

# Analiza svojstava SMA mješavina s dodatkom gume

---

**Matejčić, Azra**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:648138>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Azra Matejčić**

**Analiza svojstava SMA mješavina s dodatkom gume**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij  
Urbano inženjerstvo  
Savitljive kolničke konstrukcije**

**Azra Matejčić  
JMBAG: 0114029380**

**Analiza svojstava SMA mješavina s dodatkom gume**

**Diplomski rad**

**Rijeka, srpanj 2022.**



## **IZJAVA**

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Azra Matejčić

U Rijeci, 29.6.2022.



## ZAHVALA

*Zahvaljujem se prof. dr. sc. Aleksandri Deluka Tibljaš na mentorstvu i ukazanom povjerenju za izradu diplomskog rada.*

*Posebice se zahvaljujem komentorici dr. sc. Marijani Cuculić i laborantu Emanuelu Banu na pomoći i dostupnosti prilikom izrade diplomskog rada.*

*Velike zahvale mojoj i Edinovoj obitelji, a posebice mojoj mami Alisi i nani Arifi na konstantnoj podršci i ljubavi koje mi nikada nije nedostajalo.*

*Na kraju najveća zahvala posvećena je mojoj ljubavi i najboljem prijatelju, zaručniku Edinu, zahvaljujući kojem sam osoba kakva jesam danas.*

اللَّهُمَّ إِنِّي أَسْتَوِدُّكَ مَا قَرَأْتُ وَمَا حَفَظْتُ، فَرَضُهُ عَلَيَّ عِنْدَ حَاجَتِي إِلَيْهِ،  
إِنَّكَ عَلَى مَا تَشَاءُ قَدِيرٌ وَأَنْتَ حَسْبِي وَنِعْمَ الْوَكِيلُ





## Sažetak

Ovim se diplomskim radom obrađuje tema analiza svojstava SMA asfaltne mješavine s dodatkom gume. Guma kao dodatak asfaltu predstavlja zapravo modifikaciju bitumena umjesto dosadašnjih polimernih vlakana. Cilj istraživanja jest dokazati i usporediti osnovna fizikalna i mehanička svojstva SMA asfalta s dodatkom gume u odnosu na klasičnu mješavinu SMA asfalta. U laboratorijskom istraživanju određena je mješavina za SMA asfalt kojoj se mijenjao udio bitumena i vrste bitumena; klasični cestograđevni bitumen i polimerom modificirani bitumen s ciljem da se odabere mješavina koja zadovoljava fizikalna svojstva koja su određena normom. Mješavine koje su ispunile uvijete propisane normom ponovo su izrađene i to po tri uzorka od svake kako bi se mogla odrediti mehanička svojstva odnosno Marshallovo ispitivanje te indirektna vlačna čvrstoća uzoraka tretiranih na 25 °C i 5 °C. Uzorci SMA asfalta s dodatkom gume izrađeni su od različitih udjela cestograđevnog bitumena i gume u udjelu od 1% ukupne mase uzorka. Guma je dodana u asfaltnu mješavinu tzv. mokrim postupkom. Uzorcima su potom ispitana fizikalna svojstva, a oni uzorci koji su zadovoljili propise ponovo su izrađeni po tri uzoraka i ispitana su im mehanička svojstva kao i kod klasične mješavine SMA asfalta. Zaključeno je da uzorcima klasične SMA mješavine, povećanjem udjela bitumena pada deformacija odnosno mogu podnijeti veće maksimalno opterećenje te u odnosu na cestograđevni bitumen, polimerom modificirani bitumen daje bolja svojstva. Uzorci tretirani na 5 °C imaju približno tri puta veću vlačnu čvrstoću od uzoraka tretiranih na 25 °C, te na temperaturi od 25 °C, porastom bitumena vlačna čvrstoća raste, a na temperaturi od 5 °C opada. Uzorci s dodatkom gume pokazali su posve suprotna svojstva od uzoraka klasične mješavine. Zaključeno je da se trebaju ispitati osnovna svojstva bitumena modificiranog gumom kako bi se mogla projektirati optimalna mješavina koja bi zadovoljila sve propise. Zasigurno je otpadna guma u odnosu na vlakna isplativa u pogledu ekonomije, održanja okoliša, ali i daje bolja mehanička svojstva koja ovim radom nisu ispitana, a dokazana su iskustvima drugih zemalja.

**Ključne riječi:** SMA asfalt, guma, modifikacija bitumena, ispitivanje svojstava asfalta

## **Abstract**

The topic of this thesis is analysis of the properties of SMA asphalt mixture with the addition of rubber. Rubber as an additive to asphalt is actually a modification of bitumen instead of the previous polymer fibers. The aim of the research is to prove and compare the basic physical and mechanical properties of SMA asphalt with the addition of rubber in relation to the classical mixture of SMA asphalt. In the laboratory research a mixture for SMA asphalt was determined and the proportion and type of bitumen was changing; penetration grade bitumen and polymer modified bitumen in order to select a mixture that meets the physical properties specified by the norm. Mixtures that met the requirements prescribed by the standard were re-made, three samples from each in order to determine the mechanical properties; the Marshall test and the indirect tensile strength of the samples treated at 25 °C and 5 °C. The samples of SMA asphalt with the addition of rubber were made of different proportions of penetration grade bitumen and rubber in a proportion of 1% of the total mass of the sample. The rubber was added to the asphalt mixture with so-called wet procedure. The samples were then tested for physical properties, and those samples that met the regulations were re-made in three samples and their mechanical properties were tested as in the classic SMA asphalt mixture. It was concluded that the samples of the classic SMA mixture by increasing the bitumen content, the deformation decreases and they can withstand a higher maximum load, and in relation to penetration grade bitumen, polymer modified bitumen gives better properties. Samples treated at 5 °C have approximately three times higher tensile strength than samples treated at 25 °C, and at a temperature of 25 °C, with increasing bitumen tensile strength increases, and at a temperature of 5 °C decreases. The samples with the addition of rubber showed completely opposite properties from the samples of the classical mixture. It was concluded that the basic properties of rubber modified bitumen should be examined in order to be able to design an optimal mixture that would meet all regulations. Certainly, waste rubber in relation to fibers is cost-effective in terms of economy, environmental protection, but also gives better mechanical properties that have not been tested by this work, but have been proven by the experiences of other countries.

**Key words:** SMA asphalt, rubber, bitumen modification, testing of asphalt properties



# SADRŽAJ

1. UVOD.....	18
2. ASFALTNE MJEŠAVINE .....	20
2.1. Kolnička konstrukcija.....	20
2.2. Općenito o asfaltnim mješavinama .....	21
2.3. Sastav asfaltne mješavine .....	22
2.4. Agregat .....	22
2.5. Punilo.....	24
2.6. Bitumen .....	25
2.7. Aditivi i modifikatori.....	27
3. FIZIKALNO-MEHANIČKA SVOJSTVA ASFALTNE MJEŠAVINE .....	28
3.1. Oštećenja u kolniku izazvana udjelom šupljina .....	30
3.2. Ispitivanje mehaničkih svojstva - Marshallova metoda .....	33
4. BITUMENSKE MJEŠAVINE OD SPLITMASTIKSA (SMA).....	36
4.1. Osnovne komponente SMA mješavine .....	37
4.2. Proizvodnja i ugradnja SMA asfaltne mješavine .....	39
4.3. Karakteristike SMA mješavine.....	41
4.4. Zahtjevi SMA mješavine iz Tehničkog propisa za asfaltne kolnike .....	43
5. UTJECAJ GUME NA SVOJSTVA ASFALTNE MJEŠAVINE .....	48
5.1. Istraživanja SMA asfalta s dodatkom gume na području RH .....	51
6. ANALIZA SVOJSTAVA SMA MJEŠAVINA S DODATKOM GUME – LABORATORIJSKO ISTRAŽIVANJE.....	52
6.1. Proračun za određivanje udjela komponenti asfaltne mješavine.....	58
6.2. Sastav asfaltnih mješavina.....	59
6.3. Postupak izrade uzoraka SMA asfaltne mješavine.....	65
6.4. Određivanje gustoće asfaltne mješavine.....	69

6.5. Određivanje gustoće asfaltnog uzorka.....	71
6.6. Volumen šupljina u uzorku .....	76
6.7. Ispitivanje mehaničkih svojstva .....	80
6.8. Određivanje vlačne čvrstoće neizravnom vlačnom metodom.....	85
6.9. Izrada uzoraka SMA asfalta s dodatkom gume .....	94
6.10. Fizikalna svojstva SMA s dodatkom gume .....	95
6.11. Mehanička svojstva SMA s dodatkom gume .....	97
6.12. Marshallovo ispitivanje SMA s dodatkom gume .....	98
6.13. Određivanje vlačne čvrstoće SMA asfalta s dodatkom gume .....	101
6.14. Usporedba rezultata uzoraka bez gume i s dodatkom gume .....	107
7. ZAKLJUČAK.....	109
8. LITERATURA.....	111

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Način označavanja SMA asfaltne mješavine [1].....	43
Tablica 2: Granulometrijski sastav SMA mješavine [18] .....	44
Tablica 3: Tehnička svojstva SMA za habajuće asfaltne slojeve [1] .....	44
Tablica 4: Propisana temperatura bitumenskih mješavina od SMA [1].....	45
Tablica 5: Tipovi i svojstva cestograđevnog bitumena [1].....	46
Tablica 6: Tipovi i svojstva polimerom modificiranog bitumena [1] .....	47
Tablica 7: Granulometrijski sastav SMA mješavine .....	53
Tablica 8: Usvojeni granulometrijski sastav SMA 11 .....	56
Tablica 9: Udio komponenti za uzorke SMA 11 .....	57
Tablica 10: Udjeli komponenata za AM 1.....	59
Tablica 11: Udjeli podfrakcija za AM 1 .....	59
Tablica 12: Udjeli komponenata za AM 2.....	60
Tablica 13: Udjeli podfrakcija za AM 2.....	60
Tablica 14: Udjeli komponenata za AM 3.....	61
Tablica 15: Udjeli podfrakcija za AM 3.....	61
Tablica 16: Udjeli komponenata za AM 4.....	62
Tablica 17: Udjeli podfrakcija za AM 4.....	62
Tablica 18: Udjeli komponenata za AM 5.....	63
Tablica 19: Udjeli podfrakcija za AM 5.....	63
Tablica 20: Udjeli komponenata za AM 6.....	64
Tablica 21: Udjeli podfrakcija za AM 6.....	64
Tablica 22: Gustoća materijala .....	70
Tablica 23: Gustoća asfaltne mješavine .....	70
Tablica 24: Masa i gustoća izmjerenih uzoraka .....	72
Tablica 25: Dimenzije i mase uzoraka .....	74
Tablica 26: Gustoća asfaltnog uzorka .....	75
Tablica 27: Rezultati proračuna volumena šupljina, VMA i VFB .....	78
Tablica 28: Dimenzije i mase uzoraka .....	80
Tablica 29: Rezultati Marshallovog ispitivanja.....	84

Tablica 30: Rezultati ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće na 25 °C i 5 °C .....	91
Tablica 31: Izmjerene dimenzije i mase uzoraka s gumom.....	95
Tablica 32: Gustoća uzoraka s dodatkom gume .....	96
Tablica 33: Volumen šupljina, VMA i VFB za uzorke s gumom .....	96
Tablica 34: Dimenzije i mase uzoraka s dodatkom gume .....	97
Tablica 35: Rezultati Marshallovog ispitivanja na uzorcima s dodatkom gume.....	99
Tablica 36: Rezultati ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće uzoraka s gumom .....	105

## POPIS SLIKA

Slika 1: Presijek kolničke konstrukcije [1].....	20
Slika 2: Agregat eruptivnog porijekla .....	23
Slika 3: Odnos punila i bitumena u asfaltnoj mješavini [8] .....	24
Slika 4: Rafinerijski bitumen izložen sobnoj temperaturi .....	25
Slika 5: Vrste aditiva [2].....	27
Slika 6: Volumni udjeli u asfaltnom uzorku [8].....	28
Slika 7: Oštećenje kolnika tipa kolotraženje [2].....	30
Slika 8: Oštećenje kolnika tipa uzdužna pukotina [10] .....	31
Slika 9: Oštećenje kolnika tipa blok pukotine [11] .....	31
Slika 10: Oštećenje kolnika tipa krunjenje [9] .....	32
Slika 11: Oštećenje kolnika tipa udarna rupa [12] .....	32
Slika 12: a) Marshallova preša, b) graf stabilnost/tečenje.....	33
Slika 13: Ispitivanje uzorka na indirektnu vlačnu čvrstoću.....	34
Slika 14: : Vrste loma uzorka pri ispitivanju indirektno vlačne čvrstoće.....	35
Slika 15: Površinska tekstura ugrađenog SMA asfalta [15].....	36
Slika 16: Sastav SMA asfaltno mješavine [16] .....	37
Slika 17: Diskontinuirana gradacija (lijevo) i gusta gradacija (desno) [14].....	37
Slika 18: Odlagalište otpadnih guma u Kuvajtu [23] .....	48
Slika 19: Postupak proizvodnje gumenog granulata iz otpadnih guma [24].....	49
Slika 20: „Mokri“ postupak dodavanja granulata gume u bitumen [24].....	50
Slika 21: „Suhi“ postupak dodavanja granulata gume u bitumen [24] .....	50
Slika 22: Granice granulometrijske krivulje za mješavinu SMA 11 .....	53
Slika 23: Sijačica s poredanim sitima.....	54
Slika 24: Prosijane podfrakcije.....	55
Slika 25: Odabrana granulometrijska krivulja SMA 11 .....	56
Slika 26: a) Kumulativno vaganje podfrakcija, b) Zagrijavanje materijala u pećnici .....	65
Slika 27: a) Izvaga bitumena, b) Celulozna vlakna .....	66
Slika 28: Miješanje zagrijanog materijala .....	66
Slika 29: a) Punjenje kalupa mješavinom, b) Marshallov zbijrač .....	67



Slika 30: Izrađeni uzorci SMA 11 .....	68
Slika 31: a) Uzorci potopljeni u vodi, b) Vaganje u vodi, c) Brisanje uzorka .....	71
Slika 32: Mjerenje uzorka pomičnom mjerkom .....	73
Slika 33: Volumni udjeli u asfaltnoj mješavini [36] .....	76
Slika 34: Volumen šupljina u odnosu na udio bitumena u mješavini .....	79
Slika 35: Ispitivanje uzorka u Marshallovoj preši .....	81
Slika 36: Stabilitet/tečenje za uzorak AM 3-III.....	82
Slika 37: Stabilitet/tečenje za uzorak AM 4-II.....	82
Slika 38: Stabilitet/tečenje za uzorak AM 6-II.....	83
Slika 39: Uzorci nakon ispitivanja u Marshallovoj preši .....	83
Slika 40: Rezultati Marshallovog ispitivanja .....	84
Slika 41: Ispitivanje neizravne vlačne čvrstoće.....	85
Slika 42: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AM 3-I.....	87
Slika 43: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AM 3-II.....	87
Slika 44: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AM 4-I.....	88
Slika 45: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AM 4-III.....	88
Slika 46: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AM 6-I.....	89
Slika 47: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AM 6-III.....	89
Slika 48: Uzorci nakon ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće na 25 °C .....	90
Slika 49: Uzorci nakon ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće na 5 °C .....	90
Slika 50: Usporedba vrijednosti ITS-a na različitim temperaturama .....	91
Slika 51: Usporedba vršnog opterećenja uzoraka.....	92
Slika 52: Usporedba deformacija uzoraka.....	93
Slika 53: a) Granulat gume, b) Izvagane komponente, c) Uzorci s gumom.....	94
Slika 54: Izrađeni uzorci s dodatkom gume .....	97
Slika 55: Graf stabilitet/tečenje za uzorak AMG 2-I.....	98
Slika 56: Graf stabilitet/tečenje za uzorak AMG 3-I.....	98
Slika 57: Uzorci s dodatkom gume nakon Marshallovog ispitivanja.....	99
Slika 58: Usporedba rezultata Marshallovog ispitivanja.....	100
Slika 59: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AMG 1-II.....	101
Slika 60: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AMG 1-III.....	101

Slika 61: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AMG 2-II.....	102
Slika 62: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AMG 2-III.....	102
Slika 63: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AMG 3-II.....	103
Slika 64: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AMG 3-III.....	103
Slika 65: Uzorci nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na temperaturi od 25 °C .....	104
Slika 66: Uzorci nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na temperaturi od 5 °C .....	104
Slika 67: Usporedba rezultata ITS-a na uzorcima s dodatkom gume.....	105
Slika 68: Usporedba vršnog opterećenja na različitim temperaturama .....	106
Slika 69: Usporedba deformacija na različitim temperaturama .....	106
Slika 70: Maksimalno opterećenje uzorka bez gume i s dodatkom gume.....	107
Slika 71: Rezultati ispitivanja vrijednosti ITS-a na različitim temperaturama bez gume i s dodatkom gume .....	108

## 1. UVOD

Potreba za kvalitetom prometnica s težištem izrade najoptimalnije asfaltne mješavine koja bi zadovoljila sve potrebe koje kolnik mora ispuniti propisima rezultirala je razvoju i kontroli kvalitete asfaltne mješavine. Sve većom proizvodnjom i uporabom različitih materijala u svrhu poboljšanja karakteristika voznih površina sastavljene su recepture različitih asfaltnih mješavina koje ovisno o sastavu, metodom ugradnje i slično, ispunjavaju tražene zahtjeve. Vrste asfaltnih mješavina se razlikuju prema sastavu i udjelu komponenata koje određena mješavina sadrži. Ovim radom analizirati će se SMA asfaltna mješavina koju karakterizira diskontinuirana granulometrijska krivulja koja tvori takozvani kameni skelet čija je uloga preuzimanje i prijenos velikih opterećenja. Zahvaljujući sastavu, SMA mješavina može preuzeti teško prometno opterećenje i veliku gustoću prometa. No s obzirom da sadrži veći udio krupnog zrnja, mješavina zahtjeva uporabu vlakana radi mogućnosti ocjeđivanja bitumena. Najčešće se koriste celulozna i polimerna vlakna, no pokušava se navedena vlakna zamijeniti jeftinijim opcijama kao što su razni otpadni materijali koji više ne služe prvobitnoj namijeni. Uporabom tih materijala doprinosi se manjim odlaganjem otpada u okoliš, dakle manje onečišćenja, a održava se kružna ekonomija koja je u suvremenom svijetu sve potrebija. Otpadna guma je moguća zamjena do sada korištenih vlakana s obzirom da ima dobra svojstva što je čini vrijednom sirovinom. Odložene otpadne gume procesom drobljenja i čišćenja se pretvaraju u granulat različitih veličina koji se potom može ponovo primijeniti, primjerice u asfaltu. Asfalt s dodatkom gume počeo se istraživati te primjenjivati početkom 20. stoljeća, a u Hrvatskoj je u svrhu istraživanja, 2006. godine ugrađeno ukupno 40680 m<sup>2</sup> asfalta s dodatkom gume na području Zagrebačke županije. Nakon jedanaestogodišnje eksploatacije, asfalt s dodatkom gume dokazao je bolja svojstva što se tiče otpornosti na klizanje, otpornosti na kolotraženje te razorno djelovanje vode. Dodavanje gume asfaltu može se izvršiti mokrim ili suhim postupkom. Mokrim postupkom se granulat gume miješa prvo s bitumenom, a u suhom postupku se guma dodaje agregatu pa zatim miješa s bitumenom. Cilj ovog rada jest izraditi uzorke SMA asfalta s različitim udjelima bitumena, zadovoljavajući sve propise i norme te iste uzorke usporediti s uzorcima iste mješavine s dodatkom granulata gume u udjelu od 1% ukupne mješavine. Guma će se za potrebe ispitivanja dodati u mješavinu

