reometru na skúšobnú teplotu sa nastaví nulová medzera 1 mm a vzorka veľkosti 25 mm sa umiestni medzi doštičky reometru. Po dosadnutí doštičiek na nulovú medzeru sa prebytočné spojivo odstráni a v prípade nepokrytia celej plochy doštičiek sa nahradí novou vzorkou..

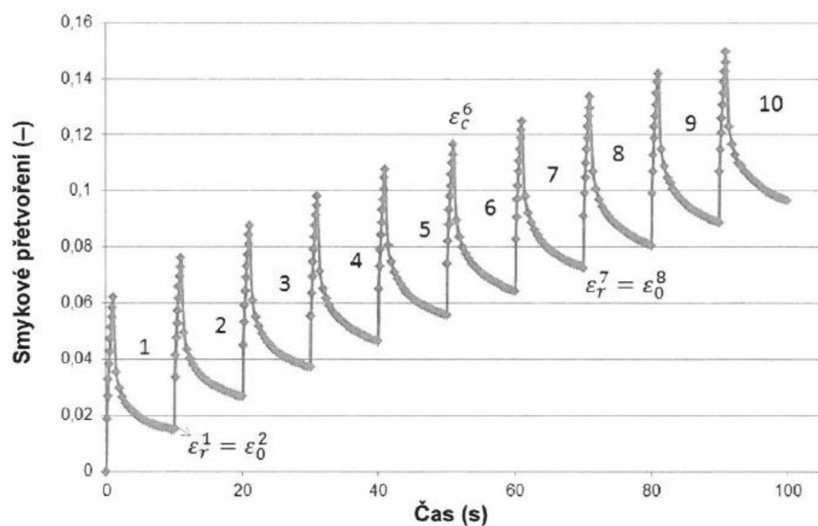
Vzorka sa zaťaží konštantným šmykovým napätím 0,100 kPa po dobu trvania 1 sekundy fáze dotvarovania a následne prebieha zotavovanie pri nulovom šmykovom napätí po dobu 9 sekúnd. Hodnota napätia a pretvorenia je zaznamenávaná aspoň každú 0,1 sekundu pre fázu dotvarovania a 0,45 sekúnd pre fázu zotavovania. Systém by mal umožňovať zaznamenanie k bodom 1 sekunda a 10 sekúnd s odchýlkou 0,05 sekundy. Fáza dotvarovania a zotavenia sa bez prerušenia vykoná 10 cyklov po sebe.

Pre každý z cyklov sa zaznamenávajú hodnoty, smerodajné pre túto bakalársku prácu sú:

- $J_{nr,3,2kPa}$ - nevratná šmyková poddajnosť na hladine 3,2 kPa
- $J_{nr-diff}$ - Rozdiel nevratnej šmykovej poddajnosti v percentách medzi zaťažením šmykovým napätím 0,1 kPa a 3,2 kPa
- $\%R_{3,2kPa}$ - Priemerné percentuálne zotavenie na hladine šmykového napätia 3,2 kPa
- R_{diff} - Rozdiel v priemernom zotavení vyjadrený v percentách pri zaťažení šmykovým napätím 0,1 kPa a 3,2 kPa [45]



Obrázok č. 56: Schéma cyklu dotvarovania a zotavenia [45]



Obrázok č. 57: Krivka dotvarovania a zotavenia 10 po sebe nasledujúcich cyklov [45]

