

# **UŽITÍ R-MATERIÁLU V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH TYPU SMA**

## **RECLAIMED ASPHALT IN STONE MASTIC ASPHALT**

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.

**Bc. Jan Blažek**



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Blažek	Jméno: Jan	Osobní číslo: _____
Zadávací katedra: katedra silničních staveb		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce a dorpava		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Užití R-materiálu v asfaltových směsích typu SMA	
Název diplomové práce anglicky: Reclaimed Asphalt in Stone Mastic Asphalt	
Pokyny pro vypracování: Rešerše problematiky recykálce v technologii asfaltových směsích vyráběných za horka, technologické možnosti výroby, požadavky na asfaltový recyklát, ověření možnosti přidávání R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 21.2.2017	Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
_____ Podpis vedoucího práce	_____ Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

21.2.2017	_____ Podpis studenta(ky)
_____ Datum převzetí zadání	



**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce p. Ing. Petra Mondscheina, Ph.D a pracovníků kolektivu silniční laboratoře Fakulty stavební.

Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých bylo čerpáno, jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne .....

.....

Bc. Jan Blažek



### **Poděkování:**

Děkuji vedoucímu diplomové práce p. Ing. Petrovi Mondscheinovi, Ph.D. za poskytnutí cenných rad, čas strávený při konzultacích a trpělivé vedení mé práce. Poděkování dále náleží i všem ostatním členům kolektivu silniční laboratoře Fakulty stavební ČVUT za podnětné rady a pomoc, a to především pí. Ing. Pavle Vackové a p. Ing. Janu Valentinovi, Ph.D. Je namístě zde poděkovat i své rodině za její ustavičnou podporu v průběhu mého studia.





## ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je ověření možností užití R-materiálu v asfaltových směsích typu SMA. Tato práce v teoretické části řeší rešerši problematiky recyklace asfaltových směsí s důrazem na technologii recyklace asfaltových směsí vyráběných za horka. Dále bylo předmětem práce ověření možnosti přidávání R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA. Zvolený problém byl řešen rozбором vlastností 12 různých asfaltových směsí typu SMA s příměsí R-materiálu a dalších přísad. Pro každou směs byla vyrobena Marshallova tělesa a byly naměřeny moduly tuhosti při teplotách 0°C, 15°C a 27°C. Dále byla provedena extrakce asfaltového pojiva, rozbor zrnitosti kameniva a základní zkoušky asfaltového pojiva. Ze získaných dat je možné usuzovat, že přidáním aditiv lze silně ovlivnit vlastnosti přidávaného R-materiálu a tedy i výsledné asfaltové směsi. Na základě zjištěných údajů usuzují, že i při vysokém obsahu R-materiálu je možné vyrábět kvalitní směsi typu SMA. Je však nutné věnovat patřičnou pozornost množství a typu použitých přísad.

Klíčová slova:

Asfaltová směs, SMA, R-materiál, recyklace, recyklace za horka na obalovně



## ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to verify the possibilities of using reclaimed material in SMA (stone mastic asphalt) mixtures. The text in the theoretical part deals with the research into the recycling of asphalt mixtures, with an emphasis on the recycling technology used by hot off-site recycling. The second part of the work involved investigation into the possibility of adding R-material to SMA type asphalt mixtures. The chosen problem was solved by analyzing the properties of a 12 SMA asphalt mixture with an admixture of R-material and other additives. Stiffness modules were measured for each mixture at 0 °C, 15 °C and 27 °C. Following that, asphalt binder extractions were made; gravel aggregate analysis and basic tests of asphalt binders were implemented. From the data obtained, it can be assumed that the addition of additives can greatly influence the properties of the added R-material and the behavior of asphalt mixtures. Based on the findings, it is found that even with a high content of R-material, it is possible to produce high quality SMA type mixtures. However, attention should be paid to the amount and the type of ingredients used.

Key words:

Asphalt mixture, SMA, R-material, recycling, hot off site recycling



## OBSAH

1. Úvod .....	10
2. Asfaltové směsi .....	12
2.1 Asfaltové směsi pro obrusnou vrstvu .....	14
2.1.1 Asfaltový beton (ACO).....	14
2.1.2 Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy (BBTM) .....	15
2.1.3 Asfaltový koberec mastixový (SMA) .....	15
2.1.4 Asfaltový koberec drenážní (PA) .....	22
2.1.5 Asfaltový koberec otevřený (AKO) .....	23
2.1.6 Lítý asfalt (MA) .....	23
2.2 Asfaltové směsi pro ložnou a podkladní vrstvu .....	23
2.2.1 Asfaltový beton (ACL, ACP).....	23
2.2.2 Asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti (VMT).....	24
3. Recyklace .....	24
3.1 Recyklace v silničním stavitelství .....	25
3.1.1 R-materiál.....	26
3.1.2 Znovuzískání a skladování.....	26
3.1.3 Vhodnost R-materiálu pro použití do asfaltových směsí .....	27
3.2 Recyklace za horka .....	29
3.2.1 Recyklace za horka prováděná na místě .....	29
3.2.2 Recyklace za horka prováděná na obalovně .....	32
3.3 Recyklace za studena .....	37
3.3.1 Recyklace za studena prováděná na místě.....	37
3.3.2 Recyklace za studena prováděná v míchacím centru.....	38
4. Změna vlastností asfaltového pojiva .....	39
4.1 Stárnutí asfaltového pojiva .....	39
4.1.1 Zkoušky stárnutí asfaltového pojiva.....	40
4.2 Obnova vlastností asfaltového pojiva .....	44
4.2.1 Užití rejuvenátorů.....	44
4.2.2 Smícháním s méně tvrdým asfaltem .....	45
5. Praktická část diplomové práce .....	46
5.1 Postup řešení .....	49
5.2 Přísady .....	50



5.2.1 Silniční vlákna S-CEL [1].....	50
5.2.2 Přísada STORFLUX [2].....	51
5.2.3 Přísada STORELASTIC [3] .....	51
5.3 Výroba Marshallových těles .....	51
5.4 Stanovení objemové hmotnosti zhutněného zkušebního tělesa .....	54
5.5 Maximální objemová hmotnost .....	57
5.6 Mezerovitost .....	58
5.7 Stanovení modulů tuhosti .....	59
5.8 Extrakce asfaltového pojiva.....	65
5.9 Vakuová destilace.....	68
5.10 Zrnitostní rozbor .....	69
5.11 Bod měknutí .....	77
5.12 Stanovení penetrace jehlou .....	82
5.13 Vyhodnocení výsledků .....	85
6. Závěr.....	97
7. Zdroje.....	98



## SEZNAM GRAFŮ

- Graf č.1:** *Objemová hmotnost*  
**Graf č.2:** *Mezerovitost zkušebních těles [29]*  
**Graf č.3:** *Moduly tuhosti*  
**Graf č.4:** *Moduly tuhosti po laboratorním cyklu stárnutí*  
**Graf č.5:** *Obsah pojiva*  
**Graf č.6:** *Zrnitost směsi SMA – 7*  
**Graf č.7:** *Zrnitost směsi SMA – 8*  
**Graf č.8:** *Zrnitost směsi SMA – 9*  
**Graf č.9:** *Zrnitost směsi SMA – 10*  
**Graf č.10:** *Zrnitost směsi SMA – 11*  
**Graf č.11:** *Zrnitost směsi SMA – 12*  
**Graf č.12:** *Zrnitost směsi SMA – 13*  
**Graf č.13:** *Zrnitost směsi SMA – 14*  
**Graf č.14:** *Zrnitost směsi SMA – 15*  
**Graf č.15:** *Zrnitost směsi SMA – 16*  
**Graf č.16:** *Zrnitost směsi SMA – 17*  
**Graf č.17:** *Zrnitost směsi SMA – 18*  
**Graf č.18:** *Souhrn křivek zrnitosti/porovnání s normovými požadavky [29]*  
**Graf č.19:** *Bod měknutí – zkouška kroužek, kulička*  
**Graf č.20:** *Bod měknutí před a po laboratorním cyklu stárnutí*  
**Graf č.21:** *Hodnota penetrace, bod měknutí*  
**Graf č.22:** *Hodnota penetrace před a po laboratorním cyklu stárnutí*  
**Graf č.23:** *Hodnota penetrace, bod měknutí*

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. č.1:** *Asfaltová směs [19]*  
**Obr. č.2:** *Schéma řezu vozovkou [7]*  
**Obr. č.3:** *Schéma uspořádání konstrukčních vrstev vozovky [20]*  
**Obr. č.4:** *Složení SMA [24]*  
**Obr. č.5:** *Otevřená struktura SMA [23]*  
**Obr. č.6:** *Schéma přenosu zatížení [24]*  
**Obr. č.7:** *Příklad označení asfaltového koberce mastixového [7]*  
**Obr. č.8:** *Detail drenážního koberce v řádném stavu [22]*  
**Obr. č.9:** *Detail zaneseného drenážního koberce [22]*  
**Obr. č.10:** *Nakládání vyfrézovaného materiálu (oprava silnice III/1553 – průtah obcí Ponědraž)*  
**Obr. č.11:** *Technologie Reshape [11]*  
**Obr. č.12:** *Technologie Repave [11]*  
**Obr. č.13:** *Technologie Remix [11]*  
**Obr. č.14:** *Technologie Remix plus [11]*  
**Obr. č.15:** *Šaržová obalovna [10]*



- Obr. č.16:** Šaržová obalovna uzpůsobená pro přidávání R-mat. přímo do míchačky [10]
- Obr. č.17:** Šaržová obalovna uzpůsobená pro předehřívání R-materiálu v paralelním sušícím bubnu [10]
- Obr. č.18:** Technologie dvouplášťového bubnu [12]
- Obr. č.19:** Proces recyklace v kontinuálních obalovnách [10]
- Obr. č.20:** Schéma soupravy [8]
- Obr. č.21:** Recyklace za studena
- Obr. č.22:** Zemní fréza
- Obr. č.23:** Dávkování pojiva
- Obr. č.24:** Vrstva z recyklovaného materiálu
- Obr. č.25:** Zkušební přístroj pro metodu RTFOT [14]
- Obr. č.26:** Vnitřní prostor přístroje [14]
- Obr. č.27:** Zkušební přístroj pro metodu RTFOT [16]
- Obr. č.28:** Vnitřní prostor přístroje [16]
- Obr. č.29:** Lokalizace pokládky zkušebních úseků
- Obr. č.30:** Rozdělení zkušebních úseků
- Obr. č.31:** Dodaný materiál
- Obr. č.32:** Materiál odebraný pro stanovení maximální objemové hmotnosti
- Obr. č.33:** Silniční vlákna S-CEL 7G [1]
- Obr. č.34:** Elektrické pece
- Obr. č.35:** Temperace navážek a nářadí
- Obr. č.36:** Forma na Marshallovo těleso před hutněním
- Obr. č.37:** Rázový zhutňovač
- Obr. č.38:** Hutnění tělesa
- Obr. č.39:** Hydraulický lis v chodu
- Obr. č.40:** Podstavec, forma, Marshallovo těleso
- Obr. č.41:** Pohled na označené tělesa
- Obr. č.42:** Pracoviště pro laboratorní měření modulů tuhosti
- Obr. č.43:** Upevněné Marshallovo těleso v klimatické komoře
- Obr. č.44:** Kalibrace zařízení
- Obr. č.45:** Výstup z měření
- Obr. č.46:** Extrační přístroj
- Obr. č.47:** Roztok trichlorethylenu a asfaltového pojiva
- Obr. č.48:** Vážení obnaženého kameniva
- Obr. č.49:** Obnažená vlákna
- Obr. č.50:** Přístroj na rotační vakuovou destilaci
- Obr. č.51:** Vakuová destilační pumpa
- Obr. č.52:** Vzorky odlité pro stanovení bodu měknutí
- Obr. č.53:** Zkušební zařízení Haver & Boecker 200 digital T
- Obr. č.54:** Zkušební síta, štětce
- Obr. č.55:** Automatický zkušební přístroj
- Obr. č.56:** Zkušební sestava [N2]
- Obr. č.57:** Zkouška kroužek kulička: fáze 1



- Obr. č.58:** Zkouška kroužek kulička: fáze 2  
**Obr. č.59:** Zkouška kroužek kulička: fáze 3  
**Obr. č.60:** Zkouška kroužek kulička: fáze 4  
**Obr. č.61:** Penetrační zařízení  
**Obr. č.62:** Temperovaný vzorek s aplikovaným penetračním vpichem

## **SEZNAM TABULEK**

- Tabulka č.1:** Rozdělení typů asfaltových směsí [21]  
**Tabulka č.2:** Mezní hodnoty návrhového složení směsi [N5]  
**Tabulka č.3:** Maximální mezerovitost  $V_{\max}$  [N5]  
**Tabulka č.4:** Minimální mezerovitost  $V_{\min}$  [N5]  
**Tabulka č.5:** Mezní hodnoty teploty asfaltové směsi typu SMA [N5]  
**Tabulka č.6:** Doporučené druhy asfaltových pojiv [N5]  
**Tabulka č.7:** Požadavky na směsi asfaltového koberce mastixového [N5]  
**Tabulka č.8:** Stavební odpad v ČR v roce 2012 [17]  
**Tabulka č.9:** Možnosti přidání R-materiálu do jednotlivých typů asfaltových směsí [4]  
**Tabulka č.10:** Faktory ovlivňující stárnutí asfaltového pojiva [9]  
**Tabulka č.11:** Přehled metod urychleného stárnutí normovaných v Evropě [13]  
**Tabulka č.12:** Přehled složení zkušebních směsí  
**Tabulka č.13:** Výpočet průměrné objemové hmotnosti zhutněného zkušebního tělesa (SMA-7)  
**Tabulka č.14:** Souhrn objemových hmotností  
**Tabulka č.15:** Maximální objemová hmotnost  
**Tabulka č.16:** Moduly tuhosti  
**Tabulka č.17:** Ageing index  
**Tabulka č.18:** Obsah pojiva  
**Tabulka č.19:** Požadavky na křivku zrnitosti dle ČSN EN 13108-5  
**Tabulka č.20:** Maximální rozdíl platných stanovení [N3]  
**Tabulka č.21:** Přehled výsledků  
**Tabulka č.22:** Kompletní přehled dostupných dat 1 [29]  
**Tabulka č.23:** Kompletní přehled dostupných dat 2 [29]  
**Tabulka č.24:** Kompletní přehled dostupných dat 3 [29]



# 1. Úvod

Zkratka SMA pochází z anglického názvu pro asfaltový koberec mastixový – Stone Mastic Asphalt. Jedná se o asfaltovou směs užívanou na nejsvrchnější (obrusnou) vrstvu vozovky vysoce zatížených dopravních ploch. Mezi přednosti této směsi patří stabilita za vysokých teplot, flexibilita za nízkých teplot, či odolnost proti tvorbě trvalých deformací. Širšímu užití této směsi brání její vyšší cena. Životnost asfaltových vozovek je omezená a je nezbytné je cyklicky obnovovat. Před pokládkou nových asfaltových vrstev je obvykle nutné odstranit původní porušené vrstvy vozovky. Tímto procesem vzniká velké množství odpadního materiálu různé kvality. Při zvolení vhodné technologie lze původní asfaltové vrstvy odstraňovat postupně a získat poměrně homogenní materiál o předvídatelných vlastnostech. Takto získaný materiál je dále v práci nazýván R-materiálem.

R-materiál tedy sestává z kameniva, asfaltového pojiva a případně dalších přísad. Získáním dostatečně homogenního a dostatečně kvalitního R-materiálu se otevírá cesta k jeho opětovnému užití při výrobě nových asfaltových směsí. Přidání podílu R-materiálu do asfaltové směsi v dnešní době umožňuje celá řada technologií. Jedná se o technologie provádějící recyklaci přímo v místě stavby nebo s odvozem R-materiálu na obalovnu. Recyklace může probíhat za horka či za studena. Z dostupných technologií je v této práci věnována největší pozornost technologii recyklace za horka prováděné na obalovně. Nejvyšší kvalitu směsi s příměsí R-materiálu lze vyrábět za užití šaržových obaloven s paralelním bubnem pro předehřev R-materiálu.

V rámci praktické části diplomové práce byla provedena analýza 12 asfaltových směsí typu SMA 11S s různým obsahem R-materiálu a dalších přísad. K obnově původních vlastností asfaltového pojiva obsaženého v R-materiálu bylo v některých směsích použito rejuvenátorů. Posuzované asfaltové směsi byly na Fakultu stavební ČVUT dovezeny v rámci širšího výzkumného projektu. Všechny tyto směsi byly vyrobeny v šaržové obalovně Froněk a položeny na zkušebních úsecích na komunikaci II/227 mezi městem Rakovník a obcí Kněžves. Obalovna Froněk disponuje paralelním sušícím bubnem pro R-materiál.





V současné době je užití R-materiálu v asfaltových směsích typu SMA v České republice zakázáno. Na vstupní materiály používané do asfaltových směsí typu SMA jsou kladeny zvýšené požadavky. V dnešní době je však již možné získat R-materiál pocházející rovněž z vyfrézované asfaltové vrstvy typu SMA. Požadavky na kvalitu vstupních materiálů a křivku zrnitosti kameniva by tedy mohly být naplněny. Cílem praktické části diplomové práce je ověření možnosti přidávání R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA. V analyzovaných asfaltových směsích byl užit R-materiál získaný z asfaltové vrstvy typu SMA a běžný R-materiál.

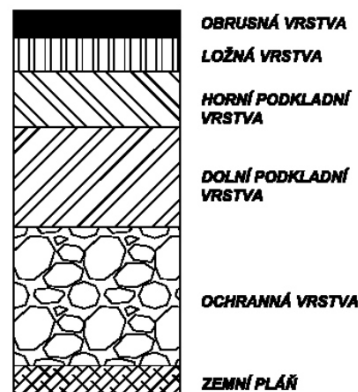


## 2. Asfaltové směsi

Asfaltová směs je směs kameniva, asfaltového pojiva a případných dalších příměsí. Jako asfaltové pojivo může být použit asfalt, asfaltová emulze nebo ředěný asfalt. Kostra směsi je tvořena kamenivem. Jednotlivá zrna kameniva se vzájemně dotýkají a jsou vzájemně zaklíněna. Zrna kameniva jsou rovněž navzájem stmelena asfaltovým pojivem. Existuje celá řada druhů asfaltových směsí. Rozhodující pro správnou volbu směsi jsou požadované funkce ve vozovce, a to zejména s ohledem na dopravní zatížení, návrhovou úroveň porušení a charakteristiky klimatu.

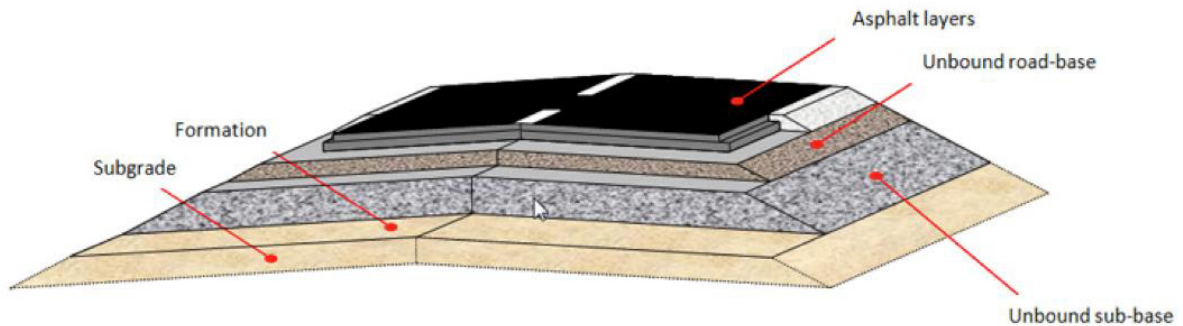


Obr. č.1: Asfaltová směs [19]



Obr. č.2: Schéma řezu vozovkou [7]

Konstrukce asfaltové vozovky obvykle sestává z několika vrstev. Na každou z těchto vrstev jsou kladeny jiné požadavky a nároky. V souladu s těmito požadavky je nutné a hospodárné navrhnout pro každou vrstvu jinou směs či materiál. Na řádně upravenou zemní pláň je pokládána nejspodnější ochranná vrstva. Tato vrstva má ochrannou funkci, a to zejména před vodou a promrzáním. Ochranná vrstva také roznáší zatížení na zemní pláň. Na ochranné vrstvě se nachází horní a dolní podkladní vrstva. Funkcí podkladních vrstev je přenos zatížení z krytových vrstev do podloží. Na podkladních vrstvách je uložena ložná vrstva. Jedná se o dolní krytovou vrstvu. Je na ní kladen požadavek odolnosti proti trvalým deformacím. Nejsvrchnější vrstva se nazývá obrusná. Jedná se o nejvíce namáhanou vrstvu, která je v přímém kontaktu s dopravou a okolním prostředím. Vlastnosti obrusné vrstvy jsou zcela rozhodující v utváření mnohých důležitých parametrů vozovky. Jedná se například o protismykové vlastnosti, hlučnost nebo schopnost efektivního odvodu vody. Asfaltové směsi nalézají uplatnění u krytových i podkladních vrstev vozovek.



**Obr. č.3:** Schéma uspořádání konstrukčních vrstev vozovky [20]

Asfaltové směsi lze dělit dle:

- složení (systému),
- použití v konstrukci vozovky,
- typu směsi,
- čáry zrnitosti kameniva,
- použitého pojiva,
- mezerovitosti,
- maximální velikosti použitého zrna. [21]

Pro potřeby diplomové práce je vhodné se podrobněji věnovat rozdělení asfaltových směsí dle typu směsi. Jednotlivé typy směsí jsou dále přehledně rozříděny v tabulce č. 1 dle jejich vhodnosti do jednotlivých konstrukčních vrstev vozovky (obrusná vrstva, podkladní vrstva, ložná vrstva).



Rozdělení asfaltových směsí - dle typu směsi					
Obrusná vrstva		Ložná vrstva		Podkladní vrstva	
Název směsi	Zkratka směsi	Název směsi	Zkratka směsi	Název směsi	Zkratka směsi
Asfaltový beton	ACO	Asfaltový beton	ACL	Asfaltový beton	ACP
Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy	BBTM	Asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti	VMT	Asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti	VMT
Asfaltový koberec mastixový	SMA				
Asfaltový koberec drenážní	PA				
Asfaltový koberec otevřený	AKO				
Litý asfalt	MA				

Tabulka č.1: Rozdělení typů asfaltových směsí [21]

## 2.1 Asfaltové směsi pro obrusnou vrstvu

Obrusná vrstva je v přímém kontaktu s vozidly a okolním prostředím. Jedná se tedy o nejvíce namáhanou vrstvu a jsou na ní kladeny největší požadavky. Je u ní tedy žádoucí věnovat výběru typu směsi zvýšenou pozornost. Rovněž je nutné dbát na použití kvalitních materiálů a dodržení technologických postupů. Po zhotovení musí obrusná vrstva splňovat vysoké nároky na protismykové vlastnosti, drenážní schopnosti, rovinatost a další.

### 2.1.1 Asfaltový beton (ACO)

Asfaltový beton se vyznačuje plynulou křivkou zrnitosti. Mezery mezi velkými zrny jsou vyplněny zrny menšími a filerem. U tohoto typu směsi se dosahuje těsného uložení zrn s nízkou mezerovitostí a vysokým třením mezi zrny kameniva v případě jejich pohybu. Asfaltový beton se používá jak pro obrusné (ACO), tak pro podkladní (ACP) a ložní (ACL) vrstvy. Asfaltový beton lze navrhnout pro všechny třídy dopravního zatížení. Mezerovitost směsi se pohybuje v rozmezí 2,5 -



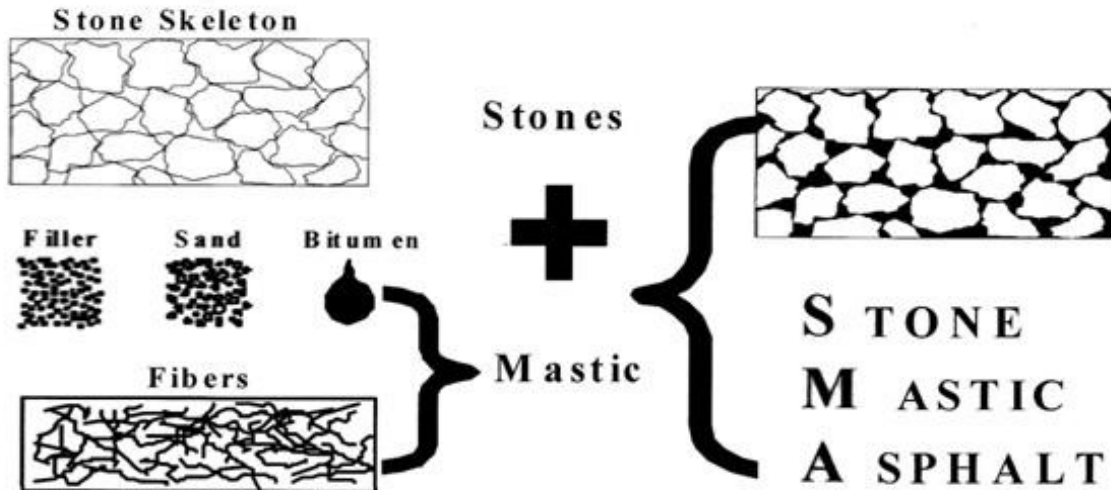
4,5% pro obrusné vrstvy, 4 - 6% pro ložní vrstvy a 4 - 7% pro podkladní vrstvy. [23] Pro požadavky na směsi typu asfaltového betonu platí norma ČSN EN 13108-1.

### **2.1.2 Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy (BBTM)**

Jedná se o asfaltovou směs pro obrusné vrstvy používanou pro všechny třídy dopravního zatížení. Směs bývá pokládána v tloušťce 20 - 30 mm. Jednotlivé frakce kameniva jsou navrženy tak, aby umožnily vytvoření otevřené povrchové struktury. Směsi BBTM se dělí podle obsahu jemného kameniva a jemných částic na A (směsi s vyšším obsahem drobného kameniva a jemných částic), B (směsi s nižším obsahem drobného kameniva a jemných částic) a C (směsi s vyšším obsahem drobného kameniva a nejvyšším obsahem jemných částic). Minimální mezerovitost je stanovena na 2,5% a maximální až na 15%. [22] Požadavky na asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy specifikuje norma ČSN EN 13108-2 [N4]. Použití R-materiálu ve směsích BBTM není povoleno. [N4]

### **2.1.3 Asfaltový koberec mastixový (SMA)**

Asfaltový koberec mastixový je směs přerušované zrnitosti složené z kostry hrubého drce-ného kameniva spojené asfaltovým mastixem. Požadavky na asfaltový koberec mastixový specifi-kuje norma ČSN EN 13108 - 5. [N5] Asfaltový koberec mastixový neboli Stone Mastic Asphalt je směs používaná do obrusných vrstev vysoce zatížených vozovek pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch. Technologie výroby asfaltového koberce mastixového byla vyvinuta v 60. letech v Německu pro vozovky zatížené pneumatiky s hroty. [24] Díky vynikajícím vlastnos-tem, jako je vysoká odolnost proti trvalým deformacím, se technologie brzy rozšířila a v současné době se jedná o jednu z předních technologií pro vysoce zatížené obrusné vrstvy asfaltových vozov-vek.



Obr. č.4: Složení SMA [24]

Asfaltový koberec mastixový má mezery mezi zrny kameniva hrubších frakcí vyplněny asfaltovým tmelem (mastixem). Mastix je směs asfaltu, jemného kameniva s maximální velikostí zrna 2 mm a celulózových nebo minerálních vláken. Vlákná slouží k vázání asfaltu a zabránění stékanosti pojiva. Funkcí mastixu je zajištění stability kameniva, jeho fixaci na místě a zamezení nadměrnému vnikání vlhkosti do vozovky.

<i>D</i>	4	6 (6,3)	8	10	12 (12,5)	14	16	20
síto mm	Propad sítem % hmotnosti							
1,4 <i>D</i> <sup>a</sup>	100	100	100	100	100	100	100	100
<i>D</i>	90 až 100	90 až 100	90 až 100	90 až 100	90 až 100	90 až 100	90 až 100	90 až 100
2	25 až 45	20 až 40	20 až 40	20 až 35	20 až 35	15 až 30	15 až 30	15 až 30
0,063	5,0 až 14,0	5,0 až 14,0	5,0 až 14,0	5,0 až 13,0	5,0 až 13,0	5,0 až 12,0	5,0 až 12,0	5,0 až 12,0

<sup>a</sup> Pokud síto vypočtené jako 1,4 *D* neodpovídá přesné velikosti síta v ISO 565, série R 20, musí se použít nejbližší velikost síta v řadě.

Tabulka č.2: Mezní hodnoty návrhového složení směsi [N5]



Ve směsi je zastoupen vysoký obsah hrubého drceného kameniva. Čára zrnitosti kameniva je přerušená. Hrubé frakce kameniva tvoří nosnou kostru obrusné vrstvy. Díky tomu dochází k přenosu zatížení přímo mezi zrny kameniva, což působí příznivě z hlediska minimalizace dlouhodobých deformací. Mezní hodnoty návrhového složení směsi jsou uvedeny v tabulce č. 2. Předpokladem správné funkce asfaltového koberce mastixového je zajištění kvalitních a únosných ostatních vrstev vozovky a podloží.

Směs bývá pokládána v tloušťce 15–60 mm v závislosti na velikosti maximálního zrna kameniva. Mezerovitost směsi je určena kategorií  $V_{\max}$  (tabulka č. 3) a  $V_{\min}$  (tabulka č. 4). Minimální obsah pojiva je stanoven dle kategorie, a to v rozmezí 5,0 % až 7,6 %. Obsah pojiva zahrnuje i pojivo v R-materiálu, pokud je použit. U směsi se dále sleduje obalení a homogenita, stupeň vyplnění mezer, stékavost pojiva, odolnost proti působení vody, odolnost proti otěru pneumatiky s hroty a odolnost proti trvalé deformaci. [N5]

Maximální mezerovitost %	Kategorie $V_{\max}$
3,0	$V_{\max 3}$
3,5	$V_{\max 3,5}$
4,0	$V_{\max 4}$
4,5	$V_{\max 4,5}$
5,0	$V_{\max 5}$
5,5	$V_{\max 5,5}$
6,0	$V_{\max 6}$
7,0	$V_{\max 7}$
8,0	$V_{\max 8}$
Bez požadavků	$V_{\max NR}$

Minimální mezerovitost %	Kategorie $V_{\min}$
1,5	$V_{\min 1,5}$
2,0	$V_{\min 2}$
2,5	$V_{\min 2,5}$
3,0	$V_{\min 3}$
3,5	$V_{\min 3,5}$
4,0	$V_{\min 4}$
4,5	$V_{\min 4,5}$
5,0	$V_{\min 5}$
5,5	$V_{\min 5,5}$
6,0	$V_{\min 6}$
Bez požadavků	$V_{\min NR}$

**Tabulka č.3:** Maximální mezerovitost  $V_{\max}$  [N5] **Tabulka č.4:** Minimální mezerovitost  $V_{\min}$  [N5]

Další parametry jsou sledovány při určení směsi pro specifické užití (například letištní plochy). Při užití silničního asfaltu norma rovněž uvádí maximální teplotu asfaltové směsi pro kterékoliv místo obalovny. Minimální teplota se požaduje při dodávce (tabulka č. 5). Při použití modifikovaného asfaltu nebo přísad lze použít i jiné teploty. [N5]





Silniční asfalt	Teplota °C
30/45, 35/50, 40/60	160 až 200
50/70	150 až 190
70/100	140 až 180
100/150, 160/220	130 až 170
250/330, 330/430	120 až 160

**Tabulka č.5:** Mezní hodnoty teploty asfaltové směsi typu SMA [N5]

Obvyklé složení směsi typu SMA je ze 70 – 80 % tvořeno hrubým kamenivem, 8 – 12 % filerem, 6 – 7 % asfaltovým pojivem a 0,3 % vláknem. [24] Dle normy ČSN EN 13108 – 5 je možno použít modifikovaná i nemodifikovaná pojiva. Užití klasických silničních asfaltových pojiv je však v praxi spíše výjimečné a převážně se užívá polymerem modifikovaných pojiv. [29] Ve směsích typu SMA dochází k pomalejšímu procesu stárnutí asfaltového pojiva, nežli je tomu u jiných běžně používaných a obdobně zatížených asfaltových směsích. Je to způsobeno vyšším obsahem asfaltového pojiva a nízkou mezerovitostí asfaltové směsi. Díky tomu je menší část asfaltového pojiva přímo vystavená negativním účinkům okolního prostředí.