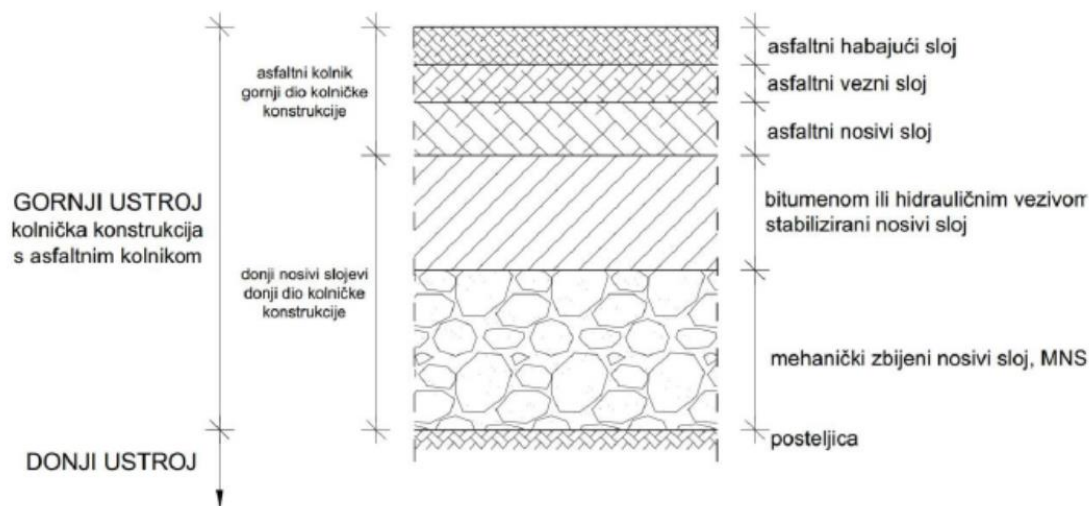
mokrim postupkom. Za izradu uzoraka potrebni su Tehnički propis za asfaltne kolnike te norme pomoću kojih se uzorci izrađuju, a potom ispituju fizikalna i mehanička svojstva. Za svaku vrstu asfalta postoji posebna norma koja propisuje vrijednosti koje određena asfaltna mješavina mora zadovoljavati. Ovim laboratorijskim istraživanjem ispitati će se svojstva uzoraka SMA mješavine s različitim udjelima klasičnog cestograđevnog bitumena s dodatkom celuloznih vlakana i polimerom modificiranog bitumena. Uzorcima koji zadovolje fizikalna svojstva koje propisuje norma, ispitati će se mehanička svojstva te usporediti rezultati s ostalim uzorcima. Uzorci s dodatkom gume izraditi će se od klasičnog cestograđevnog bitumena i celuloznih vlakana te udjelom gume od 1% ukupne mješavine. Također, ispitati će se ista mehanička svojstva kao i kod uzoraka bez gume te će se na kraju usporediti rezultati i utvrditi koja mješavina daje bolja svojstva.

## 2. ASFALTNE MJEŠAVINE

Asfaltna mješavina koja sačinjava asfaltni kolnik, sastavni je dio kolničke konstrukcije te pripada gornjem ustroju kolničke konstrukcije. U asfaltnom kolniku, asfaltna mješavina se razlikuje prema vrsti sloja odnosno može biti habajući, vezni ili nosivi sloj.

### 2.1. Kolnička konstrukcija

Kolnička konstrukcija predstavlja gornji ustroj (Slika 1.). Gornji ustroj čine asfaltni kolnik odnosno gornji dio kolničke konstrukcije te nosivi slojevi odnosno donji dio kolničke konstrukcije. Asfaltni kolnik mora biti mehanički otporan, stabilan, trajan i siguran te mora dokazati da ispunjava navedene uvijete tijekom eksploatacije. Asfaltni kolnik se sastoji od jednog ili više asfaltnih slojeva koji mogu biti habajući, vezni ili nosivi. Polaze se na donji nosivi sloj koji se sastoji od jednog ili više slojeva koji mogu biti od mehanički zbijenog ili bitumenom odnosno cementom stabiliziranog agregata. Navedeni slojevi gornjeg ustroja postavljaju se na donji ustroj kojeg mogu činiti nasip zajedno s posteljicom, usjek, galerije, mostovi, tuneli i dr. Završni sloj donjeg ustroja jest posteljica koja mora biti određene ravnosti i nagiba te mora zadovoljavati sve propisane uvijete.



Slika 1: Presijek kolničke konstrukcije [1]

## 2.2. Općenito o asfaltnim mješavinama

Asfaltna mješavina granuliranog materijala i bitumena kakva se koristi danas, upotrebljavala se početkom dvadesetog stoljeća kao završni sloj kolničke konstrukcije.

Asfalt kao mješavinu bitumena i agregata predstavio je 1900. godine Fredrick J. Warren kada je prijavio patent za „bitulitni“ kolnik. S vremenom kako se asfaltna mješavina razvijala tako je počela velika konkurencija između proizvođača asfalta što je prethodilo zahtjevanju strožih kriterija za asfaltna kolnike. Porastom posjedovanja broja automobila porasli su i zahtjevi za većim i boljim prometnim površinama pa se time pojavljuju i prva ispitivanja asfaltna mješavine. [2]

Asfaltna mješavine podijeljene su prema kriterijima:

- sastavu,
- temperaturi pripreme,
- načinu ugradnje,
- načinu pripreme,
- namjeni

Asfaltna mješavina ovisno o sastavu može imati veći udio šupljina koji spada u otvoreni tip asfaltna mješavine ili manji udio šupljina odnosno zatvoreni tip asfaltna mješavine.

Temperatura pripreme asfaltna mješavine ovisi o vrsti asfaltna mješavine te može biti pripremljena hladnim (do 25 °C), toplim (do 135 °C) ili vrućim (135-170 °C) postupkom. Najčešće se izrađuju asfaltna mješavine vrućim postupkom. Prema načinu ugradnje asfaltna mješavina se dijeli na lijevani, valjani i prefabricirani asfalt. Asfaltna mješavina prema kriteriju pripreme može biti spravljena u asfaltnoj bazi ili na terenu odnosno mjestu ugradnje. [3]

Asfaltne mješavine koriste se u habajućem, nosivom ili veznom sloju. Prema Tehničkom propisu za asfaltne kolnike [1], asfaltne mješavine se dijele na:

1. asfaltbeton (AC)
2. asfaltbeton za vrlo tanke slojeve (BBTM)
3. splitmastiksasfalt (SMA)
4. lijevani asfalt (MA)
5. porozni asfalt (PA)

Prema podacima Hrvatskog asfaltorskog društva (HAD) [4], tijekom 2021. godine u Hrvatskoj je proizvedeno i ugrađeno ukupno 2,71 milijuna tona asfaltnih mješavina za izgradnju i održavanje cesta. Asfaltbeton je najučestalija asfaltna mješavina koja se primjenjuje u RH u postotku od 94,0%. Osim asfaltbetona u malom postotku od 5,7% koristi se SMA mješavina te u iznosu od samo 0,3% BBTM asfaltna mješavina.

### **2.3. Sastav asfaltne mješavine**

Asfaltnu mješavinu čine agregat, punilo, bitumen te dodaci ovisno o potrebi. Svaka vrsta asfaltne mješavine ima normom propisanu donju i gornju granicu udjela komponenti pa se sastav mješavine određuje prema istoj.

### **2.4. Agregat**

Agregat se prema porijeklu i načinu proizvodnje razlikuje kao prirodni, industrijski ili reciklirani agregat. Također, ovisno o veličini zrna agregat se dijeli na krupni, sitni i miješani agregat te punilo odnosno kameno brašno.

Prirodni agregat potiče od prirodne stijene eruptiva, sedimenta ili metamorfa. Svaka stijena se razlikuje prema nastanku, odnosno eruptivne stijene su nastale procesom kristalizacije i hlađenjem lave, sedimentne stijene taloženjem netopivih ostataka nakon raspadanja postojećih stijena te metamorfne stijene mijenjanjem mineralne strukture zbog utjecaja topline i/ili tlaka.

Na Slici 2. je prikazan agregat eruptivnog porijekla razvrstan po različitim frakcijama koji će se koristiti za izradu laboratorijskog istraživanja.



Slika 2: Agregat eruptivnog porijekla

Ovisno o porijeklu agregata, odnosno njegovoj ishodišnoj stijeni, agregat ima različita svojstva. Pritom svojstva prirodnog agregata različita su ovisno tehnološkim čimbenicima pristupa proizvodnje agregata (drobljenje, miniranje, separiranje, otprašivanje i dr.)

Također, agregat se uvelike razlikuje prema mineralnom sastavu, strukturi, teksturi te postgenetskim procesima.

Industrijski dobiveni agregati nastaju drobljenjem nusprodukata industrijske proizvodnje, najčešće su to zgura, troska i šljaka, a reciklirani agregat nastaje drobljenjem materijala već korištenog u konstrukciji. [5]

Prilikom proizvodnje asfaltne mješavine bitna su obilježja agregata koji će se koristiti. Potrebno je odrediti veličinu i granulometrijski sastav, čistoću agregata, žilavost, trajnost, strukturu, oblik zrna te odnos prema bitumenu. [2]

Granulometrijski sastav utječe na ponašanje asfaltne mješavine prilikom ugradnje. Ukoliko je u mješavini upotrebljena velika količina prevelikih zrna pojaviti će se problemi poput segregacije.



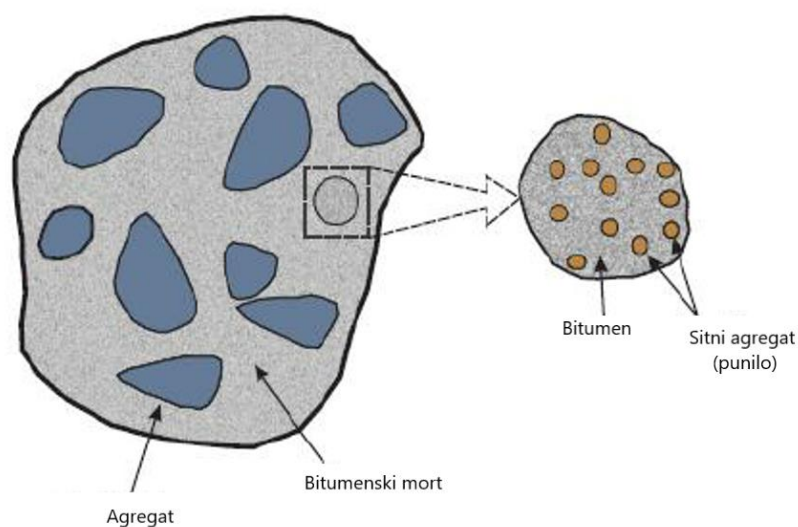
Oblik i veličina zrna utječe na čvrstoću i stabilnost mješavine. Prilikom odabira oblika zrna, preporučuju se zrna kockastog oblika jer plosnata zrna lakše pucaju te otežavaju zbijanje dok zaobljena se zrna lakše obavijaju bitumenom. Otpornost na habanje i čvrstoća bitna su svojstva agregata koja se ispituju u LA uređaju za ispitivanje kojim je dokazano da sedimentne stijene su sklonije habanju od eruptivnih. [6]

## 2.5. Punilo

Kameno brašno predstavlja mljevena kamena sitnež veličina zrna do najviše 0,25 mm, iznimno 0,71 mm, pri čemu veći dio granulometrijskog sastava kamenog brašna čini tzv. punilo promjera čestica manjeg od 0,063 mm. [7]

Punilo i bitumen zajedno čine tzv. bitumenski mort kojemu je funkcija povezivanje zrna agregata te ispuna šupljina u asfaltnoj mješavini. Povećanjem udjela punila, smanjuje se optimalni udio bitumena pa se time povećava gustoća i stabilnost. Također, punilo poboljšava vezu između agregata i bitumena. Prilikom doziranja punila potrebno je biti oprezan jer nepravilno doziranje bi moglo negativno utjecati na mješavinu. Preveliki udio punila, smanjuje udio šupljina te se povećava površina agregata zbog čega se smanjuje debljina bitumenskog filma oko zrna agregata. [6]

Na Slici 3. prikazan je odnos punila i bitumena u asfaltnoj mješavini.



Slika 3: Odnos punila i bitumena u asfaltnoj mješavini [8]

## 2.6. Bitumen

Bitumen je vezivni materijal u asfaltnoj mješavini koji se nalazi u prirodi ili se dobiva destiliranjem nafte. Svojstva bitumena kao veziva jesu čvrstoća, trajnost, prionjivost i vodonepropusnost. Ovisno o sastavu, bitumeni se dijele na rafinerijske bitumene, bitumenske emulzije i razrijeđene bitumene. Rafinerijski se bitumeni dijele na cestograđevne bitumene, tvrde cestograđevne bitumene te polimerom modificirane bitumene. Na Slici 4. je prikazan rafinerijski bitumen izložen sobnoj temperaturi.



Slika 4: Rafinerijski bitumen izložen sobnoj temperaturi

Ponašanje bitumena ovisi o sljedećim karakteristikama:

- **Reološka svojstva** – svojstva ovisna o temperaturi, opterećenju i vremenu trajanja opterećenja. Pri visokim temperaturama i dugotrajnom opterećenju, bitumen je viskozni fluid, pri niskim temperaturama i kratkotrajnom opterećenju bitumen je elastično tijelo dok je pri srednjoj temperaturi viskoelastični materijal odnosno viskozni fluid i elastično tijelo.
- **Elastičnost** – svojstvo modificiranog bitumena na otpornost pri zamoru i mogućnost da podnese velika naprezanja bez deformacije ili loma.

- **Kohezija** – svojstvo bitumena kao veziva da podnese posmična naprezanja koja su uzrokovana teškim prometnim opterećenjem.
- **Starenje bitumena** – bitumen s vremenom otvrdne te dolazi do oštećenja u asfaltu. Starenje bitumena podijeljeno je u tri faze; do prve faze starenja dolazi u transportu i skladištenju bitumena u cisterni na bazi pri kojoj temperatura iznosi 150-180 °C te dolazi do slabije oksidacije bitumena. Prilikom proizvodnje i ugradnje asfalta dolazi do druge faze starenja bitumena pri kojima temperatura iznosi 160-180 °C pri proizvodnji asfalta i 130-150 °C pri ugradnji. U drugoj fazi dolazi do intenzivne oksidacije i gubitka lako hlapljivih komponenata. U posljednjoj fazi starenja bitumena, bitumen je izložen eksploataciji kolnika te ovisi o okolišnim temperaturama gdje dolazi do dugotrajne oksidacije u kojoj je glavni razlog starenja bitumena udio šupljina u asfaltu, UV zračenje i sviježi zrak. [2]

Klasifikacija bitumena se dijeli prema penetraciji, viskoznosti i ponašanju. Pri projektiranju asfaltne mješavine potrebno je pripaziti na udio bitumena u mješavini. Veliki udio bitumena smanjuje udio šupljina te zbog toga bitumen izbija na površinu, a malim se udjelom bitumena povećava udio šupljina pa voda i vlaga imaju direktan pristup mješavini što na kraju rezultira oštećenjima kao što su pukotine, kolotrazi ili krunjenje. Također, mali udio bitumena će stvoriti tanki bitumenski film koji je osjetljiv na opterećenje te lako puca. Većim udjelom bitumena u asfaltnoj mješavini se smanjuje unutarnje trenje koje rezultira plastičnim tečenjem odnosno na kraju pojavom kolotruga i oštećenjem kolnika. [6]

## 2.7. Aditivi i modifikatori

Aditivi i modifikatori su supstance koje se dodaju mješavini kako bi se poboljšala njezina svojstva. Aditivi se dijele na punila, dopune, polimere, vlakna, oksidanse, antioksidanse, ugljikovodike te otpadne materijale.

Razlog dodavanja aditiva ili modifikatora u mješavinu ovisi o potrebama koje asfaltna mješavina mora zadovoljiti, primjerice:

- Produkcija kruće mješavine pri visokim temperaturama
- Produkcija mekše mješavine pri niskim temperaturama
- Povećanje otpornosti na zamor
- Poboljšanje otpornosti na ljuštenje
- Poboljšanje otpornosti na trošenje
- Poboljšanje ugradljivosti
- Produljenje vijeka trajanja

Na Slici 5. su prikazane različite vrste aditiva.