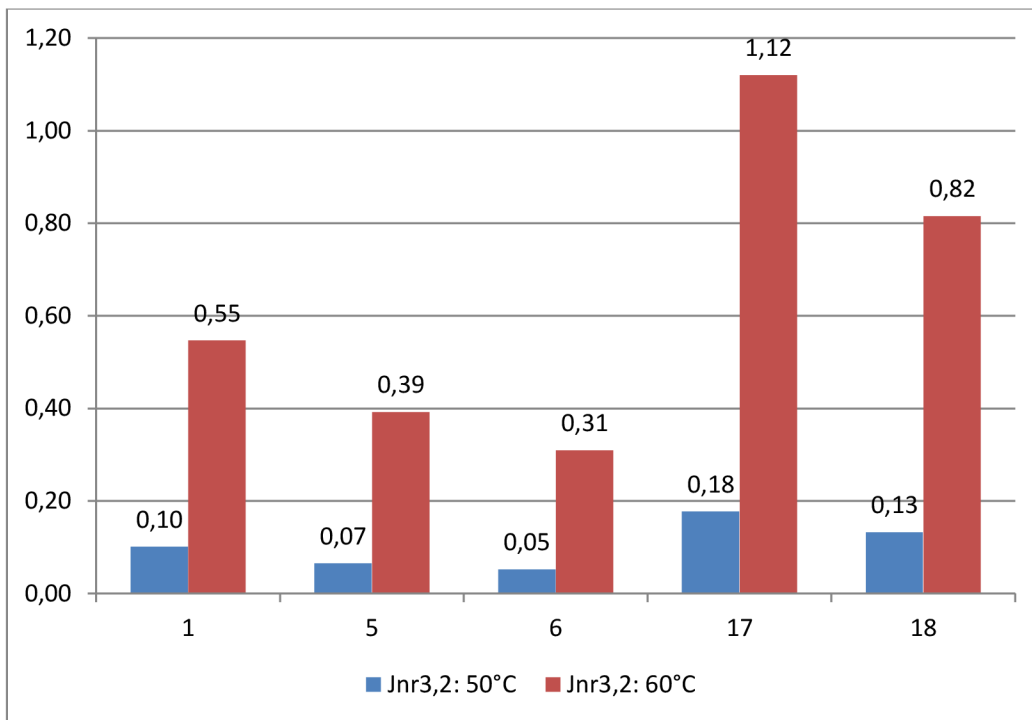
4.3.7.2 Výsledky skúšky MSCR

| ZMES | | MSCR při 50°C dle ČSN EN 16659 | | | |
|------|---------------------------------|--------------------------------|---------------|-----------|------------|
| | | $J_{nr3,2}$ | $J_{nr diff}$ | $R_{3,2}$ | R_{diff} |
| | | [kPa ⁻¹] | [%] | [%] | [%] |
| 1 | PMB + S-CEL 7G | 0,10 | 11,85 | 53,80 | 6,99 |
| 5 | PMB + S-CEL 7G + 30% R-mat | 0,07 | 24,07 | 63,64 | 7,03 |
| 6 | PMB + S-CEL 7G + 50% R-mat | 0,05 | 8,43 | 61,77 | 3,12 |
| 17 | 50/70 + Storelastic + 30% R-mat | 0,18 | 26,30 | 29,94 | 24,35 |
| 18 | 50/70 + Storelastic + 50% R-mat | 0,13 | 32,49 | 36,30 | 23,37 |

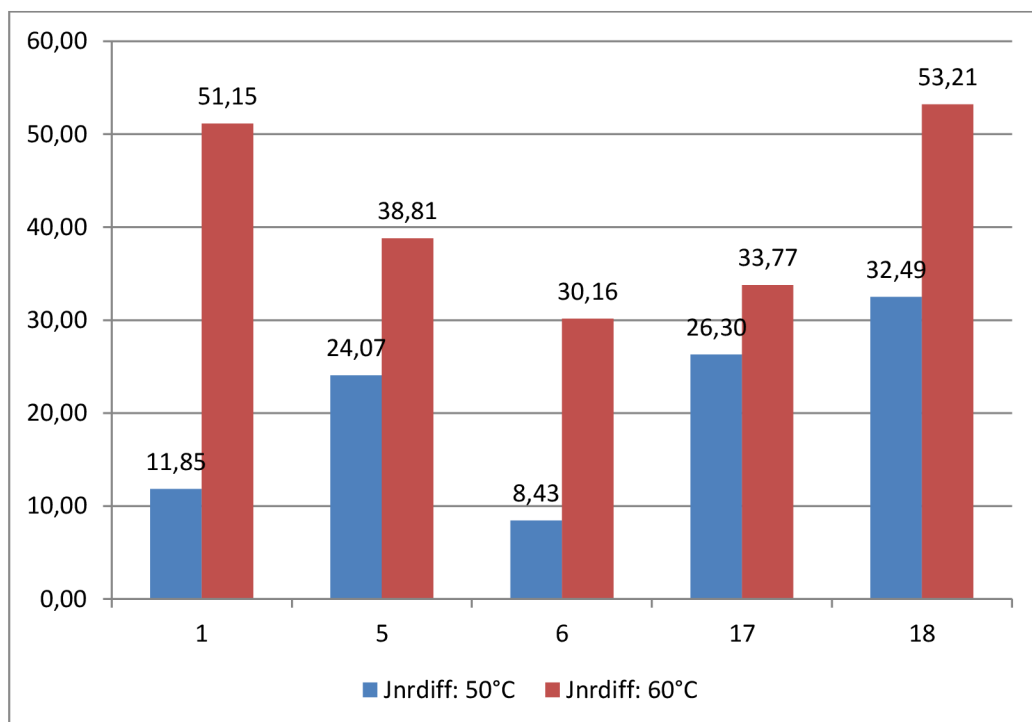
Tabuľka č.24: Výsledky merania MSCR pre teplotu 50 °C