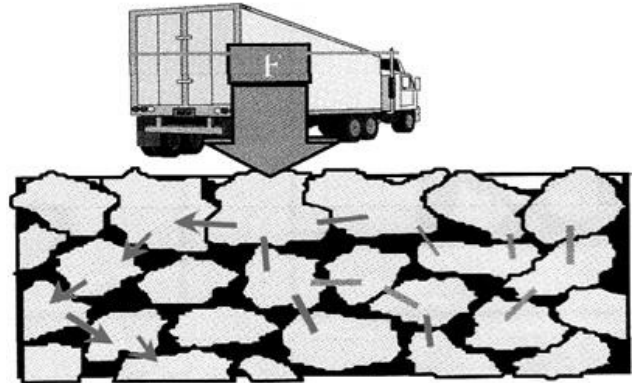
Mezi výhody technologie patří:

- dobrá stabilita za vysokých teplot,
- dobrá flexibilita za nízkých teplot,
- vysoká odolnost proti tvorbě trvalých deformací (vyjetí kolejí),
- pomalý proces stárnutí,
- dobrá přilnavost k podkladu,
- vysoká trvanlivost.





**Obr. č.5:** Otevřená struktura SMA [23]



**Obr. č.6:** Schéma přenosu zatížení [24]

Jako nevýhody lze uvést:

- zvýšená cena vstupních materiálů,
- vyšší doba přípravy směsi.

Směs asfaltového koberce mastixového se značí zkratkou jeho anglického názvu Stone Mastic Asphalt (SMA). Za označením SMA následuje velikost oka horního síta nejhrubší frakce použitého kameniva ve směsi. Následuje zatřídění kvalitativních požadavků směsi. Podle kvalitativních požadavků se směsi typu SMA dělí na směsi označované symbolem S (směsi se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací), symbolem + (směsi dříve označované kvalitou I) a bez označení (směsi dříve označované kvalitou II). Označení asfaltového koberce mastixového se doplňuje o druh použitého pojiva. V technické dokumentaci se dále značí tloušťka vrstvy v milimetrech a název příslušné normy.

**SMA 8 + 50/70; 40 mm; ČSN EN 13108-5: 2008**

**Obr. č.7:** Příklad označení asfaltového koberce mastixového [7]



Doporučené druhy asfaltových pojiv podle třídy dopravního zatížení a použitých směsí jsou uspořádány v tabulce č.6. V tabulce jsou rovněž uvedeny doporučené tloušťky vrstev v závislosti na velikosti oka horního síta nejhrubší frakce použitého kameniva ve směsi. V tabulce č.7 jsou přehledně uspořádány požadavky na směsi asfaltového koberce mastixového. [N5]

**Tabulka č.6: Doporučené druhy asfaltových pojiv [N5]**

Označení směsí	Tloušťky vrstev	Třída dopravního zatížení <sup>2)</sup>						
		S	I	II	III	IV	V	VI
<b>Obrusné vrstvy<sup>3)</sup></b>								
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 <sup>4)</sup> ; 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 <sup>4)</sup>				
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 <sup>4)</sup> ; 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 <sup>4)</sup>				
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 <sup>4)</sup> ; 50/70						
SMA 16	40–60					50/70, 70/100		



Typ	S		+							
Označení směsi SMA	8 S, 11 S		8 +, 11 +, 16 +			4, 5, 8, 11, 16				
Počet úderů Marshallova péchu	2 x 50									
Všeobecné požadavky										
Zrnitost / sito (mm) <sup>1)</sup>	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	26-42	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 $V_{min}$ (%) <sup>2)</sup>	3,0 (2,0)		2,5 (1,5)			2,0 (1,0)				
Maximální mezerovitost $V_{min}$ (%) <sup>2)</sup>	4,5 (6,0)		4,5 (6,0)			4,0 (5,5)				
Maximální poměrná hloubka koleje $PRD_{AIR}$ (%) <sup>3)</sup> po 5 000 cyklech	5,0		$PRD_{deklarovaná}$ <sup>8)</sup>			-				
Maximální přírůstek hloubky koleje $WTS_{AIR}$ (mm <sup>3</sup> /10 <sup>3</sup> cyklů) <sup>3)</sup>	0,07		$WTS_{deklarovaná}$ <sup>8)</sup>			-				
Mezní teploty asfaltové směsi pro silniční asfalty (°C) <sup>4)</sup>	50/70 a 70/100 = 140 °C – 180 °C									
Podíl lžezného kameniva (%)	jen drcené kamenivo									
Maximální množství stečeného materiálu D (% hm.)	0,3		0,3			0,6				
Minimální obsah rozpustného pojiva $B_{min}$ (% hm.) <sup>5)</sup>	6,6	6,2	6,6	6,2	5,8	6,8	6,8	6,6	6,2	5,8
Minimální obsah rozpustného pojiva $B_{vol}$ (% obj.) <sup>6)</sup>	14,0	13,5	14,0	13,5	13,0	-	-	-	-	-
Minimální stupeň vyplnění mezer $VFB_{min}$ (%) <sup>7)</sup>	74	74	74	74	74	-	-	-	-	-
Maximální stupeň vyplnění mezer $VFB_{max}$ (%) <sup>7)</sup>	83	83	83	83	83	-	-	-	-	-

1) Při různé objemové hmotnosti HDK a DDK (SDK) lze čáru zrnitosti vyhodnocovat v % objemu.  
 2) Mezerovitost zhuštěné 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  $\alpha = 2,650/\rho_b$ , kde  $\rho_b$  je objemová hmotnost kameniva v Mg/m<sup>3</sup> stanovená podle EN 1097-6.  
 6) Obsah asfaltu v % objemu se vypočítá podle vzorce  $B_{vol} = \rho_b \times B/1,020$  (%), kde  $\rho_b$  je objemová hmotnost zhuštěné směsi (Mg/m<sup>3</sup>), B je obsah asfaltu v % hmotnosti, 1020 je objemová hmotnost asfaltového pojiva (Mg/m<sup>3</sup>).  
 7) Doporučené hodnoty.  
 8) Hodnota se deklaruje pouze pro třídu dopravního zatížení III nebo pro pomalou a zastavující dopravu, v obou případech pouze při použití nemodifikovaného pojiva

**Tabulka č.7: Požadavky na směsi asfaltového koberce mastixového [N5]**



### 2.1.4 Asfaltový koberec drenážní (PA)

Jedná se o asfaltovou směs s vysokou mezerovitostí (vyšší jak 17%). [22] Čára zrnitosti je přerušená. Nosnou kostru tvoří kamenivo nejhrubší zastoupené frakce. V důsledku vysokého namáhání kameniva jsou kladeny zvýšené nároky na kvalitu kameniva. Kamenivo musí být zejména odolné na otlukovost a ohladitelnost. Musí mít také příznivý tvarový index. Asfaltový koberec drenážní velmi dobře odvádí srážkovou vodu z vozovky. Voda vrstvou PA proteče a po nepropustném podkladě stéká na okraj vozovky. Další příznivou vlastností asfaltového koberce drenážního je snížení hlučnosti jízdy vozidel. Pro správnou funkci vrstvy je zapotřebí věnovat zvýšenou pozornost údržbě. Na obrázku č.8 je zobrazen stav drenážního koberce v řádném stavu. Stav zobrazený na obrázku č.9 neumožňuje odtok vody zamýšleným způsobem. Výhody asfaltové vrstvy zhotovené ze směsi typu PA jsou tedy při nedostatečné údržbě potlačeny. V zimním období je vhodné používat radlice s gumovými břity. Po zimním období je vhodné povrch vyčistit tlakovou vodou. Pro řádné zajištění odtoku je nutné udržovat krajnice tak, aby jejich výška nepřevyšovala povrch podkladní vrstvy (případně zajistit odtok vody jiným vhodným způsobem). Požadavky na asfaltový koberec drenážní specifikuje norma ČSN EN 13108-7.



**Obr. č.8:** *Detail drenážního koberce v řádném stavu [22]*



**Obr. č.9:** *Detail zaneseného drenážního koberce [22]*





### **2.1.5 Asfaltový koberec otevřený (AKO)**

Asfaltový koberec otevřený lze použít do obrusných a ložných vrstev méně zatížených komunikací. Do podkladních vrstev vozovek ho lze použít bez omezení. Kromě dopravně zatížených ploch se rovněž používá na plochy určené ke sportovnímu užití. Mezerovitost směsi bývá v rozmezí 13–24 %. Jedná se tedy o směsi s vysokou mezerovitostí. Asfaltovým kobercem otevřeným se zabývá norma ČSN EN 73 6121 (Stavba vozovek, Hutněné asfaltové vrstvy) v příloze B.

### **2.1.6 Litý asfalt (MA)**

Jedná se o směs kameniva, asfaltového pojiva a případných dalších přísad. Vlastnosti směsi umožňují pokládku bez hutnění. Je to způsobeno vyšším obsahem pojiva. Kamenivo tedy nevytváří nosnou kostru směsi, ale jedná se pouze o kamenivo výplňové. Jednotlivá zrna kameniva plavou v asfaltovém pojivu a nedochází k jejich vzájemnému tření. Směs z litého asfaltu neobsahuje vzduchové mezery. Litý asfalt se používá pro stavbu obrusných vrstev silnic a dálnic, chodníků, dopravních a skladovacích ploch a do ochranné vrstvy izolace mostních objektů. Požadavky na směs specifikuje norma ČSN EN 13108-6.

## **2.2 Asfaltové směsi pro ložnou a podkladní vrstvu**

### **2.2.1 Asfaltový beton (ACL, ACP)**

Asfaltový beton se vyznačuje plynulou křivkou zrnitosti. Mezery mezi velkými zrny jsou vyplněny zrny menšími a filerem. U tohoto typu směsi se dosahuje těsného uložení zrn s nízkou mezerovitostí a vysokým třením mezi zrny kameniva v případě jejich pohybu. Asfaltový beton se používá jak pro obrusné (ACO), tak pro podkladní (ACP) a ložní (ACL) vrstvy. Asfaltový beton lze navrhnout pro všechny třídy dopravního zatížení. Mezerovitost směsi se pohybuje v rozmezí 4 - 6% pro ložní vrstvy a 4 - 7% pro podkladní vrstvy. [22] Pro požadavky na směsi typu asfaltový beton platí norma ČSN EN 13108-1.



## 2.2.2 Asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti (VMT)

Jedná se o typ asfaltové směsi s vyšším obsahem asfaltových pojiv tvrdších druhů. Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti se používají do ložních a podkladních vrstev vysoce zatížených dopravních ploch. Výhodou užití asfaltových směsí s vysokým modulem tuhosti je jejich vysoká odolnost proti vzniku nadměrných trvalých deformací. Jedná se především o deformace ve formě vyjetých kolejí a jiných poruch podobného typu. Cílem užití asfaltových směsí s vysokým modulem tuhosti je snížení tloušťky vozovky oproti užití běžných typů technologií při zachování vysoké užitné hodnoty vozovky. Požadavky na asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti specifikuje TP 151 - Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti. [25]

## 3. Recyklace

Pod pojmem recyklace si lze představit proces nakládání s odpadem, který vede k jeho opětovnému využití jakožto druhotné suroviny. Při dnešní úrovni technologického pokroku lze opětovně využít naprostou většinu odpadu produkovaného lidskou činností. Výrobky z recyklovaného materiálu mohou mít při zvolení vhodného technologického postupu naprosto srovnatelné vlastnosti s výrobky čistě z dosud nepoužitých surovin. Ve vysoce konkurenčním prostředí tržní ekonomiky často rozhodují o použití nového či recyklovaného materiálu náklady na proces výroby. Pro minimalizaci nevyužitého odpadu je tedy nezbytné zajistit ekonomickou konkurenceschopnost výrobků z recyklovaného materiálu nebo je zvýhodnit celospolečenskou podporou.

Dle údajů Ministerstva životního prostředí z roku 2012 (tabulka č. 8) je podíl stavebních a demoličních odpadů na celkové produkci odpadu 46,26 %, což činí bezmála 14 milionů tun odpadu za rok. Z toho je celkem 95,14 % opětovně využito. [17] Podíl recyklace stavebního odpadu je tedy vysoký, ale je třeba si uvědomit, že často není plně využito potenciálu recyklovaného materiálu. Lze to ilustrovat na příkladu neselektivního frézování asfaltových vozovek. Při neselektivním frézování je frézováno najednou více konstrukčních vrstev vozovky. Materiál z frézovaných vrstev je tím smíchán. Například velmi kvalitní kamenivo z obrusné vrstvy asfaltové vozovky je takto částečně znehodnoceno a jeho další užití je omezeno. Ve výsledku může být použito do spodních vrstev



vozovky či například na zásypy. Avšak při užití a dodržení vhodné technologie by si tento materiál dokázal udržet svou hodnotu a mohl by být užit například opět do nejmíce zatížené obrusné vrstvy vozovky.

I.23	Podíl stavebních a demoličních odpadů na celkové produkci všech odpadů	% z celkové produkce odpadů	46,26
	Celková produkce stavebních a demoličních odpadů	t	13 888 042,42
I.24	Podíl využitých stavebních a demoličních odpadů	% z celkové produkce stavebních a demoličních odpadů	95,14
	Celkové množství využitých stavebních a demoličních odpadů	t	13 212 856,51
I.25	Podíl stavebních a demoličních odpadů odstraněných skládkováním	% z celkové produkce stavebních a demoličních odpadů	3,93
	Celkové množství stavebních a demoličních odpadů, které bylo uloženo na skládkách	t	546 111,86

Tabulka č.8: *Stavební odpad v ČR v roce 2012 [17]*

### 3.1 Recyklace v silničním stavitelství

Životnost vozovky z asfaltové směsi je 20–25 let. Po této době je nutno vyměnit celou konstrukci vozovky. Tomuto procesu předchází několik výměn či oprav obrusné vrstvy. Díky postupné saturaci hustoty pozemních komunikací ve vyspělých částech světa lze předpokládat postupný útlum významu novostaveb v oboru silničního stavitelství. Naopak lze předpokládat vzestup významu údržby a rekonstrukcí pozemních komunikací, což je dáno omezenou životností těchto staveb.

Aby nedocházelo k masivnímu plýtvání neobnovitelnými zdroji, bude nutné aplikovat již dostupné technologie recyklace a podrobit tento problém dalšímu výzkumu. Již bylo prokázáno, že při řádném dodržení technologických postupů nedochází k jednostrannému posunu v kvalitě asfaltových vozovek zhotovených za přispěvku recyklovaných materiálů oproti vozovkám zhotovených tradičním způsobem. [4]



Recyklovat většinu odpadů z demolic a rekonstrukcí pozemních komunikací je technicky možné. Prvním předpokladem pro úspěšnou recyklaci je vhodný postup demolice, která musí být prováděna s ohledem na další plánované využití vybouraných hmot. V celém procesu recyklace jednoznačně platí, že kvalita recyklovaných materiálů a efektivita celého procesu je přímo úměrná kvalitě demoličních prací.

### **3.1.1 R-materiál**

R-materiálem je zde myšlena asfaltová směs, která je získána vyfrézováním asfaltových vrstev nebo vybouráním desek či kusů asfaltové směsi. Asfaltovou směsí se rozumí průmyslově vyráběná směs silničního nebo jiného asfaltového pojiva a kameniva s případným podílem přísad a příměsí. Nejhodnotnější uplatnění R-materiálu je jeho opětovné využití při procesu výstavby silničních komunikací. Tím je umožněno využití pojiva, jež R-materiál obsahuje. R-materiál je definován v TP 210.

### **3.1.2 Znovuzískání a skladování**

V ideálním případě je R-materiál získáván frézováním. Dále je možné získat R-materiál vybouráním ve formě ker a desek. Získaný R-materiál je následně drcen, tříděn a analyzován. Nejvyšší kvality získaného R-materiálu lze dosáhnout při frézování po vrstvách, jelikož je tím umožněno zpracovávat a skladovat R-materiál odděleně dle jeho kvality. R-materiál získaný z obrusné vrstvy vozovky by tedy měl být skladován odděleně od R-materiálu získaného z ložní a podkladní vrstvy, či R-materiálu frézovaného neselektivním způsobem. Při získávání a úpravě R-materiálu dochází k drcení zrn kameniva. V důsledku toho má získaný R-materiál jiné zrnitostní složení kameniva než původní asfaltová směs.





**Obr. č.10:** *Nakládání vyfrézovaného materiálu (oprava silnice III/1553 – průtah obcí Ponědraž)*

Ke skladování získaného R-materiálu je výhodné použít zastřešené prostory. Pokud nejsou k dispozici, je vhodné R-materiál chránit nepromokavými plachtami. Při zvýšené vlhkosti R-materiálu se výrazně zvyšuje energetická náročnost výroby nových asfaltových směsí. Je tedy ekonomicky výhodné skladovat R-materiál v suchém prostředí.

### **3.1.3 Vhodnost R-materiálu pro použití do asfaltových směsí**

Pro opětovné využití R-materiálu v silničním stavitelství jsou vhodné pouze R-materiály, které obsahují pojivo s průměrným bodem měknutí do 70°C. [4] Jednotlivé hodnoty jsou možné až do 77°C. [4] Bod měknutí má být stanoven metodou kroužek kulička. Při vyšších bodech měknutí je nutné účinnost pojiva ve směsi ověřit speciálními zkouškami. Zkoušky jsou voleny dle specifických požadavků na chování asfaltové směsi. Možnosti přidání R-materiálu do jednotlivých typů asfaltových směsí jsou patrné z tabulky č.9. Z tabulky je rovněž patrné, že získaný R-materiál je nejvýhodnější uplatnit ve stejném typu směsi, z níž byl získán.



R-materiál z	Možnosti přidání R-materiálu do asfaltové směsi pro					
	Litý asfalt	Asfaltová obrusná vrstva	Asfaltová ložní vrstva	Asfaltová podkladní vrstva	Jednovrstvý asfaltový kryt	Asfaltová spodní podkladní vrstva
litého asfaltu	++	○	○	+	○	○
obrusné asfaltové vrstvy	-	++ <sup>1)</sup>	++	+	+	+
obrusné a ložní asf. vrstvy <sup>2)</sup>	-	○ <sup>3)</sup>	++	+	+	+
ložní asf. vrstvy	-	○ <sup>3)</sup>	++	+	+	+
podkladní asf. vrstvy nebo vrstva jednovrstvého asfaltového krytu	-	-	-	++	○	+
spodní podkladní vrstvy	-	-	-	○	-	++

++ = priorita (nejvyšší zhodnocení)

+ = možné, ale bez plného využití technických vlastností a efektivity nákladů

○ = možné s určitými omezeními po speciálních zkouškách

- = není možné <sup>1)</sup>podle TL Asphalt-StB <sup>2)</sup>obvykle není z litého asfaltu <sup>3)</sup>následující oddělené zpracování

**Tabulka č.9:** Možnosti přidání R-materiálu do jednotlivých typů asfaltových směsí [4]

Maximální možné množství R-materiálu, které lze použít při výrobě asfaltových směsí, závisí na vhodnosti R-materiálu pro navrženou asfaltovou směs, homogenitě R-materiálu a technických předpokladech konkrétní obalovny. Charakteristiky získaného R-materiálu mohou být značně proměnné, a to zejména při nedodržení technologické kázně při jeho získávání a skladování. Je proto nutné stanovit maximální přípustný rozsah charakteristik R-materiálu.



## 3.2 Recyklace za horka

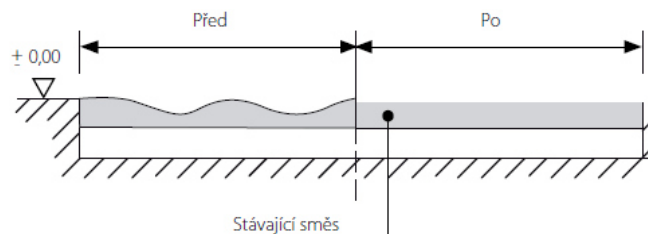
Proces recyklace asfaltové směsi můžeme dle technologického postupu rozdělit na recyklaci za studena a za tepla. Dále lze technologii dělit dle místa výroby asfaltové směsi na recyklaci na místě a na recyklaci na obalovně. Při recyklaci za horka je využito potenciálu pojiva obsaženého v R-materiálu. Podíl R-materiálu ve vyrobené směsi se obvykle pohybuje v rozmezí 10 % až 100 %. [7] Při vysokém podílu R-materiálu ve výsledné směsi je nutné použít modifikované asfalty se zvýšeným obsahem polymerů.

### 3.2.1 Recyklace za horka prováděná na místě

Nespornou výhodou recyklace prováděné na místě je omezení dopravy materiálu. Jedná se o omezení dopravy ze stavby i na stavbu. Mezi další pozitiva patří rychlost prováděných prací a ekonomická efektivita. Je však nutné udržovat technologickou kázeň a provést důslednou diagnostiku vozovky před zahájením prací. Strojní sestavu pro recyklaci za horka tvoří přehříváče, které opravovanou asfaltovou vrstvu nahřívají na pracovní teplotu. Následuje rozpojení opravované vrstvy remixerem a její promíchání s novými komponenty. Poté je výsledná směs rozprostírána, profilována a hutněna. Rozšířené jsou čtyři technologické postupy recyklace za horka na místě. Jedná se o technologii Reshape, Repave, Remix a Remix plus.

#### 3.2.1.1 Reshape

Tato technologie je užitá v případě, kdy stávající pojivo, které je obsažené v upravované asfaltové vrstvě, dosahuje požadovaných vlastností. Po ohřátí recyklované vrstvy se provede její rozpojení a nakypření. Poté následuje urovnání vrstvy v příčném a podélném směru. Vrstva je následně zhutněna.

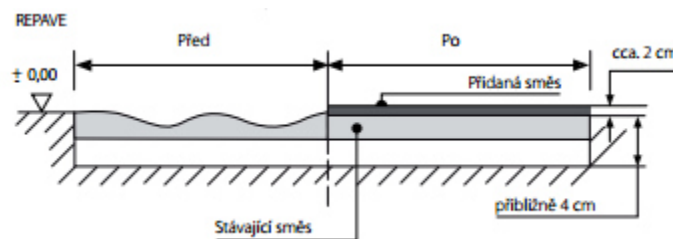


**Obr. č.11:** Technologie Reshape [11]



### 3.2.1.2 Repave

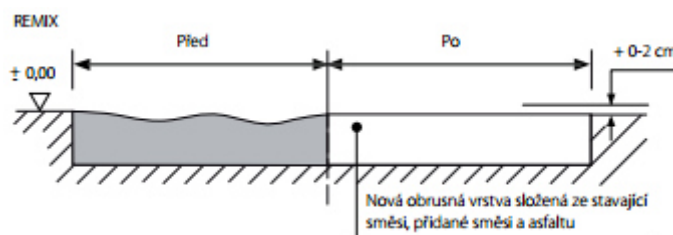
Při užití této technologie dochází k přetvarování krytu vozovky se současným přidáním tenké vrstvy kvalitní asfaltové směsi. Technologie je tedy obdobná technologii Reshape. Rozdíl přichází po urovnání rozpojené nahřáté původní asfaltové vrstvy. Tehdy je na urovnanou vrstvu poležena nová vrstva o tloušťce cca 2 až 4 cm, a to bez vzájemného promísení. [11] Následuje zhutnění obou vrstev současně. S technologií Reshape se jedná o méně časté varianty.



Obr. č.12: Technologie Repave [11]

### 3.2.1.3 Remix

Technologie Remix umožňuje přetváření krytu vozovky recyklací za současného zkvalitnění směsi stávající asfaltové vrstvy. Nejprve dochází k rozprostření přidávaného kameniva na povrch recyklované asfaltové vrstvy. Poté dochází k ohřátí recyklované asfaltové vrstvy, která je následně rozpojena. Do rozpojené směsi jsou přidány přísady (změkčující přísady, silniční asfalt nebo předobalená směs kameniva). Následuje promíchání směsi, její zpětné položení a hutnění.

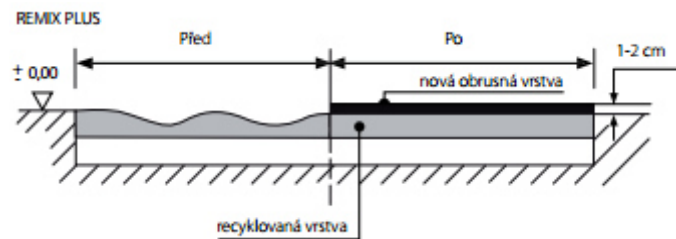


Obr. č.13: Technologie Remix [11]



### 3.2.1.4 Remix plus

Jedná se o přetvarování asfaltové vrstvy se zvýšením kvality stávající vrstvy a současnou pokládkou nové obrusné vrstvy. Nejprve dochází k rozprostření přidávaného kameniva pro úpravu zrnitostního složení stávající vrstvy. Následuje ohřátí recyklované asfaltové vrstvy, která je poté rozpojena a jsou do ní přidány změkčující přísady nebo silniční asfalt. Poté dojde k promíchání směsi a jejímu zpětnému uložení. Nakonec je položena nová obrusná vrstva a asfaltové souvrství je společně zhutněno.

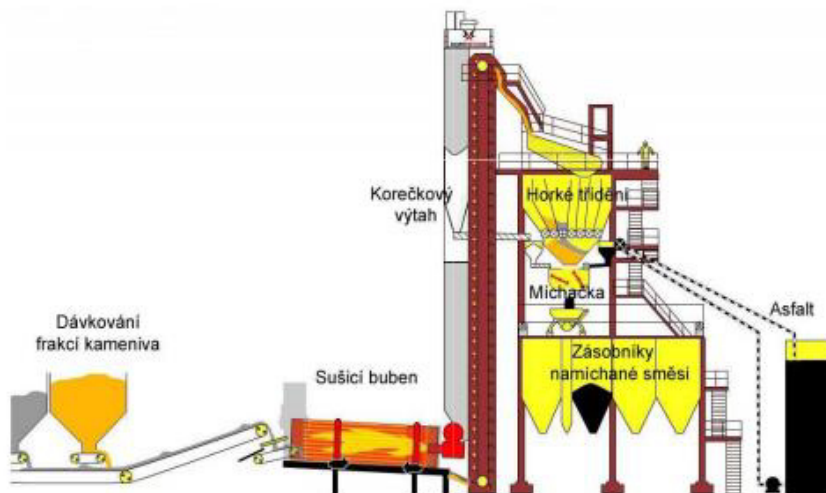


**Obr. č.14:** Technologie Remix plus [11]



### 3.2.2 Recyklace za horka prováděná na obalovně

Při recyklaci na obalovně je materiál odstraněný z vozovky přemístěn na obalovnu, kde může být uskladněn nebo okamžitě upraven. V dnešní době lze již R-materiál zpracovávat na šaržových i na kontinuálních obalovnách za podmínky, že jsou k tomuto účelu upraveny. Díky technologickému pokroku proces výroby nové směsi již probíhá bez nadměrných emisí. Dle laboratorních zkoušek dosahují asfaltové směsi s příměsí R-materiálu obdobných vlastností, jako asfaltové směsi vyrobené pouze z dosud nepoužitých materiálů.



Obr. č.15: Šaržová obalovna [10]

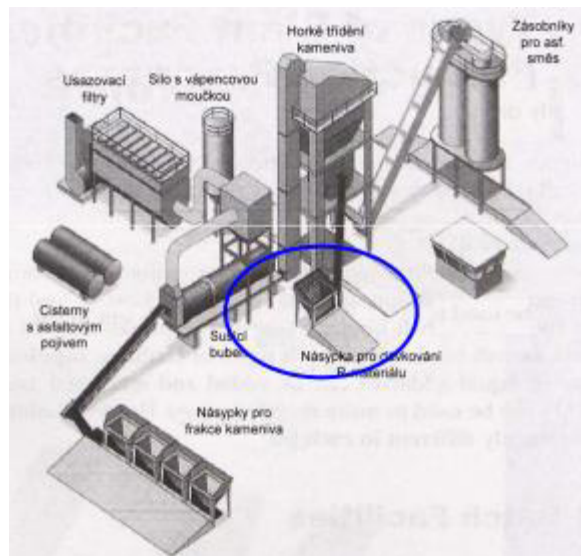
V zásadě jsou čtyři možnosti, jak lze R-materiál za horka na obalovně zpracovat. Jedná se o dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny, předehřátí v paralelním bubnu šaržové obalovny, technologii dvouplášťového bubnu a zpracování R-materiálu v kontinuální obalovně.

Proces recyklace v šaržových obalovnách je uskutečněn předehřátím dosud nepoužitého kameniva v sušícím bubnu a následným přidáním R-materiálu. R-materiál se přidává buď přímo do míchacího zařízení, nebo je nejdříve předehřán v paralelním sušícím bubnu.





Při dávkování přímo do míchačky šaržové obalovny probíhá přenos tepla během procesu míchání. Tato metoda úspěšně předchází vzniku modrého dýmu, ale je nutné déle ponechat kamenivo v zahřívacím bubnu. [9] To má za následek omezení produkce obalovny. U směsi s vysokým obsahem R-materiálu není možné dosáhnout adekvátního přenosu tepla. Z tohoto důvodu se má za to, že maximální množství přidaného R-materiálu by se mělo pohybovat mezi 20 % a 40 %. [9], [10] Přičemž většina studií se přiklání spíše k dolní hranici, tedy 20 %. Větší množství přidaného R-materiálu již není po ekonomické stránce výhodné. Mezi nevýhody recyklace R-materiálu v šaržových obalovnách za přidávání R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny patří značná spotřeba energií na udržení vyšších výrobních teplot a s tím spojené náklady.



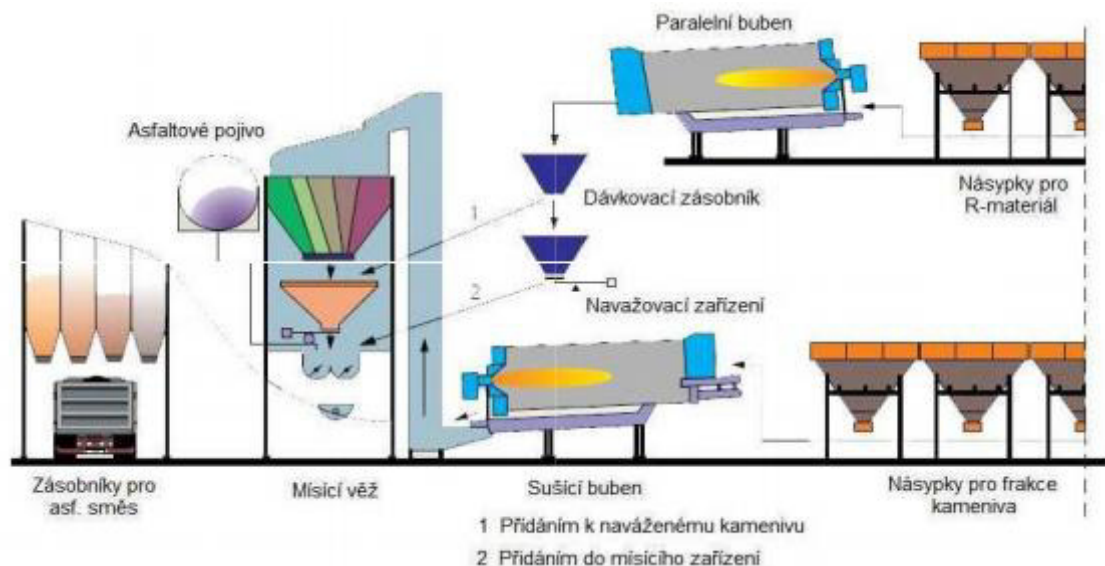
**Obr. č.16:** Šaržová obalovna uzpůsobená pro přidávání R-mat. přímo do míchačky [10]



Energeticky náročný proces přenosu tepla z kameniva na R-materiál řeší technologie předehřívání R-materiálu v paralelním sušícím bubnu šaržové obalovny. Tento buben může být součástí sušícího bubnu pro kamenivo nebo může být umístěn samostatně.