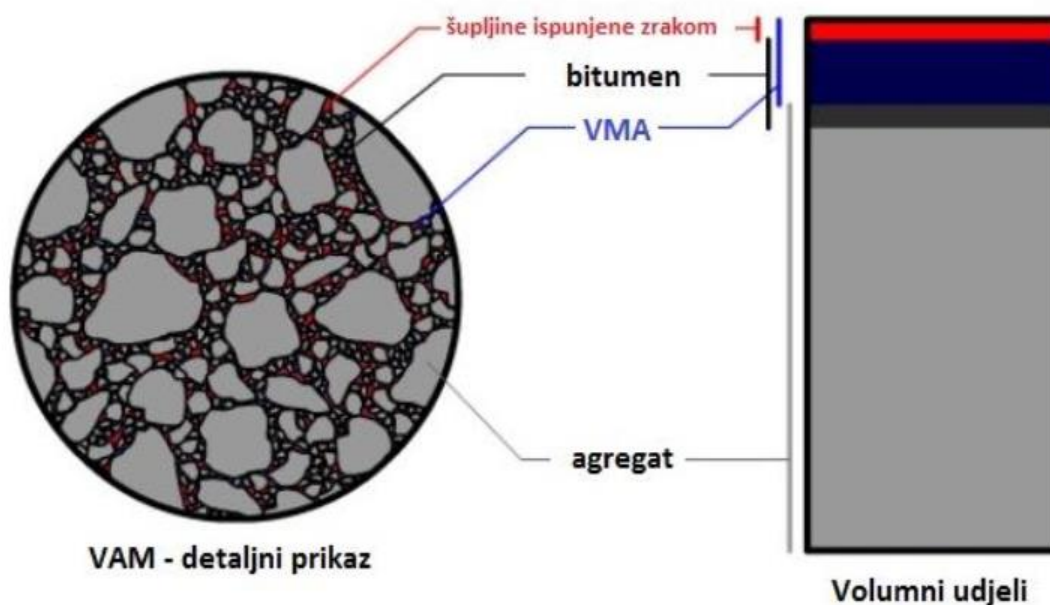


Slika 5: Vrste aditiva [2]

### 3. FIZIKALNO-MEHANIČKA SVOJSTVA ASFALTNE MJEŠAVINE

Da bi asfaltna mješavina ispunila propisane zahtjeve ispituju se fizikalna i mehanička svojstva. Pod fizikalna svojstva ulaze ispitivanje šupljina ispunjenih zrakom, šupljine u agregatu, šupljine ispunjene bitumenom, starenje bitumena i gustoća mješavine, a pod mehanička svojstva ispitivanje Marshallove stabilnosti i deformacije, Hveemove stabilnosti i kohezije, ispitivanje dinamičkog modula, modula elastičnosti, modula krutosti pri savijanju, tlačne čvrstoće, indirektno tlačne čvrstoće, puzanja i osjetljivost na vlagu. Ispitivanja se provode na terenu na postojećem kolniku ili u laboratoriju na pojedinim komponentama te uzorcima, fundamentalnim ili empirijskim metodama. [6]

Pri projektiranju sastava Marshallovom metodom analiziraju se gustoća i šupljine u mješavini te u uzorku. Kada se uzorci izrade potrebno je poznavati udio šupljina ispunjenih zrakom ( $V_m$ ) te udio šupljina ispunjenih bitumenom (VFB) kako bi znali da li uzorak zadovoljava propisane zahtjeve. Na Slici 6. su prikazani volumni udjeli sadržani u asfaltnom uzorku.



Slika 6: Volumni udjeli u asfaltnom uzorku [8]

- **Udio šupljina ispunjenih zrakom** - Udio šupljina ispunjenih zrakom u mješavini pri eksploataciji kolnika smanjuju se pod prometnim opterećenjem. Smanjenjem udjela šupljina ispunjenih zrakom (ispod 3%) nastupa kolotražnje, a udjelom većim od od 8% se povećava propusnost na zrak i vodu što rezultira oštećenjima na kolniku kao što su krunjenje i pukotine. U uzorcima izrađenim u laboratoriju koji se prema Marshallovoj metodi zbijaju 50-75 puta s obje strane prepostavlja se koliki će udio šupljina sadržavati mješavina nakon dvije do tri godine u eksploataciji. [6]
- **Udio šupljina ispunjenih bitumenom** - Udio šupljina ispunjenih zrakom i udio šupljina ispunjenih bitumenom obrnuto su proporcionalni, odnosno većim udjelom šupljina ispunjenih bitumenom smanjuje se udio šupljina ispunjenih zrakom. Povećanjem gustoće asfaltne mješavine raste i udio šupljina ispunjenih bitumenom. [6]
- **Udio šupljina u agregatu** - Na udio šupljina u agregatu utječu granulometrijski sastav te tekstura zrna. Agregati koji sadrže mali udio šupljina ne mogu apsorbirati bitumen te nastaje debeli film bitumena koji utječe na stabilnost mješavine. Mješavine koje sadrže takav agregat osjetljive su na male promjene udjela bitumena. [6]

### 3.1. Oštećenja u kolniku izazvana udjelom šupljina

Udio šupljina u asfaltnoj mješavini uvelike utječe na ponašanje kolnika tijekom eksploatacije. Da bi se projektirala asfaltna mješavina s dovoljnim udjelom šupljina, potrebno je odabrati odgovarajući granulometrijski sastav, udio bitumena te dovoljno zbijena mješavina prilikom ugradnje.

Osim udjela šupljina, na oštećenja mogu utjecati temperatura i ostali vanjski čimbenici. Oštećenja u kolniku po pravilu se javljaju pri kraju projektiranog razdoblja, no ukoliko neki od navedenih zahtjeva prilikom projektiranja mješavine nije ispunjen dolazi do oštećenja na početku eksploatacije koje je onda potrebno sanirati. [6]

Oštećenja koja mogu nastati u kolniku su sljedeća:

- **Pojava kolotruga** – razlog pojave kolotruga mogu biti preveliki udio veziva, zaobljeni agregat ili osjetljivost asfaltna mješavine na vodu. Na Slici 7. je prikazano oštećenje kolnika kolotraženjem.



Slika 7: Oštećenje kolnika tipa kolotraženje [2]

- **Uzdužne pukotine** – nastaju na spoju dvije prometne trake te nastaju pri prodiranju vode zbog velikog udjela šupljina. Na Slici 8. je prikazana uzdužna pukotina.



Slika 8: Oštećenje kolnika tipa uzdužna pukotina [10]

- **Blok pukotine** – nastaju zbog velikog udjela šupljina odnosno nedovoljnog zbijanja mješavine. Na Slici 9. je prikazan primjer blok pukotina.



Slika 9: Oštećenje kolnika tipa blok pukotine [11]



- **Krunjenje** – oštećenje nastalo krunjenjem kolnika rezultat je velikog udjela šupljina, nedovoljno zbijene mješavine koja dopušta prodor vode i zraka. Na Slici 10. je prikazano oštećenje na kolniku tipa krunjenja.



Slika 10: Oštećenje kolnika tipa krunjenje [9]

- **Udarne rupe** – nastaju zbog nedovoljnog zbijanja mješavine pa je omogućen pristup vodi koja oslabljuje vezu između agregata i bitumena pa nastaju udarne rupe i ljuštenje asfalta. Na Slici 11. je prikazano oštećenje kolnika tipa udarna rupa. [9]

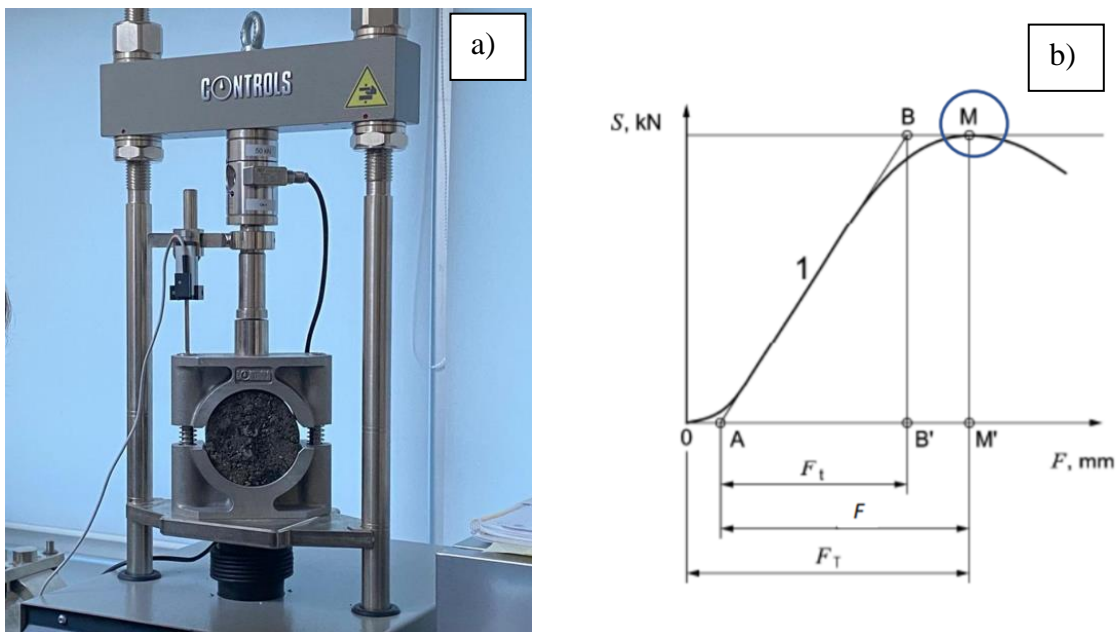


Slika 11: Oštećenje kolnika tipa udarna rupa [12]

### 3.2. Ispitivanje mehaničkih svojstva - Marshallova metoda

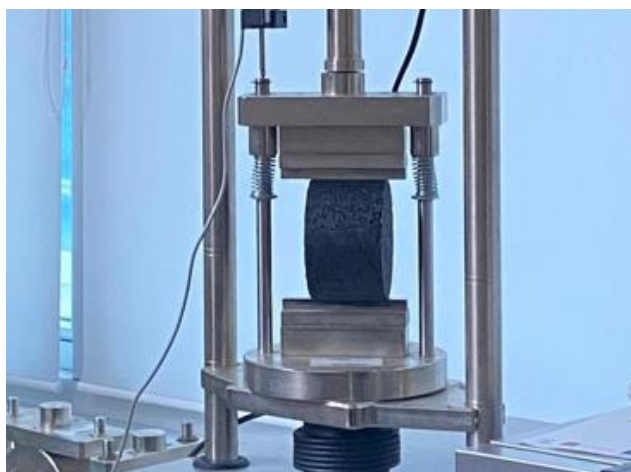
Laboratorijsko istraživanje koje će se sprovesti ovim radom uključuje ispitivanje mehaničkih svojstva prema Marshallovoj metodi u koju spadaju Marshallova stabilnost i deformacija.

- **Marshallovo ispitivanje** - Marshallovo ispitivanje provodi se na uzorcima izrađenim udarnim zbijanjem prema normi HRN EN 12697-30 *Priprema uzoraka udarnim zbijanjem* [13]. Uzorci se prije ispitivanja postavljaju u vodenu kupelj na 60°C, 40 - 60 min. Prije ispitivanja potrebno je zagrijati i čeljust Marshallove preše, na 60°C najmanje 30 minuta. Takav uzorak se potom postavlja u zagrijanu čeljust Marshallove preše (Slika 12.) koja preko softvera na kompjuteru šalje podatke koje zabilježi. Uzorak preuzima maksimalno opterećenje kako bi se ostvario konstantan prirast deformacije, a ispitivanje je završeno nakon što se postigne maksimalna vrijednost sile. Rezultati ispitivanja su Marshallov stabilitet, tečenje te Marshallov koeficijent. Također, softver izradi i graf stabilnost/tečenje, prikazan na Slici 12.



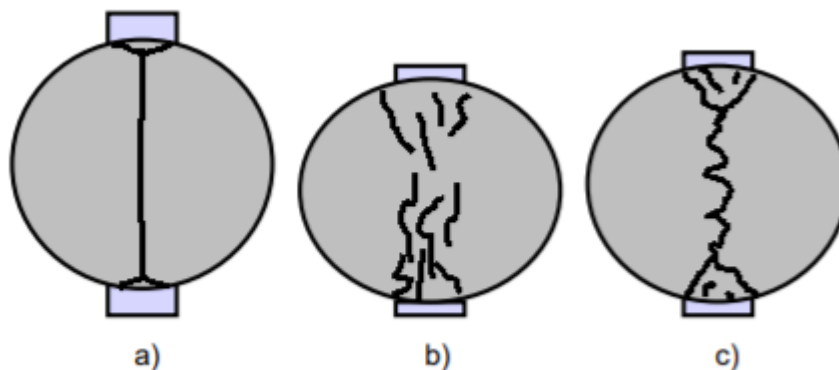
Slika 12: a) Marshallova preša, b) graf stabilnost/tečenje

- **Određivanje vlačne čvrstoće neizravnom vlačnom metodom** - Ispitivanje se provodi prema normi na uzorku temperature u rasponu 5-25 °C. Uzorak je potrebno postaviti u čeljust uređaja koji također treba biti na temperaturi između 15-25 °C. Uzorak se postavlja tako da uređaj može nanijeti silu dijametralno (Slika 13.). Nakon što se unesu potrebni ulazni podaci ispitivanje započinje te se nanosi kontinuirani prirast deformacije od 50 mm/min. Ispitivanje je završeno nakon što se postigne maksimalna vrijednost sile, odnosno slom uzorka.



Slika 13: Ispitivanje uzorka na indirektnu vlačnu čvrstoću

Nakon ispitivanja potrebno je odrediti vrstu sloma uzorka prema normi EN 12697-23, pomoću Slike 14:



Slika 14: : Vrste loma uzorka pri ispitivanju indirektno vlačne čvrstoće

- a) "jasan vlačni prekid" – uzorak jasno izlomljen duž dijametralne linije, osim možda malih trokutastih dijelova u blizini čeljusti.
- b) "deformacija" – Uzorci bez jasno vidljive vlačne linije loma.
- c) "kombinacija" - Uzorci s vlačnom linijom loma i većim deformiranim područjem blizu čeljusti.

#### 4. BITUMENSKE MJEŠAVINE OD SPLITMASTIKSA (SMA)

Splitmastiks asfalt se upotrebljava za izvedbu habajućih slojeva kolničkih konstrukcija autocesta i ostalih cesta namijenjenih teškom prometnom opterećenju i velikoj gustoći prometa, te za izvedbu zaštitnih slojeva hidroizolacije kolničkih ploča cestovnih objekata. U bitumenske mješavine od SMA obvezno se dodaju dodaci za sprečavanje otjecanja bitumenskog veziva sa zrna agregata, a proizvođač bitumenske mješavine obvezan je navesti vrstu i količinu upotrebljenog dodatka. [1]

Površinska tekstura od SMA omogućuje udobnu vožnju, daje dobar otpor klizanju te osigurava relativno nisku prometnu buku. Navedenim karakteristikama asfalta od SMA doprinosi mješavina sačinjena od krupnog agregata koji tvori takozvani agregatni skelet, dok mješavina sitnijih čestica, punila i bitumena ispunjavaju praznine između krupnog agregata i čine mješavinu vrlo izdržljivom. SMA mješavina sadrži veliki udio veziva pa je potrebno spriječiti ocijeđivanje prilikom transporta i ugradnje. U tu svrhu se najčešće koristi modificirani bitumen i razni dodaci. Veliki udio bitumena u SMA mješavini doprinosi otpornšću na zamor i refleksno pucanje.

Zbog velikog udjela veziva, punila i po potrebi dodataka asfaltna mješavina od SMA skuplja je od ostalih mješavina, no isplativija je u pogledu duljeg životnog vijeka te dobrih karakteristika. [14]

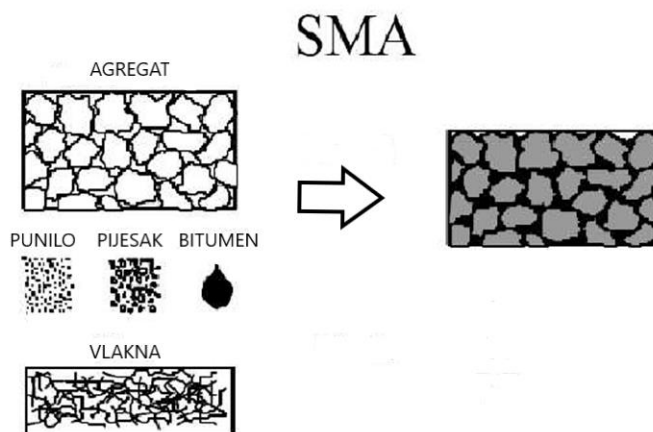
Na Slici 15. je prikazana površinska tekstura ugrađenog splitmastiks asfalta.



Slika 15: Površinska tekstura ugrađenog SMA asfalta [15]

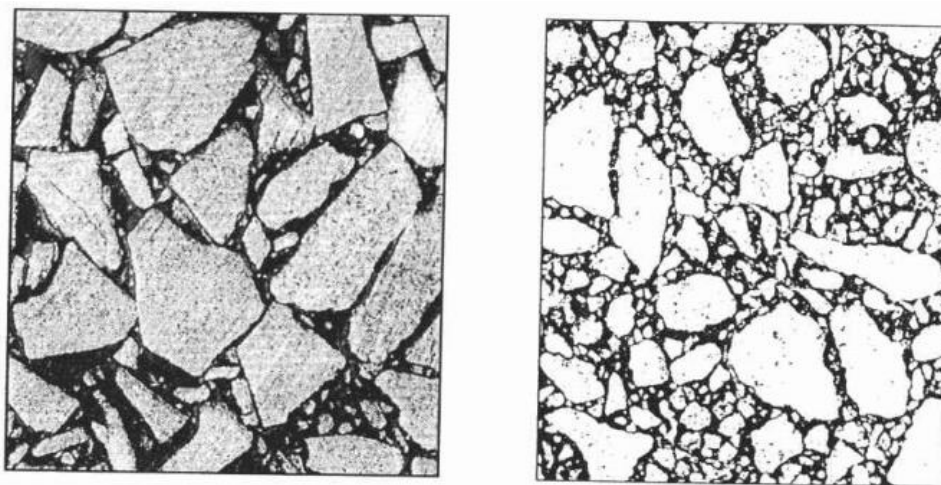
#### 4.1. Osnovne komponente SMA mješavine

Splitmastiks asfaltna mješavina sastoji se od agregata, punila, bitumena, vlakna i aditiva (Slika 16). Obzirom da je splitmastiks asfalt načinjen od diskontinuiranog granulometrijskog sastava koriste se vlakna radi sprječavanja ocjeđivanja bitumenskog veziva sa zrna agregata.



Slika 16: Sastav SMA asfaltna mješavine [16]

Usporedba SMA mješavine čiji je sastav diskontinuirana granulometrija odnosno veliki udio krupnijeg agregata koji čini tzv. kameni skelet i mješavine s gustom granulometrijom prikazana je na Slici 17.