| ZMES | | MSCR při 60°C dle ČSN EN 16659 | | | |
|------|---------------------------------|--------------------------------|---------------|-----------|------------|
| | | $J_{nr3,2}$ | $J_{nr diff}$ | $R_{3,2}$ | R_{diff} |
| | | [kPa ⁻¹] | [%] | [%] | [%] |
| 1 | PMB + S-CEL 7G | 0,55 | 51,15 | 32,74 | 33,52 |
| 5 | PMB + S-CEL 7G + 30% R-mat | 0,39 | 38,81 | 41,49 | 22,25 |
| 6 | PMB + S-CEL 7G + 50% R-mat | 0,31 | 30,16 | 41,41 | 18,44 |
| 17 | 50/70 + Storelastic + 30% R-mat | 1,12 | 33,77 | 8,25 | 61,38 |
| 18 | 50/70 + Storelastic + 50% R-mat | 0,82 | 53,21 | 13,32 | 57,81 |

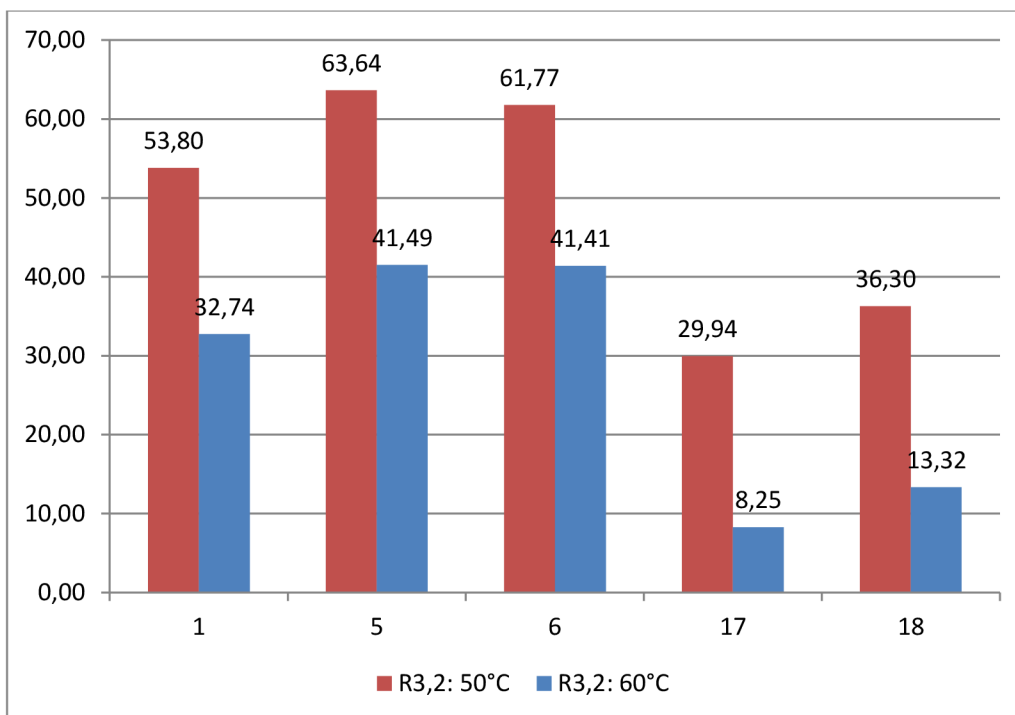
Tabuľka č.25: Výsledky merania MSCR pre teplotu 60 °C