Při použití pouze jednoho sušícího bubnu je nutné sušící buben rozdělit na vnitřní a vnější část. Ve vnitřní části probíhá sušení dosud nepoužitého kameniva plynovým hořákem. Po sušení následuje jeho třídění a dávkování do míchacího zařízení. Ve vnější části bubnu se nachází R-materiál, který nepřichází do přímého kontaktu s plynovým hořákem. Nedochází tak k nadměrnému přehřívání asfaltového pojiva. Vysušený R-materiál je následně dávkován přímo do míchacího zařízení.

Díky předehřátí R-materiálu je umožněno jeho výrazně vyšší zastoupení ve výsledné směsi než při jeho dávkování za studena. Při výrobě asfaltových směsí do podkladních vrstev je možné užít směs tvořenou R-materiálem až z 80 %. [10] Při použití selektivního frézování lze kvalitní materiál z obrusných vrstev použít ve výrobě nových hodnotných směsí určených opět pro obrusné vrstvy.

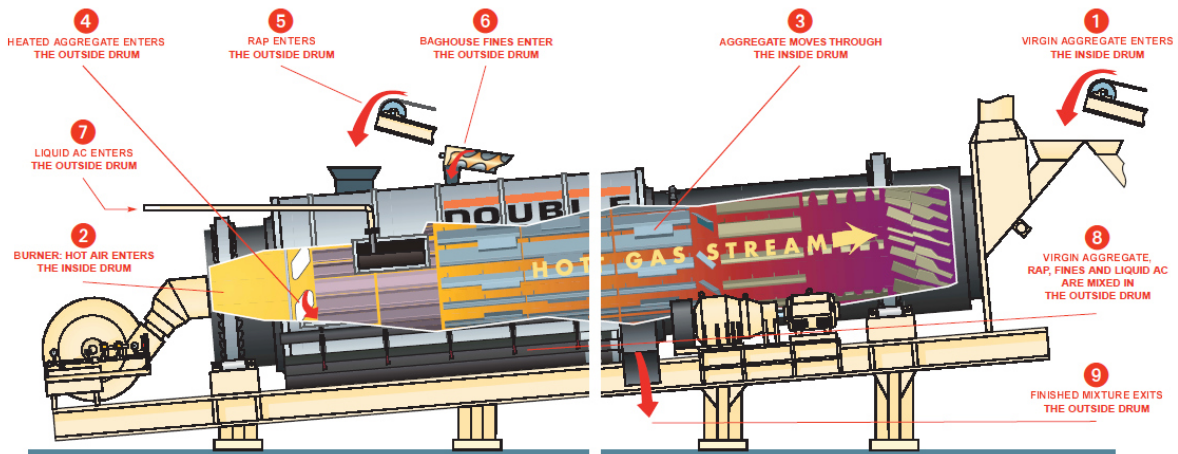


**Obr. č.17:** Šaržová obalovna uzpůsobená pro předehřívání R-materiálu v paralelním sušícím bubnu [10]





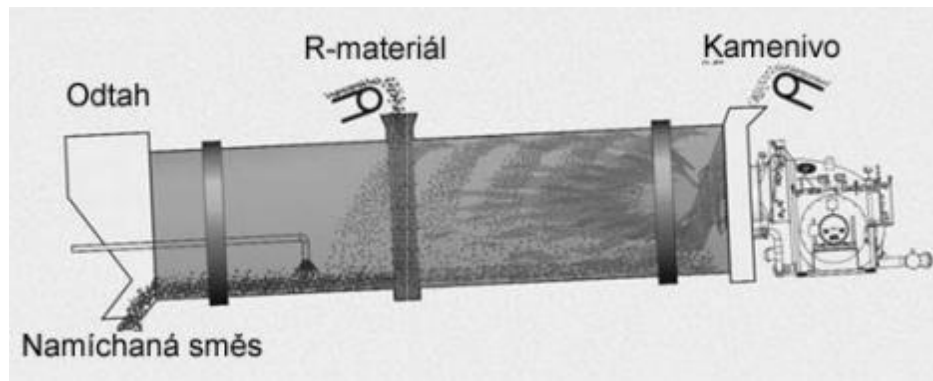
Technologie dvouplášťového bubnu („Double Barrel Drum Mixer“) využívá paralelní sušící buben pro R-materiál. Jedná se o zvláštní druh obalovny. Hlavní část obalovny sestává z bubnu, který je rozdělen na vnější a vnitřní část. Do vnitřního bubnu je zavedeno dosud nepoužité kamenivo, které po přehřátí proudem horkého vzduchu propadá do vnějšího bubnu. Mezi tím probíhá vysoušení R-materiálu ve vnějším bubnu. Promísení dosud nepoužitého kameniva a R-materiálu probíhá ve vnějším bubnu. Do vnějšího bubnu je rovněž přidáván filer a asfaltové pojivo. Výhodou této technologie je malý zábor plochy a energetická efektivita procesu. [12]



Obr. č.18: Technologie dvouplášťového bubnu [12]



Při procesu recyklace probíhající v kontinuálních obalovnách je R-materiál zaveden přímo do bubnu. V začátcích výzkumu této technologie se objevil problém se vznikajícím modrým dýmem. Produkce tohoto dýmu byla z hlediska ochrany životního prostředí a pracovních podmínek na obalovně nepřijatelná. Zmíněný modrý dým vznikal v důsledku kondenzace vypařeného asfaltového pojiva. Asfaltové pojivo kondenzovalo do částí tak drobných, že je nebylo možné tradičními prostředky na kontrolu emisí odstranit. Modrý dým tedy unikal do ovzduší. Asfaltové pojivo používané v silničním stavitelství se vypařuje při teplotě okolo 450°C. Teplota plynů v bubnu může dosáhnout až 2000°C. Z tohoto důvodu je nutné věnovat vkládání R-materiálu zvýšenou péči. [9]



**Obr. č.19:** *Proces recyklace v kontinuálních obalovnách [10]*

Díky široké škále úprav lze dnes v kontinuálních obalovnách vyrábět směsi s obsahem R-materiálu až 60 % bez emisí, které by překračovaly zákonem stanovené limity. R-materiál je vkládán přibližně v polovině bubnu. Po vytvoření homogenní směsi z R-materiálu a dosud nepoužitého kameniva je přidáno nové asfaltové pojivo a filer.

Recyklace za horka na obalovně je dnes výhodná jak z hlediska ekonomického, tak z hlediska ochrany životního prostředí. Rovněž kvalita získaných asfaltových směsí může být vysoká. Ovšem za podmínky dodržení technologické kázně při všech etapách recyklace. Lze tedy v této oblasti předpokládat další vývoj.



### 3.3 Recyklace za studena

Při recyklaci za studena je R-materiál použit pouze jako kamenivo. Není tedy využito potenciálu pojiva, které je v R-materiálu již obsaženo.

#### 3.3.1 Recyklace za studena prováděná na místě

Recyklaci za studena na místě lze rozdělit na recyklaci bez přidaného pojiva nebo s přidaným pojivem. Při recyklaci bez přidaného pojiva se jedná o homogenizaci a reprofilaci nestmelené vrstvy. Zlepšení vlastností výsledné vrstvy lze dosáhnout přidáním materiálu, který vhodně upraví její zrnitostní složení. Při recyklaci s přidaným pojivem se obvykle přidává asfaltová emulze, zpěněný asfalt, cement, struska, popílek nebo jejich kombinace.



Obr. č.20: Schéma soupravy [8]



Obr. č.21: Recyklace za studena



Obr. č.22: Zemní fréza



**Obr. č.23:** *Dávkování pojiva*



**Obr. č.24:** *Vrstva z recyklovaného materiálu*

Na obrázcích č. 21 až 23 je zobrazeno provádění recyklace za studena společností FREKOMOS (duben 2017) v obci Višňová. Při provádění recyklace za studena bylo užito zemní frézy (obrázek č. 22) k rozmělnění stávajících vozovkových vrstev. Toto rozmělnění proběhlo jedním pojezdem zemní frézy. Ve druhém kroku byl povrch zarovnan grejdrem a zhutněn válcem. Následovalo přidání pojiva (cement). Toto pojivo bylo nadávkováno na povrch urovnané vrstvy (obrázek č. 23). Po přidání pojiva proběhl druhý pojezd zemní frézy. Zemní fréza zajistila důkladné promísení původního materiálu s pojivem. Po druhém pojezdu zemní frézy bylo nutné povrch opětovně urovnat grejdrem. Urovnaný povrch byl důkladně zhutněn válcem. Na obrázku č. 24 je zobrazena hotová podkladní vrstva vozovky zhotovená technologií recyklace za studena. Před pokládkou dalších vozovkových vrstev byla ponechána dostatečná technologická pauza.

### **3.3.2 Recyklace za studena prováděná v míchacím centru**

Po odfrézování je R-materiál odvezen do míchacího centra, kde proběhne jeho drcení na požadovanou zrnitost. Následně je přidáno pojivo (emulze, zpěněný asfalt nebo cement) a upravena čára zrnitosti. Po tomto procesu je směs dopravena zpátky na stavbu.



## 4. Změna vlastností asfaltového pojiva

Asfaltové pojivo obsažené ve směsi mění v průběhu životnosti asfaltové vozovky své vlastnosti. Tento proces se nazývá stárnutí asfaltového pojiva a je závislý na řadě faktorů. Faktorům ovlivňující stárnutí asfaltového pojiva je věnována následující kapitola. V případě užití R-materiálu do kvalitních asfaltových směsí je vhodné na zestárlé asfaltové pojivo reagovat. Zestárlé asfaltové pojivo můžeme smíchat s novým asfaltovým pojivem o vhodných vlastnostech nebo můžeme užít rejuvenátory (omlazovadla, změkčovadla) asfaltového pojiva.

### 4.1 Stárnutí asfaltového pojiva

Asfaltové pojivo je ovlivněno kontaktem s kyslíkem, ultrafialovým zářením a změnami teplot. Vlivem těchto faktorů má asfaltové pojivo tendenci tvrdnout. Tvrdnutí asfaltového pojiva způsobuje pokles hodnoty penetrace a nárůst bodu měknutí. S tvrdnutím asfaltového pojiva dochází ke změně vlastností celé asfaltové směsi. Díky tomu dochází k nárůstu tuhosti materiálu, a tedy k nárůstu schopnosti asfaltové vrstvy přenášet zatížení. Na povrchu asfaltové vrstvy může vlivem tvrdnutí pojiva docházet k odírání materiálu nebo se mohou tvořit trhliny. Což je velice nepříznivý jev. Na základě výzkumu bylo stanoveno 15 faktorů, které ovlivňují stárnutí asfaltu. Tyto faktory jsou přehledně uvedeny v tabulce č.10. Z těchto faktorů má největší vliv oxidace, vypařování, vylučování olejů a krystalizace vosků.

Faktory ovlivňující stárnutí asfaltového pojiva	Ovlivňuje					Výskyt	
	Čas	Teplota	Kyslík	Sluneční světlo	Beta a gama záření	Na povrchu	Ve směsi
Oxidace (bez přístupu světla)	✓	✓	✓			✓	
Fotooxidace (přímé světlo)	✓	✓	✓	✓		✓	
Vypařování	✓	✓				✓	✓
Fotooxidace (odražené světlo)	✓	✓	✓	✓		✓	
Fotochemické reakce (přímé světlo)	✓	✓		✓		✓	
Fotochemické reakce (odražené světlo)	✓	✓		✓		✓	✓
Polymerace	✓	✓				✓	✓





Faktory ovlivňující stárnutí asfaltového pojiva	Ovlivňuje					Výskyt	
	Čas	Teplota	Kyslík	Sluneční světlo	Beta a gama záření	Na povrchu	Ve směsi
Krystalizace	✓					✓	✓
Vylučování olejů	✓	✓				✓	
Změny vyvolané jadernou energií	✓	✓			✓	✓	✓
Vliv vody	✓	✓	✓	✓		✓	
Absorpce pevnými látkami	✓	✓				✓	✓
Absorpce složek na povrchu při kontaktu s pevnými látkami	✓	✓				✓	
Chemické reakce	✓	✓				✓	✓
Mikrobiologické degradace	✓	✓	✓			✓	✓

**Tabulka č.10:** *Faktory ovlivňující stárnutí asfaltového pojiva [9]*

Asfaltové pojivo má při kontaktu s atmosférickým kyslíkem tendenci oxidovat. Procesem oxidace se vytvářejí větší a komplexnější molekuly. Důsledkem oxidace je nárůst tuhosti a pokles pružnosti asfaltového pojiva. Stupeň oxidace je vysoce závislý na teplotě, času a mocnosti asfaltového filmu. Při teplotách nad 100°C se rychlost oxidace po každých 10°C zdvojnásobuje. Oxidace je považována za hlavní příčinu tvrdnutí asfaltového pojiva. [9]

#### 4.1.1 Zkoušky stárnutí asfaltového pojiva

Zkoušky asfaltového pojiva lze rozdělit na zkoušky krátkodobého stárnutí a zkoušky dlouhodobého stárnutí. Mezi krátkodobé zkoušky stárnutí patří metody RTFOT, TFOT, RFT a modifikovaná metoda RTFOT. Smyslem krátkodobých zkoušek je simulace odolnosti proti tvrdnutí pojiva v průběhu míchání, dopravy a pokládky asfaltové směsi. Mezi dlouhodobé zkoušky stárnutí asfaltových pojiv patří zkouška v tlakové nádobě PAV, vysokotlaká metoda HiPat, metoda stárnutí v rotačním válci RCAT a metoda dlouhodobého stárnutí v rotační baňce LTRFT. Smyslem dlouhodobých zkoušek stárnutí je simulace chování asfaltového pojiva po 7 až 10 letech na vozovce.



- **RTFOT – ROLLING THIN FILM OVEN TEST**

Metoda Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) je definována v české technické normě ČSN EN 1607-1. Zkouška simuluje stárnutí, kterému je asfaltové pojivo vystaveno při výrobě asfaltové směsi na obalovně. Při zkoušce se používá sušárna, ve které je teplota udržována na 163°C. Pro umístění asfaltového pojiva je vyhrazeno osm válcových skleněných nádob, do kterých je vhnán ohřátý vzduch z trysky. Během zkoušení je asfaltové pojivo udržováno ve formě tenkého pohyblivého filmu. Kombinovanému účinku tepla a vzduchu je asfaltové pojivo vystaveno po dobu 75 minut.



**Obr. č.25:** Zkušební přístroj pro metodu RTFOT [14]    **Obr. č.26:** Vnitřní prostor přístroje [14]

- **RFT – ROTATING FLASK TEST**

Metoda Rotating Flask Test (RFT) je definována v české technické normě ČSN EN 12607-3. Jedná se o test odolnosti proti stárnutí asfaltového pojiva, při kterém je asfaltové pojivo umístěno do laboratorní baňky. Baňka s pojivem se posléze osadí do rotačního vakuového destilačního přístroje. Baňka je ohřívána v olejové lázni o teplotě 165 °C po dobu 150 minut.





- **TFOT – THIN FILM OVEN TEST**

Metoda Thin Film Oven Test (TFOT) je definována v české technické normě ČSN EN 12607-2. Při zkoušce je zkoušeno asfaltové pojivo, které se nalije do misky, tak aby vytvořilo vrstvu o tloušťce 3,2 mm. Miska se poté vloží do trouby na policičky. Poličky se otáčejí rychlostí 5,5 otáček / minutu. Během zkoušky v troubě probíhá nucené proudění vzduchu. Zkouška probíhá po dobu pěti hodin při 120 °C alternativně při 163 °C.

- **3 x RTFOT**

Jedná se o metodu užívanou v Rakousku. Zkouška probíhá dle metody RTFOT. Doba trvání zkoušky je však prodloužena na trojnásobek.

- **PAV – PRESSURE AGEING VESSEL**

Metoda Pressure Ageing Vessel (PAV) je definována v české technické normě ČSN EN 14769. Jedná se o zkoušku dlouhodobého stárnutí, která modeluje chování asfaltového pojivo po 10-20 letech přítomnosti ve směsi. Zkoušce PAV předchází zkouška RTFOT. Vzorek zkoušeného asfaltového pojiva je tedy již před začátkem zkoušky PAV termooxidačně zatížen. Samotná zkouška probíhá za přetlaku 2,07 MPa. Přetlak zajišťuje zvýšený přístup molekul kyslíku hlouběji do vzorku. Zkouška probíhá po dobu 20 hodin.



**Obr. č.27:** Zkušební přístroj pro metodu RTFOT [16]    **Obr. č.28:** Vnitřní prostor přístroje [16]

- **HiPAT – HIGH PRESSURE TEST**

Jedná se o metodu zkoušení dlouhodobého stárnutí asfaltového pojiva. Metoda je používána především ve Velké Británii. Zkouška probíhá obdobně jako metoda PAV. Oproti metodě PAV je teplota snížena na 85°C a zkouška je prodloužena z 20 na 65 hodin. [15]

- **RCAT – ROTATING CYLINDER AGEING TEST**

Metoda Rotating Cylinder Ageing Test je definována v české technické normě ČSN EN 15323. Zkouška probíhá v horizontálně umístěném rotujícím válci. Do válce je vháněn kyslík po dobu 140 hodin. Zatímco teplota je v průběhu zkoušky udržována na 85 °C.



Metody urychleného stárnutí	Název metody (angl.)	Označení normy	Pracovní teplota	Velikost Vzorku	Čas expozice	Podmínky expozice	Rozměr geometrie	Nucená cirkulace	Přívod vzduchu / kyslíku
-	-	-	[°C]	[g]	[min]	-	[mm]	-	[ml/min]
RTFOT	Rotation Thin Film Oven Test	EN 12607-1	163	35,0 ± 0,5	75 ± 1	rotující film	140 x Ø 64	Ano (přerušovaná)	Atm. vzduch 4,5
TFOT	Thin Film Oven Test	EN 12607-2	120 (163)	50,0 ± 0,5	300 (+ 15)	rotující film	9,5 x Ø 140	Ne	-
RFT	Rotating Flask Test	EN 12607-3	165	100,0 ± 1,0	150 ± 1	rotující film	1000 ml std. 29/32	Ano (permanentní)	Atm. vzduch 500
RCAT	Rotating Cylinder Ageing Test	EN 15323	163	525,0 ± 25,0	235 ± 5	rotující film	300 x Ø 125	Ano (permanentní)	Kyslík 4,0
PAV	Pressure Ageing Vessel	EN 14769	100 (90/110)	50 ± 0,5	1200	statický film	9,5 x Ø 140	Ne/Ano (nucený přetlak)	Atm. Vzduch 2,1 Mpa

Tabulka č.11: Přehled metod urychleného stárnutí normovaných v Evropě [13]

## 4.2 Obnova vlastností asfaltového pojiva

Vlivem stárnutí asfaltové pojivo tvrdne. Při získání R-materiálu z vyfrézované vrstvy asfaltové vozovky je tedy vhodné stanovit vlastnosti obsaženého asfaltového pojiva. Především se jedná o stanovení bodu měknutí a hodnoty penetrace. Díky takto získaným informacím lze na zestárlé asfaltové pojivo vhodně reagovat a zajistit optimální tvrdost asfaltového pojiva v nově navrhované směsi. Zestárlé asfaltové pojivo lze vhodně upravit použitím změkčovadel asfaltového pojiva (rejuvenátorů) nebo smícháním s novým asfaltovým pojivem o vhodných vlastnostech.

### 4.2.1 Užití rejuvenátorů

Rejuvenátory (omlazovadla, změkčovadla) slouží k obnově vlastností asfaltového pojiva. Principem rejuvenátorů je obnovení původního poměru obsahu asfaltenů a maltenů v asfaltovém pojivu. Výsledným efektem je omlazení zestárlého asfaltového pojiva a částečná obnova jeho původních vlastností v závislosti na účinnosti rejuvenátoru a způsobu jeho aplikace. Rejuvenátory lze při recyklaci asfaltové směsi užít:

- Aplikací mikrokapslí s rejuvenátory do asfaltových směsí, [26]



- Přímou aplikací na povrch vozovky, [27]
- Smícháním rejuvenátoru s R-materiálem na obalovně před přidáním R-materiálu do asfaltové směsi (je vyžadována obalovna s paralelním bubnem). [28]

Rejuvenátory se obvykle dávkuje v objemu 3 až 4 % váhy upravovaného asfaltového pojiva a sestávají převážně z maltenů. Jedná se o olejový extrakt, který se svými charakteristikami blíží mazacím olejům. [28]

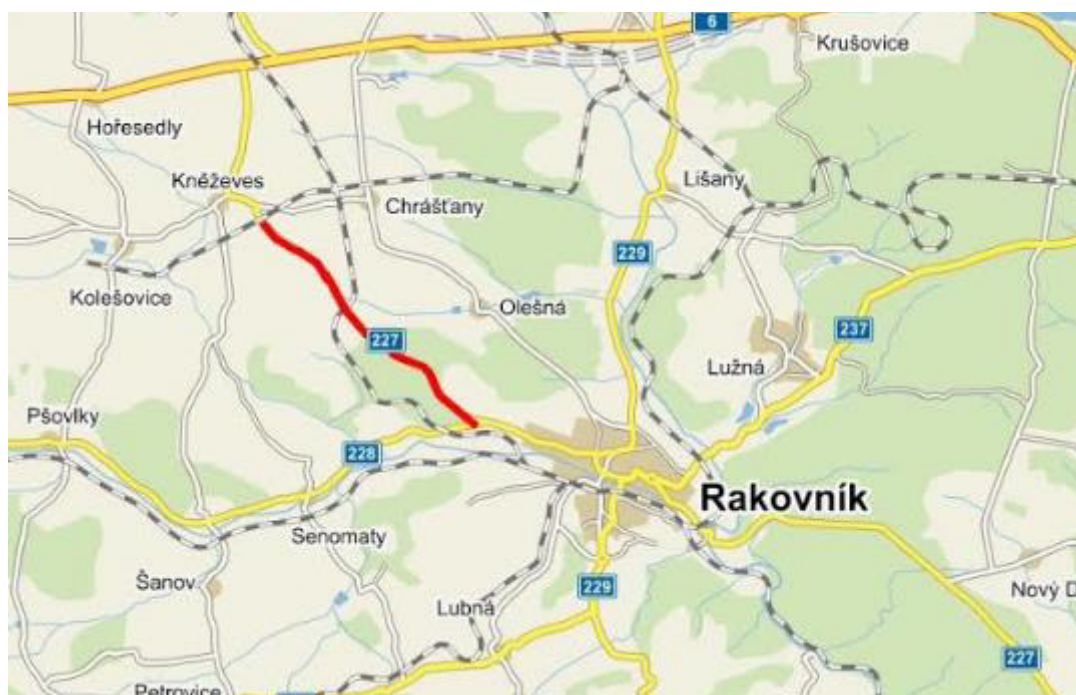
#### **4.2.2 Smícháním s méně tvrdým asfaltem**

Smícháním zestárlého ztvrdlého asfaltového pojiva (obsaženého v R-materiálu) s měkčím (dosud nepoužitým) asfaltovým pojivem ve správném poměru lze docílit vhodných vlastností výsledného asfaltového pojiva obsaženého v nově produkované směsi. Pro směs s obsahem modifikovaného asfaltu je vhodné užít pouze R-materiálu s obsahem rovněž modifikovaného asfaltu.



## 5. Praktická část diplomové práce

V praktické části diplomové práce byla provedena analýza dvanácti asfaltových směsí typu SMA 11S vyrobených na obalovně Froněk v Rakovníku ve Středočeském kraji. Obalovna Froněk je vybavena paralelním bubnem pro přehřev asfaltového R-materiálu. Zkoušené směsi byly položeny v rámci výzkumného projektu na 12 zkušebních úsecích na silnici II/227 mezi městem Rakovník a obcí Kněževes. Celkem bylo v rámci výzkumného projektu vyrobeno 18 různých směsí typu SMA 11S a položeno 18 úseků. V rámci této diplomové práce byly řešeny vlastnosti směsí číslo 7 až 18. Tyto směsi byly dovezeny na fakultu stavební v množství cca 25 kg/směs.

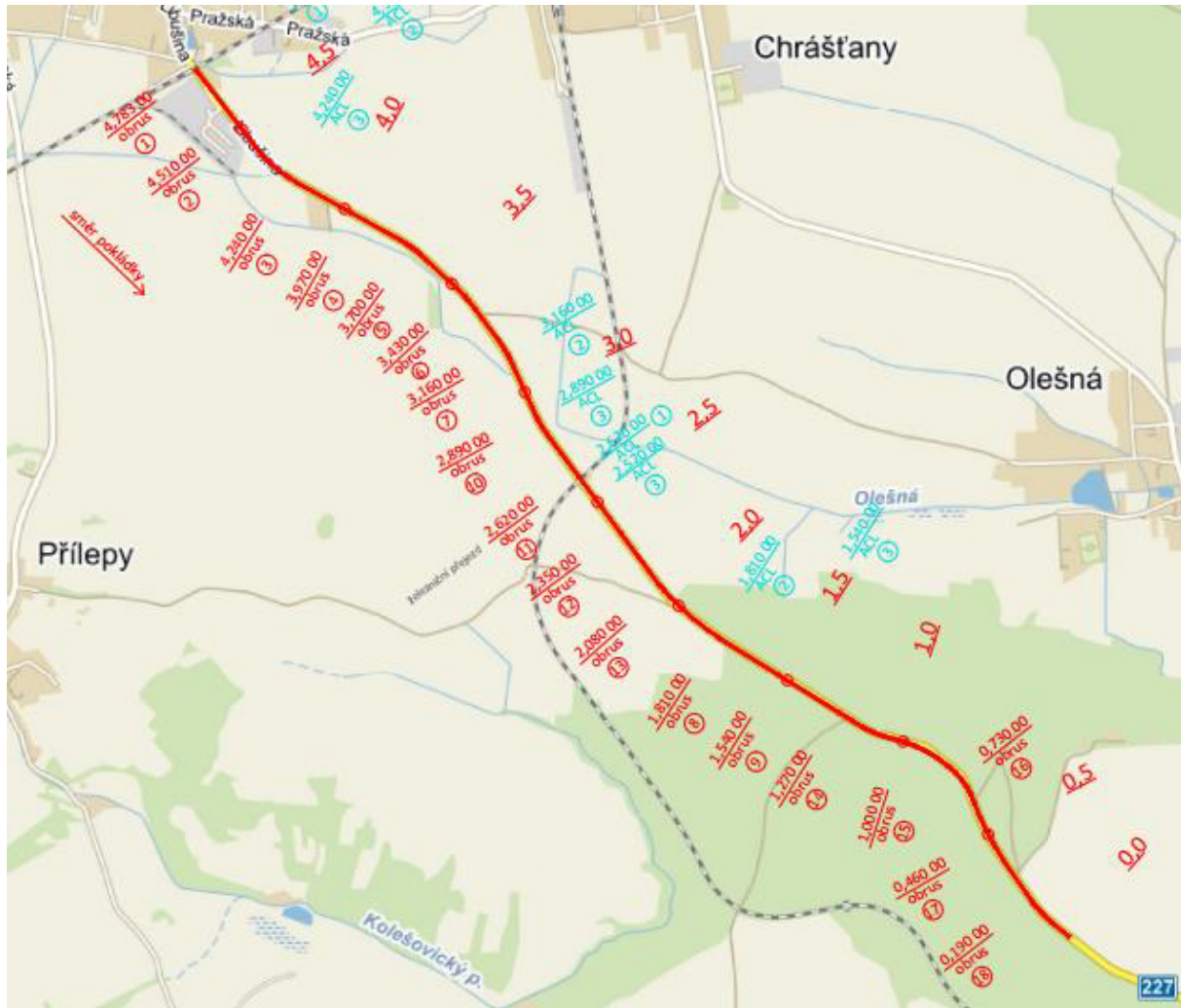


**Obr. č.29:** Lokalizace pokládky zkušebních úseků

Každá z vyrobených směsí se vyznačuje odlišným složením. U směsí č. 7 až 9 a 14 až 18 bylo použito silničního asfaltu 50/70. U směsí č. 10 až 13 bylo užito modifikovaného pojiva PMB 45/80-65. Směsi se rovněž liší podílem použitého R-materiálu a druhem použitého R-materiálu. Byl použit R-materiál frakce 0/11 pocházející ze směsi typu SMA (pro směsi č. 12, 13, 17, 18) a R-materiál frakce 0/11 získaný z jiného typu směsi (pro směsi č. 8, 9, 10, 11, 15, 16). Rovněž byly



použity různé přísady. Jedná se o použití rejuvenátoru nebo přísady na bázi rejuvenátoru a drcené pryže. Přehled zkoušených směsí je uveden v tabulce č. 12.



**Obr. č.30:** Rozdělení zkušebních úseků

Situace pokládky zkušebních úseků je zobrazena na obrázku č. 30. Pokládka zkušebních úseků proběhla v druhé polovině roku 2016. Místní šetření bylo provedeno dne 30. 4. 2017. Při místním šetření nebyly zaznamenány vady na povrchu vozovky v místě pokládky řešených zkušebních úseků. Nutno však podotknout, že v tomto časovém horizontu od pokládky se jedná o zjištění zcela očekávané.





Označení směsi SMA	Směr pokládky	Staničení [km]	Místo odběru vzorku	Asfaltové pojivo	R-materiál		S-CEL 7G	S-CEL RE (prýž CIUR)	S-CEL RF 20 (storflux)	S-CEL RF 30 (storflux)	S-CEL RF 50 (storflux)	Storelastic
					běžný	SMA						
1	Kněžves	4,783-4,516	-	PmB	-	-	ano	-	-	-	-	-
2		4,516-4,233	-	PmB	-	-	ano	-	-	-	-	-
3		4,233-3,978	-	PmB	20	-	ano	-	-	-	-	-
4		3,978-3,748	-	PmB	30	-	ano	-	-	-	-	-
5		3,748-3,426	-	PmB	-	30	ano	-	-	-	-	-
6		3,426-3,115	-	PmB	-	50	ano	-	-	-	-	-
7		3,115-2,834	2,909	50/70	-	-	-	ano	-	-	-	-
8		1,821-1,541	1,682	50/70	20	-	ano	-	-	-	-	ano
9		1,541-1,278	1,444	50/70	30	-	ano	-	-	-	-	ano
10	Žel. Přejezd	2,834-2,620	2,781	PmB	20	-	-	ano	-	-	-	-
11	Žel. Přejezd	2,620-2,385	2,530	PmB	30	-	-	-	ano	-	-	-
12		2,385-2,102	2,284	PmB	-	30	-	-	-	ano	-	-
13		2,102-1,821	2,020	PmB	-	50	-	-	-	-	ano	-
14		1,278-1,020	1,203	50/70	-	-	-	-	-	-	-	ano
15		1,020-0,755	0,882	50/70	20	-	-	-	-	-	-	ano
16		0,755-0,529	0,639	50/70	30	-	-	-	-	-	-	ano
17		0,529-0,309	0,357	50/70	-	30	-	-	-	-	-	ano
18	Rakovník	0,309-0,000	0,095	50/70	-	50	-	-	-	-	-	ano

Tabulka č.12: Přehled složení zkušebních směsí





## 5.1 Postup řešení

Na fakultu stavební bylo dovezeno 12 vzorků směsí typu SMA 11S. V rámci řešení této diplomové práce bylo z každé směsi vytvořeno šest zkušebních Marshallových těles dle ČSN EN 12697-30. Z těchto těles byla následně stanovena objemová hmotnost zhutněného zkušebního tělesa dle ČSN EN 12697-6 a mezerovitost dle ČSN EN 12697-8. Na Marshallových tělesech byly následně změřeny moduly tuhosti dle ČSN EN 12697-26 nedestruktivní metodou IT-CY, metodou dle přílohy C. Moduly tuhosti byly měřeny při teplotách 0°C, 15°C a 27°C. Část Marshallových těles byla poté podrobena cyklu laboratorního stárnutí dle ČSN EN 12697-52. Stárnutí bylo provedeno uskladněním zkušebních těles v temperované komoře při teplotě 85 °C po dobu 5 dní. Po tomto procesu byly na tělesech opětovně změřeny moduly tuhosti metodou IT-CY.



**Obr. č.31:** *Dodaný materiál*



**Obr. č.32:** *Materiál odebraný pro stanovení maximální objemové hmotnosti*

Rovněž bylo analyzováno asfaltové pojivo obsažené ve zkušebních směsích. Toto pojivo bylo získáno extrakcí z dodaných experimentálních směsí. Po extrakci asfaltového pojiva byl vždy proveden zrnitostní rozbor kameniva.