Slika 17: Diskontinuirana gradacija (lijevo) i gusta gradacija (desno) [14]

- **Krupni agregat** - Za izvedbu SMA mješavine potrebno je koristiti kvalitetni krupni agregat dobrih svojstava kako bi se osigurala stabilnost mješavine. Treba pripaziti na odabir oblika zrna jer duguljaste i ljuskave čestice utječu na ponašanje kamenog skeleta. Također, ovisno o kategoriji prometa koju će prometnica prihvatiti odabiru se zrna s odgovarajućom otpornošću na habanje. [14]
  
- **Sitni agregat** - Pri odabiru sitnog agregata potrebno je osigurati ravnotežu između stabilnosti i ugradljivosti. Na prometnicama koje moraju osigurati veliku otpornost na kolotrage preporuča se upotreba samo sitnog agregata. [14]
  
- **Punilo** - U izradi SMA mješavine može se koristiti isto punilo kao kod ostalih asfaltnih mješavina te se preporuča što finije punilo koje sadrži više od 45% šupljina u suhom materijalu jer će takvo punilo imati veći učinak na očvršćenje veziva što rezultira povećanjem otpornosti na trajne deformacije. [14]
  
- **Vlakna** - Uporaba vlakana u mješavini osigurava otpornost na ocjeđivanje veziva kojemu je SMA mješavina sklona zbog velikog udjela krupnijeg agregata. Vrste vlakana koja se mogu upotrijebiti u mješavini jesu celulozna vlakna, kamena vuna, staklena vlakna i slično. Količina vlakna kreće se između 0,3%-0,5% ukupne mase mješavine, ovisno o gustoći i površini čestica vlakana. Manji postotak zahtjevaju primjerice celulozna vlakna, a veći kamena vuna. [14]
  
- **Bitumen** - SMA mješavina nije pretjerano osjetljiva na varijacije različitih vrsta bitumena. Upotreba polimerom modificiranog bitumena osigurava veću otpornost na deformacije te doprinosi smanjenju upotrebe vlakana. [14]

## 4.2. Proizvodnja i ugradnja SMA asfaltne mješavine

Razni parametri utječu na kvalitetu proizvodnje i ugradnje SMA asfalta. Kako bi mješavina ispunila uvijete koje prometnica zahtjeva potrebno je pripaziti na ograničenja u proizvodnji.

- **Temperatura proizvodnje** - Temperatura proizvodnje ovisi o uvjetima ugradnje i korištenom materijalu. Raspon temperature varira između 150 °C-165 °C. Velike temperature, veće od 200 °C, mogu prouzročiti ocjeđivanje veziva te oštetiti celulozna vlakna. [14]
- **Miješanje** - Vlakna u mješavini zahtijevaju duže miješanje zbog toga što se moraju ravnomjerno pomiješati pa se zato bubanj u kojem se proizvodi mješavina SMA treba pratiti vizualno. Zbog toga može se produljiti vrijeme miješanja suhe i mokre mješavine. [14]
- **Skladištenje** - Mješavina SMA se ne smije skladištiti dugo na visokim temperaturama jer to dovodi do ocjeđivanja veziva. Maksimalno vrijeme skladištenja je 2-3 sata. [14]
- **Transport** - Vrijeme transporta treba biti što je kraće moguće te nije dozvoljeno podizanje temperature kako bi se osiguralo dulje vrijeme transporta. Povišena temperatura i vibracije uzrokovane transportom rezultiraju ocjeđivanjem veziva. Visoki udio bitumena u mješavini prijanja na karoseriju kamiona pa je potrebno osigurati čistoću transportnog vozila. [14]
- **Vremensko ograničenje** - Ugradnja mješavine ovisi o vjetru, temperaturi kolnika, debljini ugradnje, opremi, načinom ugradnje i zbijanju. Treba izbjegavati ugradnju SMA na hladnom ili lošem vremenu. SMA se ne smije ugrađivati na kolnik temperature ispod 10 °C ili ispod 15 °C ako se koristi SMA s dodatkom polimerom modificiranog bitumena. [14]



- **Priprema podloge** - Priprema podloge ista je kao kod ostalih asfaltnih mješavina. Ukoliko na mjestu ugradnje postoje udubljenja ili oštećenja potrebno ih je zapuniti prije ugradnje SMA asfalta. Prije ugradnje potrebno je nanijeti tanki sloj bitumenske emulzije koja se koristi pri ugradnji asfalta kako bi se poboljšalo vezivanje. [14]
- **Razastiranje** - Potrebno je osigurati stalnu brzinu napredovanja ugradnje. SMA asfalt je u odnosu na gusto graduirane mješavine ljepljiviji i teže se obrađuje pa se preporuča izbjegavanje ručne ugradnje. Debljina SMA pri ugradnji i nakon zbijanja je manja od gusto graduirane mješavine pa je potrebno na to obratiti pozornost pri određivanju debljine kolnika. [14]
- **Zbijanje** - Kako bi se pravilno ugradio SMA asfalt potrebno je na odgovarajući način zbiti asfalt nakon ugradnje. Poželjno je zbijati teškim, ne vibrirajućim kotačem valjka zbog probijanja veziva na površinu te lomljenja krupnog agregata. [14]
- **Otvaranje za prometovanje** - SMA asfalt se ne smije otvoriti za promet dokle temperatura površine nije ispod 40 °C kako se ne bi dogodilo odvajanje veziva na površinu. Otpornost na klizanje na početku može biti niska dokle se ne istroši bitumenski film koji se nalazi na površini kolnika. U nekim zemljama se površina izbrusi krupnim pijeskom ili sitnijim agregatom ukoliko je otpornost na klizanje od primarne važnosti, a ukoliko nije mogu se postaviti ograničenja brzine na kratko razdoblje dokle se bitumenski film ne istroši. [14]

### 4.3. Karakteristike SMA mješavine

Zahtjevi koje buduća prometnica morati ispunjavati ovise o funkcionalnim karakteristikama SMA mješavine [14]:

- Otpornost na klizanje
  - Ravnost površine
  - Razina buke
  - Trajnost
  - Vidljivost
  - Mogućnost reciklaže
- 
- **Otpornost na klizanje** - Otpornost na klizanje ovisi o odabiru agregata te dubini površinske teksture. Preporuka je da se uvijek koristi krupniji agregat koji ispunjava uvijete PSV (*Polished Stone Value*) ili PAFV (*Polished Aggregate Friction Value*) ispitivanja koje zahtjeva mjesto ugradnje. Agregati s većim PSV ili PAFV otporniji su na poliranje uzrokovano opterećenjem te osiguravaju veću otpornost na klizanje. Prilikom ugradnje SMA asfalta na površini izbija deblji vezivni film koji utječe na otpornost na klizanje u ranijem životnom vijeku prometnice. Upotreba modificiranog bitumena produljuje vrijeme potrebno da se debeli vezivni film istroši te se često moraju primijeniti mjere kontrole kao što je ograničenje brzine. [14]
  - **Ravnost površine** - Ravnost površine predstavlja sposobnost asfaltne mješavine da zadrži oblik nakon ugradnje. SMA mješavina ima veliku otpornost na trajne deformacije zbog skeletne konstrukcije koju čini krupni agregat. Upotreba modificiranog bitumena poboljšava otpornost na deformaciju. [14]
  - **Razina buke** - SMA asfaltna mješavina zbog svoje teksture koju čini krupni agregat, ima nižu razinu buke od mješavina s gusto građuiranim asfaltom. Što se tiče razine buke, porozni asfalt ipak postiže nižu razinu buke od SMA asfalta. [14]

- **Trajnost** - SMA mješavina osigurava otpornost na deformaciju kolnika te istraživanjima se pokazala kao izdržljivi materijal otporan na habanje. Razlog tome je spora stopa trošenja zahvaljujući bitumenskom mortu koji sadrži veliki udio bitumena čije je svojstvo niska propusnost. [14]
- **Vidljivost** - Površinska tekstura kolnika od SMA mješavine osigurava zadržavanje vode unutar površinskih praznina umjesto na vrhu površine čime se smanjuje odsjaj od mokrih površina noću te poboljšava se vidljivost horizontalne signalizacije. [14]
- **Mogućnost reciklaže** - SMA asfalt se lako reciklira, no ne preporučuje se osim ako se recikliranom asfaltu raščlane komponente krupnijeg i sitnog agregata koji mora biti sačuvan odnosno imati ista svojstva. [14]

#### 4.4. Zahtjevi SMA mješavine iz Tehničkog propisa za asfaltne kolnike

Tehničkim propisom za asfaltne kolnike propisuju se temeljni zahtjevi koje moraju zadovoljiti asfaltni kolnici ovisno o vrsti i namjeni. Način označavanja splitmastiks asfalta prikazan je Tablicom 1.

Tablica 1: Način označavanja SMA asfaltne mješavine [1]

SMA	D	bitumen	agregat	tip mješavine	NT
-----	---	---------	---------	---------------	----

pri čemu je:

1. **SMA** – oznaka za bitumensku mješavinu (Stone Mastic Asphalt),
2. **D** – najveće nazivno zrno agregata u bitumenskoj mješavini (mm),
3. **bitumen** – oznaka vrste i tipa upotrijebljenog bitumena,
4. **agregat** – primjenska oznaka smjese upotrijebljenog agregata,
5. **tip mješavine** – primjenska oznaka tipa bitumenske mješavine s obzirom na fizikalno mehanička svojstva
6. **NT** - niskotemperaturna bitumenska mješavina. [1]

Granulometrijski sastav bitumenske mješavine splitmastiks asfalta definiran je normom HRN EN 13108-5 *Specifikacije materijala – 5.dio: SMA* [17]. (Tablica 2.) Granulometrijski se sastav mješavine razlikuje ovisno o najvećem nazivnom zrnu agregata u bitumenskoj mješavini D (mm).

Tablica 2: Granulometrijski sastav SMA mješavine [18]

Točka norme HRN EN 13108-5	Otvori okaca sita, mm	Bitumenske mješavine od SMA			
		SMA 4	SMA 8	SMA 11	SMA 16
		Prolaz kroz sito, %(m/m)			
Granulometrijski sastav, točka 5.2.2 <sup>(a)</sup>	22,4				100
	16			100	90-100
	11,2		100	90 do 100	35-60
	8	100	90 do 100	40 do 60	27 do 43
	4	90 do 100	24 do 45	25 do 38	20 do 33
	2	30 do 40	16 do 31	17 do 30	16 do 28
	1	-	-	-	-
	0,25	11 do 22	9 do 20	9 do 20	9 do 17
0,063	8,0 do 12,0	7,0 do 12,0	7,0 do 12,0	7,0 do 12,0	
Minimalni udio bitumena, točka 5.2.3 <sup>(b)</sup>	$B_{min}^{(c)}$	$B_{min5,0}$	$B_{min5,0}$	$B_{min5,0}$	$B_{min5,0}$

<sup>(a)</sup> ispituje se prema normi HRN EN 12697-2  
<sup>(b)</sup> topivi udio bitumena ispituje se prema normi HRN EN 12697-1 ili HRN EN 12697-39  
<sup>(c)</sup> pri određivanju minimalnog udjela bitumena aktualne bitumenske mješavine ( $B_{akt}$ ),  $B_{min}$  se korigira faktorom  $\alpha$  ( $\alpha=2,65/\rho_a$ ) ( $\rho_a$  je prividna gustoća smjese agregata u aktualnoj bitumenskoj mješavini, određena prema normi HRN EN 1097-6 i izražena u Mg/m<sup>3</sup>)

Ukoliko se izvode habajući asfaltni slojevi bitumenske mješavine od splitmastiks asfalta upotrebljava se SMA s oznakom M1 i M2.

Navedene bitumenske mješavine moraju ispuniti tehnička svojstva dana normom HRN EN 13108-5 *Specifikacije materijala – 5.dio: SMA* [17]. (Tablica 3.)

Tablica 3: Tehnička svojstva SMA za habajuće asfaltno slojeve [1]

SMA za habajuće asfaltno slojeve HRN EN 13108-5		Tipovi	
		M1	M2
		SMA 8; SMA 11; SMA 16	SMA 4; SMA 8; SMA 11; SMA 16
Sastavni materijali	Primjenska oznaka agregata	AG1	AG1 i AG2
	Cestogradevni bitumen	-	35/50
	Polimerom modificirani bitumen	25/55-55; 25/55-65; 45/80-65; 45/80-55	
	Reciklažni asfalt	nije dopušten	
Fizikalno-mehanička svojstva bitumenske mješavine			
Točka 5.4 <sup>(a)</sup>	Udio šupljina, V, % (V/V)	$V_{min3}$	$V_{min3}$
		$V_{max6}$	$V_{max6}$
Točka 5.5 <sup>(a)</sup>	Ispuna šupljina bitumenom, VFB, (%)	$VFB_{minNR}$	$VFB_{minNR}$
		$VFB_{maxNR}$	$VFB_{maxNR}$
Točka 5.6 <sup>(b)</sup>	Najveći razred ocjeđivanja veziva, % (m/m)	$D_{0,3}$	$D_{0,3}$
Točka 5.7 <sup>(c)</sup>	Najmanji omjer indirektno vlačne čvrstoće, ITSR, (%)	ITSR <sub>80</sub>	ITSR <sub>80</sub>
Točka 5.9 <sup>(d)</sup> Tablica 13	Najveća brzina deformacije $WTS_{AIR}$ (mm/10 <sup>3</sup> ciklusa)	$WTS_{AIR 0,05}$	$WTS_{AIR 0,07}$
Točka 5.9 <sup>(d)</sup> Tablica 14	Najveća relativna dubina kolotruga, $PRD_{AIR}$ , (%)	$PRD_{AIR 5,0}$	$PRD_{AIR 5,0}$

<sup>(a)</sup> uzorci se spravljuju Marshall zbijanjem, 2x50 udaraca prema *Dodatku C* norme HRN EN 13108-20, točka C.2, tablica C.1, točka C.1.2, a volumetrijska svojstva se određuju sukladno *Dodatku D* norme HRN EN 13108-20, točka D.2  
<sup>(b)</sup> ispitivanje se provodi sukladno normi HRN EN 12697-18  
<sup>(c)</sup> uzorci se spravljuju Marshall zbijanjem, 2x35 udaraca, a ispituju sukladno *Dodatku D* norme HRN EN 13108-20, točka D.3  
<sup>(d)</sup> uzorci se spravljuju valjkastim zbijanjem prema *Dodatku C* norme HRN EN 13108-20, točka C.4, tablica C.1, točka C.1.20 ( $P_{98} - P_{100}$ ), a ispituju sukladno *Dodatku D* norme HRN EN 13108-20, točka D.6, tablica D.1, točka D.1.6, ili se uzimaju iz izvedenog asfaltnog sloja prema *Dodatku C* norme HRN EN 13108-20, točka C.4, tablica C.1, točka C.1.21 ( $P_{98} - P_{100}$ ), a ispituju sukladno *Dodatku D* norme HRN EN 13108-20, točka D.6, tablica D.1, točka D.1.6

Ovisno o tipu i vrsti bitumena, najviše i najniže dopuštene temperature bitumenskih mješavina od splitmastiks asfalta izmjerene su prema normi HRN EN 12697-13 *Mjerenje temperature* [19]. Propisana temperatura bitumenskih mješavina od SMA prikazana je Tablicom 4.

Tablica 4: Propisana temperatura bitumenskih mješavina od SMA [1]

Vrste i tipovi upotrijebljenog bitumena		Temperatura bitumenske mješavine, °C		
		Najniža dopuštena temperatura <sup>(a)</sup>	Najviša dopuštena temperatura <sup>(b)</sup>	
Cestograđevni bitumen	35/50	obvezno navodi proizvođač bitumenske mješavine <sup>(c)</sup>	190	
	50/70		180	
Polimerom modificirani bitumen	25/55-55		obvezno navodi proizvođač bitumenske mješavine <sup>(c)</sup>	obvezno navodi proizvođač bitumenske mješavine <sup>(c)</sup>
	25/55-65			
	45/80-65			
	45/80-55			
<sup>(a)</sup> pri isporuci <sup>(b)</sup> bilo gdje u proizvodnom pogonu <sup>(c)</sup> HRN EN 13108-5:2006/AC:2008, točka 5.13				

Ovisno o tipu splitmastiks asfaltne mješavine (M1, M2 ili M3) bitumeni koji se koriste mogu biti:

- Cestograđevni bitumen

Cestograđevni bitumen je produkt tehnološkog postupka puhanja zrakom ostatka vakuumske destilacije nafte. Proizvodi se u rafinerijama ili u posebnim industrijskim pogonima. [1]

Tipovi i svojstva cestograđevnog bitumena specificirani su prema usklađenoj normi HRN EN 12591:2009 *Specifikacije za cestograđevne bitumene* [20] te prikazani Tablicom 5.

Tablica 5: Tipovi i svojstva cestograđevnog bitumena [1]

HRN EN 12591						
Točka norme	Svojstvo	Ispitna norma	Tip			
			20/30	35/50	50/70	70/100
5.2.2	Penetracija na 25°C, 0,1 mm	HRN EN 1426	20 – 30	35 – 50	50 – 70	70 – 100
5.2.3	Točka razmekšanja, °C	HRN EN 1427	55 – 63	50 – 58	46 – 54	43 – 51
5.2.4	Točka loma po Fraassu, °C	HRN EN 12593	-	≤ -5	≤ -8	≤ -10
5.2.5	Indeks penetracije	HRN EN 12591 Dodatak A	- 1,5 do +0,7			
	Dinamička viskoznost na 60 °C, Pas	HRN EN 12596	NR			
	Kinematička viskoznost na 135 °C, mm <sup>2</sup> /s	HRN EN 12595	≥ 530	≥ 370	≥ 295	≥ 230
5.2.7	Gustoća, kg/m <sup>3</sup>	HRN EN 15326	Navesti			
	Točka paljenja, °C	HRN EN ISO 2592	≥ 240	≥ 240	≥ 230	≥ 230
	Topljivost, % (m/m)	HRN EN 12592	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0	≥ 99,0
5.2.6	Promjena mase, % (m/m)	HRN EN 12607-1	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8
	Zadržana penetracija, %	HRN EN 1426	≥ 55	≥ 53	≥ 50	≥ 46
	Porast točke razmekšanja, °C	HRN EN 1427	≤ 10	≤ 11	≤ 11	≤ 11

- Polimerom modificirani bitumen

Polimerom modificirani bitumen je homogena smjesa cestograđevnog bitumena i polimera (elastomera i/ili plastomera), a proizvodi se u rafinerijama ili u posebnim industrijskim pogonima, samostalnim ili pridruženim asfaltnim postrojenjima u asfaltnim bazama. [1]

Tipovi i svojstva polimerom modificiranog bitumena specificirani su prema usklađenoj normi HRN EN 14023:2010 *Okvirna specifikacija za polimerom modificirane bitumene* [21] te prikazani Tablicom 6.