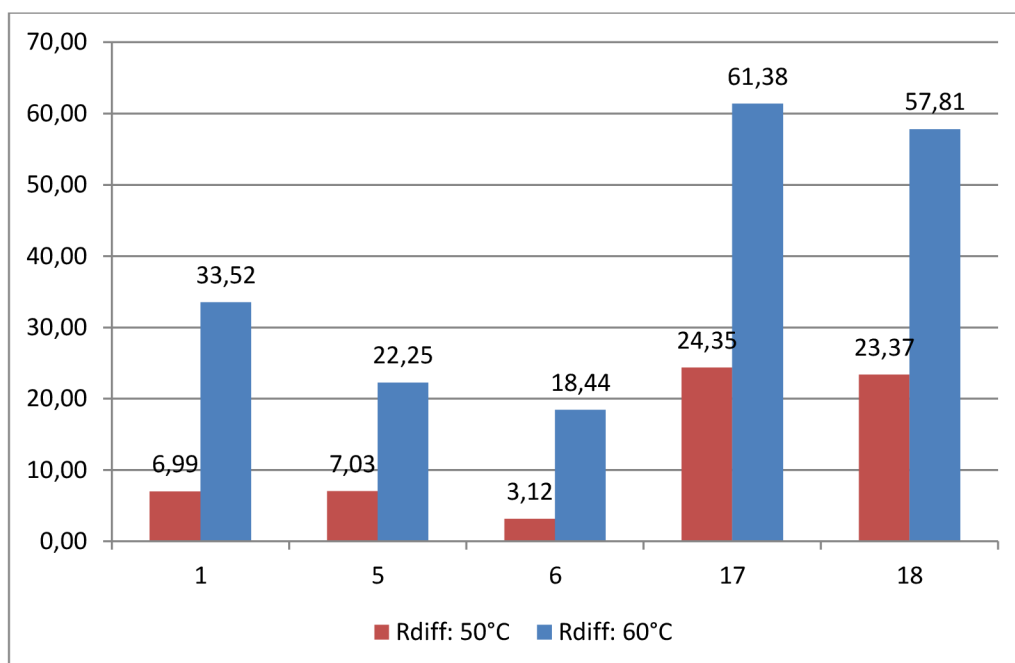
Graf č.11: Nevratná šmyková poddajnosť $J_{nr3,2}$ [kPa^{-1}]



Graf č.12: Rozdiel v nevratnej šmykovej poddajnosti $J_{nr diff}$ [%]



Graf č.13: Priemerné elastické zotavenie $R_{3,2}$ [%]



Graf č.14: Rozdiel v elastickom zotavení R_{diff} [%]

Z grafov je viditeľný výrazný rozdiel medzi pôsobením teplôt 50 °C a 60 °C na skúšku MSCR. Vyššia teplota spôsobuje zhoršenie vlastností asfaltového spojiva.

U hodnôt nevratnej šmykovej poddajnosti $J_{nr3,2}$ platí, že čím je hodnota menšia, tým väčšiu schopnosť navrátiť sa do pôvodného stavu má asfaltové spojivo. U priemerného

elastického zotavenia $R_{3,2}$ je naopak výhodnejšia vyššia hodnota, ktorá charakterizuje schopnosť spojiva sa navrátiť do pôvodného stavu.

Výsledky skúšok ukazujú, že zmesi s PMB sa ukazujú ako výrazne pružnejšie v porovnaní so zmesami s cestným asfaltom. Zmesi 5 a 6 s obsahom R-materiálu dokazujú vyššiu pružnosť oproti zmesi číslo 1 bez prítomnosti R-materiálu. Tento fakt môžeme pripísať vplyvu rejuvenátoru, ktorý dostatočne oživil asfaltové spojivo. Zmesi číslo 17 a 18 s cestným asfaltom gradácie 50/70 dosahujú nepriaznivejších hodnôt, sú menej pružné.

5. ZÁVER

Z výsledkov skúšok môžeme usúdiť, že prítomnosť R-materiálu nemá vplyv na vlastnosti výslednej zmesi. Pozorovateľný je pozitívny vplyv rejuvenátoru na oživenie vlastností zostarnutého spojiva, ktoré sa vyrovná nezostarnutému spojivu.

Výsledky skúšok DSR a MSCR sú výrazne odlišné od výsledkov konvenčných skúšok. Kým pri hodnotách penetrácie a bodu mäknutia nebol zaznamenaný rozdiel medzi výsledkami jednotlivých vzoriek, reologické skúšky tento rozdiel ukazujú. To vedie k otázke, ktorými skúškami je vhodné sa riadiť.

Z výsledkov reologických skúšok môžeme usúdiť, že modifikácia cestného asfaltu prísadou Storelastic neprebehla podľa očakávaní. Modifikácia prísadou Storelastic nenastala do takej miery, aby sa zmesi s cestným asfaltom vyrovnali výsledkami zmesiam s PMB. Dôvodom môže byť fakt, že Storelastic zostal zachytený na kamenive pri sitovom rozbere a ďalšie merania prebiehali bez prítomnosti tejto prísady. Otázkou je, či táto prísada jednorázovo modifikuje asfaltové spojivo zmenou jeho vlastností po zamiešaní alebo musí byť fyzicky prítomná v asfaltovej zmesi.

6. ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] FLAT, Zdenko, Jozef HLADKÝ a Juraj KELEŠI. *Dopravní stavby I pro 3. ročník SPŠ stavebních*. Praha: SNTL, 1988.
- [2] VARAUS, Michal. *Recyklace asfaltových směsí na obalovně* [online]. 15.5.2013, 25 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.konference-projektovani.cz/rocnik-2013/prezentace/data/19-varaus.pdf>.
- [3] PŘÍVARA, Jakub. *Využití běžného R-materiálu v asfaltových směsích*. Brno, 2016. 73 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [4] TP 210. Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy – OSI, 2010.
- [5] ZAJÍČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [6] Bomag - stabilizační a recyklační frézy. In: *Bomag Fayat Group* [online]. Poprad, 2010 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.bomag.sk/bomag-stabilizacne-recyklačne-frezy.html>
- [7] VALENTIN, Jan. *Recyklace asfaltových vozovek: Technologie, specifikace* [online]. 1.12.2012, 24 s [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://readgur.com/doc/168845/recyklace-asfaltov%C3%BDch-vozovek—katedra-silni%C4%8Dn%C3%ADch-staveb>
- [8] TP 209. Recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek na místě za horka. Ministerstvo dopravy – OSI, 2009.
- [9] Externí výroba recyklátu. In: *Recyklační středisko Brno-Modřice* [online]. Recyklační středisko Brno, 2018 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.brnorecyklace.cz/externi-vyroba-recyklatu>
- [10] VARAUS, Michal. *Asfaltové směsi s vysokým obsahem R-materiálu* [online]. 2015, 9 s [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.sdruzeni-silnice.cz/Download.aspx?param=jx3godhnp7M1LWTdfUhReMaO1ImXeAzRHrBhMFAG%2F%2BNJ2D9EP6fcyxLCHzM2Y0X3hN2biYcg6zTd9ebdiEYm4Um665IIPVjKLGdOao09kkl2dWYuNopTo9TpC7jh8hO8pt4K%2B8y7YbmumSxDu8MjcSrDIF4uiQhW80jO7P%2BRtxdROoPZkGMxUzH1nRGQZLkU%2Fb9pntghZabNDnU%2Fsmfm%2BILIRyiPHrrFivxKgojU5Keliso8UjQZQKUHJIEID8CpFlkXJIOEDOPiV8X6S%2F96z%2BU91Ei0Vja8oZuAeCUYW15isovLMhHMIfc80PzkFwiHTYOYwPK86iYD%2BR4vabVtuZovsMytos9iOZ9GB4W2SGAa54btP%2F2EYn2s1kjbzYuHGP9318F4XrbjZMcOWdivhHTATx0qYD1Yo5uXkt%2F3CwGhfCtkZMq4>

- D6zKeibTfo5dyGU47i3tjgZOFcvdV8EAuTwTPDv0ZOubEpxuv1tRivYm%2FN7%2BTKP1AhgZdKmSfIH%2FIqmeDwFf6tLeESLbA%3D%3D&tname=SiteContent.aspx
- [11] VARAUS, M.; HÝZL, P.; STEHLÍK, D.; VALENTIN, J.; MONDSCHNEIN, P.; PAZYNA, R.; SVOBODA, P.; MATOUŠEK, D.: Metodika RAP; *Metodika aplikace R-materiálu v asfaltových směsích*. Silniční laboratoř PKO
- [12] Frézování dopravních ploch. In: *Freko* [online]. Praha, 2015-17 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.freko.cz/sluzby/dopravni-stavby/frezovani-dopravnich-ploch/>
- [13] Cold recycler 2200 CR. In: *Wirtgen* [online]. Germany, 2018 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <https://www.wirtgen.de/en/products/cold-recyclers-soil-stabilizers/cold-recyclers/2200cr.php>
- [14] ČSN EN 13108-8 ed.2. Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál. 2017
- [15] ČSN EN 13108-1. Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton. Praha, 2008
- [16] BLAŽEK, Jan. *Užití R-materiálu v asfaltových směsích typu SMA*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Petr Mondschein, Ph.D
- [17] ŠINDELÁŘOVÁ, Tereza. *Využití rejuvenátorů v asfaltových směsích s R-materiálem*. Praha, 2013. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Petr Mondschein, Ph.D
- [18] GSCHWENDT, Ivan. *Vozovky: obnova, zesilování a rekonstrukce*. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-8076-005-5
- [19] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II, Modul 3, Asfaltová pojiva*. Elektronické skriptum, FAST VUT, Brno, 17 s
- [20] Trinidad's Pitch Lake. In: *The Flying Kiwi* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.richard-seaman.com/Travel/TrinidadAndTobago/Trinidad/PitchLake>
- [21] Pitch Lake: The World's Largest Natural Asphalt Lake. In: *Techblog* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.techeblog.com/index.php/tech-gadget/pitch-lake-the-world-s-largest-natural-asphalt-lake>
- [22] ČSN EN 12591. Asfalty a asfaltová pojiva - Specifikace pro silniční asfalty. 2009
- [23] ČSN EN 14023. Asfalty a asfaltová pojiva - Systém specifikace pro polymerem modifikované asfalty. 2010
- [24] ČSN EN 13108-5. Asfaltové směsi – specifikace pro materiály – část 5: Asfaltový koberec mastixový. Oprava 1. Praha, 2008