Dále v rámci širšího výzkumného projektu byla mimo rozsah diplomové práce pracovníky silniční laboratoře Fakulty stavební ČVUT stanovena maximální objemová hmotnost dle ČSN EN 12697-5, odolnost vůči trvalým deformacím dle ČSN EN 12697-22+A1 na malém zkušebním zařízení ve vzduchové lázni, pevnost v tahu za ohybu na trámčích v souladu s platnou přílohou k TP 151 a odolnost proti šíření trhliny dle normy ČSN EN 12697-44 na půlválcových zkušebních tělesech. Pevnost v tahu za ohybu a odolnost proti trvalým deformacím byla měřena na tělesech před i po



laboratorním procesu stárnutí. V rámci komplexnějšího pohledu na problematiku byly informace z těchto zkoušek zahrnuty do finálního vyhodnocení výsledků zkušebních směsí v rámci diplomové práce. Pracovníky silniční laboratoře byla rovněž zhotovena referenční směs SMA 11 S PMB 25/55-55.

Cílem práce je ověřit, zda vhodně zvolená směs typu SMA s příměsí R-materiálu může za předpokladu užití patřičných aditiv v optimálním množství vykazovat podobné vlastnosti jako je tomu u směsí čistě z dosud nepoužitých materiálů.

## 5.2 Přísady

### Použité přísady:

- A. S-CEL 7G,
- B. S-CEL RE (pryž CIUR),
- C. S-CEL RF 20 (storflux),
- D. S-CEL RF 30 (storflux),
- E. S-CEL RF 50 (storflux),
- F. Storelastic.



**Obr. č.33:** Silniční vlákna S-CEL 7G [1]

### 5.2.1 Silniční vlákna S-CEL [1]

Jedná se o vláknitý granulát pro silniční stavitelství s přísadou speciálního vosku. Primárně slouží jako stabilizační přísada do směsí typu SMA. Silniční vlákna S-CEL působí jakožto nosič pojiva umožňující zvýšení obsahu asfaltu v obalovaných směsích, snížení stékevosti asfaltu z kameniva, zvýšení zpracovatelnosti směsi při pokládce, zlepšení tepelné odolnosti směsi, zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností asfaltových směsí, zlepšení nízkoteplotních vlastností směsí, snížení teploty pokládky. Dle vyjádření výrobce vlákna dále zvyšují životnost vozovky a odolnost proti průniku vody, vylepšují trvalou stálost při vysokém dopravním zatížení, snižují vyjždění



kolejí, přinášejí vysokou odolnost komunikace proti obrusu. Přesné složení vláken S-CEL 7G, S-CEL RF 20–50 je předmětem obchodního tajemství výrobce a z volně dostupných zdrojů tyto informace nebyly dohledány.

### **5.2.2 Přísada STORFLUX [2]**

Jedná se o přísadu, která slouží jako změkčovaadlo k regeneraci oxidovaného asfaltového pojiva R-materiálu. Tato přísada je produktem firmy STORIPLEX. Její složení a reakce s oxidovaným asfaltovým pojivem je rovněž předmětem obchodního tajemství firmy a z volně dostupných zdrojů nebylo složení dohledáno. Změkčovaadlo STORFLUX patří do skupiny speciálních fluxačních olejů.

### **5.2.3 Přísada STORELASTIC [3]**

Jedná se o kombinaci přísad z pryžového granulátu, Fischer Tropsch vosku a STORFLUXU. Přísada STORELASTIC je vyráběna firmou Storimpex Unternehmensgruppe. Užití přísady STORELASTIC příznivě působí na asfaltové pojivo z hlediska zvýšení stability, zlepšení vlastností při nízkých teplotách a zvýšené přilnavosti ke kamenivu. Výrobce rovněž přislíbujje snížení hladiny hluku provozu. Při užití R-materiálu přísada umožňuje omlazení oxidovaného pojiva. Ve směsích s přísadou Storelastic není použito žádné celulózové vlákno.

## **5.3 Výroba Marshallových těles**

Marshallova tělesa byla vyrobena v souladu s ČSN EN 12697-30: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Tělesa byla vyrobena pomocí rázového zhutňovače (Marshallova pěchu). Z každé směsi bylo vyrobeno šest těles. Celkem tedy 36 těles. Směs na výrobu Marshallových těles byla odebrána od dovezených vzorků. Pro umožnění manipulace byly dovezené směsi zahřáty na cca 150°C. Zahřátá směs byla poté navážena pro potřeby výroby jednotlivých zkušebních těles. Na výrobu jednoho tělesa bylo užito 1250 g ± 50 g. Od dovezeného vzorku byly rovněž odebrány cca 2 kg potřebné pro extrakci asfaltového pojiva a cca 1 kg pro určení maximální objemové hmotnosti.



**Obr. č.34:** Elektrické pece



**Obr. č.35:** Temperace navážek a nářadí

Po navážení byly vzorky směsí určených pro výrobu Marshallových těles vloženy do klimatické komory za účelem temperace na 160°C. Dosažení této teploty bylo kontrolováno teploměrem. Do trouby byly vloženy i válcové formy, podložka, nástavec a nářadí (lopatka, špachtle). Marshallovo těleso je tvořeno nasypáním směsi do formy a následným hutněním. Před nasypáním směsi je nutné formu poskládat. Na kruhovou podložku se osadí válcová forma. Na válcovou formu je osazen nástavec, na který se položí trychtýř pro snadnější vsypání směsi.



**Obr. č.36:** Forma na Marshallovo těleso před hutněním



**Obr. č.37:** Rázový zhutňovač





Trychtýř je možno po nasypání směsi odstranit. Následuje urovnání povrchu a usazení sestavy pod rázový zhutňovač. Hutnění probíhá dle předepsaného počtu rázů. V tomto případě bylo užito 2 x 50 rázů, což znamená 50 rázů z každé strany. Po prvních 50 rázech byla sestava vyjmuta a otočena. Následovalo 50 rázů z druhé strany. Po ukončení hutnění byla sestava vyjmuta a osazena na ocelový podstavec po dobu dostatečně dlouhou pro vychladnutí. Po vychladnutí bylo těleso pomocí hydraulického zařízení vyjmuta z formy a náležitě označeno.



Obr. č.38: *Hutnění tělesa*



Obr. č.39: *Hydraulický lis v chodu*



Obr. č.40: *Podstavec, forma, Marshallovo těleso*



Obr. č.41: *Pohled na označené tělesa*



## 5.4 Stanovení objemové hmotnosti zhutněného zkušební tělesa

Objemová hmotnost zhutněného zkušební tělesa byla stanovena dle ČSN EN 12697-6. [N9] Objemová hmotnost je v normě definována jako hmotnost připadající na jednotku objemu asfaltové směsi včetně mezer při dané zkušební teplotě. Norma popisuje 4 způsoby stanovení objemové hmotnosti. V diplomové práci byl použit postup B – nasycený suchý povrch, který požaduje norma ČSN EN 13108-20: Zkoušky typu.

Nejprve byla stanovena hmotnost suchých Marshallových těles. Jedná se o hmotnost  $m_1$ . Poté byla po dobu minimálně 30 minut tělesa vložena do vodní lázně pro umožnění plného nasycení. Teplota vodní lázně byla sledována. Nasycená ponořená zkušební tělesa byla zvážena pomocí ocelové konstrukce zavěšené na váze. Stanovená váha byla zaznamenána jakožto hmotnost  $m_2$ . Marshallova tělesa byla poté vyjmuta z vodní lázně, povrchově osušena jelenicí a bezprostředně zvážena. Jedná se o hmotnost  $m_3$ . Objemová hmotnost byla následně vypočtena ze vzorce:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} * \rho_w$$

$\rho_{bssd}$  : objemová hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ]

$m_1$ : hmotnost suchého tělesa [g]

$m_2$ : hmotnost tělesa nasyceného a ponořeného ve vodě [g]

$m_3$ : hmotnost tělesa nasyceného a povrchově osušeného [g]

$\rho_w$ : hustota vody při zkušební teplotě [ $\text{kg/m}^3$ ]

Objemová hmotnost byla stanovena pro každé těleso (6 hodnot/směs). Následně byly hodnoty pro jednotlivé směsi zprůměrovány a byly stanoveny průměrné objemové hmotnosti pro jednotlivé směsi. Výpočet jednotlivých objemových hmotností je ilustrován v tabulce č.13. V tabulce č. 14 je uveden souhrn průměrných objemových hmotností jednotlivých směsí. Z tabulky č. 14 je patrné, že nejvyšší objemovou hmotnost má směs č. 11 s obsahem 30 % R-materiálu. Nejnižší objemovou hmotnost má směs č. 8 s 20 % obsahem R-materiálu.



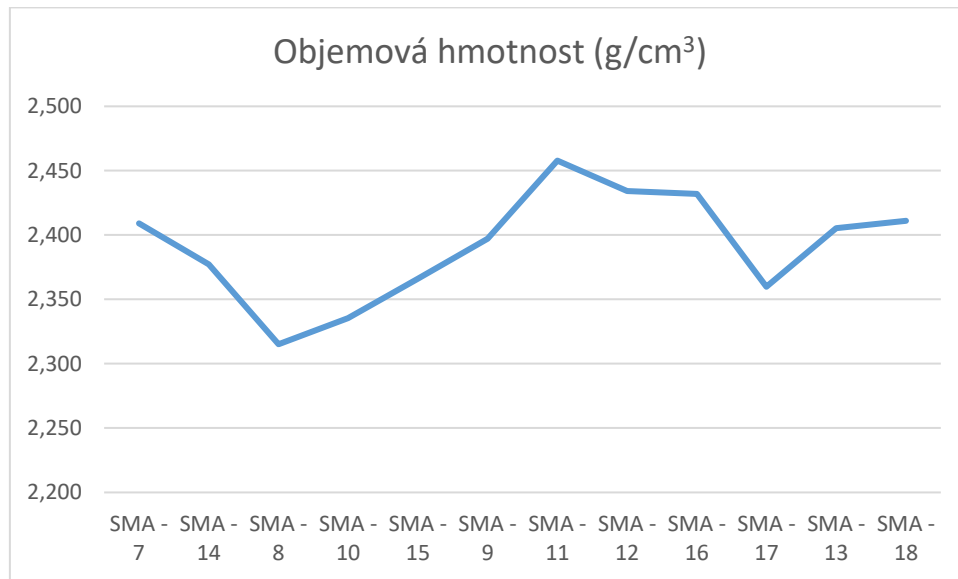


Směs	Těleso	Pojivo	Hmotnost			Temp. T (°C)	Hustota vody rw (g.cm <sup>-3</sup> )	Objemová hmotnost	
			m <sub>s</sub>	m <sub>m</sub>	m <sub>v</sub>			r <sub>vz</sub>	
			(g)	(g)	(g)			(g.cm <sup>-3</sup> )	
SMA - 7	1	50/70	1 245,6	732,4	1 248,3	16,0	0,9990	2,412	2,409
	2		1 219,7	717,6	1 222,7			2,412	
	3		1 250,3	734,3	1 253,2			2,407	
	4		1 251,0	735,1	1 253,7			2,410	
	5		1 255,0	736,6	1 258,0			2,405	
	6		1 248,0	733,2	1 250,9			2,408	

Tabulka č.13: Výpočet průměrné objemové hmotnosti zhutněného zkušebního tělesa (SMA-7)

		SMA - 7	SMA - 8	SMA - 9	SMA - 10	SMA - 11	SMA - 12	SMA - 13	SMA - 14	SMA - 15	SMA - 16	SMA - 17	SMA - 18
Objemová hmotnost tělesa (g.cm <sup>-3</sup> )	1	2,41 2	2,30 5	2,40 9	2,335	2,448	2,420	2,408	2,341	2,370	2,433	2,371	2,400
	2	2,41 2	2,30 4	2,39 6	2,344	2,464	2,434	2,411	2,397	2,368	2,432	2,348	2,417
	3	2,40 7	2,33 5	2,37 3	2,334	2,465	2,434	2,403	2,383	2,356	2,427	2,332	2,412
	4	2,41 0	2,32 3	2,40 4	2,335	2,453	2,433	2,412	2,383	2,381	2,437	2,390	2,414
	5	2,40 5	2,32 0	2,39 8	2,333	2,461	2,440	2,398	2,379	2,343	2,435	2,336	2,414
	6	2,40 8	2,30 3	2,40 2	2,331	2,456	2,444	2,399	2,381	2,379	2,427	2,383	2,407
Objemová hmot- nost (g.cm <sup>-3</sup> )		2,40 9	2,31 5	2,39 7	2,335	2,458	2,434	2,405	2,377	2,366	2,432	2,360	2,411

Tabulka č.14: Souhrn objemových hmotností



**Graf č.1:** *Objemová hmotnost*

Na grafu č. 1 jsou jednotlivé směsi seřazeny dle podílu R-materiálu ve směsi od 0 % (SMA 7, 14), přes 20 % (SMA 8, 10, 15), 30 % (SMA 9, 11, 12, 17) po 50 % (SMA 13, 18). Z grafu je patrné, že objemová hmotnost osciluje okolo hodnoty  $2,4 \text{ g}/\text{cm}^3$ . Z počátečních průměrných hodnot při 0 % R-materiálu objemová hmotnost při nízkém podílu R-materiálu klesá. Dále se zvyšujícím se poměrem R-materiálu (30 %) se objemová hmotnost zvyšuje na nadprůměrné hodnoty. Při vysokém podílu R-materiálu (50 %) se však objemová hmotnost vrací do průměrných hodnot.



## 5.5 Maximální objemová hmotnost

Maximální objemová hmotnost (objemová hmotnost nezhuštěné směsi) je dána jako hmotnost připadající na jednotku objemu asfaltové směsi bez mezer a dutin při dané zkušební teplotě. Maximální objemová hmotnost byla stanovena pracovníky silniční laboratoře Fakulty stavební v rámci širšího výzkumného projektu. Pro umožnění komplexního pohledu na problematiku je zde s maximální objemovou hmotností dále počítáno. Souhrn hodnot maximální objemové hmotnosti je uveden v tabulce č. 15.

Označení směsi	Maximální objemová hmotnost [g/cm <sup>3</sup> ]
SMA - 7	2,477
SMA - 8	2,471
SMA - 9	2,472
SMA - 10	2,489
SMA - 11	2,526
SMA - 12	2,518
SMA - 13	2,517
SMA - 14	2,451
SMA - 15	2,488
SMA - 16	2,488
SMA - 17	2,463
SMA - 18	2,498

Tabulka č.15: Maximální objemová hmotnost



## 5.6 Mezerovitost

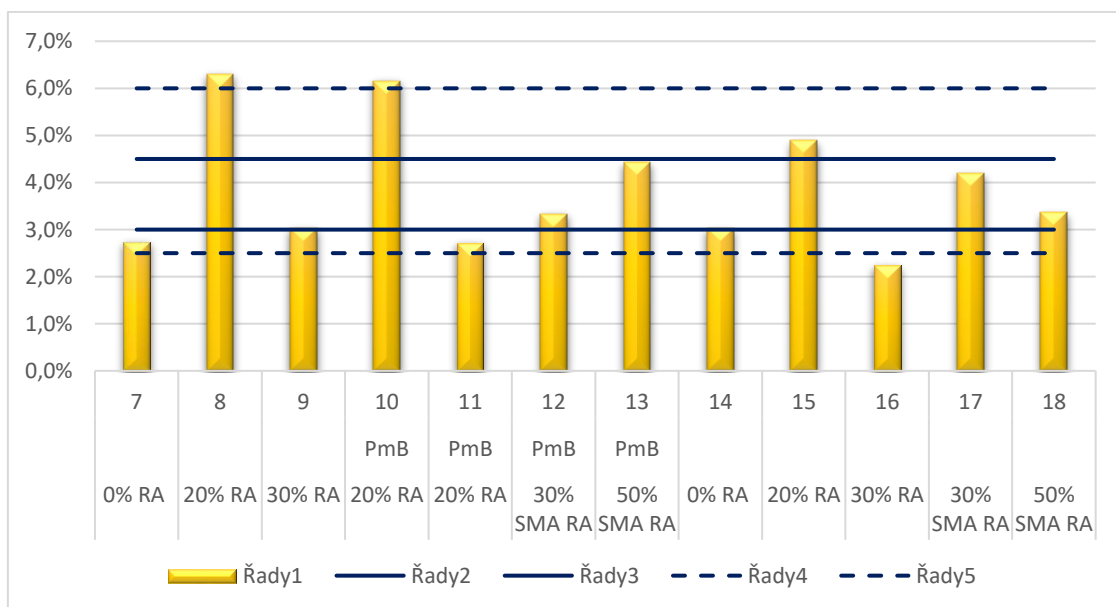
Mezerovitost zkušebních těles byla stanovena dle normy ČSN EN 12697-8. Mezerovitost je v normě definována jako objem mezer ve zkušebním tělese vyjádřený v procentech celkového objemu tělesa. Norma ČSN EN 13108-5 definuje maximální a minimální hodnoty pro směsi typu SMA. Výpočet mezerovitosti je proveden z maximální objemové hmotnosti a objemové hmotnosti ztuhnutého zkušebního tělesa dle vzorce:

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho_{bssd}}{\rho_{mv}} * 100 \%$$

$V_m$ : mezerovitost směsi [%]

$\rho_{mv}$ : maximální objemová hmotnost [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho_{bssd}$ : objemová hmotnost zkušebních těles [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]



**Graf č.2:** Mezerovitost zkušebních těles [29]

V normě ČSN EN 13108-5 jsou v tabulce č. NA.5.1 uvedeny požadavky na mezerovitost směsi typu SMA 11 S. Minimální mezerovitost je stanovena na 3,0 % (pro kontrolní zkoušky 2,0 %). Maximální mezerovitost je stanovena na 4,5 % (pro kontrolní zkoušky 6,0 %). Vzorové směsi byly odebrány na stavbě. Ke zhodnocení výsledků jsou tedy užity hodnoty pro kontrolní



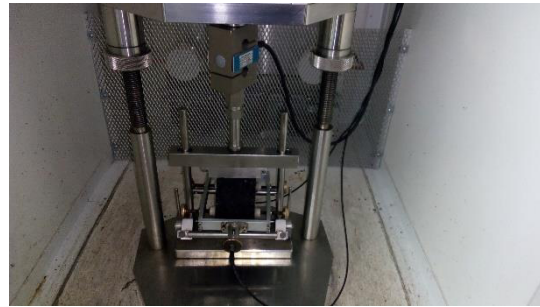
zkoušky. Z grafu č.2 [29] je zřejmé, že směsi SMA - 8 a SMA - 10 převyšují povolené hodnoty pro kontrolní zkoušky. Jedná se o směsi s 20 % obsahem R-materiálu. Směs SMA - 16 naopak nedosáhla minimální hodnoty stanovené pro kontrolní zkoušky. Jedná se o směs s 30 % R-materiálu.

## 5.7 Stanovení modulů tuhosti

Moduly tuhosti asfaltových směsí byly stanoveny dle normy ČSN EN 12697-26, dle přílohy C – Zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY). Principem zkoušky je měření vodorovných deformací při vynuceném ustáleném harmonickém kmitání. Moduly tuhosti byly měřeny na všech tělesech před uskutečněním laboratorního cyklu stárnutí při teplotách 0°C, 15°C a 27°C. Po procesu laboratorního stárnutí byla při stejných teplotách přeměřena polovina těles. Směs SMA – 7 nebyla podrobena laboratornímu cyklu stárnutí z důvodu potřeby materiálu na další zkoušky.

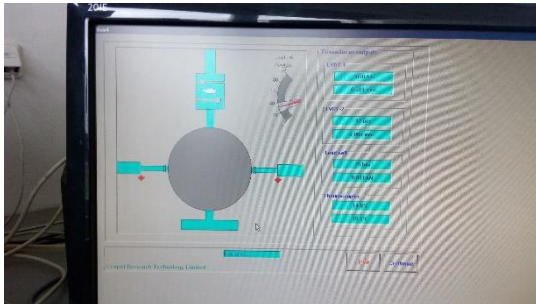


**Obr. č.42:** Pracoviště pro laboratorní měření modulů tuhosti

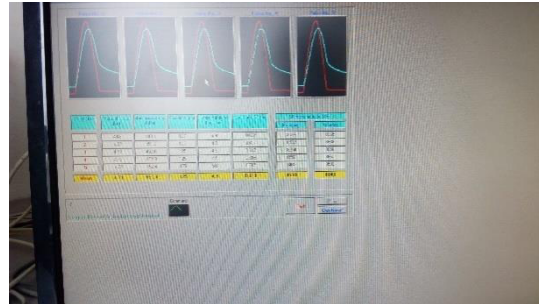


**Obr. č.43:** Upevněné Marshallovo těleso v klimatické komoře

Před měřením byla Marshallova tělesa vložena do klimatické komory za účelem temperace na požadovanou teplotu. Před měřením při teplotě 0°C a 27°C byla tělesa v klimatické komoře vždy přenechána přes noc. Tělesa byla tedy temperována minimálně 10 hodin. Před měřením při teplotě 15°C byla tělesa v klimatické komoře ponechána minimálně 4 hodiny před počátkem samotného měření. Měření probíhalo v silniční laboratoři ČVUT.

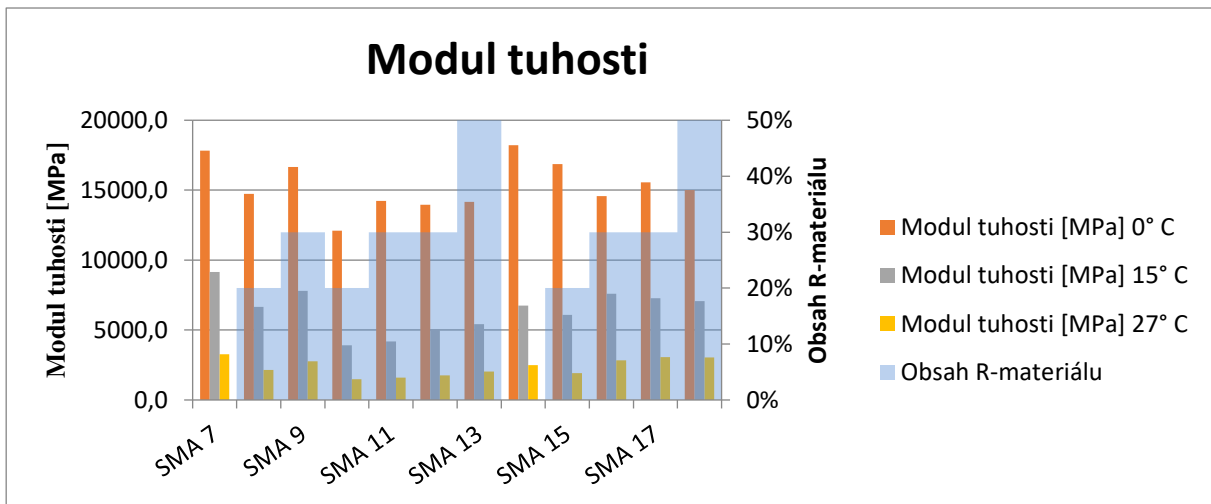


Obr. č.44: Kalibrace zařízení



Obr. č.45: Výstup z měření

Zkušební zařízení NAT (Nottingham Asphalt Tester) se skládá ze tří částí. Jedná se o zatěžovací zařízení, kovový rámeček a snímací zařízení. Temperované těleso bylo nejprve vloženo na podpěru a přichyceno ke kovovému rámečku. Kovový rámeček je vybavený upevňovacími šrouby a snímači LVDT. Šrouby slouží k pevnému uchycení tělesa. Snímače LVDT měří vodorovnou deformaci tělesa při zatěžování. Zkušební sestava poté byla zkompletována přidáním horní části rámu a umístěna pod zatěžovací zařízení v temperované komoře.



Graf č.3: Moduly tuhosti





Každé měření bylo zahájeno deseti kontrolními impulzy. Kontrolní impulzy slouží k synchronizaci parametrů a vyrovnání křivky zatěžování. Mezi synchronizované parametry patří doba náběhu a perioda opakování pulzů. Zatěžování představuje působení vertikálního impulzu síly na měřené těleso. Po provedení kontrolních pulzů a vhodné úpravě snímacích zařízení následovalo samotné měření. Zkušební zatěžování probíhalo v rozsahu 2 x 5 pulzů. Těleso je při zatěžování stlačováno mezi čelistmi a měří se jeho vodorovná deformace a síla zatěžování. Vodorovná deformace nesmí přesáhnout hodnotu 0,005 % průměru tělesa.

Po prvních pěti pulzech bylo těleso vyjmuta a otočeno o 90°. Po opětovném upevnění tělesa, kalibraci sond a kontrolních deseti impulzech následovalo druhých pět zkušebních pulzů. Moduly tuhosti byly vypočítány pomocí měřícího zařízení pro obě polohy. Hodnota modulu tuhosti daného tělesa byla stanovena jako jejich průměr. Pokud byla hodnota modulů tuhosti pro dané těleso mimo rozmezí +10 % až -20 % průměrné hodnoty všech modulů tuhosti pro tělesa dané směsi, bylo těleso přeměřeno.

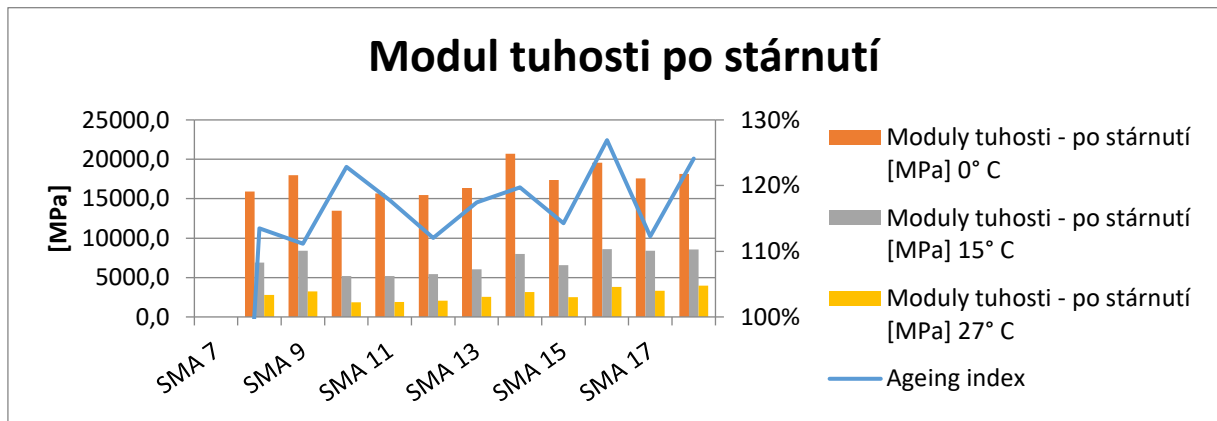
Celkem bylo změřeno 324 modulů tuhosti bez oprav (přeměřeno muselo být cca 20 % těles). Zaměření takového počtu modulů tuhosti je časově velice náročné. Část modulů tuhosti byla tedy změřena pracovníky silniční laboratoře Fakulty stavební v rámci širšího výzkumného projektu. Souhrn výsledků je přehledně uveden v tabulce č.16. Z poměru modulů tuhosti před a po laboratorním cyklu stárnutí byl stanoven ageing index. Ageing index je shrnut v tabulce č. 17.

Označení směsi	Modul tuhosti [MPa]			Moduly tuhosti - po stárnutí [MPa]		
	0° C	15° C	27° C	0° C	15° C	27° C
SMA 7	17826,8	9148,2	3263,5	-	-	-
SMA 8	14747,3	6664,5	2158,6	15893,8	6896,5	2789,7
SMA 9	16656,4	7806,1	2768,4	18002,3	8409,5	3255,5
SMA 10	12115,2	3913,6	1485,9	13484,8	5192,2	1850,2
SMA 11	14243,8	4178,8	1597,6	15664,0	5179,2	1907,5
SMA 12	13967,3	5065,2	1766,1	15480,2	5450,5	2078,2



Označení směsi	Modul tuhosti [MPa]			Moduly tuhosti - po stárnutí [MPa]		
	0° C	15° C	27° C	0° C	15° C	27° C
SMA 13	14170,9	5412,3	2042,3	16371,8	6063,0	2548,5
SMA 14	18211,8	6759,8	2490,4	20711,0	8012,7	3160,5
SMA 15	16861,1	6093,2	1917,0	17373,7	6572,7	2528,8
SMA 16	14577,3	7603,2	2843,0	19577,5	8587,0	3796,0
SMA 17	15571,3	7278,9	3053,5	17598,3	8401,8	3307,8
SMA 18	15004,0	7077,0	3029,3	18136,5	8556,0	3955,0

Tabulka č.16: Moduly tuhosti



Graf č.4: Moduly tuhosti po laboratorním cyklu stárnutí



Ozna- čení směsi	Ageing index				Poznámka
	0° C	15° C	27° C	∅	
SMA 7	-	-	-	-	0% RA + S-CEL RE
SMA 8	108%	103%	129%	113%	20% RA + S-CEL 7G
SMA 9	108%	108%	118%	111%	30% RA + S-CEL 7G
SMA 10	111%	133%	125%	123%	PmB + 20% RA + S-CEL RF 20
SMA 11	110%	124%	119%	118%	PmB + 30% RA + S-CEL RF 30
SMA 12	111%	108%	118%	112%	PmB + 30% SMA RA + S-CEL RF 30
SMA 13	116%	112%	125%	117%	PmB + 50% SMA RA + S-CEL RF 50
SMA 14	114%	119%	127%	120%	0% RA + Storelastic
SMA 15	103%	108%	132%	114%	20% RA + Storelastic
SMA 16	134%	113%	134%	127%	30% RA + Storelastic
SMA 17	113%	115%	108%	112%	30% SMA RA + Storelastic
SMA 18	121%	121%	131%	124%	50% SMA RA + Storelastic

**Tabulka č.17: Ageing index**

Z tabulky č. 16 je patrné, že nejvyšších výsledků při 0°C dosahují směsi SMA – 7 a SMA – 14. Jedná se o směsi bez příměsí R-materiálu. Nejnižších výsledků při 0°C dosáhly směsi SMA - 10 a SMA - 12. Jedná se o směsi s příměsí 20 % a 30 % R-materiálu a modifikovaným pojivem. Tyto výsledky se potvrdily i v měření po laboratorním cyklu stárnutí. V důsledku tvrdnutí pojiva došlo po procesu umělého stárnutí k navýšení naměřených modulů tuhosti.

Při 15°C dosáhly nejvyšších hodnot směsi SMA – 7 a SMA – 16. Směs SMA – 7 je bez příměsí R-materiálu. Směs SMA – 16 obsahuje 30 % R-materiálu a přísadu Storelastic. Nejnižších hodnot dosáhly směsi SMA – 10 a SMA – 11. Směs SMA – 10 obsahuje 20 % R-materiálu. Směs SMA – 11 obsahuje rovněž 30 % R-materiálu. Tyto výsledky se potvrdily i v měření po laboratorním cyklu stárnutí.



Při 27°C dosáhly nejvyšších hodnot směsi SMA – 7 a SMA – 17. Směs SMA – 7 je bez příměsí R-materiálu. Směs SMA – 17 obsahuje 30 % R-materiálu a přísadu Storelastic. Nejnižších hodnot dosáhly směsi SMA – 10 a SMA – 11. Směs SMA – 10 obsahuje 20 % R-materiálu. Směs SMA – 11 obsahuje rovněž 30 % R-materiálu. Nejvyšších hodnot po laboratorním cyklu stárnutí dosáhla směs SMA - 18. V důsledku tvrdnutí pojiva došlo k navýšení naměřených modulů tuhosti.

Nejméně byla laboratorním cyklem stárnutí ovlivněna směs SMA – 9. Nejvíce byla ovlivněna směs SMA – 16. Při pohledu na tabulku č. 17 nebyla odhalena souvislost mezi náchylností ke stárnutí a použitými přísadami či podílem R-materiálu.