Tablica 6: Tipovi i svojstva polimerom modificiranog bitumena [1]

HRN EN 14023																
Točka norme	Svojstvo	Ispitna norma	Tip													
			10/40-65		25/55-55		25/55-65		45/80-55		45/80-65		40/100-65		90/150-45	
			Raz.	Zahtjev	Raz.	Zahtjev	Raz.	Zahtjev	Raz.	Zahtjev	Raz.	Zahtjev	Raz.	Zahtjev	Raz.	Zahtjev
5.2.2	Penetracija na 25°C, 0,1 mm	HRN EN 1426	2	10 – 40	3	25 – 55		25 – 55	4	45 – 80	4	45 – 80	5	40 – 100	8	90 – 150
5.2.3	Točka razmekšanja, °C	HRN EN 1427	5	≥ 65	7	≥ 55		≥ 65	7	≥ 55	5	≥ 65	5	≥ 65	9	≥ 45
5.2.5	Kohezija, J/cm <sup>2</sup>	10°C	6	≥ 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		5°C	-	-	2	≥ 3	2	≥ 3	2	≥ 3	2	≥ 3	2	≥ 3	2	≥ 3
	Kohezija, J/cm <sup>2</sup> <sup>(a)</sup>	HRN EN 13588	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	≥ 0,7
5.2.8.2	Točka paljenja, °C	HRN EN ISO 2592	2	≥ 250	2	≥ 250	2	≥ 250	2	≥ 250	2	≥ 250	2	≥ 250	2	≥ 250
5.2.8.3	Gustoća na 25 °C, kg/m <sup>3</sup>	HRN EN 15326	-	navesti	-	navesti	-	navesti	-	navesti	-	navesti	-	navesti	-	navesti
Tablica 2	Točka loma po Fraassu, °C	HRN EN 12593	3	≤ -5	5	≤ -10	6	≤ -12	6	≤ -12	7	≤ -15	7	≤ -15	8	≤ -18
	Elastični povrat na 25 °C, % <sup>(b)</sup>	HRN EN 13398	5	≥ 50	5	≥ 50	5	≥ 50	4	≥ 60	2	≥ 80	2	≥ 80	2	≥ 80
	Stabilnost pri skladištenju Δ PK, °C	HRN EN 13399 i HRN EN 1427	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5	2	≤ 5
	Δ Pen, 0,1 mm	HRN EN 13399 i HRN EN 1426	0	NR	0	NR	0	NR	a.	NR	0	NR	0	NR	0	NR
<b>Otpornost na otvrdnjavanje (HRN EN 12607-1)</b>																
5.2.6	Promjena mase, % (m/m)	HRN EN 12607-1	3	≤ 0,5	3	≤ 0,5	3	≤ 0,5	3	≤ 0,5	3	≤ 0,5	3	≤ 0,5	3	≤ 0,5
	Zadržana penetracija, %	HRN EN 1426	6	≥ 55	6	≥ 55	6	≥ 55	6	≥ 55	6	≥ 55	6	≥ 55	6	≥ 55
	Porast točke razmekšanja, °C	HRN EN 1427	2	≤ 8	2	≤ 8	2	≤ 8	2	≤ 8	2	≤ 8	2	≤ 8	2	≤ 8
Tablica 2	Pad točke razmekšanja, °C	HRN EN 1427	2	≤ 2	2	≤ 2	2	≤ 2	2	≤ 2	2	≤ 2	2	≤ 2	2	≤ 2
	Elastični povrat na 25 °C, % <sup>(b)</sup>	HRN EN 13398	4	≥ 50	4	≥ 50	4	≥ 50	4	≥ 50	2	≥ 70	2	≥ 70	2	≥ 70
<sup>(a)</sup> odnosi se isključivo na polimerom modificirani bitumen namijenjen za površinske obrade																
<sup>(b)</sup> odnosi se isključivo na bitumen modificiran elastomerom																



## 5. UTJECAJ GUME NA SVOJSTVA ASFALTNE MJEŠAVINE

Sirovina za proizvodnju gume prirodni je ili sintetski kaučuk, koji zbog svojih nepovezanih lančastih makromolekula zagrijavanjem postaje mekan i ljepljiv, a na nižim temperaturama tvrd i lomljiv. Međutim, dodatkom prikladnih tvari, ponajprije sumpora, makromolekularni se lanci međusobno povezuju u procesu vulkanizacije. Tako se dobiva guma, materijal velike elastičnosti, savitljivosti i žilavosti te dobre vlačne čvrstoće i otpornosti prema abraziji i bubrenju, koji ta svojstva zadržava i na niskim temperaturama, a zagrijavanjem ne omekša. [22]

Nakon što su automobilske gume iskorištene i više ne služe svrsi, potrebno ih je odložiti na odlagalište otpada gdje će se zbrinuti na način pripisan pravilnikom o gospodarenju otpadnim gumama (*Hrvatski pravilnik o gospodarenju otpadnim gumama: NN 113/2016*).

Na Slici 18. prikazano je jedno od odlagališta otpadnih guma u Kuvajtu na čijem se primjeru može uočiti koliko otpadne gume zauzimaju prostora i onečišćuju okoliš ukoliko stoje neiskorištene. Važno je napomenuti da reciklaža otpadnih guma spada u djelatnosti održivog razvoja, a otpadna guma se može u potpunosti reciklirati i zbog svog sastava spada u vrijedne sirovine.



Slika 18: Odlagalište otpadnih guma u Kuvajtu [23]

Osim odlaganja otpadnih guma na odlagalište otpada, gume se mogu ponovo upotrijebiti na različite načine, primjerice dodavanjem granulata gume u bitumenske mješavine što će se ovim radom i analizirati. Početak dodavanja gumenog granulata bitumenskoj mješavini zabilježen je početkom 20. stoljeća kada su provedeni pokusi u svrhu poboljšanja svojstva bitumenske mješavine, a 1960. godine je inženjer Charles McDonald razvio „mokri“ postupak dodavanja granulata gume bitumenu za izvedbu površinskih obrada pri održavanju asfaltnog kolnika.

Postupak proizvodnje gumenog granulata iz otpadnih guma prikazan je na Slici 19.



Slika 19: Postupak proizvodnje gumenog granulata iz otpadnih guma [24]

Recikliranje općenito ima prednosti u aspektima inženjerstva, ekonomije i okoliša. Pri izboru materijala za izgradnju prvi izbor bi trebali biti reciklirani materijali koji se ponovo mogu upotrijebiti i na taj način održati kružnu ekonomiju gospodarenja otpadom.

Pri izradi bitumenske mješavine s dodatkom granulata gume, gumu je moguće dodati u mješavinu takozvanim „mokrim“ ili „suhim“ postupkom.

- „Mokri“ postupak

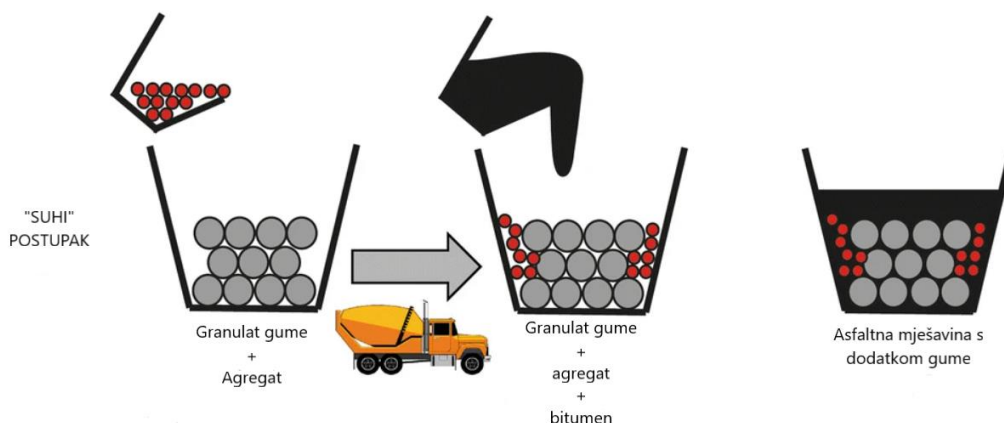
Granulat gume miješa se s bitumenom te se na taj način formira homogena smjesa koja se poslije kao takva miješa s agregatom. (Slika 20)



Slika 20: „Mokri“ postupak dodavanja granulata gume u bitumen [24]

- „Suhi“ postupak

Granulat gume miješa se prvo s agregatom pa onda s bitumenom. (Slika 21)



Slika 21: „Suhi“ postupak dodavanja granulata gume u bitumen [24]

### 5.1. Istraživanja SMA asfalta s dodatkom gume na području RH

U provedenom istraživanju kojeg su opisali u svom radu autori M. Šimun i S. Mihalinac [26] analizirana su svojstva asfalta s različitim udjelom reciklirane gume u cestograđevnome i polimerom modificiranome bitumenu. Nakon provedenog laboratorijskog istraživanja, na području Zagrebačke županije izvedene su tri pokusne dionice: „U 2006. provedena su istraživanja mogućnosti upotrebe otpadne automobilske gume kao dodatka bitumenu u svrhu postizanja boljih svojstava bitumenskih mješavina te zamjene ili smanjivanja udjela polimera u bitumenskome vezivu. Nakon što su laboratorijska istraživanja provedena, izvedene su tri pokusne dionice asfaltnoga kolnika SMA 8 i SMA 16 s dodatkom gume.“ [26]

Nakon jedanaest godina eksploatacije, ispitivanjem su došli do sljedećih zaključaka:

- dodavanjem gume u asfaltnu mješavinu pospješuje se otpornost asfalta na razorno djelovanje vode
- najveća vlačna čvrstoća zabilježena je u kombinaciji cestograđevnog bitumena i gume
- dodatak gume smanjuje otpornost na kolotraženje asfalta
- krutost asfalta s cestograđevnim bitumenom i gumom veća je od asfalta s polimernim bitumenom i gumom
- dodavanjem gume u bitumenskome vezivu povećava se otpornost na klizanje po voznoj površini asfaltnoga kolnika.

S obzirom da RH nema velikih iskustava s dodavanjem gume u asfalt korisna su iskustva drugih zemalja čiji su se autori posvetili istraživanju utjecaja gume na asfalt. Pa su tako autori Xiao i dr. [27] ispitivanjem provedenom na terenu i laboratoriju dokazali da se dodavanjem gume u asfalt poboljšavaju trajnost i otpornost na kolotraženje. Autori Paje i dr. [28] dokazali su da se korištenjem asfalta s dodatkom gume razina buke smanjuje za 3 dB. Autori Sri Wulandary P. i Tajandra D. [29] dokazali su da se dodatak gume povećava kvaliteta asfaltna mješavine te se omogućuje uporaba manjeg udjela bitumena.

## **6. ANALIZA SVOJSTAVA SMA MJEŠAVINA S DODATKOM GUME – LABORATORIJSKO ISTRAŽIVANJE**

Ovim radom provesti će se laboratorijsko ispitivanje bitumenske mješavine izrađene od splitmastiks asfalta (SMA) te splitmastiks asfalta (SMA) s dodatkom gume i usporediti će se njihova fizikalno-mehanička svojstva. Za projektiranje mješavine od splitmastiks asfalta, svojstva i zahtjevi se provode prema normi HRN EN 13108-5:2007 *Specifikacije materijala – 5.dio: SMA* [17].

U laboratorijskom istraživanju izrađeno je šest uzoraka s različitim udjelima bitumena u mješavini te pri izradi su korišteni klasični cestograđevni bitumen 50/70 i polimerom modificirani bitumen 45/80-65. Pri izradi SMA 11 s cestograđevnim bitumenom, dodana su i celulozna vlakna u iznosu od 0.30% udjela bitumena.

Udio navedenih komponenti određen je prema zahtjevima danim u Tehničkom propisu za asfaltne kolnike [1] te istraživanjem.

Nakon određenih fizikalnih svojstva izrađenih uzoraka, oni uzorci koji su zadovoljili normom propisane zahtjeve, izrađeni su po tri uzorka od svakog kako bi se na njima mogla izračunati mehanička svojstva te kako bi se usporedili rezultati uzoraka s i bez dodatka gume.

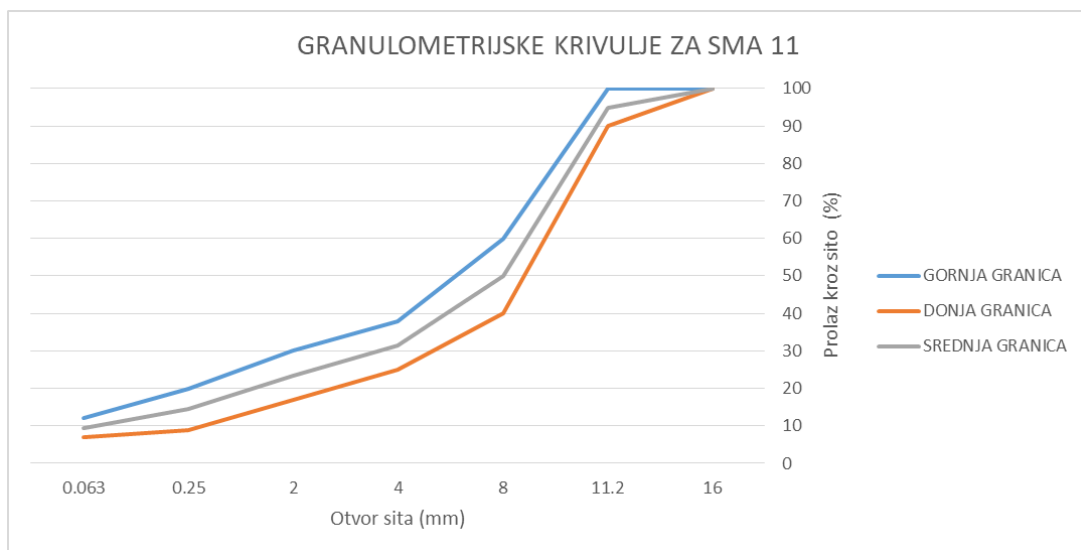
Granulometrijski sastav (gornja i donja granica) i minimalni udio bitumena koje mora ispunjavati mješavina SMA 11 označeni su Tablicom 7.

Tablica 7: Granulometrijski sastav SMA mješavine

Točka norme HRN EN 13108-5	Otvori okaca sita, mm	Bitumenske mješavine od SMA			
		SMA 4	SMA 8	SMA 11	SMA 16
		Prolaz kroz sito, %(m/m)			
Granulometrijski sastav, točka 5.2.2 <sup>(a)</sup>	22,4				100
	16			100	90-100
	11,2		100	90 do 100	35-60
	8	100	90 do 100	40 do 60	27 do 43
	4	90 do 100	24 do 45	25 do 38	20 do 33
	2	30 do 40	16 do 31	17 do 30	16 do 28
	1	-	-	-	-
	0,25	11 do 22	9 do 20	9 do 20	9 do 17
0,063	8,0 do 12,0	7,0 do 12,0	7,0 do 12,0	7,0 do 12,0	
Minimalni udio bitumena, točka 5.2.3 <sup>(b)</sup>	$B_{min}^{(c)}$	$B_{min5,0}$	$B_{min5,0}$	$B_{min5,0}$	$B_{min5,0}$

<sup>(a)</sup> ispituje se prema normi HRN EN 12697-2  
<sup>(b)</sup> toplivi udio bitumena ispituje se prema normi HRN EN 12697-1 ili HRN EN 12697-39  
<sup>(c)</sup> pri određivanju minimalnog udjela bitumena aktualne bitumenske mješavine ( $B_{akt}$ ),  $B_{min}$  se korigira faktorom  $\alpha$  ( $\alpha=2,65/\rho_a$ ) ( $\rho_a$  je prividna gustoća smjese agregata u aktualnoj bitumenskoj mješavini, određena prema normi HRN EN 1097-6 i izražena u Mg/m<sup>3</sup>)

Na Slici 22. su prikazane granice granulometrijske krivulje koju mješavina SMA 11 mora zadovoljiti te optimalna (srednja) krivulja.



Slika 22: Granice granulometrijske krivulje za mješavinu SMA 11

- **Priprema kamenog materijala** - Udio pojedinog sastavnog materijala u mješavini ovisi o vrsti asfaltne mješavine i graničnim vrijednostima koje su definirane Tehničkim propisima za asfaltne kolnike [1]. Propisi definiraju i zahtjeve koje sastavni materijali i izrađena asfaltna mješavina moraju zadovoljavati. Postupak pripreme započinje pranjem agregata kako bi se uklonile vrlo sitne čestice, a zatim se ocijedi pomoću sita veličine 0.063 mm. Agregat je potrebno ispirati sve dok voda nije potpuno čista te osušiti u sušioniku na 110 °C do stalne mase tako da između dva mjerenja razlika masa ne bude veća od 1%. Sušenje agregata traje 2 – 3 sata te kako bi se što prije osušio, potrebno ga je rasprostrijeti na široku posudu i ukloniti što više vode nakon pranja.
- **Granulometrijski sastav agregata** - Granulometrijski sastav agregata dobiva se sijanjem agregata u sijačici prema normi HRN EN 933-1 *Metoda sijanja* [30]. Potrebno je odabrati odgovarajuća sita za asfaltnu mješavinu koja se izrađuje, za SMA 11 korištena su sita 0.063, 0.25, 1, 2, 4, 8, 11.2 i 16. Sita se poredaju tako da na dno se stavljaju sita s najmanjim prolazom, a prema vrhu s najvećim, također na dno se postavlja posuda koja će prikupiti kameno brašno, odnosno čestice manje od 0.063 mm. Tako složena sita postavljaju se u sijačicu i prosijavaju se u trajanju od tri minute. Za potrebe laboratorijskog istraživanja prosijane su frakcije 0-2, 2-4, 4-8 i 8-11.2 mm. Sijačica sa poredanim sitima je prikazana na Slici 23.



Slika 23: Sijačica s poredanim sitima

Različite podfrakcije koje su se zadržale na sitima, razvrstane su u zdjelice te ih se označava i mjeri im se masa. Na Slici 24. prikazane su zdjelice s razvrstanim podfrakcijama.