- [25] Celostátní sčítání dopravy 2010. *Ředitelství silnic a dálnic ČR* [online]. [cit. 2018-05-12].
Dostupné z: <http://scitani2010.rsd.cz/pages/map/default.aspx>
- [26] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z:
<https://sk.mapy.cz/zakladni?x=18.2143990&y=49.1134990&z=11>
- [27] Silniční vlákna S-CEL 7G. *CIUR a.s.* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<http://www.ciur.cz/produkty/obsah/silnicni-vlakna-s-cel-7g>
- [28] Additive und Rejuvenatoren, Gummimodifizierter Asphalt. *Storimpex Unternehmensgruppe* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<http://www.storimpex.de/asphalt.html>
- [29] MALÁ, Markéta. *Využití R-materiálu v krytových vrstvách vozovek*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [30] BROWNRIDGE, J. *The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation*. Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation.
- [31] URBANEC, Luboš. *Problematika zvyšování podílu R-materiálu v asfaltových směsích*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [32] Oplulent Marketing. *Uteeni* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
<https://www.uteeni.com/th/listings/opulent-marketing>
- [33] EN 932-2 Zkoušení všeobecných vlastností kameniva - Část 2: Metody zmenšování laboratorních vzorku
- [34] ČSN EN 12697-3. Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – část 3: znovuzískání extrahovaného pojiva: rotační vákuové destilační zařízení. 2008
- [35] TRÁVNÍČEK, Dušan. *Segregace směsí do vozovek pozemních komunikací*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
- [36] ČSN EN 933-1. Zkoušení geometrických vlastností kameniva – část 1: stanovení zrnitosti – sítový rozbor. 1998
- [37] Zrnitost zemin. *Wikiwand* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z:
http://www.wikiwand.com/cs/Zrnitost_zemin
- [38] ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. 2007.
- [39] ŘEZÁČ, Miloslav. *Systémy hospodaření s dopravní infrastrukturou* [online]. , 14 [cit. 2018-

- 05-13]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2890429>
- [40] Penetrometr digital. In: *BFI Praha s.r.o.* [online]. [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <https://bfi.cz/penetrometr-digital>
- [41] Zkoušení asfaltových pojiv [online]. , 23 s [cit. 2018-05-13]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2864707>
- [42] ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička. 2007
- [43] MUSIL, Vladimír. *Relaxace smykového napětí asfaltových pojiv v DSR*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, 2015. 72 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Ondřej Dašek, Ph.D
- [44] ČSN EN 14770 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR). 2006
- [45] ČSN EN 16659 - Asfalty a asfaltová pojiva – Zkouška MSCR (Multiple Stress Creep and Recovery Test). 2016.