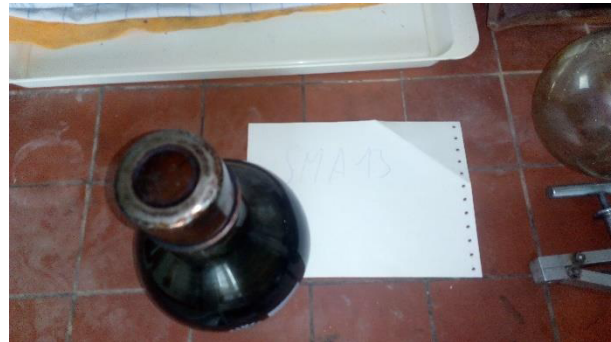


## 5.8 Extrakce asfaltového pojiva

Pro extrakci asfaltového pojiva ze zkušebních vzorků byl použit extrační přístroj vyrobený společností Infratest. Extrakce probíhala promýváním navážky asfaltové směsi (cca 2kg) trichlorethylenem. Trichlorethylen je bezbarvá kapalina, která se používá jako průmyslové rozpouštědlo. Vzorek asfaltové směsi byl zvážen a vložen do k tomuto účelu určené nádoby. Nádoba byla následně vložena do extraktoru. Poté byla do extraktoru vložena patrona. Patrona slouží k zachycení nejjemnějších částic vzorku, které se oddělí od rozpouštědla pomocí odstředivé síly. Po usazení vzorku a patrony byl uveden do provozu extraktor. V první části extrakce se vzorek asfaltové směsi nechal cyklicky promývat omezeným množstvím trichlorethylenu. Po přiměřené době byl trichlorethylen obohacený o asfaltové pojivo vyjmut z oběhu a jímán do připravené nádoby. Z tohoto roztoku lze pomocí vakuové destilace odstranit rozpouštědlo a získat asfaltové pojivo očištěné od kameniva. Tomuto procesu je blíže věnována následující kapitola.



**Obr. č.46:** *Extrační přístroj*



**Obr. č.47:** *Roztok trichlorethylenu a asfaltového pojiva*

Následně byla spuštěna druhá fáze extrakce. Cílem druhé fáze extrakce je docílit odstranění zbytků asfaltového pojiva ze zkušební navážky. Trichlorethylen je v druhé fázi extrakce v přístroji pomocí destilace zbavován příměsí asfaltu. Při práci s trichlorethylenem je třeba dbát zvýšené opatrnosti. Jedná se o látku, která v případě nadměrného kontaktu působí negativně na nervový systém. Při práci s extraktorem bylo dbáno na zajištění chlazení extraktoru a dostatečnou ventilaci místnosti. Manipulace s trichlorethylenem byla prováděna s gumovými rukavicemi.



**Obr. č.48:** Vážení obnaženého kameniva



**Obr. č.49:** Obnažená vlákna

Extrakce byla ukončena v okamžiku, kdy z nádoby se vzorkem směsi vytékal čistý trichlorethylen. Následně bylo vypnuto vstřikování rozpouštědla. Centrifuga byla ponechána v běhu pro odstranění rozpouštědla z patrony. Zároveň probíhalo sušení obnaženého kameniva. Po vysušení kameniva a odstranění trichlorethylenu z patrony byl extraktor vypnut. Vysušené kamenivo bylo poté zváženo nebo bylo podrobeno kompletnímu zmitostnímu rozboru. Z rozdílu váhy vzorků před extrakcí asfaltového pojiva a po jeho extrakci bylo vypočítáno procentuální zastoupení asfaltového pojiva v jednotlivých směsích. Celkem bylo provedeno 12 extarkcí asfaltového pojiva.

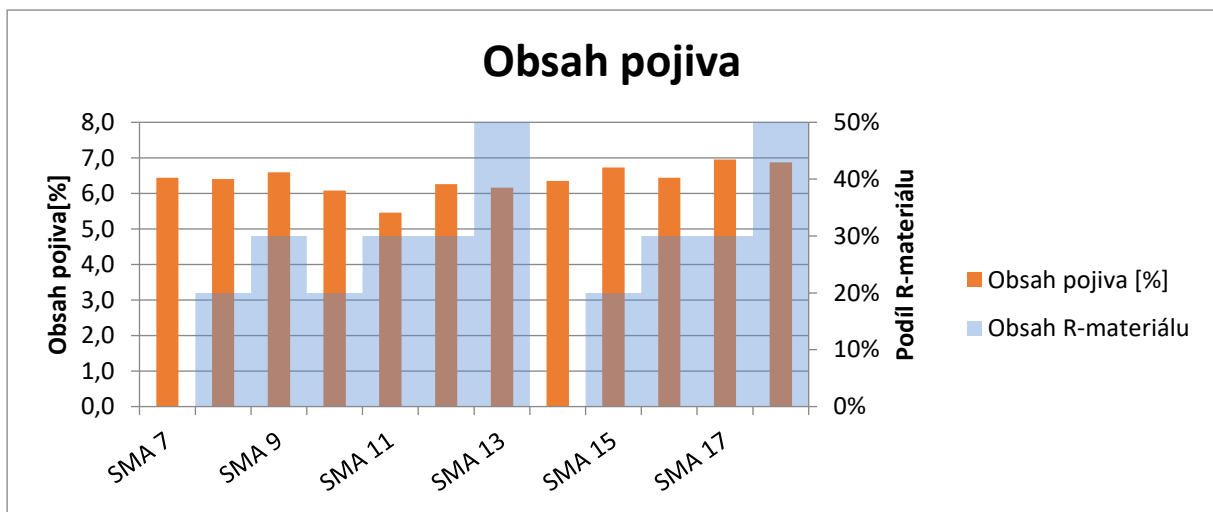
Označení směsi	Obsah R-materiálu	Mezerovitost	Obsah pojiva [%]
SMA 7	0%	2,7%	6,4
SMA 8	20%	6,3%	6,4
SMA 9	30%	3,0%	6,6
SMA 10	20%	6,2%	6,1
SMA 11	30%	2,7%	5,5
SMA 12	30%	3,3%	6,3
SMA 13	50%	4,4%	6,2
SMA 14	0%	3,0%	6,3
SMA 15	20%	4,9%	6,7
SMA 16	30%	2,2%	6,4
SMA 17	30%	4,2%	7,0
SMA 18	50%	3,4%	6,9

**Tabulka č.18:** Obsah pojiva





Obsah pojiva v jednotlivých směsích je uveden v tabulce č. 18. Obsah pojiva je stabilně v rozmezí 6,0 % až 7,0 %. Mírně se vyjímá směs SMA – 11 s obsahem pojiva 5,5 %. Obsahem pojiva se tedy směsi nevykají požadavkům normy ČSN EN 13108-5. V tabulce č.18 byla mezerovitost směsi dána do souvislosti s obsahem pojiva. Souvislost mezi obsahem pojiva a mezerovitostí směsi však nebyla z dostupných dat vyvozena.



Graf č.5: Obsah pojiva



## 5.9 Vakuová destilace

Roztok trichlorethylenu s asfaltovým pojivem získaný z extraktoru byl vystaven procesu destilace pomocí rotačního vakuového destilačního přístroje. Vakuový destilační přístroj sestává z olejové lázně (glycerin), ve které se nachází laboratorní baňka s destilovaným roztokem. Baňka s roztokem je osazena na rotační zařízení a ústí do kondenzační komory. Z této komory je kondenzovaný destilát odváděn do shromažďovací baňky. Jelikož se jedná o vakuovou destilaci, náleží k destilačnímu zařízení vakuová pumpa. Destilace proběhla ve dvou fázích. První fáze proběhla za atmosférického tlaku a teplotě 120°C za postupného doplňování destilovaného roztoku. Rotace baňky byla nastavena na 30 otáček za minutu. Vypařovaný trichlorethylen byl zachycován pomocí vodního chladicího zařízení a shromažďován v laboratorní baňce.

Ke druhé fázi bylo přistoupeno v okamžiku, kdy již nebylo možné vypořádat jakoukoli změnu objemu shromažďovaného předestilovaného trichlorethylenu. V druhé fázi byla teplota olejové lázně zvýšena na 160°C a osazena vakuová pumpa. V destilačním zařízení byl vytvořen a udržován podtlak ve výši  $2,0 \pm 0,5$  kPa. Podtlak byl držen po dobu 15 minut. Po uplynutí 15 minut již nebylo možné vypořádat jakýkoliv proces probíhající v destilovaném materiálu. Poté byl podtlak uvolněn a destilační přístroj vypnut.



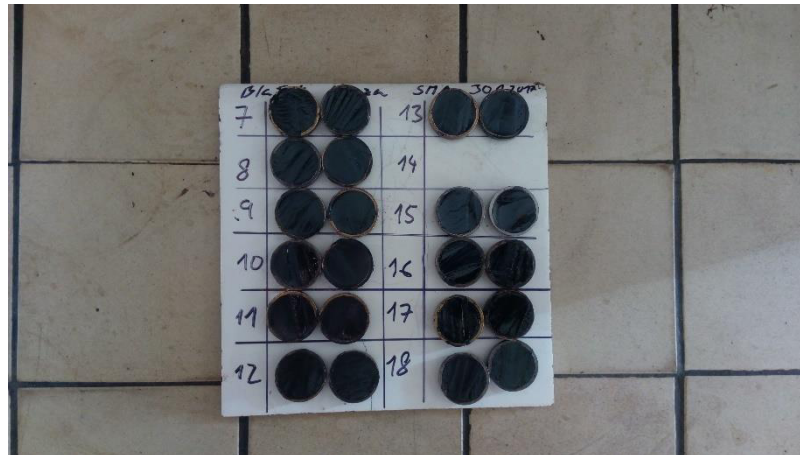
**Obr. č.50:** *Přístroj na rotační vakuovou destilaci*



**Obr. č.51:** *Vakuová destilační pumpa*



Baňka s asfaltovým pojivem byla následně uvolněna a v případě potřeby vložena do trouby a nahřáta na 150°C. Asfaltové pojivo bylo následně nalito do připravených zkušebních nádob pro zkoušky penetrace a bodu měknutí.



**Obr. č.52:** *Vzorky odlité pro stanovení bodu měknutí*

## 5.10 Zrnitostní rozbor

Zrnitostní rozbor byl proveden v souladu s českou technickou normou ČSN EN 933-1 (Zkoušení geometrických vlastností kameniva). Předmětem normy je popis referenční metody praní a prosévání za sucha, která se používá pro stanovení zrnitostního složení kameniva. Norma specifikuje postup pro veškeré kamenivo, včetně pórovitého, do jmenovité velikosti zrna 90 mm, kromě fileru.

Kamenivo je v dokumentu definováno jako zrnitý materiál používaný ve stavbě. Může být původu přírodního, průmyslového nebo může pocházet z rekonstrukcí či demolic. Tehdy se jedná o kamenivo recyklované. Zkušební navážka je definována jako celek při jednotlivé zkoušce. Ustálená hmotnost je definována jako hmotnost, která se při následném vážení, po vysoušení trvajícím nejméně jednu hodinu, nemění o více než 0,1 %.



Podstata zkoušky spočívá v roztrídění a oddělení materiálu pomocí sady sít do několika zrnitostních podílů s klesající velikostí částic. Velikosti otvorů sít a jejich počet mají být voleny dle požadované přesnosti a druhu vzorku.

Pro potřeby projektu byla zvolena síta se jmenovitou velikostí otvorů sít 22,4, 16, 11,2, 8, 5,6, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 a 0,063. Velikosti otvorů zkušebních sít jsou uvedeny v milimetrech. Dále bylo použito pevně líčující víko a dno sít, váhy s přesností  $\pm 0,1$  mm, nádoby, kartáče a štětce. Třídění bylo realizováno za pomoci zkušebního zařízení. Jedná se o zkušební zařízení Haver & Boecker 200 digital T. Pro prosévání všech zkušebních navážek bylo použito maximální vibrační intenzity po dobu 30 minut. Následně bylo aplikováno ruční prosévání. Zrnitostnímu rozboru bylo podrobena obnažené kamenivo po extrakci asfaltového pojiva.



**Obr. č.53:** Zkušební zařízení  
*Haver & Boecker 200 digital T*



**Obr. č.54:** Zkušební síta, štětce

Norma ČSN EN 933-1 předepisuje sušení zkušebního vzorku při teplotě  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  do ustálené hmotnosti. Sušení kameniva proběhlo již v rámci extrakce asfaltového pojiva. Další sušení nebylo aplikováno a kamenivo bylo považováno za optimálně suché.

Samotné prosévání probíhá vysypáním zkušební navážky na sloupec sít. Sloupec obsahuje víko, dno a jednotlivá zkušební síta. Síta jsou sestavena sestupně od největšího po nejmenší. Sestava je ukončená dnem. Následně proběhl proces třídění. Tedy mechanického třesení sloupcem



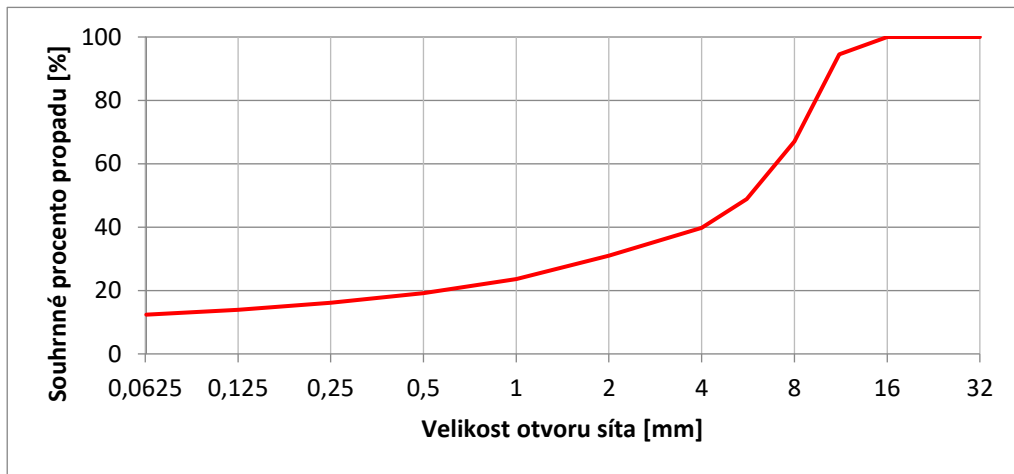
sít a následným ručním třesením pro dotřídění větších frakcí zkušebních vzorků. Prosévání bylo ukončeno v okamžiku, kdy další prosévání nevedlo ke změně hmotnosti zachyceného materiálu na jednotlivém sítě o více než 1 %. Při prosévání je nutno zabránit přetížení sít. Aby se tomu zabránilo, neměl by zachycený podíl materiálu na žádném sítě přesáhnout mez určenou dle vzorce  $\frac{A*\sqrt{d}}{200}$ . Kde A je plocha síta v mm<sup>2</sup> a d je velikost otvorů síta v mm. V případě přetížení síta je nutné danou frakci rozdělit na menší podíly, které se následně přesévají postupně.

Po procesu přesévání následuje vážení, při kterém se váží zachycený materiál na jednotlivých sítech. Postupuje se sestupně od síta s největšími otvory. Nakonec se zváží materiál zbylý na dně. K materiálu zbylém na dně byl připočten rozdíl hmotností patrony extraktoru po a před extrakcí asfaltového pojiva. Výsledky se průběžně zaznamenávají do protokolu o zkoušce. Ze získaných dat lze sestavit křivku zrnitosti a procento jemných částic.

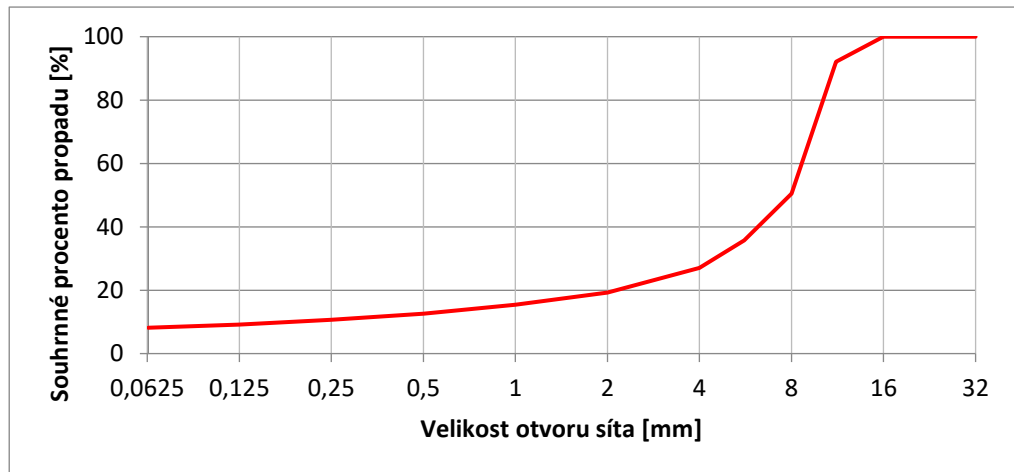
Zrnitost/síto (mm)	SMA 11 S
22,4	100
16	100
11,2	90-100
8	45-60
5,6	-
4	26-38
2	20-28
0,125	9-15
0,063	8-12

**Tabulka č.19:** Požadavky na křivku zrnitosti dle ČSN EN 13108-5

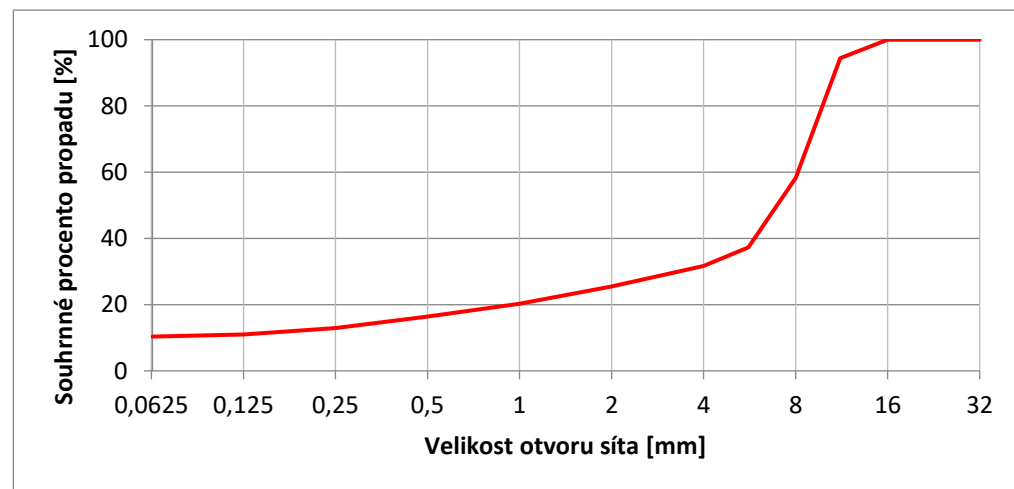
Veškeré protokoly ze zkoušek prosévání za sucha se nacházejí v zadní části diplomové práce v přílohách. Zde uvádím pouze grafické vyjádření výsledků zkoušek. Norma ČSN EN 13108-5 v tabulce č. NA.5.1 specifikuje nároky na zrnitostní složení směsi typu SMA 11 S. Zrnitostní požadavky jsou zobrazeny v tabulce č. 19.



Graf č.6: Zrnitost směsi SMA – 7

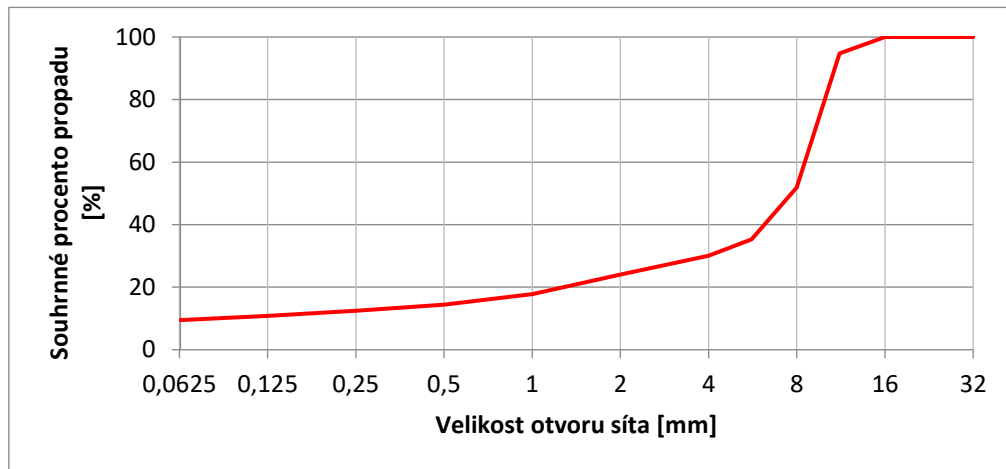


Graf č.7: Zrnitost směsi SMA – 8

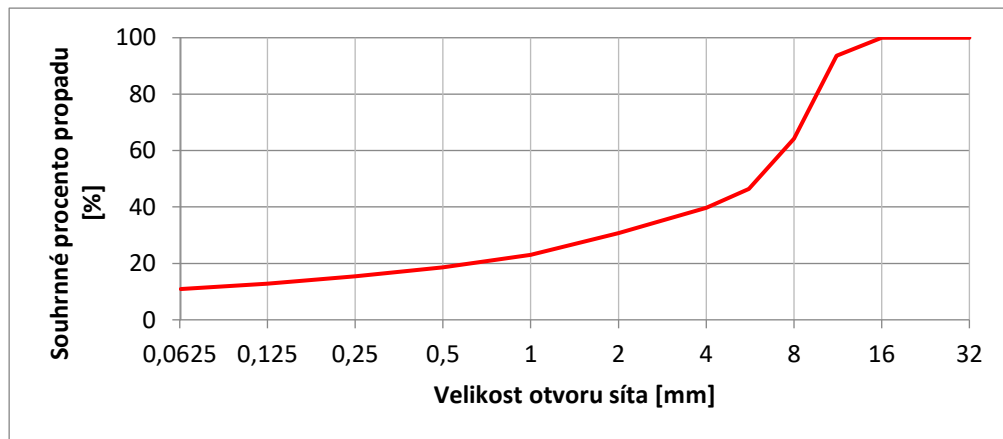


Graf č.8: Zrnitost směsi SMA – 9

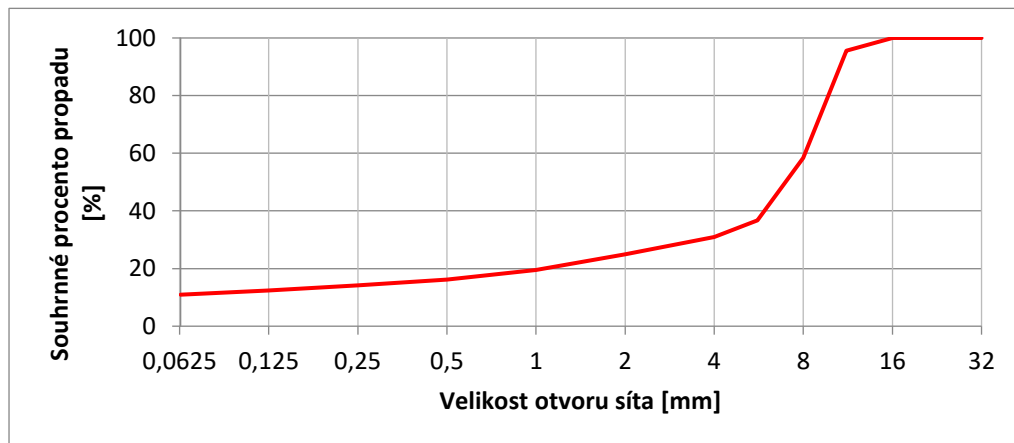




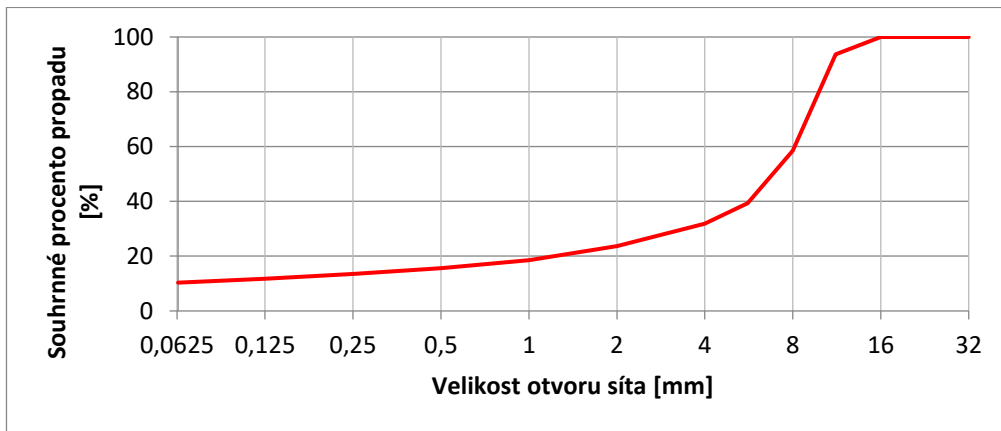
**Graf č.9: Zrnitost směsi SMA – 10**



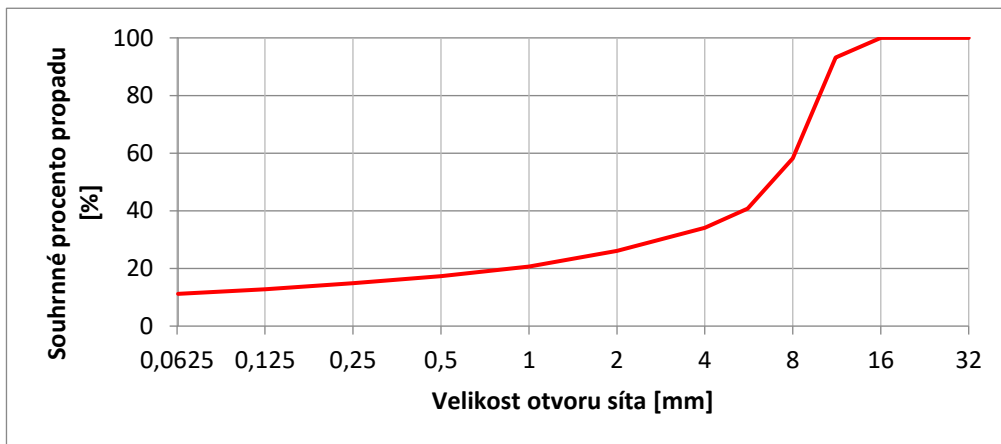
**Graf č.10: Zrnitost směsi SMA – 11**



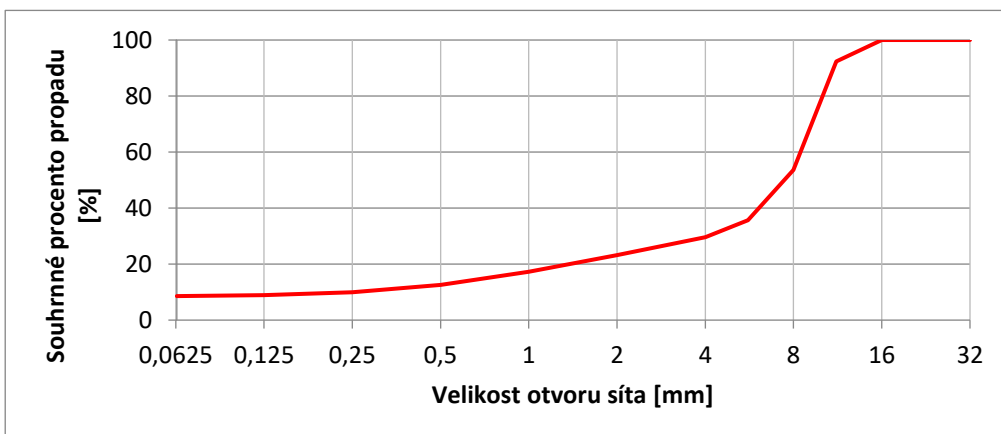
**Graf č.11: Zrnitost směsi SMA – 12**



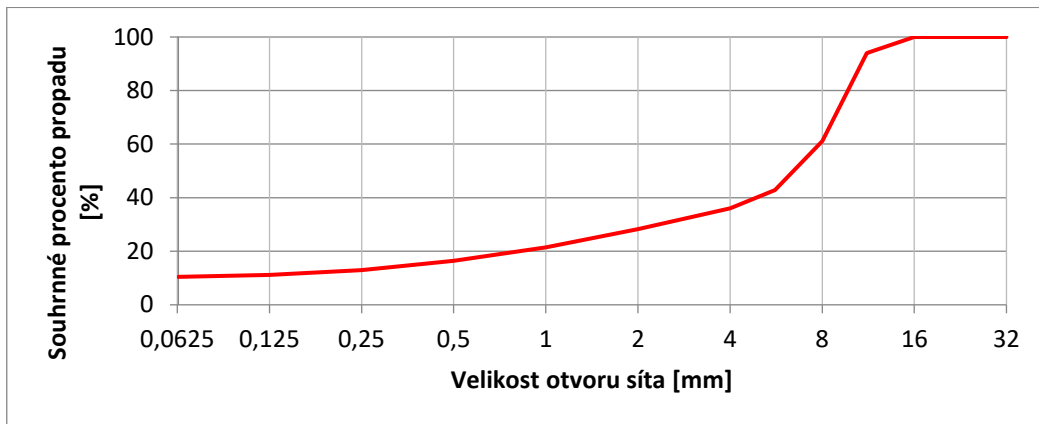
**Graf č.12:** Zrnitost směsi SMA – 13



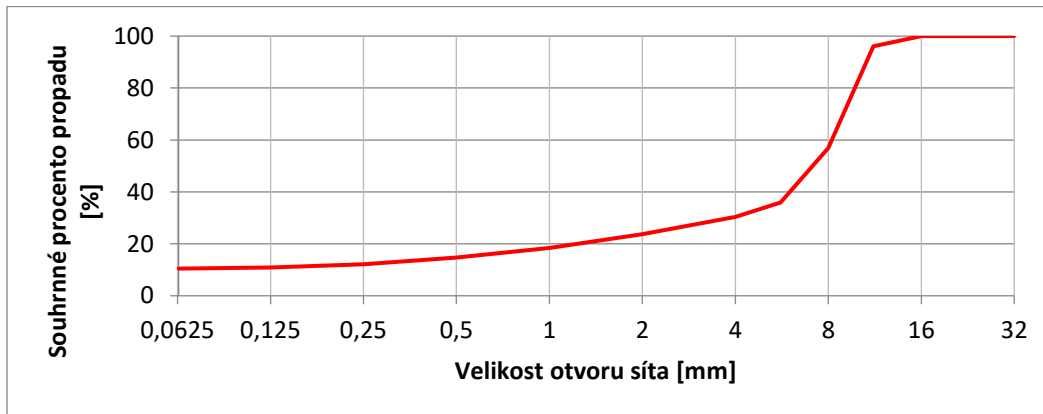
**Graf č.13:** Zrnitost směsi SMA – 14



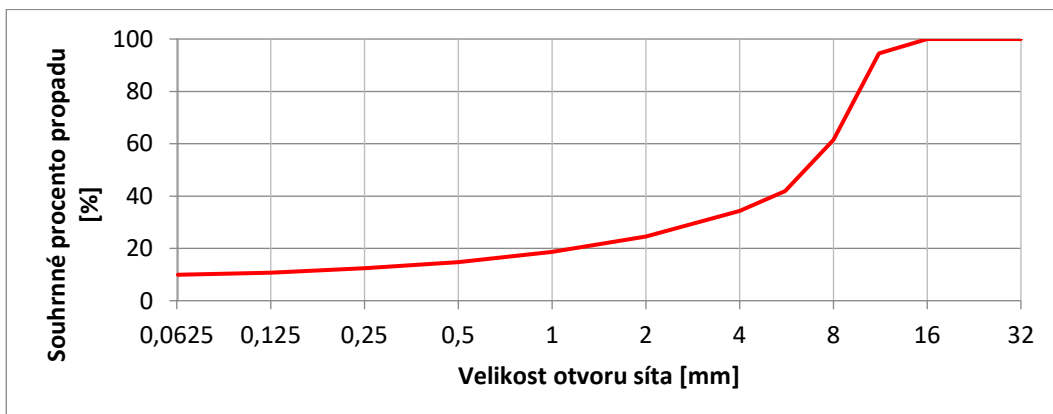
**Graf č.14:** Zrnitost směsi SMA – 15



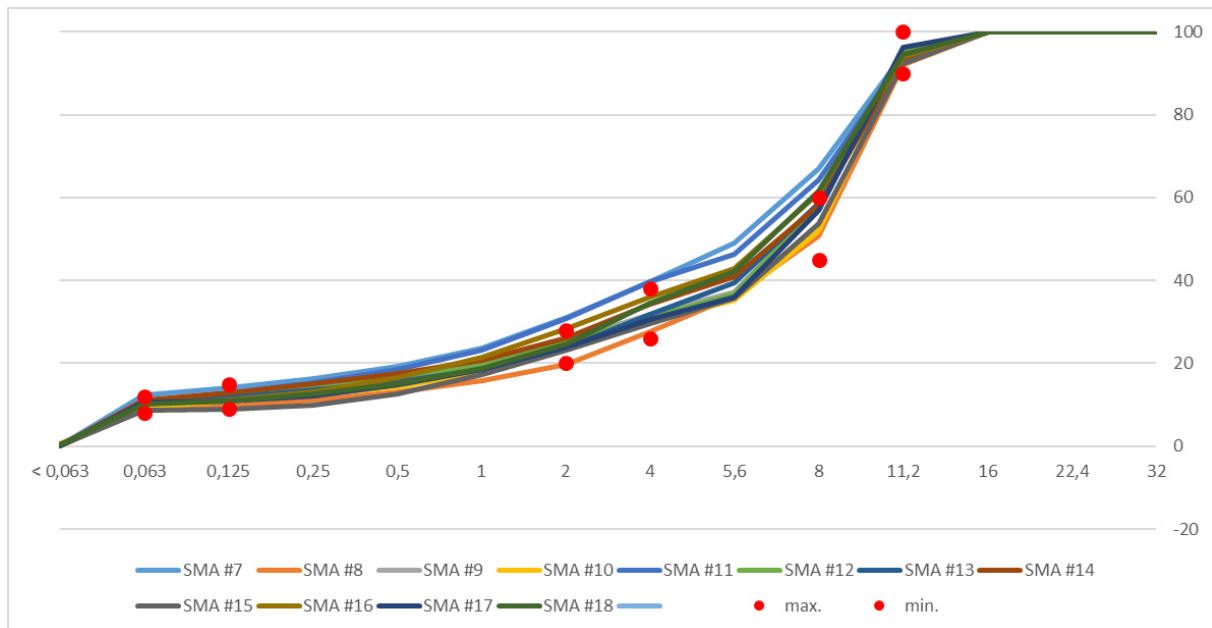
**Graf č.15:** Zrnitost směsi SMA – 16



**Graf č.16:** Zrnitost směsi SMA – 17



**Graf č.17:** Zrnitost směsi SMA – 18



**Graf č.18:** Souhrn křivek zrnitosti/porovnání s normovými požadavky [29]

Dle grafu č. 18 je zrnitostní složení většiny směsí v souladu s normovými požadavky. Norma ČSN EN 13108-5 specifikuje požadavky na zrnitostní složení v tabulce NA.5.1 na straně 35. Zrnitostní složení je však nutné porovnávat se zkouškami typu. Zrnitostní složení směsi se může od definované čáry ve zkoušce typu lišit pouze v určitém intervalu. Kontrolní zkouška může vyběhat z intervalu normy za předpokladu, že je zkouška typu na hraně definovaného intervalu. Vzhledem k absenci dat o zkouškách typu pro předmětné směsi bylo pro další posouzení směsí užito normového intervalu.