Slika 24: Prosjijane podfrakcije

Nakon što je agregat prosijan i razvrstan na podfrakcije, potrebno je odrediti granulometrijski sastav za uzorke splitmastiks asfalta. Granulometrijski sastav dobiva se iz izraza (1):

$$P = pA * a + pB * b + pC * c \quad (1)$$

Gdje su:

P – postotak materijala koji prolazi kroz sita A, B i C

pA, pB, pC – postotak materijala koji prolazi kroz određeno sito za svaku frakciju agregata u mješavini

a, b, c – udio agregata A, B, C koji će se upotrijebiti u mješavini

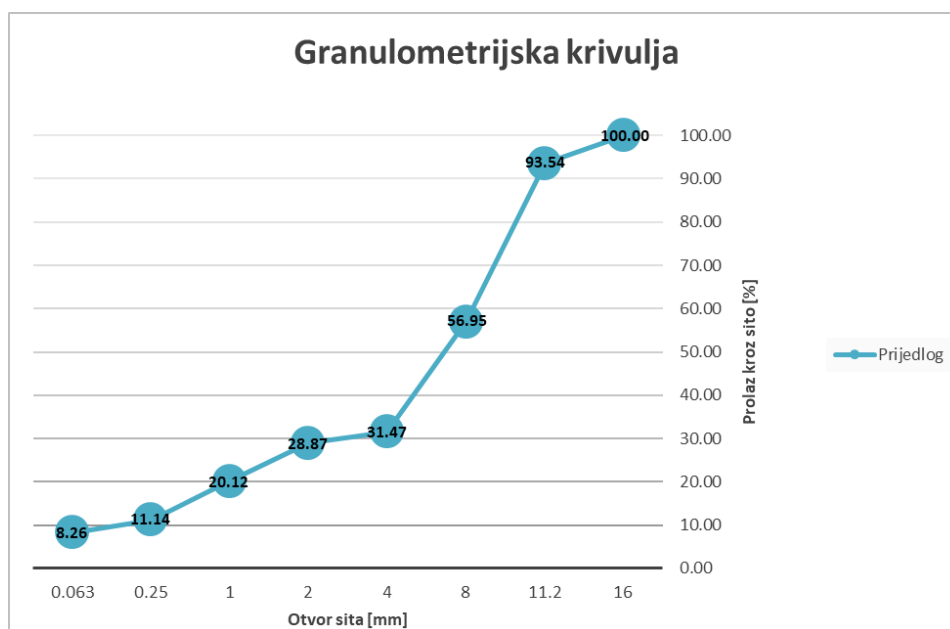
Granulometrijski sastav agregata određuje se na temelju graničnih vrijednosti udjela pojedine frakcije u asfaltnoj mješavini. Tehničkim propisom za asfaltno kolnike [1] propisane su granične vrijednosti odnosno donja i gornja granica prolaska kroz sito pojedine frakcije agregata izražene u postotcima. Uzorci za izradu asfaltno mješavine izrađuju se uzimajući proizvoljni postotak prolaza pojedine frakcije unutar tih granica. Ovisno o granulometrijskom sastavu, asfalti imaju različita svojstva. Tablicom 8. su prikazani usvojeni udjeli pojedinačnih frakcija koje čine granulometrijski sastav uzoraka za laboratorijska istraživanja pri izradi SMA 11:



Tablica 8: Usvojeni granulometrijski sastav SMA 11

Udjeli poj. frakcija	8	20	0	23	49		$\Sigma$	100
Otvor sita (mm)	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2	Donja granica	Gornja granica	Granulometrijska krivulja
16	100	100	100	100	100.00	100	100	100.00
11.2	100	100	100	100.00	86.82	90	100	93.54
8	100	100	100	96.35	13.85	40	60	56.94
4	100	100	92.20	11.22	1.82	25	38	31.47
2	100	99.74	0.00	2.64	0.65	17	30	28.87
1	100	57.08	0.00	2.08	0.46			20.12
0.25	100	13.74	0.00	1.05	0.30	9	20	11.14
0.063	100	1.07	0.00	0.11	0.04	7	12	8.26

Na Slici 25. prikazana je odabrana granulometrijska krivulja prema kojoj će se izraditi uzorci:



Slika 25: Odabrana granulometrijska krivulja SMA 11

Za pripremu asfaltne mješavine SMA 11 potrebna je definirana masa uzorka, granulometrijski sastav, udio bitumena te udio vlakana.

Prema normi HRN EN 12697 – 30 *Priprema uzorka udarnim zbijačem* [13] masa uzorka varira između 1050 g – 1400 g, odnosno ovisi o željenoj visini uzorka i gustoći mješavine, a minimalni udio bitumena propisan je Uvjetima za asfaltne kolnike [18] te se dodaje ovisno o željenim svojstvima asfaltne mješavine.

Odabrani udio bitumena i celuloznih vlakana prikazani su Tablicom 9.

Tablica 9: Udio komponenti za uzorke SMA 11

	OZNAKA UZORKA	UDIO BITUMENA	UDIO VLAKANA (u bitumenu)
		[%]	[%]
<b>SMA 11 - cestograđevni bitumen 50/70</b>	AM 1	5.5	0.3
	AM 2	6.0	0.3
	AM 3	6.5	0.3
<b>SMA 11 - polimerom modificirani bitumen 45/80-65</b>	AM 4	5.5	/
	AM 5	6.0	/
	AM 6	6.5	/

### 6.1. Proračun za određivanje udjela komponenti asfaltne mješavine

Udio sastavnih komponenti uzoraka određuju se na sljedeći način:

**a) Pretpostavka ukupne mase uzorka:**

Između 1050 g – 1400 g (HRN EN 12697 – 30)

**b) Određivanje mase bitumena:**

$$m \text{ bitumena} = m \text{ uzorka} * \% \text{ bitumena} \quad (2)$$

**c) Određivanje mase agregata:**

$$m \text{ agregata} = m \text{ uzorka} - m \text{ bitumena} \quad (3)$$

**d) Određivanje mase pojedinačnih frakcija:**

$$m \text{ frakcije} = m \text{ agregata} * \% \text{ frakcije} \quad (4)$$

**e) Određivanje mase podfrakcija:**

$$m \text{ podfrakcije} = (\% \text{ prolaza gornje sito} - \% \text{ prolaza donje sito}) * m \text{ frakcije} \quad (5)$$

**f) Ukupni mineralni materijal bez punila (jer su sitne čestice oprane na situ 0.063):**

$$\text{suma mase kamena bez punila} = m^{0-2} \text{ podfrakcije} + m^{2-4} \text{ podfrakcije} + m^{4-8} \text{ podfrakcije} + m^{8-11.2} \text{ podfrakcije} \quad (6)$$

**g) Kumulativni zbroj sume mineralnog materijala:**

$$\text{suma kumulativno} = \text{suma kumulativno prethodna podfrakcija} + \text{suma mase kamena bez punila trenutna podfrakcija} \quad (7)$$

## 6.2. Sastav asfaltnih mješavina

Na temelju prethodno opisanog proračuna udjela komponenti u uzorku asfaltne mješavine, Tablicama 10.-15. prikazani su usvojeni udjeli sastavnih komponenti SMA 11 asfaltne mješavine za uzorke AM 1 – AM 3 koji su izrađeni s klasičnim cestograđevnim bitumenom 50/70 i dodatkom celuloznih vlakana te Tablicama 16.-21. prikazani su uzorci AM 4 – AM 6 izrađeni s polimerom modificiranim bitumenom 45/80-65.

- AM 1 – asfaltna mješavina s 5.50% cestograđevnog bitumena i 0.30% celuloznih vlakna.

Tablica 10: Udjeli komponenata za AM 1

Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena	Ukupna masa vlakana
[g]	[g]	[g]	[g]
<b>1200</b>	<b>1133.80</b>	<b>66</b>	<b>0.198</b>

Tablica 11: Udjeli podfrakcija za AM 1

		Udio bitumena: <b>5.50%</b>					Udio vlakana: <b>0.30%</b>								
AM 1	100% od ukupne mase mineralne mješavine					Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)					Suma kamen bez punila	Kumulativno kamen	Punilo		
	8%	20%	0%	23%	49%	90.70	226.76	0.00	260.77	555.56	[g]	[g]	[g]		
Udjeli poj. Frakcije															
Otvor sita (mm)	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2					
16	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00										
11.2-16	0.00	0.00	0.00	0.00	13.18	0.00	0.00	0.00	0.00	73.22	73.22	73.22			
11.2	100.00	100.00	100.00	100.00	86.82										
8-11.2	0.00	0.00	0.00	3.65	72.97	0.00	0.00	0.00	9.52	405.39	414.91	488.14			
8	100.00	100.00	100.00	96.35	13.85										
4-8	0.00	0.00	7.80	85.15	12.03	0.00	0.00	0.00	222.05	66.83	288.88	777.02			
4	100.00	100.00	92.20	11.20	1.82										
2-4	0.00	0.26	92.20	8.56	1.17	0.00	0.59	0.00	22.32	6.50	29.41	806.43			
2	100.00	99.74	0.00	2.64	0.65										
1-2	0.00	42.66	0.00	0.56	0.19	0.00	96.74	0.00	1.46	1.06	99.25	905.68			
1	100.00	57.08	0.00	2.08	0.46										
0.25-1	0.00	43.34	0.00	1.03	0.16	0.00	98.28	0.00	2.69	0.89	101.85	1007.54			
0.25	100.00	13.74	0.00	1.05	0.30										
0.063-0.25	0.00	12.67	0.00	0.94	0.26	0.00	28.73	0.00	2.45	1.44	32.63	1040.16			
0.063	100.00	1.07	0.00	0.11	0.04										
<0.063	100.00	1.07	0.00	0.11	0.04	90.70	2.43	0.00	0.29	0.22	2.94	1043.10	90.70		
											1043.10		1133.80		

- AM 2 – asfaltna mješavina s 6.00% cestograđevnog bitumena i 0.30% celuloznih vlakna.

Tablica 12: Udjeli komponenata za AM 2

Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena	Ukupna masa vlakana
[g]	[g]	[g]	[g]
<b>1200</b>	<b>1127.78</b>	<b>72</b>	<b>0.216</b>

Tablica 13: Udjeli podfrakcija za AM 2

AM 2	Udio bitumena: <b>6.00%</b>					Udio vlakana: <b>0.30%</b>					Suma kamen bez punila	Kumulativno kamen	Punilo
	100% od ukupne mase mineralne mješavine					Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)							
Udjeli poj. Frakcije	8%	20%	0%	23%	49%	90.22	225.56	0.00	259.39	552.61	[g]	[g]	[g]
Otvor sita (mm)	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2			
16	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00								
11.2-16	0.00	0.00	0.00	0.00	13.18	0.00	0.00	0.00	0.00	72.83	72.83	72.83	
11.2	100.00	100.00	100.00	100.00	86.82								
8-11.2	0.00	0.00	0.00	3.65	72.97	0.00	0.00	0.00	9.47	403.24	412.71	485.54	
8	100.00	100.00	100.00	96.35	13.85								
4-8	0.00	0.00	7.80	85.15	12.03	0.00	0.00	0.00	220.87	66.48	287.35	772.90	
4	100.00	100.00	92.20	11.20	1.82								
2-4	0.00	0.26	92.20	8.56	1.17	0.00	0.59	0.00	22.20	6.47	29.26	802.15	
2	100.00	99.74	0.00	2.64	0.65								
1-2	0.00	42.66	0.00	0.56	0.19	0.00	96.22	0.00	1.45	1.05	98.73	900.88	
1	100.00	57.08	0.00	2.08	0.46								
0.25-1	0.00	43.34	0.00	1.03	0.16	0.00	97.76	0.00	2.67	0.88	101.31	1002.19	
0.25	100.00	13.74	0.00	1.05	0.30								
0.063-0.25	0.00	12.67	0.00	0.94	0.26	0.00	28.58	0.00	2.44	1.44	32.45	1034.64	
0.063	100.00	1.07	0.00	0.11	0.04								
<0.063	100.00	1.07	0.00	0.11	0.04	90.22	2.41	0.00	0.29	0.22	2.92	1037.56	90.22
											1037.56		1127.78

- AM 3 – asfaltna mješavina s 6.50% cestograđevnog bitumena i 0.30% celuloznih vlakna.

Tablica 14: Udjeli komponenata za AM 3

Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena	Ukupna masa vlakana
[g]	[g]	[g]	[g]
<b>1200</b>	<b>1121.77</b>	<b>78</b>	<b>0.234</b>

Tablica 15: Udjeli podfrakcija za AM 3

		Udio bitumena: <b>6.50%</b>					Udio vlakana: <b>0.30%</b>							
AM 3	100% od ukupne mase mineralne mješavine					Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)					Suma kamen bez punila	Kumulativno kamen	Punilo	
	8%	20%	0%	23%	49%	89.74	224.35	0.00	258.01	549.67	[g]	[g]	[g]	
Udjeli poj. Frakcije	8%	20%	0%	23%	49%	89.74	224.35	0.00	258.01	549.67	[g]	[g]	[g]	
Otvor sita (mm)	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2				
16	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00									
11.2-16	0.00	0.00	0.00	0.00	13.18	0.00	0.00	0.00	0.00	72.45	72.45	72.45		
11.2	100.00	100.00	100.00	100.00	86.82									
8-11.2	0.00	0.00	0.00	3.65	72.97	0.00	0.00	0.00	9.42	401.09	410.51	482.95		
8	100.00	100.00	100.00	96.35	13.85									
4-8	0.00	0.00	7.80	85.15	12.03	0.00	0.00	0.00	219.69	66.12	285.82	768.77		
4	100.00	100.00	92.20	11.20	1.82									
2-4	0.00	0.26	92.20	8.56	1.17	0.00	0.58	0.00	22.09	6.43	29.10	797.87		
2	100.00	99.74	0.00	2.64	0.65									
1-2	0.00	42.66	0.00	0.56	0.19	0.00	95.71	0.00	1.44	1.04	98.20	896.07		
1	100.00	57.08	0.00	2.08	0.46									
0.25-1	0.00	43.34	0.00	1.03	0.16	0.00	97.23	0.00	2.66	0.88	100.77	996.84		
0.25	100.00	13.74	0.00	1.05	0.30									
0.063-0.25	0.00	12.67	0.00	0.94	0.26	0.00	28.43	0.00	2.43	1.43	32.28	1029.12		
0.063	100.00	1.07	0.00	0.11	0.04									
<0.063	100.00	1.07	0.00	0.11	0.04	89.74	2.40	0.00	0.28	0.22	2.90	1032.02	89.74	
											1032.02		1121.77	

- AM 4 – asfaltna mješavina s 5.50% polimerom modificiranim bitumenom.

Tablica 16: Udjeli komponenata za AM 4

Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena	Ukupna masa vlakana
[g]	[g]	[g]	[g]
<b>1200</b>	<b>1134.00</b>	<b>66</b>	<b>0</b>

Tablica 17: Udjeli podfrakcija za AM 4

		Udio bitumena: <b>5.50%</b>					Udio vlakana: <b>0.00%</b>					Suma kamen bez punila	Kumulativno kamen	Punilo
<b>AM 4</b>	100% od ukupne mase mineralne mješavine					Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)								
Udjeli poj. Frakcije	<b>8%</b>	<b>20%</b>	<b>0%</b>	<b>23%</b>	<b>49%</b>	<b>90.72</b>	<b>226.80</b>	<b>0.00</b>	<b>260.82</b>	<b>555.66</b>	[g]	[g]	[g]	
Otvor sita (mm)	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2				
16	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00									
11.2-16	0.00	0.00	0.00	0.00	13.18	0.00	0.00	0.00	0.00	73.24	73.24	73.24		
11.2	100.00	100.00	100.00	100.00	86.82									
8-11.2	0.00	0.00	0.00	3.65	72.97	0.00	0.00	0.00	9.52	405.47	414.99	488.22		
8	100.00	100.00	100.00	96.35	13.85									
4-8	0.00	0.00	7.80	85.15	12.03	0.00	0.00	0.00	222.09	66.85	288.93	777.16		
4	100.00	100.00	92.20	11.20	1.82									
2-4	0.00	0.26	92.20	8.56	1.17	0.00	0.59	0.00	22.33	6.50	29.42	806.57		
2	100.00	99.74	0.00	2.64	0.65									
1-2	0.00	42.66	0.00	0.56	0.19	0.00	96.75	0.00	1.46	1.06	99.27	905.84		
1	100.00	57.08	0.00	2.08	0.46									
0.25-1	0.00	43.34	0.00	1.03	0.16	0.00	98.30	0.00	2.69	0.89	101.87	1007.71		
0.25	100.00	13.74	0.00	1.05	0.30									
0.063-0.25	0.00	12.67	0.00	0.94	0.26	0.00	28.74	0.00	2.45	1.44	32.63	1040.34		
0.063	100.00	1.07	0.00	0.11	0.04									
<0.063	100.00	1.07	0.00	0.11	0.04	90.72	2.43	0.00	0.29	0.22	2.94	1043.28	90.72	
											1043.28		1134.00	

- AM 5 – asfaltna mješavina s 6.00% polimerom modificiranim bitumenom.

Tablica 18: Udjeli komponenata za AM 5

Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena	Ukupna masa vlakana
[g]	[g]	[g]	[g]
<b>1200</b>	<b>1128.00</b>	<b>72</b>	<b>0</b>

Tablica 19: Udjeli podfrakcija za AM 5

Udio bitumena: <b>6.00%</b>		Udio vlakana: <b>0.00%</b>												
AM 5	100% od ukupne mase mineralne mješavine					Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)					Suma kamen bez punila	Kumulativno kamen	Punilo	
Udjeli poj. Frakcije	8%	20%	0%	23%	49%	90.24	225.60	0.00	259.44	552.72	[g]	[g]	[g]	
Otvor sita (mm)	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2				
16	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00									
11.2-16	0.00	0.00	0.00	0.00	13.18	0.00	0.00	0.00	0.00	72.85	72.85	72.85		
11.2	100.00	100.00	100.00	100.00	86.82									
8-11.2	0.00	0.00	0.00	3.65	72.97	0.00	0.00	0.00	9.47	403.32	412.79	485.64		
8	100.00	100.00	100.00	96.35	13.85									
4-8	0.00	0.00	7.80	85.15	12.03	0.00	0.00	0.00	220.91	66.49	287.41	773.04		
4	100.00	100.00	92.20	11.20	1.82									
2-4	0.00	0.26	92.20	8.56	1.17	0.00	0.59	0.00	22.21	6.47	29.26	802.30		
2	100.00	99.74	0.00	2.64	0.65									
1-2	0.00	42.66	0.00	0.56	0.19	0.00	96.24	0.00	1.45	1.05	98.74	901.05		
1	100.00	57.08	0.00	2.08	0.46									
0.25-1	0.00	43.34	0.00	1.03	0.16	0.00	97.78	0.00	2.67	0.88	101.33	1002.38		
0.25	100.00	13.74	0.00	1.05	0.30									
0.063-0.25	0.00	12.67	0.00	0.94	0.26	0.00	28.58	0.00	2.44	1.44	32.46	1034.84		
0.063	100.00	1.07	0.00	0.11	0.04									
<0.063	100.00	1.07	0.00	0.11	0.04	90.24	2.41	0.00	0.29	0.22	2.92	1037.76	90.24	
											1037.76		1128.00	



- AM 6 – asfaltna mješavina s 6.50% polimerom modificiranim bitumenom.