7. ZOZNAM OBRÁZKOV

| | |
|--|----|
| Obrázok č. 1: Recyklácia na mieste s použitím recyklačnej frézy [5]..... | 16 |
| Obrázok č. 2: Recyklačná fréza Bomag [6]..... | 17 |
| Obrázok č. 3: Princíp technológie Remix [7]..... | 18 |
| Obrázok č. 4: Princíp technológie Remix Plus [7]..... | 18 |
| Obrázok č. 5: Zostava strojov používaných pre recykláciu za studena [7]..... | 19 |
| Obrázok č. 6: Betónový recyklát frakcii 0/8, 8/32, 32/64 mm [9]..... | 21 |
| Obrázok č. 7: Zmesný recyklát frakcii 0/8, 8/32, 32/64 mm [9]..... | 21 |
| Obrázok č. 8: R-materiál (asfaltový recyklát) frakcii 0/8, 8/32, 32/64 mm [9]..... | 21 |
| Obrázok č. 9: Schéma šaržovej obalovne [2]..... | 22 |
| Obrázok č. 10: Šaržová obalovna s pridávaním R-materiálu do miešačky [2]..... | 23 |
| Obrázok č. 11: Nezastrešené skládky kameniva [2]..... | 23 |
| Obrázok č. 12: Schéma šaržovej obalovne s predhrievaním R-materiálu [2]..... | 24 |
| Obrázok č. 13: Paralelný sušiaci bubon pre pridávanie R-materiálu [2]..... | 24 |
| Obrázok č. 14: Schéma kontinuálnej obalovne s pridávaním R-materiálu [2]..... | 25 |
| Obrázok č. 15: Pridávanie R-materiálu súbežne s prúdom horúceho vzduchu [10]..... | 25 |
| Obrázok č. 16: Pridávanie R-materiálu proti prúdu horúceho vzduchu [10]..... | 26 |
| Obrázok č. 17: Separátne vysušenie R-materiálu a premiešanie v miešačke [10]..... | 26 |
| Obrázok č. 18: Búranie konštrukcie vozovky vo forme kryh [3]..... | 27 |
| Obrázok č. 19: Frézovanie konštrukcie vozovky [12]..... | 28 |
| Obrázok č. 20: Cestná fréza Wirtgen WR2200CR [13]..... | 29 |
| Obrázok č. 21: Komponenty asfaltu [17]..... | 33 |
| Obrázok č. 22: Asfaltové jazero Trinidad: Pitch Lake [20]..... | 34 |
| Obrázok č. 23: Prírodný asfalt z jazera Trinidad [21]..... | 34 |
| Obrázok č. 24: Schéma frakčnej destilácie ropy [5]..... | 35 |
| Obrázok č. 25: Teplotná závislosť visko-elastických vlastností asfaltu [19]..... | 37 |
| Obrázok č. 26: Obor použiteľnosti asfaltových spojív [5]..... | 37 |
| Obrázok č. 27: Porovnanie zrnitosti zmesí typu SMA a AC [5]..... | 42 |
| Obrázok č. 28: Typická čiara zrnitosti zmesi SMA 11 S [5]..... | 43 |
| Obrázok č. 29: Rekonštrukcia cesty II/227 v roku 2016..... | 46 |
| Obrázok č. 30: Predmetný úsek skúmania [26]..... | 46 |
| Obrázok č. 31: Skúška stekavosti pre rôzne dávkovanie celulózových vláken [5]..... | 48 |

| | |
|---|----|
| Obrázok č. 32: Celulózové vlákna S-CEL 7G [27] | 49 |
| Obrázok č. 33: Účinok rejuvenátorov na zostarnuté asfaltové spojivo [30]..... | 50 |
| Obrázok č. 34: Rejuvenátory od firmy Storimpex [32]..... | 51 |
| Obrázok č. 35: Váženie jednotlivých vzoriek R-materiálu..... | 53 |
| Obrázok č. 36: Umiestnenie patróny s filtračným papierom [35]..... | 53 |
| Obrázok č. 37: Prietoková laboratórna odstredivka pre oddelenie kameniva [35]..... | 54 |
| Obrázok č. 38: Skúšobné formy a misky [3]..... | 56 |
| Obrázok č. 39: Rotačné vákuové destilačné zariadenie..... | 56 |
| Obrázok č. 40: Zmes asfaltového spojiva a rozpúšťadla v banke v olejovom kúpeli..... | 56 |
| Obrázok č. 41: Prístroj na vibračné preosievanie kameniva [37] | 58 |
| Obrázok č. 42: Váženie zostatku na jednotlivých sitách..... | 58 |
| Obrázok č. 43: Podstata skúšky penetrácie ihlou [39]..... | 64 |
| Obrázok č. 44: Príklad penetrometru [40]..... | 65 |
| Obrázok č. 45: Schéma usporiadania skúšky penetrácie [38]..... | 65 |
| Obrázok č. 46: Penetrácia ihlou do vytemperovaného vzorku [41]..... | 66 |
| Obrázok č. 47: Podstata skúšky stanovenia bodu mäknutia metódou KK [41]..... | 68 |
| Obrázok č. 48: Prístroj pre skúšku bodu mäknutia metódou KK..... | 68 |
| Obrázok č. 49: Prepad guľôčok asfaltovým spojivom..... | 70 |
| Obrázok č. 50: Znázornenie pohybov reometra – rotácia a oscilácia [43]..... | 72 |
| Obrázok č. 51: Reometer KINEXUS pro +..... | 72 |
| Obrázok č. 52: Vybavenie reometru [43]..... | 73 |
| Obrázok č. 53: Typy geometrie: A – doska-doska, B – kužeľ-doska [5]..... | 74 |
| Obrázok č. 54: Znázornenie oscilácie a jej pôsobenia [5]..... | 75 |
| Obrázok č. 55: Grafické znázornenie výsledkov merania oscilácie [5]..... | 76 |
| Obrázok č. 56: Schéma cyklu dotvarovania a zotavenia [45]..... | 80 |
| Obrázok č. 57: Krivka dotvarovania a zotavenia 10 nasledujúcich cykloch [45]..... | 81 |