Pro směs SMA 11S jsou požadavky následující: na sítu s velikostí oka 16 mm 100 % propad, na sítu s velikostí oka 11,2 mm propad v rozmezí 90-100 %, na sítu s velikostí oka 8 mm propad v rozmezí 45-60 %, na sítu s velikostí oka 4 mm propad v rozmezí 26-48 %, na sítu s velikostí oka 2 mm propad v rozmezí 20-28 %, na sítu s velikostí oka 0,125 mm propad v rozmezí 9-16 % a na sítu s velikostí oka 0,063 propad v rozmezí 8-12 %. Požadavky na propad na zkušební sítu 11,2 splňují všechny směsi. Požadavky na propad na zkušební sítu s velikostí oka 8 mm nespĺňují směsi SMA – 7, 11 a 18. Na zkušebních sítích s velikostí ok 4 mm a 2 mm požadavky nespĺňují směsi 7 a



11. Požadavky normy na zkušebních sítích s velikostí ok 0,125 mm a 0,063 mm splňují všechny zkoušené směsi.

## 5.11 Bod měknutí

Stanovení bodu měknutí bylo provedeno v souladu s českou technickou normou ČSN EN 1427 (Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička). Předmětem normy je stanovení bodu měknutí asfaltu a asfaltových pojiv v rozmezí od 28°C do 150°C. Metoda je použitelná též pro asfaltová pojiva, která byla znovuzískána z asfaltových směsí. Pro potřeby normy je definován bod měknutí jako teplota, při které materiál za normalizovaných podmínek dosáhne určité konzistence.

Podstata metody spočívá v řízeném zahřívání dvou kroužků asfaltu, odlitých v mosazných kroužcích. Zahřívání probíhá v kapalinové lázni. Na každém kroužku je umístěna ocelová kulička. V důsledku zahřívání kroužků dochází k měknutí asfaltu. Kulička se v důsledku gravitačních sil a měnících se vlastností zahříváného asfaltu propadá. V okamžiku, kdy se kulička obalená v asfaltovém pojivu propadne o vzdálenost 25,0 mm ± 0,4 mm, se zaznamená teplota. Bod měknutí je stanoven jako průměr naměřených teplot.

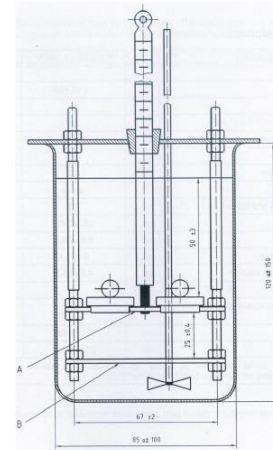
Kapalinová lázeň má sestávat z čerstvě převařené destilované vody nebo deionizované vody. Použitím takto upravené vody se předejde ovlivnění výsledků od vzduchových bublin zachycovaných na povrchu vzorků. Pro stanovení bodu měknutí nad 80°C a do 150°C se použije kapalinová lázeň z glycerinu.

K provedení zkoušky jsou potřeba následující pomůcky (podrobná specifikace pomůcek uvedena v normě ČSN EN 1427):

- dva mosazné kroužky
- odlévací destička
- kuličky
- dva mosazné středící prstence pro kuličky
- držák kroužků a sestava
- lázeň



- teploměr s minimální přesností 0,2°C (0,5°C při bodu měknutí nad 80°C)
- vrtulové nebo magnetické míchadlo s topnou plotýnkou (zajišťuje rovnoměrnou distribuci tepla v kapalinové lázni)
- v případě dostupnosti je možno použít řádně kalibrované poloautomatické nebo automatické zařízení



**Obr. č.55:** Automatický zkušební přístroj

**Obr. č.56:** Zkušební sestava [N2]

Příprava vzorků započala získáním roztoku asfaltového pojiva s rozpouštědlem z extraktoru. Dále bylo vakuovou destilací odstraněno rozpouštědlo. Získané asfaltové pojivo bylo neprodleně poté nalito do zkušebních nádob. Pro každou analyzovanou byl zhotoven jeden pár zkušebních těles. V rámci diplomové práce byl určován bod měknutí stanovený u asfaltových pojiv získaných z asfaltových směsí před laboratorním cyklem stárnutí. V rámci širšího výzkumného projektu byly pracovníky silniční laboratoře Fakulty stavební ČVUT stanoveny body měknutí i u asfaltových pojiv získaných ze směsí po laboratorním cyklu stárnutí. Pro umožnění komplexního pohledu na řešenou problematiku byly tyto údaje zahrnuty do finálního vyhodnocení výsledků. Od každého vzorku byl zhotoven jeden pár zkušebních těles. Vzorky byly odlity do zkušebních těles, která byla osazena na keramické dlaždici potřené separačním prostředkem. Do každého z kružků byl nalit mírný přebytek asfaltového pojiva. Vzorky byly posléze chlazeny při laboratorní teplotě po dobu minimálně 30 minut. Od doby odlití nemá do konce zkoušky uplynout doba delší než 4 hodiny. Po zchladnutí vzorků proběhlo odříznutí nadbytečného pojiva nahřátou čepelí nože. Seříznutý povrch byl zarovnan

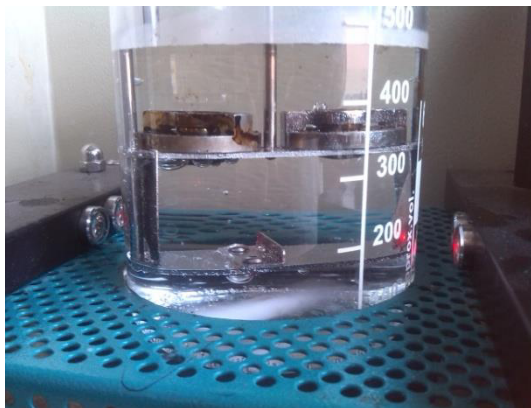




s okrajem kroužku. Po seříznutí byly kroužky opět ponechány po dobu 30 minut při laboratorní teplotě.

Samotná zkouška proběhla v kapalinové lázni tvořené destilovanou vodou. Počáteční teplota lázně činila  $5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Kádinka s lázní a sestaveným přístrojem byla následně umístěna do automatického zkušebního zařízení. Poté byl osazen teploměr a ověřena teplota lázně. Po započetí zkoušky byla kapalina rovnoměrně zahřívána rychlostí  $5^{\circ}\text{C} / \text{minutu}$ . U každého kroužku a kuličky se zaznamená teplota, kdy se asfalt obklopující kuličku dotkne při manuální metodě základní desky nebo při použití poloautomatického nebo automatického přístroje paprsku světla. Zkoušku je třeba opakovat, pokud je rozdíl mezi dvěma teplotami větší než  $1^{\circ}\text{C}$  pro bod měknutí do  $80^{\circ}\text{C}$  nebo větší než  $2^{\circ}\text{C}$  pro bod měknutí nad  $80^{\circ}\text{C}$ . Výsledný bod měknutí se zaznamená jako průměr teplot zaokrouhlený na nejbližší  $0,2^{\circ}\text{C}$ .

Norma ČSN EN 1427 dále definuje opakovatelnost zkoušky. Dle normy by rozdíl mezi výsledky dvou zkoušek získaných téže způsobem na tomtéž přístroji za konstantních zkušebních podmínek na identickém zkušebním materiálu neměl přesáhnout  $1^{\circ}\text{C}$  vícekrát než v jednom případě z dvaceti.



**Obr. č.57:** Zkouška kroužek kulička: fáze 1



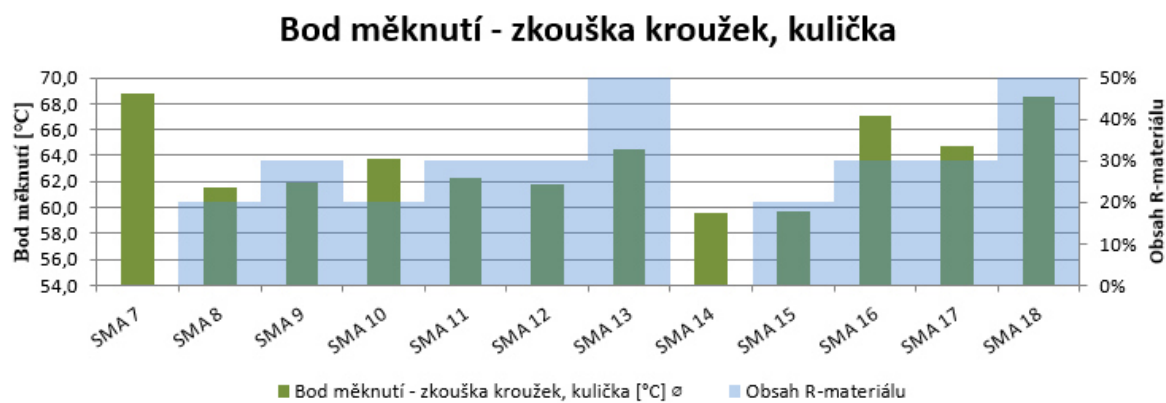
**Obr. č.58:** Zkouška kroužek kulička: fáze 2



Obr. č.59: Zkouška kroužek kulička: fáze 3

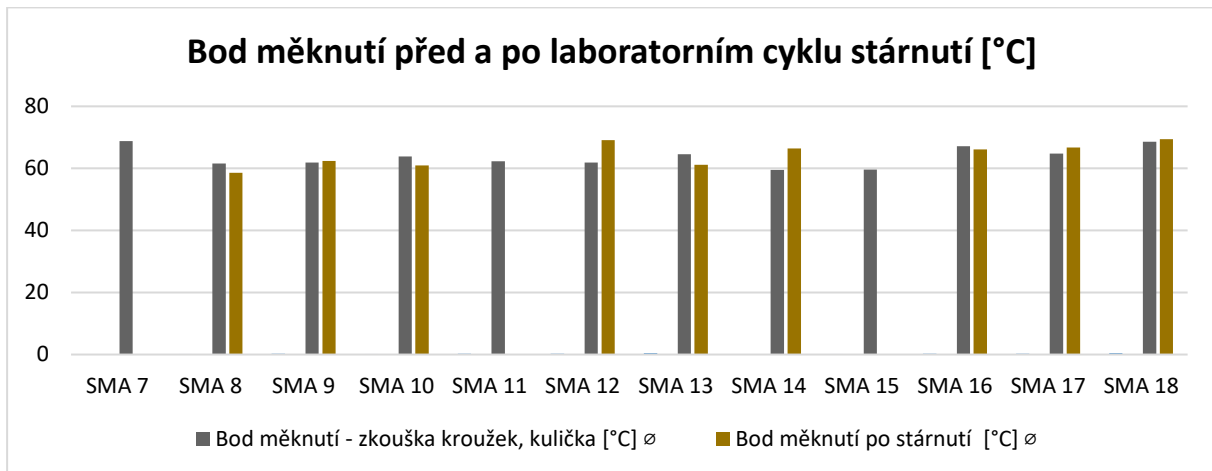


Obr. č.60: Zkouška kroužek kulička: fáze 4



Graf č.19: Bod měknutí – zkouška kroužek, kulička

Z grafu č. 19 je patrné, že asfaltové pojivo obsažené ve směsích SMA – 7 a SMA – 18 má nejvyšší bod měknutí. Směs SMA - 7 je směs bez příměsi R-materiálu a se silničním asfaltem 50/70. Směs SMA – 18 je směs s vysokým podílem SMA R-materiálu (50 %). U směsi byla použita změkčovací přísada Storelastic. Nejnižších naměřených hodnot bodu měknutí dosahují směsi SMA – 14 a SMA – 15. U obou směsí byla užita změkčovací přísada Storelastic. Směs SMA -14 je bez příměsi R-materiálu. Směs SMA – 15 je s 20 % příměsí běžného R-materiálu. Obecně lze říci, že jsou naměřené hodnoty v očekávaných mezích.



**Graf č.20:** *Bod měknutí před a po laboratorním cyklu stárnutí*

Za mírně překvapivé lze označit výsledky vyplývající z grafu č. 20. Dle teorie o stárnutí asfaltových pojiv byl předpokládán nárůst bodu měknutí. Tento předpoklad byl potvrzen u směsí SMA – 12 a SMA – 14. U směsi SMA – 8 a SMA – 13 byl zaznamenán dokonce opačný trend. U ostatních směsí se naměřené teploty oscilovaly okolo původně naměřených hodnot. Směsi SMA – 7, SMA – 11 a SMA – 15 nebyly podrobeny laboratornímu cyklu stárnutí z důvodu nedostatku materiálu. Stárnutí bylo provedeno uskladněním zkušebních těles v temperované komoře při teplotě 85 °C po dobu 5 dní.



## 5.12 Stanovení penetrace jehlou

Penetrace byla stanovena v souladu s českou technickou normou ČSN EN 1426 (Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou). Předmětem normy je specifikace metody na stanovení konzistence asfaltů a asfaltových pojiv. Běžný postup je popsán pro penetraci do 330 x 0,1 mm. Pro penetrace nad tuto hodnotu, až do 500 x 0,1 mm, jsou nezbytné jiné zkušební podmínky. Pro potřeby této diplomové práce s rezervou postačí běžný postup. Pozornost bude tedy věnována pouze běžnému postupu. Norma definuje penetraci jako konzistenci vzorku materiálu vyjádřenou jako hloubku v desetinách milimetru, do které svisle vnikne normalizovaná jehla za stanovených podmínek teploty, zatížení a doby zatěžování.

Podstata zkoušky spočívá v průniku normalizované jehly do vytemperovaného analytického vzorku. Zkušební podmínky zkoušky pro penetraci do 330 x 0,1 mm jsou: teplota 25°C, aplikované zatížení 100 g a doba zatížení 5 s. Pro realizaci zkoušky je zapotřebí penetrometru, penetrační jehly, nádoby na zkušební vzorek, vodní lázně, zařízení na měření času a teploměr. Penetrometr je přístroj, u kterého se držák jehly pohybuje ve svislém směru bez měřitelného tření, a který umožňuje stanovit penetraci na nejbližších 0,1 mm. Podstavec, na kterém spočívá nádoba se vzorkem, má být vodorovný a plochý. Součástí použitého penetrometru bylo zařízení, které automaticky kontroluje správnou dobu pronikání penetrační jehly. Nádoba na zkušební vzorek má být s plochým dnem a má být hluboká minimálně 35 mm, přičemž musí být minimálně o 10 mm větší, než je předpokládaná penetrace. Vodní lázeň musí mít kapacitu nejméně 10 l a musí být schopná udržovat teplotu vzorku v rozmezí  $\pm 0,15^\circ\text{C}$ .

Pro každou analyzovanou směs byl zhotoven jeden vzorek pro zkoušku penetrace před a po laboratorním cyklu stárnutí. V rámci diplomové práce byla určována hodnota penetrace stanovená u asfaltových pojiv získaných z asfaltových směsí před laboratorním cyklem stárnutí. V rámci širšího výzkumného projektu byla pracovníky silniční laboratoře Fakulty stavební ČVUT stanovena hodnota penetrace i u asfaltových pojiv získaných ze směsí po laboratorním cyklu stárnutí. Pro umožnění komplexního pohledu na řešenou problematiku byly tyto údaje zahrnuty do finálního vyhodnocení výsledků. V případě potřeby byl vzorek po nalití asfaltového pojiva krátce zahříván na



160°C pro jeho homogenizaci a urovnání nerovností povrchu. Následně se vzorky nechaly vychladnout při laboratorní teplotě. Po vychladnutí byly vzorky temperovány ve vodní lázni při teplotě  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  po dobu 90 minut.

Samotná zkouška začíná osazením očištěné penetrační jehly. Poté se umístí do své pozice nádoba se vzorkem a pomalu se snižuje jehla, až se její hrot dotkne svého obrazu odraženého povrchem vzorku. Poté se uvolní držák jehly na dobu 5 s a zaznamená se penetrace. Je nutné provést nejméně tři platná stanovení. Na platné stanovení jsou kladeny podmínky dle tabulky č.20.

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

**Tabulka č.20:** Maximální rozdíl platných stanovení [N3]

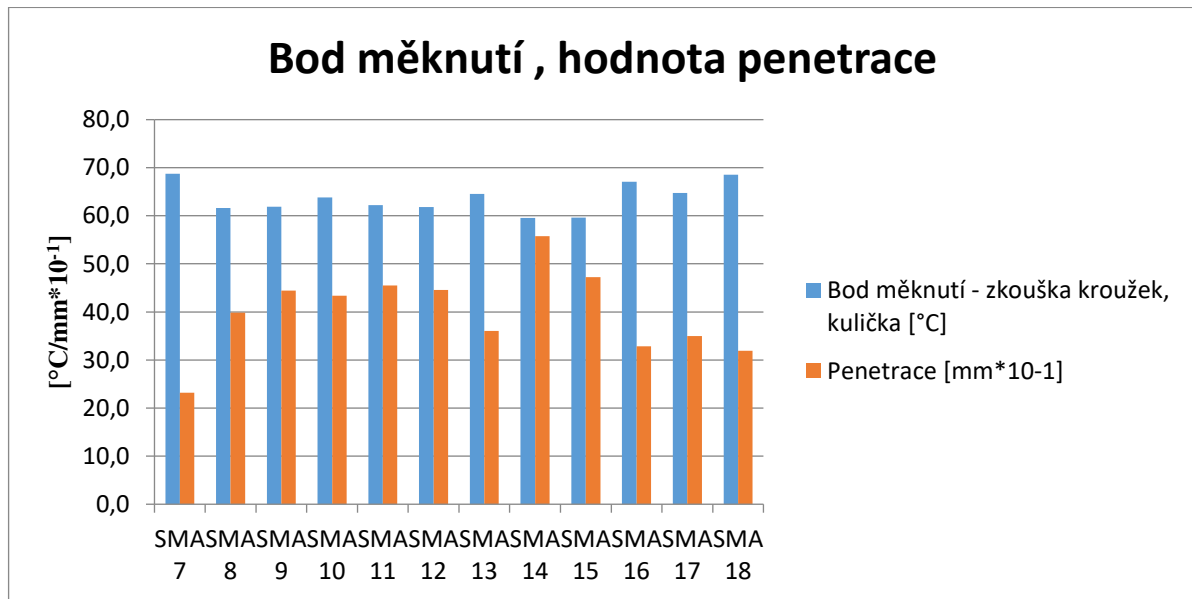
Vpichy musejí být od sebe vzdáleny nejméně 10 mm a zároveň nejméně 10 mm od stran nádoby. Pro potřeby diplomové práce byla vždy realizována alespoň 4 platná stanovení. Výsledná hodnota penetrace se stanoví jako aritmetický průměr platných stanovení. Hodnoty penetrace se uvádějí v  $\text{mm} \times 10^{-1}$  zaokrouhleny na nejbližší celé číslo.



**Obr. č.61:** Penetrační zařízení



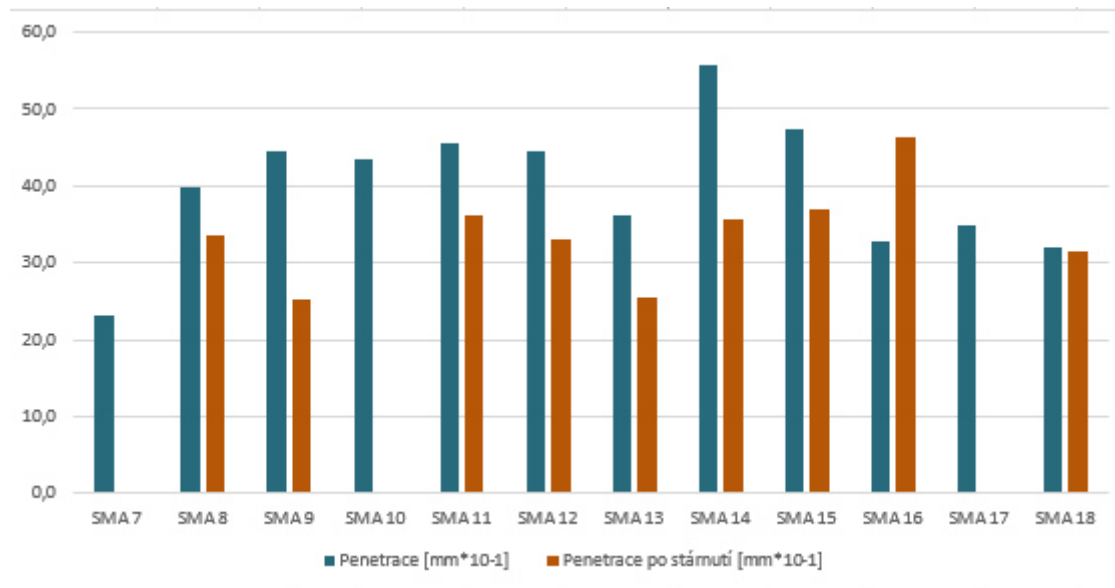
**Obr. č.62:** Temperovaný vzorek s aplikovaným penetračním vpichem



**Graf č.21:** *Hodnota penetrace, bod měknutí*

Na grafu č. 21 jsou zobrazeny naměřené hodnoty penetrace před laboratorním cyklem stárnutí. Tyto hodnoty jsou zde dále dány do souvislosti s naměřeným bodem měknutí jednotlivých směsí. Z grafu je názorné, že vyšší bod měknutí asfaltové směsi souvisí s nižší hodnotou penetrace. Nejnižší hodnota penetrace a zároveň nejvyšší hodnota bodu měknutí byla naměřena na směsi SMA – 7. Nejvyšší hodnota penetrace byla naměřena na směsi SMA – 14. Směs SMA – 7 je bez příměsí R-materiálu. Směs SMA – 14 je rovněž bez příměsí R-materiálu, ale obsahuje změkčovací přísadu Storelastic. Obě směsi obsahují silniční asfalt 50/70.



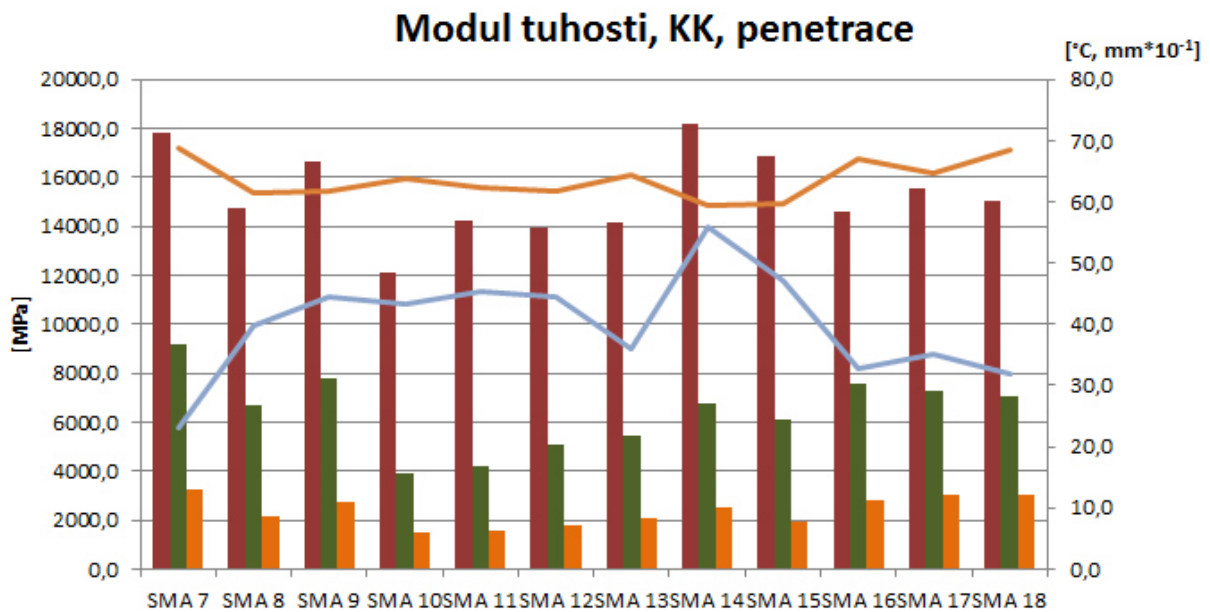


**Graf č.22:** Hodnota penetrace před a po laboratorním cyklu stárnutí

Z grafu č. 22 je zřejmé, že hodnota penetrace se po laboratorním cyklu stárnutí snížila. Tento jev je v souladu s teorií o stárnutí asfaltového pojiva. Pojivo v důsledku stárnutí tvrdne a hodnota penetrace se tedy snižuje. Tento jev nebyl potvrzen pouze u směsi SMA – 16. Možné příčiny tohoto jevu lze hledat v nehomogenitě materiálu, nedokonalé destilaci trichlorethylenu při vakuové destilaci či například neúmyslnému vystavení vzorku asfaltového pojiva nepříznivým jevům. Rovněž by toto chování bylo možné přičítat vlastnostem přísady Storelastic. Tato přísada je ale přítomna i ve směsích SMA – 14, SMA – 15 a SMA – 18, ve kterých se tento trend nepotvrdil.

### 5.13 Vyhodnocení výsledků

V rámci řešení diplomové práce byl naměřen poměrně obsáhlý soubor dat. Tento soubor byl obohacen o data naměřená dalšími pracovníky silniční laboratoře ČVUT, která byla naměřena v rámci širšího výzkumného projektu. Nejprve se pokusím shrnout výsledky na základě dat naměřených v rámci této diplomové práce. Tyto výsledky následně zhodnotím v kontextu ostatních dostupných dat.



Graf č.23: Hodnota penetrace, bod měknutí

**Legenda:**

- Modul tuhosti [MPa] 0° C
- Modul tuhosti [MPa] 15° C
- Modul tuhosti [MPa] 27° C
- Bod měknutí - zkouška kroužek, kulička [°C] ⌀
- Penetrace [mm\*10<sup>-1</sup>]

Na grafu č. 23 jsou přehledně uvedeny velikosti modulů tuhosti naměřených při teplotách 0°C, 15°C a 27°C na zkušebních Marshallových tělesech zkouškou v příčném tahu (IT-CY). Moduly tuhostí dosahují nejvyšších hodnot při 0°C, kdy je asfaltové pojivo z měřených teplot nejtužší. Při zvyšující se teplotě asfaltové pojivo měkne a moduly tuhosti se zmenšují. Nejvyšší modul tuhosti byl při 0°C naměřen u směsi SMA – 14. Tato směs je bez příměsi R-materiálu, ale obsahuje příměs změkčovací přísady.