Tablica 20: Udjeli komponenata za AM 6

Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena	Ukupna masa vlakana
[g]	[g]	[g]	[g]
<b>1200</b>	<b>1122.00</b>	<b>78</b>	<b>0</b>

Tablica 21: Udjeli podfrakcija za AM 6

AM 6	Udio bitumena: <b>6.50%</b>					Udio vlakana: <b>0.00%</b>					Suma kamen bez punila	Kumulativno kamen	Punilo
	100% od ukupne mase mineralne mješavine					Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)							
Udjeli poj. Frakcije	<b>8%</b>	<b>20%</b>	<b>0%</b>	<b>23%</b>	<b>49%</b>	<b>89.76</b>	<b>224.40</b>	<b>0.00</b>	<b>258.06</b>	<b>549.78</b>	[g]	[g]	[g]
Otvor sita (mm)	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2	Punilo	0-2	2-4	4-8	8-11.2			
16	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00								
<b>11.2-16</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>13.18</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	72.46	<b>72.46</b>	<b>72.46</b>	
11.2	100.00	100.00	100.00	100.00	86.82								
<b>8-11.2</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>3.65</b>	<b>72.97</b>	0.00	0.00	0.00	9.42	401.17	<b>410.59</b>	<b>483.05</b>	
8	100.00	100.00	100.00	96.35	13.85								
<b>4-8</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>7.80</b>	<b>85.15</b>	<b>12.03</b>	0.00	0.00	0.00	219.74	66.14	<b>285.88</b>	<b>768.93</b>	
4	100.00	100.00	92.20	11.20	1.82								
<b>2-4</b>	<b>0.00</b>	<b>0.26</b>	<b>92.20</b>	<b>8.56</b>	<b>1.17</b>	0.00	0.58	0.00	22.09	6.43	<b>29.11</b>	<b>798.04</b>	
2	100.00	99.74	0.00	2.64	0.65								
<b>1-2</b>	<b>0.00</b>	<b>42.66</b>	<b>0.00</b>	<b>0.56</b>	<b>0.19</b>	0.00	95.73	0.00	1.45	1.04	<b>98.22</b>	<b>896.26</b>	
1	100.00	57.08	0.00	2.08	0.46								
<b>0.25-1</b>	<b>0.00</b>	<b>43.34</b>	<b>0.00</b>	<b>1.03</b>	<b>0.16</b>	0.00	97.25	0.00	2.66	0.88	<b>100.79</b>	<b>997.05</b>	
0.25	100.00	13.74	0.00	1.05	0.30								
<b>0.063-0.25</b>	<b>0.00</b>	<b>12.67</b>	<b>0.00</b>	<b>0.94</b>	<b>0.26</b>	0.00	28.43	0.00	2.43	1.43	<b>32.29</b>	<b>1029.34</b>	
0.063	100.00	1.07	0.00	0.11	0.04								
<b>&lt;0.063</b>	<b>100.00</b>	<b>1.07</b>	<b>0.00</b>	<b>0.11</b>	<b>0.04</b>	89.76	2.40	0.00	0.28	0.22	<b>2.90</b>	<b>1032.24</b>	<b>89.76</b>
											<b>1032.24</b>		<b>1122.00</b>

### 6.3. Postupak izrade uzoraka SMA asfaltne mješavine

Nakon što je određen granulometrijski sastav, udio bitumena i vlakana te ukupna masu uzorka, frakcije agregata je potrebno izvagati. Ponajprije se važe najsitnija frakcija odnosno kameno brašno (<0.063 mm) pa prema najkrupnijoj frakciji (11.2 mm). Na Slici 26. prikazano je kumulativno vaganje frakcija.

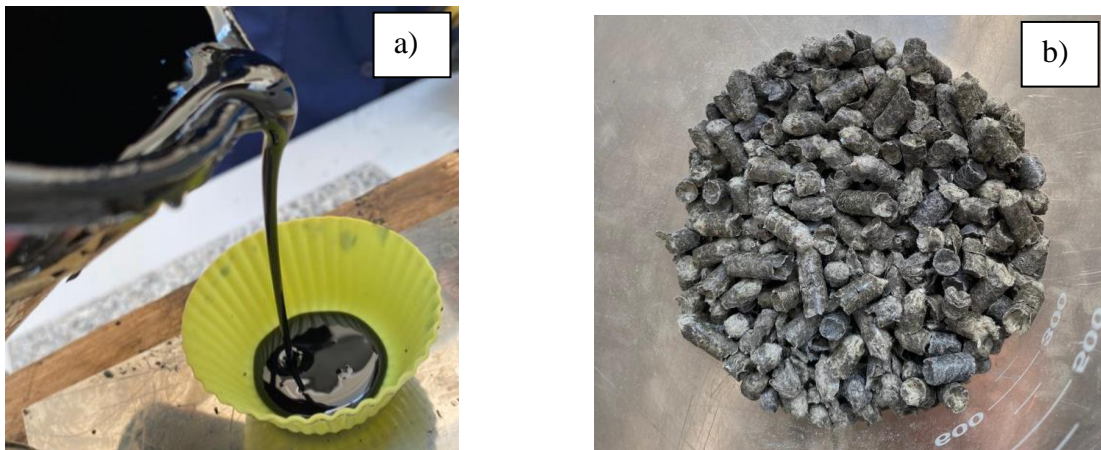
Materijal se potom stavlja u pećnicu na grijanje kako bi dobili ciljanu temperaturu mješavine, koja ovisi o tipu bitumena koji se koristi i prema normi HRN EN 12697-35 *Laboratorijsko miješanje* [31]. Na Slici 26. prikazano je zagrijavanje materijala u pećnici.



Slika 26: a) Kumulativno vaganje podfrakcija, b) Zagrijavanje materijala u pećnici

Bitumen se zagrijava u komori na temperaturi od 150 °C prema normi HRN EN 12697-35 *Laboratorijsko miješanje* [31], 3-5 h. Nakon grijanja bitumen je u tekućem stanju te se dozira u silikonske kalupe, ovisno o određenom udjelu kojeg pojedina mješavina sadrži. Izvagani bitumen se ohladi te ukoliko je potrebno korigira pa se zatim dodaje zagrijanoj mješavini i ponovo se zagrijava u komori do tekućeg stanja kako bi ga se moglo promiješati sa ostalim komponentama. Izvaga bitumena prikazana je na Slici 27. U uzorcima s cestograđevnim

bitumenom koristila su se i celulozna vlakna koja su se također izvagala te dodala bitumenu pri miješanju. Korištena celulozna vlakna prikazana su na Slici 27.



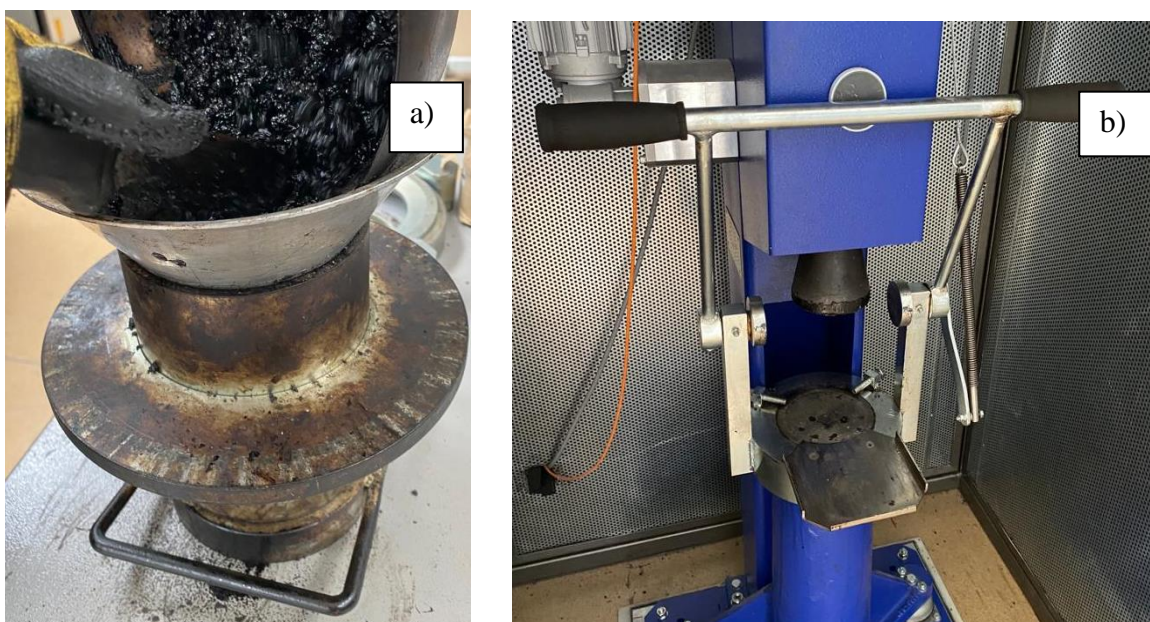
Slika 27: a) Izvaga bitumena, b) Celulozna vlakna

Nakon što se mješavina ugrijala, potrebno ju je miješati metalnom špatulom u trajanju od 5 minuta kako bi postala homogena i kako bi svako zrno agregata bilo obavijeno bitumenom (Slika 28).



Slika 28: Miješanje zagrijanog materijala

- **Zbijanje uzorka udarnim zbijačem** - Izmiješana mješavina se ponovo stavlja u komoru na grijanje na 150 °C u trajanju od 30 min kako bi bila spremna za izradu uzorka udarnim zbijačem. Uz mješavinu zagrijava se i kalup u kojem će se uzorak izraditi. Pripremljena vruća asfaltna mješavina prebaci se u zagrijani kalup (Slika 29) te postavi u Marshallov zbijač (Slika 29). Marshallov zbijač postavlja se na 50 udaraca. Nakon što je jedna strana zbijena, uzorak se okrene na drugu stranu kako bi se ponovio postupak zbijanja. Nakon zbijanja, uzorak se s kalupom postavlja na ploču za hlađenje dok se ne ohladi na približno 40 °C kada se može ukloniti kalup.



Slika 29: a) Punjenje kalupa mješavinom, b) Marshallov zbijač

Na Slici 30. prikazani su gotovi uzorci. Uzorci označeni brojevima 1-3 izrađeni su s cestograđevnim bitumenom i dodatkom vlakana, a uzorci 4-6 s polimerom modificiranim bitumenom.



Slika 30: Izrađeni uzorci SMA 11

#### 6.4. Određivanje gustoće asfaltne mješavine

Za određivanje gustoće asfaltne mješavine primjenjuje se norma HRN EN 12697-5 *Određivanje gustoće asfaltne mješavine* [32]. U ovom laboratorijskom istraživanju primijenjena je matematička metoda izračuna gustoće asfaltne mješavine.

- **Određivanje gustoće asfaltne mješavine procedurom C (HRN EN 1297-5)**

Za izračun gustoće asfaltne mješavine prema proceduri C potrebni su maseni udjeli agregata koji su se koristili u mješavini te gustoća agregata koju dostavlja proizvođač u izjavi o svojstvima. Osim agregata u proračun ulaze udio i gustoća bitumena koju također dostavlja proizvođač. Za potrebe laboratorijskog istraživanja korišten je drobljeni prirodni agregat s kamenoloma u Fužinskom Benkovcu.

Gustoća asfaltne mješavine računa se prema izrazu (8):

$$\rho_{mc} = p_a \rho_a \frac{100}{(p_{a1}/\rho_{a1}) + (p_{a2}/\rho_{a2}) + \dots + (p_b/\rho_b)} \quad (8)$$

gdje su:

$\rho_{mc}$  – maksimalna gustoća asfaltne mješavine [ $\text{Mg}/\text{m}^3$ ]

$p_{a1}$  – maseni udio agregata 1 u mješavini [%]

$\rho_{a1}$  – prividna gustoća agregata 1 u mješavini [ $\text{Mg}/\text{m}^3$ ]

$p_{a2}$  – maseni udio agregata 2 u mješavini [%]

$\rho_{a2}$  – prividna gustoća agregata 2 u mješavini [ $\text{Mg}/\text{m}^3$ ]

$p_b$  – maseni udio bitumena u mješavini [%]

$\rho_b$  – gustoća bitumena u mješavini [ $\text{Mg}/\text{m}^3$ ]

$p_{a1} + p_{a2} + \dots + p_b = 100\%$  mase mješavine

Gustoća korištenih materijala agregata i bitumena pri izradi uzoraka dostavljena je od strane proizvođača u izjavi o svojstvima. Vrijednosti su prikazane Tablicom 22:

Tablica 22: Gustoća materijala

GUSTOĆE MATERIJALA	
FRAKCIJA [mm]	GUSTOĆA [Mg/m <sup>3</sup> ]
Brašno	2.890
0/2	2.73
2/4	2.73
4/8	2.73
8/11.2	2.73
BITUMEN [Mg/m <sup>3</sup> ]	GUSTOĆA [Mg/m <sup>3</sup> ]
BIT 50/70	1.018
PmB 45/80-65	1.021

Pomoću izraza (8) dobivena je gustoća asfaltne mješavine za svaki uzorak. Dobivene vrijednosti prikazane su Tablicom 23:

Tablica 23: Gustoća asfaltne mješavine

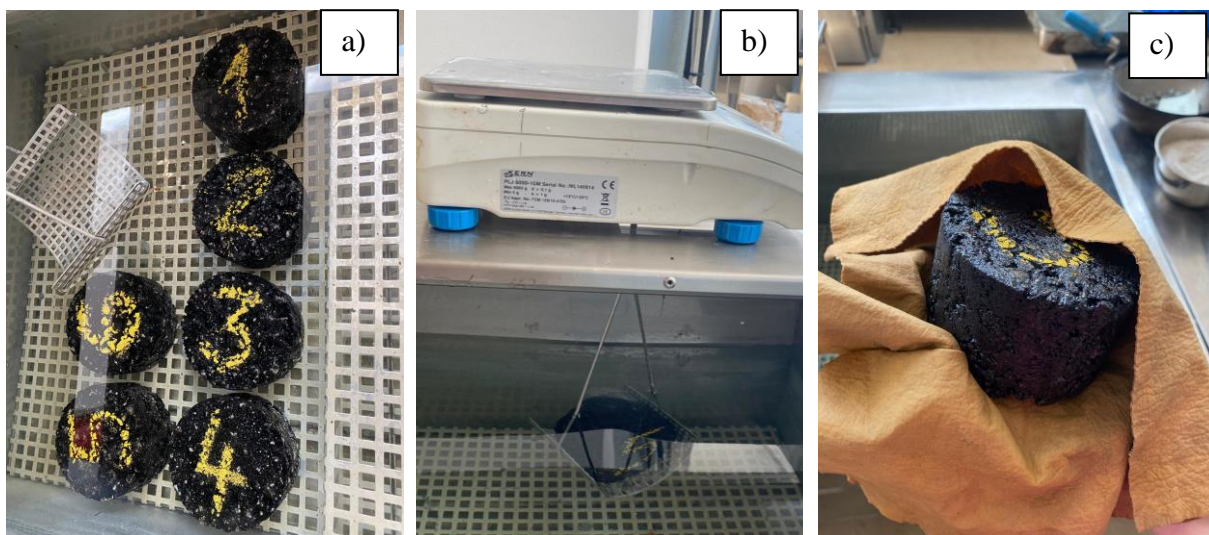
	AM 1	AM 2	AM 3	AM 4	AM 5	AM 6
GUSTOĆA ASFALTNE MJEŠAVINE $\rho_{mc}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2.508	2.489	2.470	2.509	2.490	2.471

Dobiveni rezultati iz Tablice 23. upućuju da mješavina s klasičnim cestograđevnim bitumenom i mješavina s polimerom modificiranim bitumenom imaju približno jednaku gustoću te da mješavine u kojima je korišteno manje udjela bitumena imaju veću gustoću od onih u kojem je korišten veći postotak udjela bitumena, odnosno gustoća mješavine se smanjuje sa povećanjem udjela bitumena te smanjenjem udjela kamenog agregata. S obzirom da je gustoća bitumena manja od gustoće kamenog agregata, povećanjem udjela bitumena smanjuje se gustoća asfaltne mješavine.

## 6.5. Određivanje gustoće asfaltnog uzorka

Za određivanje gustoće asfaltnog uzorka primjenjuje se norma HRN EN 12697-6 *Određivanje gustoće asfaltnih uzoraka* [33] koja je podijeljena u više procedura po kojima se određuje gustoća asfaltnog uzorka. Za potrebe laboratorijskog istraživanja koristile su se procedura B i procedura D.

- **Određivanje gustoće asfaltnog uzorka procedurom B (HRN EN 12697-6)**  
Procedura B se koristi za guste bitumenske mješavine s niskom upojnošću i sporom drenažom apsorbirane vode. Za primjenu procedure B, uzorke je potrebno izvagati na zraku te zatim potopiti u vodu temperature 25 °C minimalno 30 minuta (Slika 31). Nakon što je uzorak odstajao u vodi, mjeri se njegova težina pod vodom (Slika 31) te težina kada se uzorak izvadi iz vode i površinski obriše krpicom od jelenje kože (Slika 31), težina takvog uzorka predstavlja zasićeni površinski suh uzorak.



Slika 31: a) Uzorci potopljeni u vodi, b) Vaganje u vodi, c) Brisanje uzorka



Iz navedenih triju masa pomoću izraza (9) određuje se gustoća asfaltnog uzorka.