8. ZOZNAM TABULIEK

| | |
|--|----|
| Tabuľka č. 1: Porovnanie využitia R-materiálu vo vybraných krajinách [3]..... | 12 |
| Tabuľka č. 2: Požiadavky skúšok na zmesi pre recykláciu na mieste [8]..... | 20 |
| Tabuľka č. 3: Povolené množstvo R-materiálu do vrstiev typu AC [15]..... | 30 |
| Tabuľka č. 4: Povolené množstvo R-materiálu do ostatných typov zmesí [15]..... | 31 |
| Tabuľka č. 5: Požiadavky na najbežnejšie používané cestné asfalty [22]..... | 40 |
| Tabuľka č. 6: Požiadavky na modifikované asfalty [23]..... | 42 |
| Tabuľka č. 7: Doporučený typ zmesi podľa intenzity dopravy vozidiel [24]..... | 44 |
| Tabuľka č. 8: Skúmané zmesi a ich zloženie..... | 47 |
| Tabuľka č. 9: Požiadavky na vlastnosti zmäkčovadla Storflux podľa EN 932-2 [33]..... | 51 |
| Tabuľka č. 10: Predpísané skúšobné podmienky podľa typu rozpúšťadla [34]..... | 55 |
| Tabuľka č. 11: Požiadavky na kamenivo pre zmesi typu SMA [24]..... | 59 |
| Tabuľka č. 12: Zastúpenie jednotlivých frakcií zmesi číslo 5..... | 59 |
| Tabuľka č. 13: Posúdenie zmesi číslo 5 podľa ČSN EN 933-1..... | 60 |
| Tabuľka č. 14: Zastúpenie jednotlivých frakcií zmesi číslo 6..... | 60 |
| Tabuľka č. 15: Posúdenie zmesi číslo 6 podľa ČSN EN 933-1..... | 60 |
| Tabuľka č. 16: Zastúpenie jednotlivých frakcií zmesi číslo 17..... | 60 |
| Tabuľka č. 17: Posúdenie zmesi číslo 17 podľa ČSN EN 933-1..... | 60 |
| Tabuľka č. 18: Zastúpenie jednotlivých frakcií zmesi číslo 18..... | 61 |
| Tabuľka č. 19: Posúdenie zmesi číslo 18 podľa ČSN EN 933-1..... | 61 |
| Tabuľka č. 20: Požiadavky na opakovateľnosť skúšky penetrácie ihlou [38]..... | 66 |
| Tabuľka č. 21: Výsledky merania penetrácie ihlou v p.u..... | 67 |
| Tabuľka č. 22: Výsledky merania bodu mäknutia metódou KK v °C..... | 71 |
| Tabuľka č. 23: Výsledky merania oscilácie pre teplotu 60 °C..... | 77 |
| Tabuľka č. 24: Výsledky merania MSCR pre teplotu 50 °C..... | 81 |
| Tabuľka č. 25: Výsledky merania MSCR pre teplotu 60 °C..... | 81 |

9. ZOZNAM GRAFOV

| | |
|---|----|
| Graf č. 1: Vývoj ceny asfaltu [3]..... | 10 |
| Graf č. 2: Zrinitosť zmesi 5 s limitnými hodnotami pre SMA podľa EN 13108-5 | 61 |
| Graf č. 3: Zrinitosť zmesi 6 s limitnými hodnotami pre SMA podľa EN 13108-5 | 62 |
| Graf č. 4: Zrinitosť zmesi 17 s limitnými hodnotami pre SMA podľa EN 13108-5..... | 62 |
| Graf č. 5: Zrinitosť zmesi 18 s limitnými hodnotami pre SMA podľa EN 13108-5..... | 63 |
| Graf č. 6 : Zrinitosť zmesí s limitnými hodnotami pre SMA 11 S podľa EN 13108-5..... | 63 |
| Graf č. 7: Grafické znázornenie výsledkov merania penetrácie ihlou v p.u..... | 67 |
| Graf č. 8: Grafické znázornenie skúšky bodu mäknutia metódou KK v °C..... | 71 |
| Graf č. 9: Výsledky skúšky oscilácie - G^* v [kPa] pri 60 °C..... | 78 |
| Graf č. 10: Výsledky skúšky oscilácie - δ v [°] pri 60 °C..... | 78 |
| Graf č. 11: Nevratná šmyková poddajnosť $J_{nr3,2}$ [kPa ⁻¹]..... | 82 |
| Graf č. 12: Rozdiel v nevratnej šmykovej poddajnosti $J_{nr\text{diff}}$ [%]..... | 82 |
| Graf č. 13: Priemerné elastické zotavenie $R_{3,2}$ [%]..... | 83 |
| Graf č. 14: Rozdiel v elastickom zotavení R_{diff} [%]..... | 83 |