Směs SMA – 7 je směs bez příměsi R-materiálu s obsahem silničního asfaltu 50/70 a vláken S-CEL RE. Směs dosahovala při měření modulů tuhosti při všech zkušebních teplotách vysokých



hodnot. Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena nejnižší hodnota penetrace ( $23,2 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a nejvyšší bod měknutí ( $68,8^\circ\text{C}$ ). Objemová hmotnost směsi činí  $2409 \text{ kg/m}^3$ . Mezerovitost směsi je  $2,7 \%$  (naměřený průměr je  $3,9 \%$ ). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na  $6,4 \%$  (naměřený průměr je  $6,4 \%$ ). Křivka zrnitosti se mírně vymykala normovým požadavkům. Směs oproti normovým požadavkům obsahuje větší podíl jemného kameniva. Mezerovitost směsi je v souladu s požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí  $2$  až  $6 \%$ ). [N5]

Směs SMA – 8 je směs s  $20 \%$  příměsí běžného R-materiálu, obsahem silničního asfaltu 50/70, vláken S-CEL 7G a přísady Storelastic. Směs dosahovala při měření modulů tuhosti při všech zkušebních teplotách průměrných hodnot. Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena hodnota penetrace  $39,9 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$  (naměřený průměr je  $40,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a bod měknutí  $61,6^\circ\text{C}$  (naměřený průměr je  $63,7^\circ\text{C}$ ). Objemová hmotnost směsi činí  $2471 \text{ kg/m}^3$ . Mezerovitost směsi je  $6,3 \%$  (naměřený průměr je  $3,9 \%$ ). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na  $6,4 \%$  (naměřený průměr je  $6,4 \%$ ). Křivka zrnitosti je v souladu s normovými požadavky. Mezerovitost směsi mírně překračuje požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí  $2$  až  $6 \%$ ). [N5]

Směs SMA – 9 je směs s  $30 \%$  příměsí běžného R-materiálu, obsahem silničního asfaltu 50/70, vláken S-CEL 7G a přísady Storelastic. Směs dosahovala při měření modulů tuhosti při všech zkušebních teplotách nadprůměrných hodnot. Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena hodnota penetrace  $44,4 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$  (naměřený průměr je  $40,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a bod měknutí  $62,5^\circ\text{C}$  (naměřený průměr je  $63,7^\circ\text{C}$ ). Objemová hmotnost směsi činí  $2397 \text{ kg/m}^3$ . Mezerovitost směsi je  $3,0 \%$  (naměřený průměr je  $3,9 \%$ ). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na  $6,6 \%$  (naměřený průměr je  $6,4 \%$ ). Křivka zrnitosti je v souladu s normovými požadavky. Mezerovitost směsi je v souladu s požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí  $2$  až  $6 \%$ ). [N5]

Směs SMA – 10 je směs s  $20 \%$  příměsí běžného R-materiálu, obsahem modifikovaného asfaltového pojiva PmB 45/80-65 a vláken S-CEL RF 20 (storflux). Směs dosahovala při měření



modulů tuhosti při všech zkušebních teplotách nejnižších hodnot. Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena hodnota penetrace  $43,4 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$  (naměřený průměr je  $40,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a bod měknutí  $62,5^\circ\text{C}$  (naměřený průměr je  $63,8^\circ\text{C}$ ). Objemová hmotnost směsi činí  $2392 \text{ kg/m}^3$ . Mezerovitost směsi je  $6,2 \%$  (naměřený průměr je  $3,9 \%$ ). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na  $6,1 \%$  (naměřený průměr je  $6,4 \%$ ). Křivka zrnitosti je v souladu s normovými požadavky. Mezerovitost směsi mírně překračuje požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí  $2$  až  $6 \%$ ). [N5]

Směs SMA – 11 je směs s  $30 \%$  příměsí běžného R-materiálu, obsahem modifikovaného asfaltového pojiva PmB 45/80-65 a vláken S-CEL RF 30 (storflux). Směs dosahovala při měření modulů tuhosti při všech zkušebních teplotách podprůměrných hodnot. Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena hodnota penetrace  $45,5 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$  (naměřený průměr je  $40,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a bod měknutí  $62,3^\circ\text{C}$  (naměřený průměr je  $63,8^\circ\text{C}$ ). Objemová hmotnost směsi činí  $2526 \text{ kg/m}^3$ . Mezerovitost směsi je  $2,7 \%$  (naměřený průměr je  $3,9 \%$ ). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na  $5,5 \%$  (naměřený průměr je  $6,4 \%$ ). Křivka zrnitosti je v rozporu s normovými požadavky. Směs obsahuje mírně vyšší obsah drobného kameniva. Mezerovitost směsi je v souladu s požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí  $2$  až  $6 \%$ ). [N5]

Směs SMA – 12 je směs s  $30 \%$  příměsí SMA R-materiálu, obsahem modifikovaného asfaltového pojiva PmB 45/80-65 a vláken S-CEL RF 30 (storflux). Směs dosahovala při měření modulů tuhosti při všech zkušebních teplotách podprůměrných hodnot (při teplotách  $0^\circ\text{C}$  a  $15^\circ\text{C}$  druhých nejnižších). Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena hodnota penetrace  $44,6 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$  (naměřený průměr je  $40,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a bod měknutí  $69,2^\circ\text{C}$  (naměřený průměr je  $63,8^\circ\text{C}$ ). Objemová hmotnost směsi činí  $2434 \text{ kg/m}^3$ . Mezerovitost směsi je  $3,3 \%$  (naměřený průměr je  $3,9 \%$ ). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na  $6,3 \%$  (naměřený průměr je  $6,4 \%$ ). Křivka zrnitosti je v souladu s normovými požadavky. Mezerovitost směsi je v souladu s požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí  $2$  až  $6 \%$ ). [N5]



Směs SMA – 13 je směs s 50 % příměsí SMA R-materiálu, obsahem modifikovaného asfaltového pojiva PmB 45/80-65 a vláken S-CEL RF 50 (storflux). Směs dosahovala při měření modulů tuhosti při všech zkušebních teplotách podprůměrných hodnot. Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena hodnota penetrace  $36,1 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$  (naměřený průměr je  $40,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a bod měknutí  $64,6^\circ\text{C}$  (naměřený průměr je  $63,8^\circ\text{C}$ ). Objemová hmotnost směsi činí  $2405 \text{ kg/m}^3$ . Mezerovitost směsi je 4,4 % (naměřený průměr je 3,9 %). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na 6,2 % (naměřený průměr je 6,4 %). Křivka zrnitosti je v souladu s normovými požadavky. Mezerovitost směsi je v souladu s požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí 2 až 6 %). [N5]

Směs SMA – 14 je směs bez příměsí R-materiálu, s obsahem silničního asfaltu 50/70 a přísady Storelastic. Směs dosahovala při měření modulů tuhosti při všech zkušebních teplotách podprůměrných hodnot. Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena hodnota penetrace  $55,8 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$  (naměřený průměr je  $40,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a bod měknutí  $59,6^\circ\text{C}$  (naměřený průměr je  $63,8^\circ\text{C}$ ). Objemová hmotnost směsi činí  $2377 \text{ kg/m}^3$ . Mezerovitost směsi je 3,0 % (naměřený průměr je 3,9 %). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na 6,3 % (naměřený průměr je 6,4 %). Křivka zrnitosti je v souladu s normovými požadavky. Mezerovitost směsi je v souladu s požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí 2 až 6 %). [N5]

Směs SMA – 15 je směs s 20 % příměsí běžného R-materiálu, obsahem silničního asfaltu 50/70 a přísady Storelastic. Směs dosahovala při měření modulů tuhosti při zkušební teplotě  $0^\circ\text{C}$  mírně nadprůměrných hodnot, při  $15^\circ\text{C}$  a  $27^\circ\text{C}$  mírně podprůměrných hodnot. Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena hodnota penetrace  $47,3 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$  (naměřený průměr je  $40,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a bod měknutí  $59,7^\circ\text{C}$  (naměřený průměr je  $63,8^\circ\text{C}$ ). Objemová hmotnost směsi činí  $2366 \text{ kg/m}^3$ . Mezerovitost směsi je 4,9 % (naměřený průměr je 3,9 %). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na 6,7 % (naměřený průměr je 6,4 %). Křivka zrnitosti je v souladu s normovými požadavky. Mezerovitost směsi je v souladu s požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí 2 až 6 %). [N5]



Směs SMA – 16 je směs s 30 % příměsí běžného R-materiálu, obsahem silničního asfaltu 50/70 a přísady Storelastic. Směs dosahovala při měření modulů tuhosti při zkušební teplotě 15°C mírně nadprůměrných hodnot, při 0°C a 27°C mírně podprůměrných hodnot. Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena hodnota penetrace  $32,9 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$  (naměřený průměr je  $40,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a bod měknutí 67,1°C (naměřený průměr je 63,8°C). Objemová hmotnost směsi činí 2432 kg/m<sup>3</sup>. Mezerovitost směsi je 2,2 % (naměřený průměr je 3,9 %). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na 6,4 % (naměřený průměr je 6,4 %). Křivka zrnitosti je v rozporu s normovými požadavky. Směs obsahuje nedostatečný podíl kameniva frakce 8/11,2. Mezerovitost směsi je v souladu s požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí 2 až 6 %). [N5]

Směs SMA – 17 je směs s 30 % příměsí SMA R-materiálu, obsahem silničního asfaltu 50/70 a přísady Storelastic. Směs dosahovala při měření modulů tuhosti při všech zkušebních teplotách nadprůměrných hodnot. Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena hodnota penetrace  $35,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$  (naměřený průměr je  $40,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a bod měknutí 64,8°C (naměřený průměr je 63,8°C). Objemová hmotnost směsi činí 2360 kg/m<sup>3</sup>. Mezerovitost směsi je 4,2 % (naměřený průměr je 3,9 %). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na 7,0 % (naměřený průměr je 6,4 %). Křivka zrnitosti je v souladu s normovými požadavky. Mezerovitost směsi je v souladu s požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí 2 až 6 %). [N5]

Směs SMA – 18 je směs s 80 % příměsí SMA R-materiálu, obsahem silničního asfaltu 50/70 a přísady Storelastic. Směs dosahovala při měření modulů tuhosti při všech zkušebních teplotách nadprůměrných hodnot. Při rozboru vlastností obsaženého asfaltového pojiva byla naměřena hodnota penetrace  $32,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$  (naměřený průměr je  $40,0 \text{ mm} \cdot 10^{-1}$ ) a bod měknutí 64,8°C (naměřený průměr je 68,6°C). Objemová hmotnost směsi činí 2414 kg/m<sup>3</sup>. Mezerovitost směsi je 3,4 % (naměřený průměr je 3,9 %). Obsah pojiva byl po extrakci stanoven na 6,9 % (naměřený průměr je 6,4 %). Křivka zrnitosti je v rozporu s normovými požadavky. Směs obsahuje nedostatečný podíl kameniva frakce 8/11,2. Mezerovitost směsi je v souladu s požadavky normy pro kontrolní zkoušky (norma požaduje mezerovitost při kontrolních zkouškách v rozmezí 2 až 6 %). [N5]





Při posuzování směsí je nutné dbát na hodnocení vhodné mezerovitosti směsí. Při příliš vysoké mezerovitosti směsi obvykle dosahují horších pevnostních charakteristik. (SMA – 8 a SMA – 10: směsi s 20 % R-materiálu) Při příliš nízké mezerovitosti mohou být směsi naopak problematické z hlediska odolnosti vůči trvalým deformacím (směs SMA – 16 má nejnižší naměřenou mezerovitost a zároveň nevyhověla ve zkoušce odolnosti vůči trvalým deformacím [29]). Při příliš nízké mezerovitosti nemá směs při opakovaném zatížení a stlačení dostatek prostoru, aby se mohla deformovat do volných mezer. Dochází tak k jejímu postupnému vytlačování. Další důležitý parametr je tuhost asfaltové směsi. Při hodnocení asfaltových směsí do obrusných vrstev se však nejedná o jediný rozhodující ukazatel. Norma ČSN EN 13108-5 nestanovuje ani limitní či doporučenou hodnotu modulu tuhosti. Vysoký modul tuhosti může přislíbovat velmi dobrou odolnost vůči trvalým deformacím, za nízkých teplot ale může být problematický.

Při měření modulů tuhosti by se dalo očekávat, že směsi s vysokým obsahem R-materiálu budou obsahovat tvrdší pojivo a naměřené hodnoty budou tedy vyšší. Tento předpoklad se v průběhu měření nepotvrdil. Trend růstu hodnot modulů tuhosti byl pravděpodobně zvrácen použitím rejuvenátorů. Tyto rejuvenátory mají vliv na změkčení zestárlého pojiva a způsobují tedy i pokles hodnot modulů tuhosti. Schopnost rejuvenátorů udržet vlastnosti asfaltového pojiva byla vyzkoušena procesem laboratorního stárnutí. S opatrností lze říci, že nejvíce náchylné byly k procesu stárnutí směsi s vysokým podílem R-materiálu a přísadou Storelastic. Tento trend je ovšem velmi nevýrazný.

Pracovníky silniční laboratoře byla vyrobena referenční směs SMA 11S PMB 25/55-55. V referenční směsi nebyl použit žádný R-materiál. Pro referenční směs byla stanovena mezerovitost a naměřeny moduly tuhosti před procesem stárnutí. V porovnání s referenční směsí mají směsi s 20% R-materiálu větší mezerovitost. Naopak směsi s větším podílem R-materiálu mají mezerovitost obvykle menší. Moduly tuhosti referenční směsi byly při všech měřených teplotách nadprůměrné.



Směsi s přísadou Storelastic vykazovaly mírně menší mezerovitost, než tomu bylo u ostatních směsí. Moduly tuhosti jsou lehce nadprůměrné, a to zejména po laboratorním cyklu stárnutí.

Z dostupných informací je poměrně obtížné vypočítat zákonitosti a trendy v chování směsí. Zkoušené směsi jsou totiž rozdílné v širokém rozsahu svých parametrů. Je tedy obtížné stanovit, zda je například nižší mezerovitost směsi způsobena podílem a druhem R-materiálu, použitou přísadou, výběrem pojiva či kombinací těchto parametrů. Dle dostupných informací byly vzorky směsí odebrány na stavbě. Bylo by určitě vhodnější pracovat se vzorky odebranými přímo na obalovně. Z dosavadních zkušeností mohu říci, že dělníci od pokládky nepřistupují k odběru vzorků vždy svědomitě a může tedy dojít k částečnému ovlivnění výsledků již nevhodným odběrem směsi.



Označení směsi	Obsah R-materiálu	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Max. obj. hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Mezerovitost	Hmotnost vzorku před extrakcí [g]	Obsah pojiva [%]	Bod měknutí - zkouška kroužek, kulička [°C]			Penetrace [mm <sup>*</sup> 10 <sup>-1</sup> ]	Modul tuhosti [MPa]		
							L	P	ø		0° C	15° C	27° C
SMA 7	0%	2409	2477	2,7%	1252,40	6,4	68,5	69,0	68,8	23,2	17826,8	9148,2	3263,5
SMA 8	20%	2315	2471	6,3%	2124,90	6,4	61,5	61,7	61,6	39,9	14747,3	6664,5	2158,6
SMA 9	30%	2397	2472	3,0%	1946,80	6,6	62,0	61,8	61,9	44,4	16656,4	7806,1	2768,4
SMA 10	20%	2335	2489	6,2%	1820,90	6,1	63,6	64,0	63,8	43,4	12115,2	3913,6	1485,9
SMA 11	30%	2458	2526	2,7%	2062,10	5,5	62,2	62,3	62,3	45,5	14243,8	4178,8	1597,6
SMA 12	30%	2434	2518	3,3%	1511,90	6,3	61,5	62,2	61,9	44,6	13967,3	5065,2	1766,1
SMA 13	50%	2405	2517	4,4%	1820,90	6,2	64,5	64,6	64,6	36,1	14170,9	5412,3	2042,3
SMA 14	0%	2377	2451	3,0%	1901,50	6,3	59,7	59,4	59,6	55,8	18211,8	6759,8	2490,4
SMA 15	20%	2366	2488	4,9%	2020,40	6,7	59,2	60,1	59,7	47,3	16861,1	6093,2	1917,0
SMA 16	30%	2432	2488	2,2%	1940,70	6,4	67,0	67,2	67,1	32,9	14577,3	7603,2	2843,0
SMA 17	30%	2360	2463	4,2%	1881,80	7,0	64,5	65,0	64,8	35,0	15571,3	7278,9	3053,5
SMA 18	50%	2414	2498	3,4%	1998,40	6,9	68,5	68,6	68,6	32,0	15004,0	7077,0	3029,3

Tabulka č.21: Přehled výsledků



SMA ref.	Referenční	Volumetrické vlastnosti		Modul tuhosti													
		OH MT (kg.m-3)	Max. Měteroví objem.h m. (%)	Modul tuhosti (MPa)			Modul tuhosti (MPa)			Modul tuhosti zestárá (MPa)			Ageing index				
				0 °C	15 °C	27 °C	0 °C	15 °C	27 °C	0 °C	15 °C	27 °C	0 °C	15 °C	27 °C		
SMA #7	0% RA + S-CEL RE	2454	2571	4,2%	19204	8764	4492	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SMA #8	20% RA + S-CEL 7G	2409	2477	2,7%	17827	9148	3264	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SMA #9	30% RA + S-CEL 7G	2315	2471	6,3%	14747	6665	2159	15894	6897	2790	108%	103%	108%	103%	108%	108%	118%
SMA #10	PmB + 20% RA + S-CEL RF 20	2397	2472	3,0%	16656	7806	2768	18002	8410	3256	108%	108%	108%	108%	108%	108%	118%
SMA #11	PmB + 30% RA + S-CEL RF 30	2335	2489	6,2%	12115	3914	1486	13485	5192	1850	111%	133%	111%	133%	111%	133%	125%
SMA #12	PmB + 30% SMA RA + S-CEL RF 30	2458	2526	2,7%	14244	4179	1598	15664	5179	1908	110%	124%	110%	124%	110%	124%	119%
SMA #13	PmB + 50% SMA RA + S-CEL RF 50	2434	2518	3,3%	13967	5065	1766	15480	5451	2078	111%	108%	111%	108%	111%	108%	118%
SMA #14	0% RA + Storelastic	2405	2517	4,4%	14171	5412	2042	16372	6063	2549	116%	112%	116%	112%	116%	112%	125%
SMA #15	20% RA + Storelastic	2377	2451	3,0%	18212	6760	2490	20711	8013	3161	114%	119%	114%	119%	114%	119%	127%
SMA #16	30% RA + Storelastic	2366	2488	4,9%	16861	6093	1917	17374	6573	2529	103%	108%	103%	108%	103%	108%	132%
SMA #17	30% SMA RA + Storelastic	2432	2488	2,2%	14577	7603	2843	19578	8587	3796	134%	113%	134%	113%	134%	113%	134%
SMA #18	50% SMA RA + Storelastic	2360	2463	4,2%	15571	7279	3054	17598	8402	3308	113%	115%	113%	115%	113%	115%	108%
SMA #19	50% SMA RA + Storelastic	2414	2498	3,4%	15004	7077	3029	18137	8556	3955	121%	121%	121%	121%	121%	121%	131%

Tabulka č.22: Kompletní přehled dostupných dat 1 [29]



	Referenční, T = 0°C						Odolnost vůči vzniku mirazové trhliny						Zestárlá, T = 0°C			AKTUÁLNÍ NORMA			NOVÁ NORMA			Odolnost vůči trvalým deformacím		
	Lomová energie		Přetvoření		Napětí při porušení		Lomová energie		Přetvoření		Napětí při porušení		Kritická hodnota		Kritická hodnota		Míra ztuhnutí		prům. hloubka koleje po 5 000 cyklech		WTSair		PRDair	
	(J)	(%)	(MPa)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(J)	(%)	(MPa)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(MPa)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm)	(%)	(%)	
SMA ref.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SMA #7	2284	1,42%	5,29	39,04	36,51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,9%	1,28	0,034	3,2%	-	-	
SMA #8	1794	1,52%	4,56	33,69	31,42	2157	1,93%	4,92	36,34	33,95	1,93%	4,92	36,34	33,95	1,93%	4,92	0,98	103,3%	0,98	0,026	2,4%	-	-	
SMA #9	2219	1,50%	5,46	40,35	37,64	2642	2,04%	6,29	46,25	43,37	2,04%	6,29	46,25	43,37	2,04%	6,29	1,14	100,9%	1,14	0,031	2,8%	-	-	
SMA #10	3105	2,00%	5,39	40,29	37,14	3509	2,21%	5,74	42,42	39,60	2,21%	5,74	42,42	39,60	2,21%	5,74	0,99	103,8%	0,99	0,020	2,4%	-	-	
SMA #11	4179	1,96%	7,43	55,19	51,24	3367	2,15%	7,40	54,74	51,01	2,15%	7,40	54,74	51,01	2,15%	7,40	1,08	101,0%	1,08	0,030	2,7%	-	-	
SMA #12	3097	1,91%	6,21	45,90	42,81	3854	2,68%	6,96	51,37	47,98	2,68%	6,96	51,37	47,98	2,68%	6,96	0,95	100,6%	0,95	0,026	2,3%	-	-	
SMA #13	2482	1,59%	5,94	43,88	40,96	2435	1,81%	5,87	43,42	40,48	1,81%	5,87	43,42	40,48	1,81%	5,87	1,22	102,0%	1,22	0,028	3,0%	-	-	
SMA #14	-	1,43%	5,69	42,07	39,26	1432	1,51%	5,37	40,02	36,99	1,51%	5,37	40,02	36,99	1,51%	5,37	1,17	101,5%	1,17	0,028	2,9%	-	-	
SMA #15	2169	1,66%	5,38	39,85	37,08	1987	1,66%	5,22	38,70	35,99	1,66%	5,22	38,70	35,99	1,66%	5,22	1,18	102,6%	1,18	0,028	2,9%	-	-	
SMA #16	2653	1,50%	5,26	38,84	36,31	1986	1,39%	5,84	43,25	40,28	1,39%	5,84	43,25	40,28	1,39%	5,84	1,58	100,4%	1,58	0,060	4,0%	-	-	
SMA #17	1579	1,32%	4,99	36,96	34,40	2319	1,49%	5,51	40,90	37,96	1,49%	5,51	40,90	37,96	1,49%	5,51	1,12	102,5%	1,12	0,032	2,8%	-	-	
SMA #18	2548	1,50%	5,12	37,87	35,34	-	2,38%	5,93	43,96	40,91	2,38%	5,93	43,96	40,91	2,38%	5,93	0,93	100,7%	0,93	0,022	2,3%	-	-	

Tabulka č.23: Kompletní přehled dostupných dat 2 [29]





	Pevnost v tahu za ohybu				Vlastnosti asfaltových pojiv - extrakce pojiva ze směsí										
	Referenční, T = 0°C		Zestárání, T = 0°C		Referenční směsí				Zestárání směsí						
	Pevnost v tahu za ohybu (MPa)	Modul tuhosti v tahu za ohybu (MPa)	Práce (J)	pevnost v tahu za ohybu (MPa)	Modul tuhosti v tahu za ohybu (MPa)	Práce (J)	Obsah pojiva (%)	Bod měknutí (°C)	Penetrace (měřeno HB) (mm*10-1)	Penetrace (měřeno LB) (mm*10-1)	Penetrační index (-)	Obsah pojiva (%)	Bod měknutí (°C)	Penetrace (mm*10-1)	Penetrační index (-)
SMA ref.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SMA #7	10,1	3125	941	8,3	1980	1060	6,4%	69	23	21	0,88	-	-	-	-
SMA #8	7,4	1880	1036	7,7	1963	1065	5,9%	62	40	-	0,79	6,4%	62,5	34	0,56
SMA #9	7,6	1735	1163	9,0	2246	1219	6,6%	62	44	-	1,10	6,5%	69,2	25	1,12
SMA #10	6,1	874	1797	6,1	1056	1371	6,1%	64	43	-	1,40	5,8%	-	-	-
SMA #11	7,5	1453	1350	8,1	1518	1518	5,4%	62	45	-	1,23	6,1%	66,4	36	1,44
SMA #12	4,6	630	1334	5,5	832	1313	6,2%	62	45	-	1,10	6,2%	66,1	33	1,18
SMA #13	7,2	1205	1553	8,2	1817	1337	6,1%	65	36	33	1,10	5,9%	69,5	25	1,17
SMA #14	8,9	1961	1361	9,5	2263	1376	6,3%	60	56	49	1,22	6,4%	58,6	36	-0,03
SMA #15	7,3	1573	1111	6,3	1091	1293	6,7%	60	47	41	0,82	5,9%	61,0	37	0,50
SMA #16	6,9	1203	1364	5,5	795	1518	6,4%	67	33	29	1,33	6,3%	61,2	46	1,07
SMA #17	7,8	1726	1257	8,2	1745	1346	6,9%	65	35	-	1,07	6,8%	-	-	-
SMA #18	6,4	1470	1061	5,6	979	1068	6,7%	69	32	-	1,51	6,4%	66,8	31	1,17

Tabulka č.24: Kompletní přehled dostupných dat 3 [29]





## 6. Závěr

V rámci řešení diplomové práce bylo zkoušeno 12 směsí typu SMA 11S. Pro každou směs bylo vyrobeno 6 Marshallových těles. Z těchto těles byla následně určena objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost a mezerovitost. Tělesa rovněž posloužila k určení modulů tuhosti před a po laboratorním cyklu stárnutí. Z dodaných asfaltových směsí bylo extrahováno asfaltové pojivo. Roztok asfaltového pojiva byl pomocí vakuové destilace zbaven rozpouštědla. Získané asfaltové pojivo bylo následně podrobeno zkouškám ke stanovení bodu měknutí a hodnoty penetrace. Z obnaženého kameniva byla určena křivka zrnitosti.

Analyzované směsi byly vyrobeny v rámci širšího výzkumného projektu na šaržové obalovně s paralelním bubnem pro přehřev R-materiálu. Jednotlivé směsi se lišily ve svém složení. Obsah R-materiálu ve směsích byl v rozmezí 0 – 50 %. Ve směsích byl použit běžný R-materiál a R-materiál pocházející ze směsí typu SMA. Směsi obsahovaly silniční asfalt 50/70 nebo modifikovaný asfalt 40/80-65. Rovněž směsi obsahovaly různé typy vláken a rejuvenátorů, které slouží k obnově vlastností zestárlého asfaltového pojiva.

V rámci řešení diplomové práce bylo potvrzeno, že použití rejuvenátorů významně ovlivňuje chování výsledné asfaltové směsi. Z naměřených dat lze vyvodit, že užití R-materiálu jednostranně neposouvá vlastnosti výsledné asfaltové směsi. Tyto vlastnosti mohou být dále upravovány použitím rejuvenátorů a je tedy možné dosáhnout kýžených vlastností asfaltové směsi. Typ a množství užitého rejuvenátoru však musí být pečlivě voleno v závislosti na vlastnostech R-materiálu i nového asfaltového pojiva. Bez patřičné analýzy veškerých vstupních materiálů nelze automaticky předpokládat prvotřídní výsledek. Užití R-materiálu ve směsích typu SMA přislíbují snížení nákladů a zvýšení jejich konkurenceschopnosti v kontextu ostatních asfaltových směsí pro obrusné vrstvy. Před masivním rozšířením směsí typu SMA s příměsí R-materiálu je však vhodné podrobit problematiku dalšímu výzkumu.



## 7. Zdroje

### Normy:

- [N1] ČSN EN 933-1, Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor
- [N2] ČSN EN 1427 - Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení bodu měknutí - Metoda kroužek a kulička
- [N3] ČSN EN 1426, Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení penetrace jehlou
- [N4] ČSN EN 13108-2, Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy
- [N5] ČSN EN 13108-5, Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 5: Asfaltový koberec mastixový
- [N6] ČSN EN 12697-30, Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem
- [N7] ČSN EN 12697-26, Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost
- [N8] ČSN EN 12697-8, Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí
- [N9] ČSN EN 12697-6, Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa

### Použitá literatura:

- [1] Internetové stránky společnosti CIUR a.s. <http://www.ciur.cz/>
- [2] Pavličík P. Návrhy asfaltových směsí s využitím vyššího obsahu R-materiálu: diplomová práce (2013)
- [3] Mucha B., Asfaltové směsi s použitím vyššího množství R-materiálu: diplomová práce (2014)



- [4] Varaus M. – Maximálně efektivní využití recyklovaných asfaltových vrstev vozovek pro výrobu nových asfaltových směsí
- [5] CENIA – Životní prostředí české republiky
- [6] TP 209 – Recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek na místě za horka
- [7] Mondschein P., přednášky ze Silničních staveb 2 (2014)
- [8] Solařová H., Recyklace asfaltových vozovek za studena,
- [9] Read J., Whiteoak D., The Shell Bitumen Handbook, Fifth Edition (2003)
- [10] Varaus M., Recyklace asfaltový směsí na obalovně (2013)
- [11] FREKOMOS, s.r.o., Obnova a zesílení krytů vozovek recyklací za horka na místě
- [12] ASTEC Australia Pty Ltd, The Double Barrel Aggregate Dryer/Drum Mixer
- [13] Stoklásek S., Kapitola 1 – Stárnutí asfaltových pojiv (2014)
- [14] <http://www.strassenbau.uni-wuppertal.de/SeSb/Labor/Geraete/rtfot.html>
- [15] Štěpanovský V., Problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsí (2015)
- [16] Vojtíš J., Modifikace asfaltových pojiv (2009)
- [17] Plán odpadového hospodářství České republiky na období 2015 - 2024 (2014)
- [18] Blažek J. – Recyklace za horka, Analýza vlastností R-materiálu (2015)
- [19] <http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=asfalty>
- [20] <http://www.eapa.org/promo.php?c=173>
- [21] Mondschein P., přednášky ze Stavby silničních komunikací (2012)
- [22] Kudrna J., Návrh a stavba vozovek – Krytové vrstvy vozovek (2011)
- [23] Hýzl P., Praktické aplikace v pozemních komunikacích – Modul 6 – Asfaltové směsi (2006)
- [24] <http://civilenggseminar.blogspot.cz/2011/09/stone-mastic-asphalt.html>
- [25] VUT v Brně, ČVUT v Praze, PSVS a.s., EUROVIA CS a.s., TP 151 – Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (2010)
- [26] García A., Schlangen E. – Properties of capsules containing rejuvenators for their use in asphalt concrete (2011)
- [27] Karlsson R., Isacsson U. – Material – related aspects of asphalt recycling – state of the art – Journal of Materials in Civil Engineering (2006)



- [28] Babický S. – Asfaltové pojivo s rejuvenátorem (2015)
- [29] Vacková P., Valentin J., Blažek J. – Vybrané charakteristiky variant asfaltové směsi typu SMA z pokusného úseku Kněžves – Rakovník – Dílčí výzkumná zpráva za rok 2016

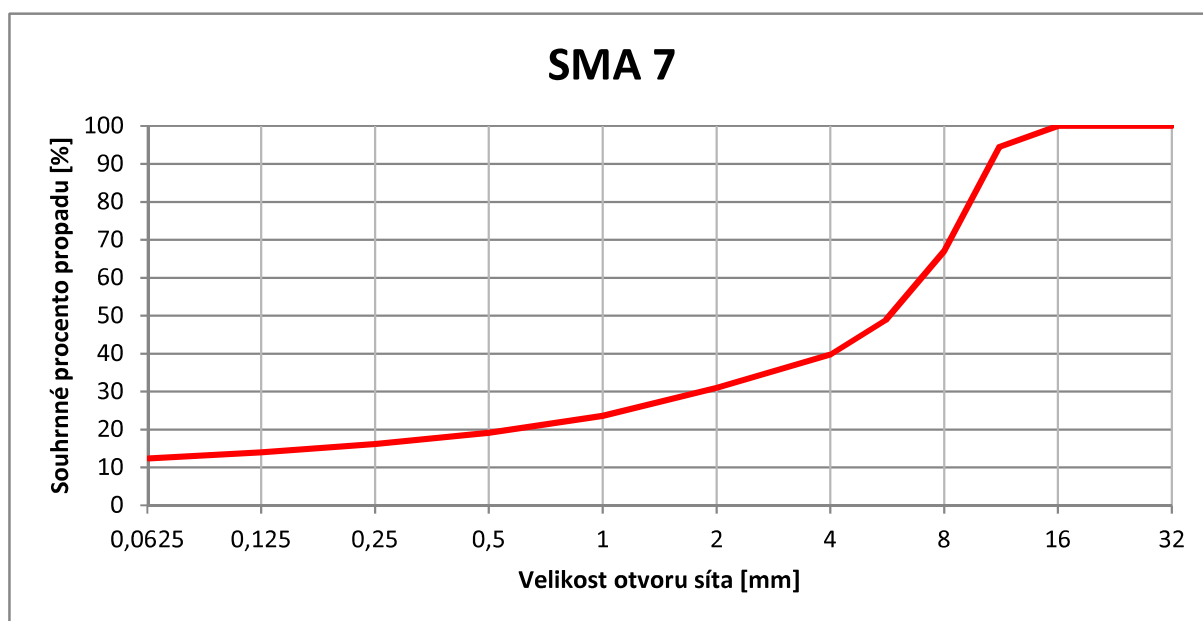
## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku:		Datum: 31.1.2017
SMA 7		Pracovník: Jan Blažek
Použitá metoda: prosévání za sucha	Obsah asf. pojiva:	6,4 %

celková hmotnost před extrakcí =	1252,4 g	patrona: prázdná =	542,8
celková hmotnost po extrakci =	1029,1 g	po extrakci =	685,4
		rozdíl =	142,6

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	64,6	5,51	5,51	94
8	321,9	27,47	32,99	67
5,6	212,8	18,16	51,15	49
4	106,9	9,12	60,27	40
2	102,6	8,76	69,03	31
1	86,2	7,36	76,38	24
0,5	52,6	4,49	80,87	19
0,25	34,5	2,94	83,82	16
0,125	26	2,22	86,04	14
0,063	18,5	1,58	87,62	12
materiál na dně + patrona	145,1	12,38	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  14 %



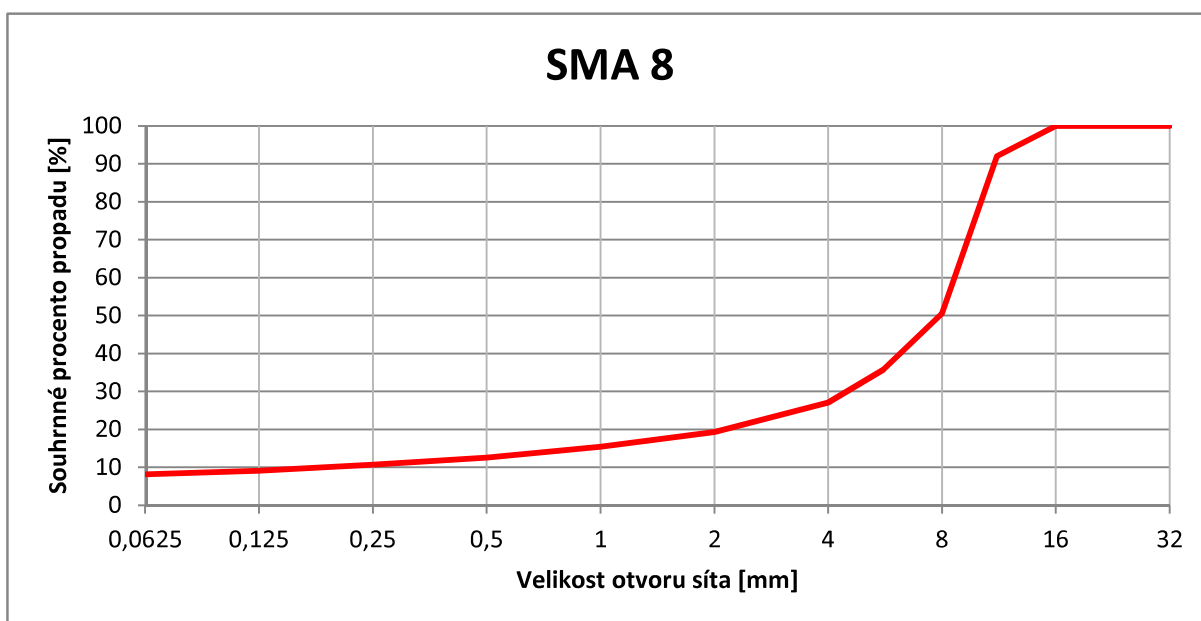
## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku: SMA 8		Datum: 26.1.2017
Použitá metoda: prosévání za sucha		Pracovník: Jan Blažek
Obsah asf. pojiva:		6,4 %

celková hmotnost před extrakcí =	2124,9 g	patrona: prázdná =	543,9
hmotnost po extrakci =	1829,3 g	po extrakci =	703,4
		rozdíl =	159,5

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	157,6	7,92	7,92	92
8	827,4	41,60	49,53	50
5,6	293,1	14,74	64,26	36
4	172,1	8,65	72,92	27
2	154,7	7,78	80,70	19
1	77,6	3,90	84,60	15
0,5	56,6	2,85	87,44	13
0,25	37,8	1,90	89,35	11
0,125	30,7	1,54	90,89	9
0,063	18,9	0,95	91,84	8
materiál na dně + patrona	162,3	8,16	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  9 %





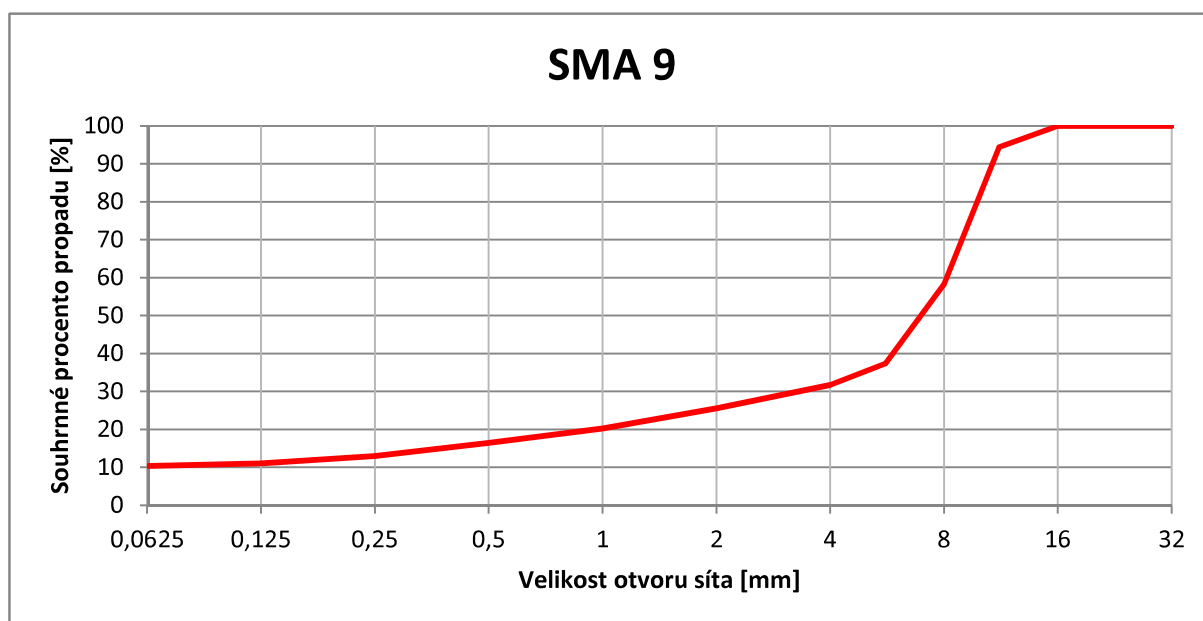
## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku:		Datum: 25.1.2017
SMA 9		Pracovník: Jan Blažek
Použitá metoda: prosévání za sucha	Obsah asf. pojiva:	6,6 %

celková hmotnost před extrakcí =	1946,8 g	patrona: prázdná =	524,9
hmotnost po extrakci =	1632,9 g	po extrakci =	710,4
		rozdíl =	185,5

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	101,4	5,58	5,58	94
8	657,2	36,14	41,72	58
5,6	381,2	20,96	62,68	37
4	102	5,61	68,29	32
2	112,9	6,21	74,50	26
1	95,5	5,25	79,75	20
0,5	70,2	3,86	83,61	16
0,25	62,2	3,42	87,03	13
0,125	35,7	1,96	89,00	11
0,063	11,9	0,65	89,65	10
materiál na dně + patrona	188,2	10,35	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  12 %



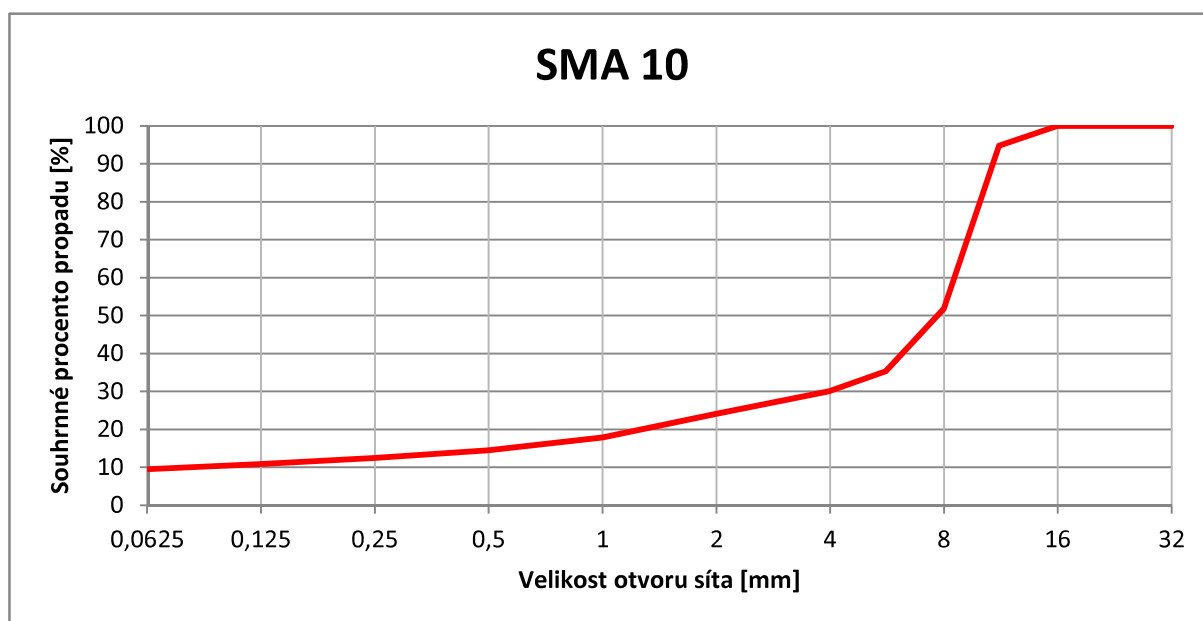
## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku:		Datum: 25.1.2017
SMA 10		Pracovník: Jan Blažek
Použitá metoda: prosévání za sucha	Obsah asf. pojiva:	6,1 %

celková hmotnost před extrakcí =	1820,9 g	patrona: prázdná =	523,9
hmotnost po extrakci =	1551,0 g	po extrakci =	683,1
		rozdíl =	159,2

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	89,6	5,24	5,24	95
8	732,9	42,85	48,09	52
5,6	284,5	16,64	64,73	35
4	88,3	5,16	69,89	30
2	103	6,02	75,92	24
1	106,8	6,24	82,16	18
0,5	58,2	3,40	85,56	14
0,25	33,8	1,98	87,54	12
0,125	27,7	1,62	89,16	11
0,063	23,2	1,36	90,52	9
materiál na dně + patrona	162,2	9,48	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  10 %



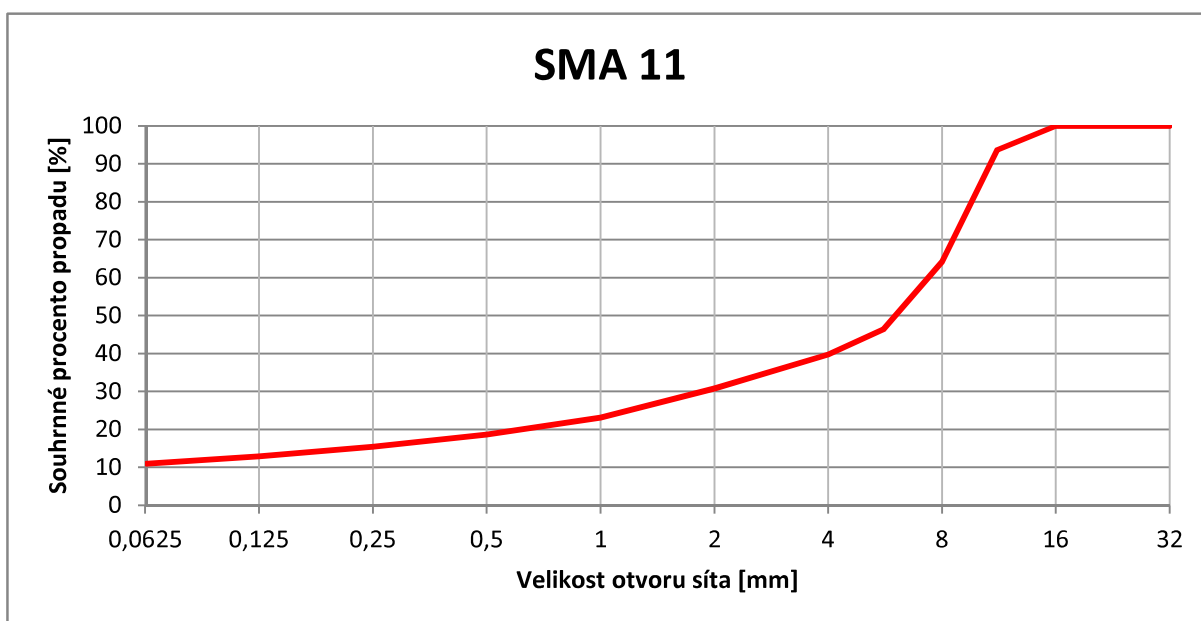
## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku:		Datum: 30.1.2017
SMA 11		Pracovník: Jan Blažek
Použitá metoda: prosévání za sucha	Obsah asf. pojiva:	5,5 %

celková hmotnost před extrakcí =	2062,1 g	patrona: prázdná =	516,8
hmotnost po extrakci =	1740,7 g	po extrakci =	725,6
		rozdíl =	208,8

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	123,5	6,33	6,33	94
8	574,5	29,47	35,80	64
5,6	347	17,80	53,60	46
4	130,7	6,70	60,31	40
2	173,6	8,90	69,21	31
1	150,2	7,70	76,92	23
0,5	87,3	4,48	81,40	19
0,25	63	3,23	84,63	15
0,125	49,2	2,52	87,15	13
0,063	37,7	1,93	89,08	11
materiál na dně + patrona	212,8	10,92	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  12 %



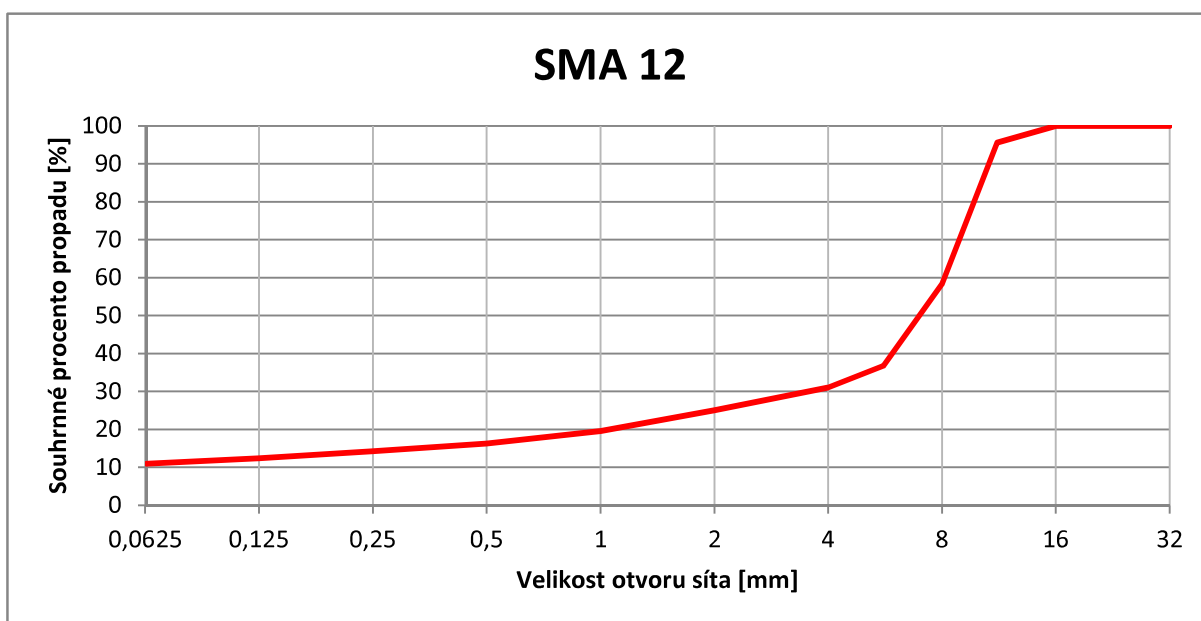
## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku:		Datum: 30.1.2017
SMA 12		Pracovník: Jan Blažek
Použitá metoda: prosévání za sucha	Obsah asf. pojiva:	6,3 %

celková hmotnost před extrakcí =	1511,9 g	patrona: prázdná =	523,3
hmotnost po extrakci =	1265,3 g	po extrakci =	675,2
		rozdíl =	151,9

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	62,7	4,42	4,42	96
8	527	37,19	41,61	58
5,6	306,4	21,62	63,23	37
4	82,1	5,79	69,02	31
2	84,9	5,99	75,01	25
1	77,1	5,44	80,45	20
0,5	47,3	3,34	83,79	16
0,25	28,7	2,03	85,82	14
0,125	25,9	1,83	87,64	12
0,063	20,2	1,43	89,07	11
materiál na dně + patrona	154,9	10,93	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  12 %



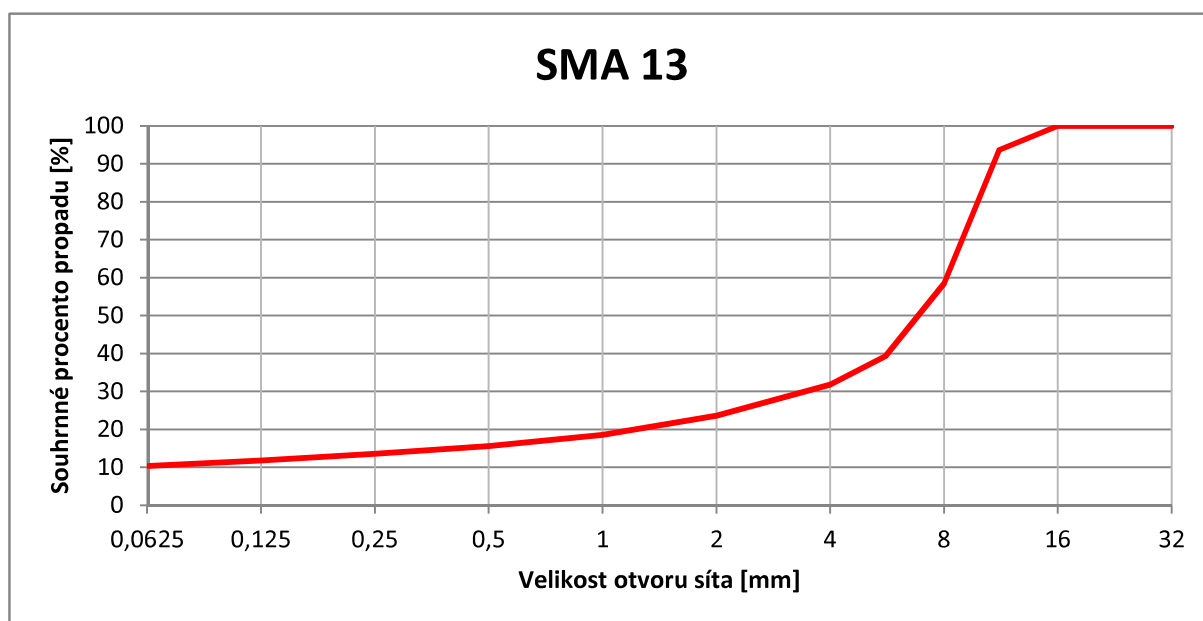
## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku: SMA 13		Datum: 27.1.2017
Použitá metoda: prosévání za sucha		Pracovník: Jan Blažek
Obsah asf. pojiva:		6,2 %

celková hmotnost před extrakcí =	1820,9 g	patrona: prázdná =	516,3
hmotnost po extrakci =	1535,4 g	po extrakci =	689,6
		rozdíl =	173,3

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	108,3	6,34	6,34	94
8	601	35,17	41,51	58
5,6	327,9	19,19	60,70	39
4	127,9	7,49	68,19	32
2	139,9	8,19	76,37	24
1	86,8	5,08	81,45	19
0,5	50,2	2,94	84,39	16
0,25	35,2	2,06	86,45	14
0,125	30	1,76	88,21	12
0,063	24,9	1,46	89,66	10
materiál na dně + patrona	176,6	10,34	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  12 %



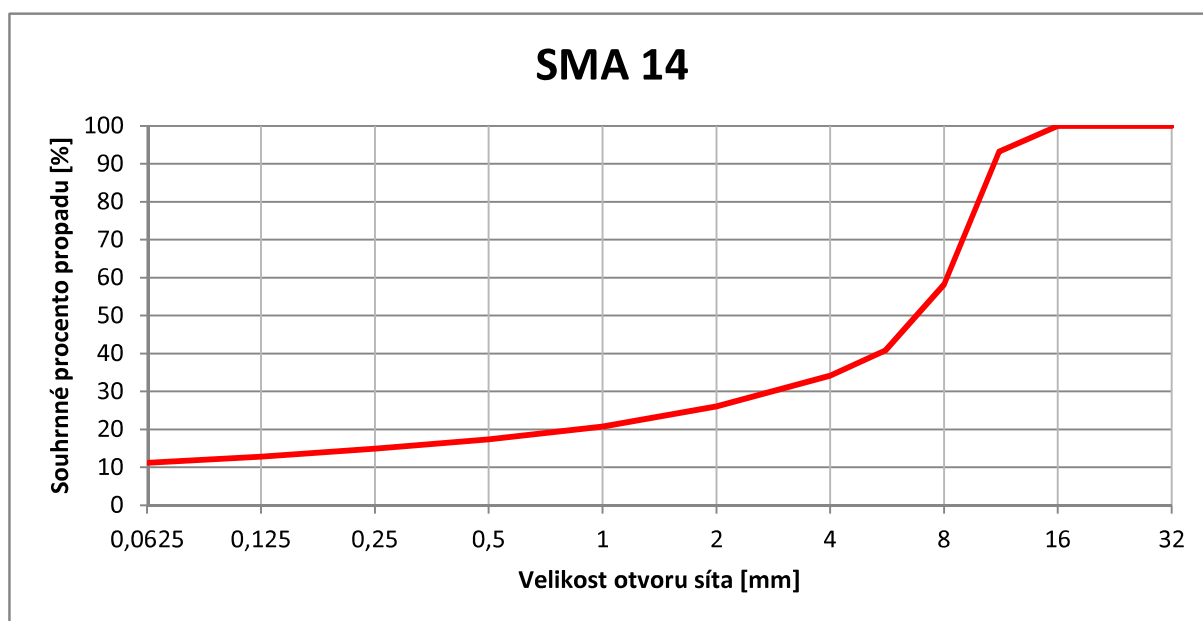
## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku:		Datum: 27.1.2017
SMA 14		Pracovník: Jan Blažek
Použitá metoda: prosévání za sucha	Obsah asf. pojiva:	6,3 %

celková hmotnost před extrakcí =	1901,5 g	patrona: prázdná =	515,2
hmotnost po extrakci =	1584,2 g	po extrakci =	711,8
		rozdíl =	196,6

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	120,7	6,78	6,78	93
8	623,9	35,03	41,81	58
5,6	309,8	17,40	59,21	41
4	118,2	6,64	65,85	34
2	144,3	8,10	73,95	26
1	95,6	5,37	79,32	21
0,5	59	3,31	82,63	17
0,25	43,8	2,46	85,09	15
0,125	37,3	2,09	87,19	13
0,063	28,9	1,62	88,81	11
materiál na dně + patrona	199,3	11,19	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  13 %





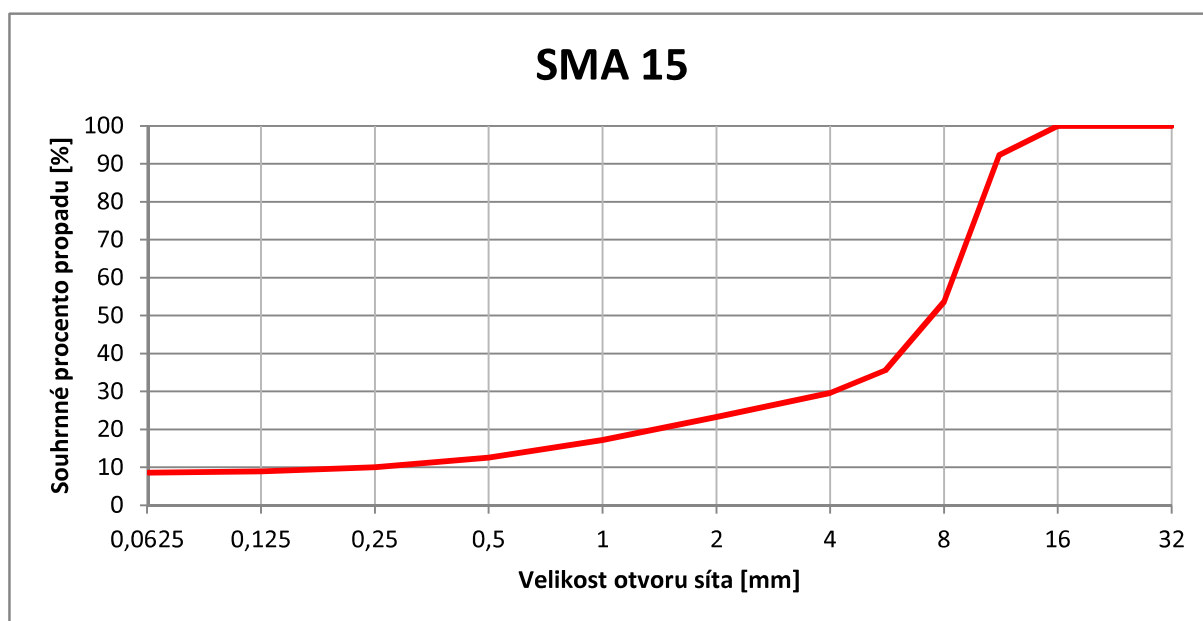
## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku:		Datum: 30.1.2017
SMA 15		Pracovník: Jan Blažek
Použitá metoda: prosévání za sucha	Obsah asf. pojiva:	6,7 %

celková hmotnost před extrakcí =	2020,4 g	patrona: prázdná =	520,9
hmotnost po extrakci =	1724,5 g	po extrakci =	680,9
		rozdíl =	160,0

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	145,2	7,70	7,70	92
8	728,8	38,67	46,38	54
5,6	339,3	18,00	64,38	36
4	113,5	6,02	70,41	30
2	120	6,37	76,77	23
1	113,5	6,02	82,80	17
0,5	87,2	4,63	87,42	13
0,25	48,9	2,59	90,02	10
0,125	19,5	1,03	91,05	9
0,063	7,1	0,38	91,43	9
materiál na dně + patrona	161,5	8,57	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  9 %



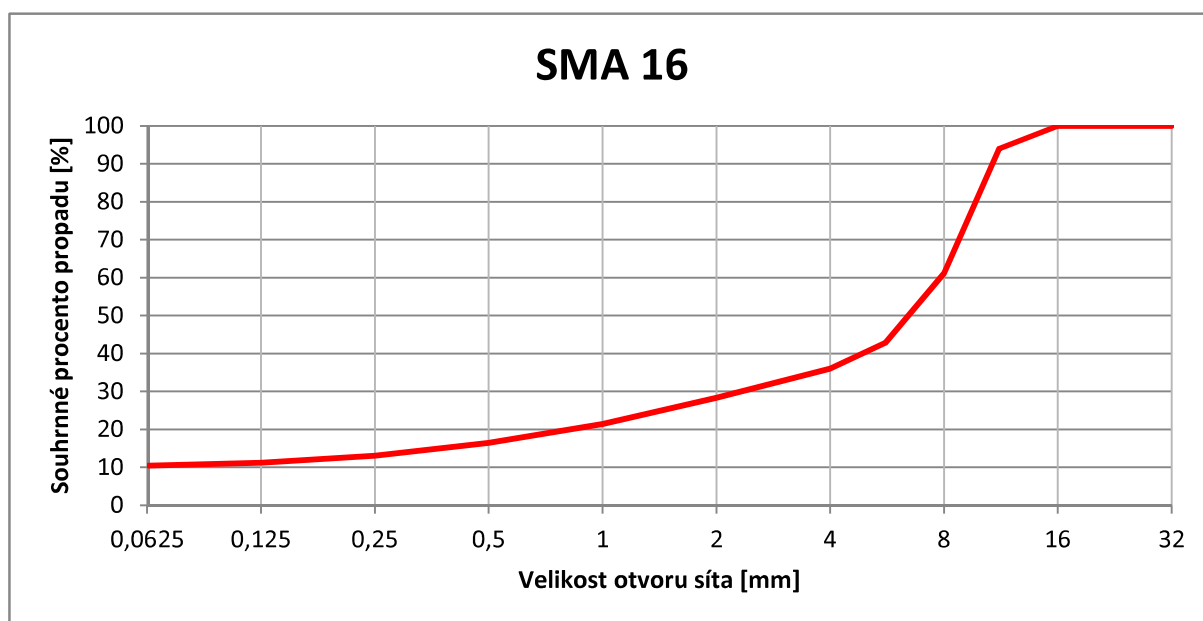
## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku:		Datum: 30.1.2017
SMA 16		Pracovník: Jan Blažek
Použitá metoda: prosévání za sucha	Obsah asf. pojiva:	6,4 %

celková hmotnost před extrakcí =	1940,7 g	patrona: prázdná =	543,2
hmotnost po extrakci =	1629,3 g	po extrakci =	729,7
		rozdíl =	186,5

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	109,6	6,04	6,04	94
8	596,2	32,83	38,87	61
5,6	331,7	18,27	57,14	43
4	124,5	6,86	63,99	36
2	139,7	7,69	71,69	28
1	125,6	6,92	78,60	21
0,5	90,2	4,97	83,57	16
0,25	62,1	3,42	86,99	13
0,125	33,2	1,83	88,82	11
0,063	13,4	0,74	89,56	10
materiál na dně + patrona	189,6	10,44	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  12 %



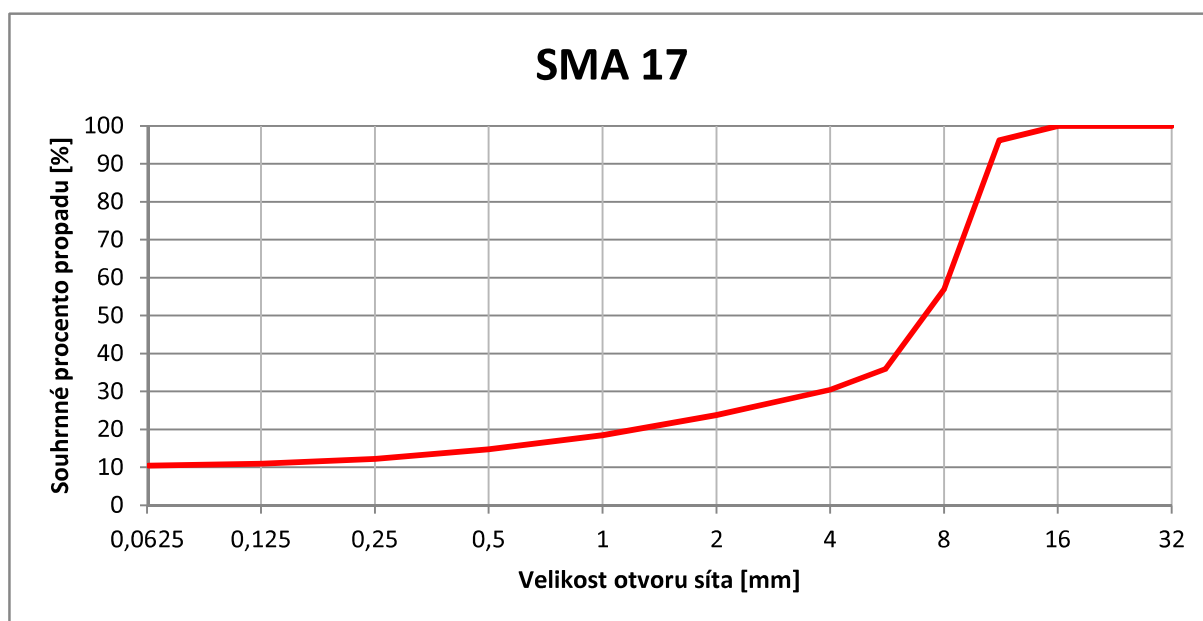
## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku: SMA 17		Datum: 26.1.2017
Použitá metoda: prosévání za sucha		Pracovník: Jan Blažek
Obsah asf. pojiva:		7,0 %

celková hmotnost před extrakcí =	1881,8 g	patrona: prázdná =	547,3
hmotnost po extrakci =	1570,5 g	po extrakci =	727,7
		rozdíl =	180,4

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	67,7	3,87	3,87	96
8	687,1	39,24	43,11	57
5,6	367,5	20,99	64,10	36
4	96,1	5,49	69,59	30
2	116,6	6,66	76,25	24
1	92,9	5,31	81,55	18
0,5	65,2	3,72	85,28	15
0,25	44,9	2,56	87,84	12
0,125	22,1	1,26	89,10	11
0,063	7,6	0,43	89,54	10
materiál na dně + patrona	183,2	10,46	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  12 %



## Záznam o zkoušce

<b>ZRNITOST - SÍTOVÝ ROZBOR podle EN 933 - 1</b>		<b>Laboratoř:</b>
Identifikace vzorku:		Datum: 26.1.2017
SMA 18		Pracovník: Jan Blažek
Použitá metoda: prosévání za sucha	Obsah asf. pojiva:	6,9 %

celková hmotnost před extrakcí =	1998,4 g	patrona: prázdná =	518,7
hmotnost po extrakci =	1679,7 g	po extrakci =	700,0
		rozdíl =	181,3

Velikost otvoru síta [mm]	Hmotnost zachyceného materiálu Ri [g]	Procento zachyceného materiálu [%]	Celkové zbytky [%]	Souhrnné procento propadu [%]
32	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	0	0	0	100
11,2	101,4	5,45	5,45	95
8	616,2	33,11	38,56	61
5,6	363,4	19,53	58,09	42
4	142,4	7,65	65,74	34
2	181,5	9,75	75,49	25
1	107,9	5,80	81,29	19
0,5	72,8	3,91	85,20	15
0,25	45,4	2,44	87,64	12
0,125	30,5	1,64	89,28	11
0,063	15	0,81	90,09	10
materiál na dně + patrona	184,5	9,91	100,00	0

procento jemných částic  $f=100 \cdot P/M1=$  11 %