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \times \rho_w \quad (9)$$

gdje su:

$\rho_{bssd}$  – gustoća asfaltnog uzorka [Mg/m<sup>3</sup>]

$m_1$  – masa suhog uzorka [g]

$m_2$  – masa uzorka u vodi [g]

$m_3$  – masa zasićenog površinski suhog uzorka [g]

$\rho_w$  – gustoća vode [Mg/m<sup>3</sup>]

Gustoća vode računa se prema izrazu (10):

$$\rho_w = 1,00025205 + \left( \frac{7,59 * t - 5,32 * t^2}{10^6} \right) \quad (10)$$

gdje su:

$\rho_w$  – gustoća vode na testiranoj temperaturi [Mg/m<sup>3</sup>]

$t$  – temperatura vode [°C]

Tablicom 24. su prikazane spomenute izmjerene mase te rezultati gustoća asfaltnih uzoraka dobivenih izračunom pomoću izraza (9).

Tablica 24: Masa i gustoća izmjerenih uzoraka

UZORAK	MASA SUHOG UZORKA [g]	MASA UZORKA U VODI [g]	MASA ZASIĆENOG POVRŠINSKI SUHOG UZORKA [g]	GUSTOĆA VODE [Mg/m <sup>3</sup> ]	GUSTOĆA ASFALTOG UZORKA $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]
	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$\rho_w$	$\rho_{bssd}$
AM 1	1202.8	683.3	1211.30	0.9971	2.271
AM 2	1147.7	656.6	1153.2	0.9971	2.304
AM 3	1187	685.7	1192	0.9971	2.338
AM 4	1190.2	690.8	1194	0.9971	2.358
AM 5	1184	682.8	1190	0.9971	2.328
AM 6	1182.6	681.7	1188	0.9971	2.329

Dobiveni rezultati iz Tablice 24. upućuju na povećanje gustoće uzoraka s povećanjem udjela bitumena. Osim toga, povećanjem udjela bitumena, smanjuje se razlika između masa suhog uzorka i zasićenog površinski suhog uzorka. Razlog tome je smanjeni udio šupljina u uzorku zbog povećanja bitumenskog morta.

- **Određivanje gustoće asfaltnog uzorka procedurom D (HRN EN 12697-6)**

Procedura D odnosi se na određivanje gustoće iz dimenzija uzorka za uzorke pravilnih geometrijskih oblika, a postupak se provodi na način da se prvo mjeri visina uzorka -  $h$ , na četiri mjesta, zakretanjem uzorka za 90 stupnjeva i zatim promjer uzorka –  $d$ , na šest mjesta; na vrhu, sredini i dnu u dva međusobno okomita smjera. Postupak mjerenja visine i promjera uzorka izvodi se prema normi HRN EN 12697-29 *Određivanje dimenzija asfaltnog uzorka* [34], a za mjerenje se koristi pomična mjerka. Nakon izmjerenih veličina, mjeri se masa suhog uzorka –  $m_1$ . Na Slici 32. prikazano je mjerenje promjera uzorka pomičnom mjerkom.



Slika 32: Mjerenje uzorka pomičnom mjerkom

Pomoću izraza (10) i izmjerenih veličina volumena i mase izračunava se gustoća:

$$\rho_{\text{bdim}} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^3 \quad (10)$$

gdje su:

$\rho_{\text{bdim}}$  – gustoća asfaltnog uzorka [ $\text{Mg/m}^3$ ]

$m_1$  – masa suhog uzorka [g]

$h$  – srednja vrijednost visina uzorka [mm]

$d$  – srednja vrijednost promjera uzorka [mm]

Tablicom 25. prikazane su izmjerene dimenzije uzoraka te mase uzoraka. Za izračun uzima se srednja vrijednost izmjerenih veličina.

Tablica 25: Dimenzije i mase uzoraka

		OZNAKA UZORKA					
		AM 1	AM 2	AM 3	AM 4	AM 5	AM 6
VISINE UZORKA [mm]	h1	67.86	64.86	65.62	64.96	65.64	65.59
	h2	68.52	64.26	64.16	65.35	66.31	65.21
	h3	68.31	64.15	65.89	64.34	64.87	65.31
	h4	68.45	63.82	65.59	64.44	65.38	65.12
	<b>hsr</b>	<b>68.29</b>	<b>64.27</b>	<b>65.32</b>	<b>64.77</b>	<b>65.55</b>	<b>65.31</b>
PROMJERI UZORKA [mm]	d1	101.15	101.41	101.3	100.88	101.21	101.42
	d2	101.38	101.32	101.32	101.13	101.43	101.46
	d3	101.25	101.31	100.95	100.97	101.38	101.38
	d4	101.13	101.34	100.83	101	101.1	101.32
	d5	101.22	101.26	101.26	101.08	101.32	101.31
	d6	101.12	101.36	101.24	101.14	101.43	100.42
	<b>dsr</b>	<b>101.21</b>	<b>101.33</b>	<b>101.15</b>	<b>101.03</b>	<b>101.31</b>	<b>101.22</b>
	MASA UZORKA [g]	<b>1202.8</b>	<b>1147.7</b>	<b>1187</b>	<b>1190.2</b>	<b>1184</b>	<b>1182.6</b>

Pomoću izraza (10) izračunata je gustoća svakog uzorka, prikazana Tablicom 26:

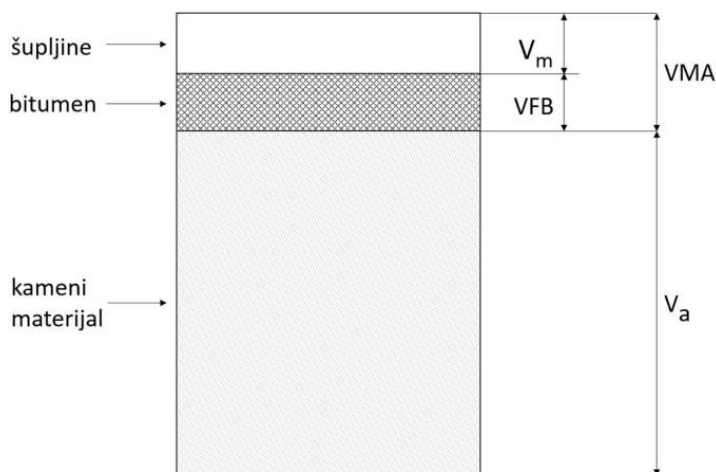
*Tablica 26: Gustoća asfaltnog uzorka*

	AM 1	AM 2	AM 3	AM 4	AM 5	AM 6
<b>GUSTOĆA ASFALTOG UZORKA <math>\rho_{bdim}</math> [Mg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>2.190</b>	<b>2.214</b>	<b>2.262</b>	<b>2.292</b>	<b>2.241</b>	<b>2.250</b>

Za daljnji proračun usvojena je gustoća uzoraka izračunata prema proceduri B.

## 6.6. Volumen šupljina u uzorku

Ukupni volumen asfaltne mješavine sastoji se od volumena šupljina, volumena šupljina u kamenom materijalu te volumena šupljina ispunjenih bitumenom. Za određivanje navedenih vrijednosti primijenjena je norma HRN EN 12697-8 *Određivanje šupljina u asfaltnim uzorcima* [35]. Na Slici 33. su prikazani udjeli volumena u asfaltnoj mješavini.



Slika 33: Volumni udjeli u asfaltnoj mješavini [36]

Volumen šupljina u asfaltnoj mješavini računa se prema izrazu (11):

$$Vm = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100\% \quad (v/v) \quad (11)$$

gdje su:

$V_m$  – udio šupljina u asfaltnoj mješavini izražen u 0,1 % (v/v)

$\rho_m$  – najveća gustoća asfaltne mješavine ( $\text{Mg/m}^3$ )

$\rho_b$  – gustoća asfaltnog uzorka [ $\text{Mg/m}^3$ ]

Volumen šupljina u kamenom materijalu računa se prema izrazu (12):

$$(12) \quad VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} \% (v/v)$$

gdje su:

VMA – udio šupljina u kamenom materijalu, izražen s 0,1% (v/v)

V<sub>m</sub> – udio šupljina u asfaltnom uzorku, izražen s 0,1% (v/v)

B – količina bitumena u mješavini [%]

ρ<sub>b</sub> – gustoća asfaltnog uzorka [Mg/m<sup>3</sup>]

ρ<sub>B</sub> – gustoća bitumena [Mg/m<sup>3</sup>]

Ispuna šupljina bitumenom računa se prema izrazu (13):

$$VFB = \left[ \left( B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} \right) / VMA \right] \times 100\% \quad (13)$$

gdje su:

VFB – ispuna šupljina bitumenom [%]

B – količina bitumena u mješavini [%]

ρ<sub>b</sub> – gustoća asfaltnog uzorka [Mg/m<sup>3</sup>]

ρ<sub>B</sub> – gustoća bitumena [Mg/m<sup>3</sup>]

VMA - udio šupljina u kamenom materijalu, izražen s 0,1% (v/v)

Tablicom 27. su prikazane dobivene vrijednosti volumena šupljina, volumena šupljina u kamenom materijalu i ispunjena šupljina bitumenom, izračunom pomoću izraza (11), (12) i (13) za sve uzorke:

Tablica 27: Rezultati proračuna volumena šupljina, VMA i VFB

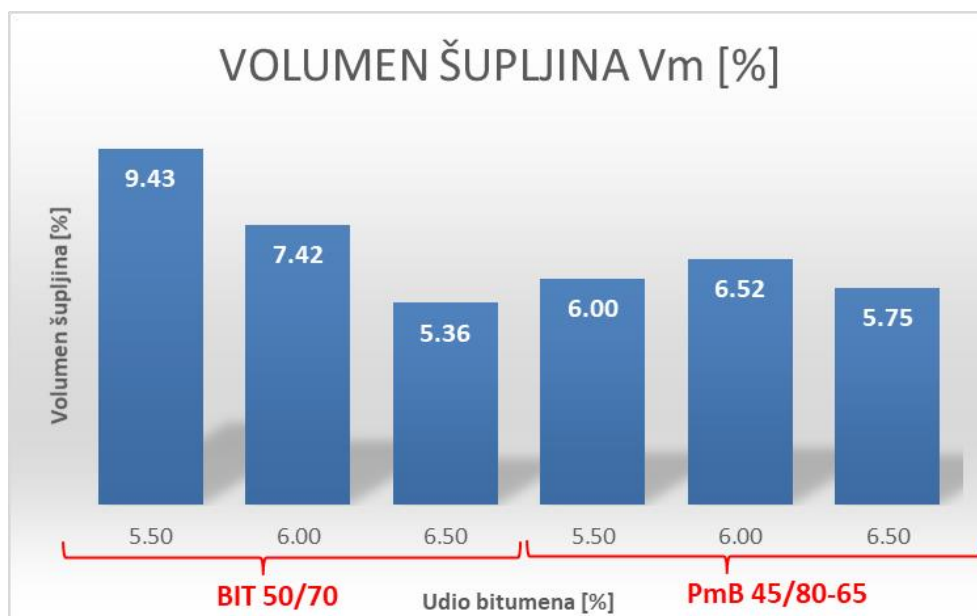
UZORAK	UDIO BITUMENA [%]	GUSTOĆA BITUMENA [Mg/m <sup>3</sup> ]	GUSTOĆA UZORKA $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	MAKSIMALNA GUSTOĆA $\rho_{mc}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ŠUPLJINA $V_m$ [%]	VMA [%]	VFB [%]
AM 1	5.50	1.018	2.271	2.508	9.43	21.70	56.54
AM 2	6.00	1.018	2.304	2.489	7.42	21.00	64.68
AM 3	6.50	1.018	2.338	2.470	5.36	20.28	73.59
AM 4	5.50	1.021	2.358	2.509	6.00	18.71	67.91
AM 5	6.00	1.021	2.328	2.490	6.52	20.20	67.72
AM 6	6.50	1.021	2.329	2.471	5.75	20.57	72.07

Iz dobivenih rezultata može se primijetiti kako se smanjenjem razlike između gustoća smanjuje i udio šupljina u mješavini  $V_m$ . Tehnički propis za asfaltne kolnike [1] za asfaltnu mješavinu SMA 11 propisuje dozvoljene granice volumena šupljina u mješavini između 3% - 6%, a za volumen šupljina u kamenom materijalu VMA nema zahtjeva, odnosno nije definiran u hrvatskim normama.

Volumen šupljina ispunjenih bitumenom VFB dobiven je pomoću volumena udjela šupljina u agregatu te udjela bitumena u uzorku. Smanjenjem udjela šupljina i povećanjem bitumena VFB se povećava.

Propise zadovoljavaju asfaltne mješavine označene zelenom bojom (AM 3, AM 4 te AM 5) od kojih su dvije mješavine sačinjene od polimerom modificiranog bitumena koji se najčešće i upotrebljava u izvedbi asfaltne mješavine od SMA.

Na Slici 34. prikazan je odnos volumena šupljina i udjela bitumena u mješavini. Uzorcima izrađenim od cestograđevnog bitumena, volumen šupljina s porastom bitumena postepeno opada za razliku od uzoraka izrađenih od polimerom modificiranog bitumena gdje volumen šupljina očito ne ovisi o udjelu bitumena jer na početku raste s povećanjem udjela 5,50% na 6,00% pa onda pada sa povećanjem udjela sa 6,00% na 6,50%.



Slika 34: Volumen šupljina u odnosu na udio bitumena u mješavini



## 6.7. Ispitivanje mehaničkih svojstva

Izrađeni uzorci koji su zadovoljili zahtjeve fizikalna svojstva (AM 3, AM 4 i AM 6) izrađeni su po još tri primjeraka od svakog kako bi se mogla ispitati mehanička svojstva istih. Ukupno je izrađeno devet uzoraka, prema jednakom postupku koji je prethodno u radu opsežno opisan, zadovoljavajući sve zahtjeve dane normama.

Za ispitivanje mehaničkih svojstva potrebno je bilo izmjeriti visinu i promjer svakog uzorka.

Tablica 28. s izmjerenim veličinama prikazana je u nastavku:

Tablica 28: Dimenzije i mase uzoraka

	OZNAKA UZORKA								
	AM 3-I	AM 3-II	AM 3-III	AM 4-I	AM 4-II	AM 4-III	AM 6-I	AM 6-II	AM 6-III
h1	65.46	66.5	65.49	66.7	61.6	66.92	64.31	65.47	65.33
h2	64.17	66.37	65.1	66.8	61.6	67.4	64.27	65.32	65.28
h3	65.05	66.02	65.49	67.3	61.46	67.08	64.58	65.49	65.78
h4	65.09	66.26	65.28	66.3	62.66	67.3	64.26	65.16	66.07
hsr	<b>64.94</b>	<b>66.29</b>	<b>65.34</b>	<b>66.78</b>	<b>61.83</b>	<b>67.18</b>	<b>64.36</b>	<b>65.36</b>	<b>65.62</b>
d1	101.3	101.08	101.33	101.22	101.09	101.32	101.42	101.49	101.4
d2	101.59	101.4	101.43	101.32	101.3	101.22	101.28	101.29	101.08
d3	101.23	101.46	101.21	101.18	101.2	100.6	101.3	101.09	101.39
d4	101.57	101.57	101.6	101.43	100.81	101.2	101.36	101.23	101.7
d5	101.33	101.49	101.49	101.31	101.31	100.9	101.06	101.26	101.95
d6	101.46	101.33	101.53	101.36	101.44	101.26	101.5	101.46	101.17
dsr	<b>101.41</b>	<b>101.39</b>	<b>101.43</b>	<b>101.30</b>	<b>101.19</b>	<b>101.08</b>	<b>101.32</b>	<b>101.30</b>	<b>101.45</b>
MASA UZORKA [g]	<b>1185.4</b>	<b>1183.7</b>	<b>1187</b>	<b>1190.1</b>	<b>1185.4</b>	<b>1190.3</b>	<b>1176.8</b>	<b>1186.2</b>	<b>1181</b>

- **Marshallovo ispitivanje prema normi HRN EN 12697-34**

Marshallovo ispitivanje provodi se prema normi HRN EN 12697-34 *Marshallovo ispitivanje* [37] na uzorcima izrađenim udarnim zbijanjem. Uzorci se prije ispitivanja postavljaju u vodenu kupelj na 60°C, 40 - 60 min. Prije ispitivanja potrebno je zagrijati i čeljust Marshallove preše, na 60°C najmanje 30 minuta. Takav uzorak se potom postavlja u zagrijanu čeljust Marshallove preše. Uzorak je potrebno postaviti centralno u čeljust i zatim pokrenuti softverom ispitivanje. Uzorak preuzima maksimalno opterećenje kako bi se ostvario konstantan prirast deformacije. Ispitivanje je završeno nakon što se postigne maksimalna vrijednost sile.

Ispitivanje je provedeno na tri uzoraka izrađenih od mješavina koje su zadovoljile propisana fizikalna svojstva. Na Slici 35. je prikazano ispitivanje u Marshallovoj preši.

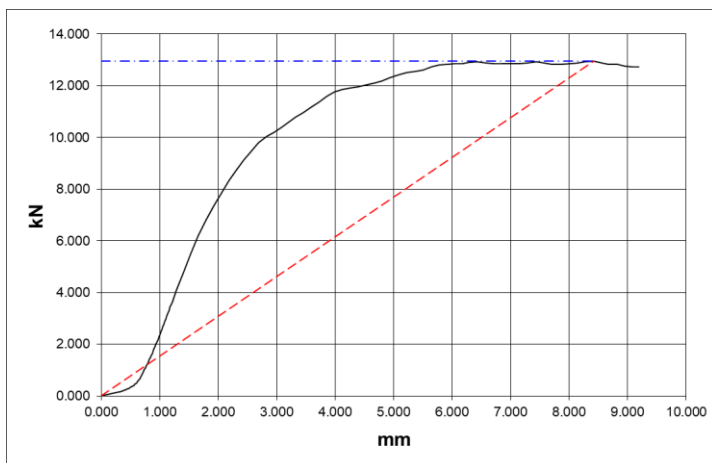


Slika 35: Ispitivanje uzorka u Marshallovoj preši

Rezultati ispitivanja su:

- Marshallov stabilitet **S** - maksimalno opterećenje uzorka u kN.
- Tečenje **F** - deformacija uzorka pri maksimalnom opterećenju u mm, manja od nominalne deformacije.
- Marshallov koeficijent **S/F** – omjer stabiliteta i tečenja

Za uzorak **AM 3-III** koji sadrži **6.5%** udjela cestograđevnog bitumena, Slika 36. stabilitet/tečenje je prikazan u nastavku:

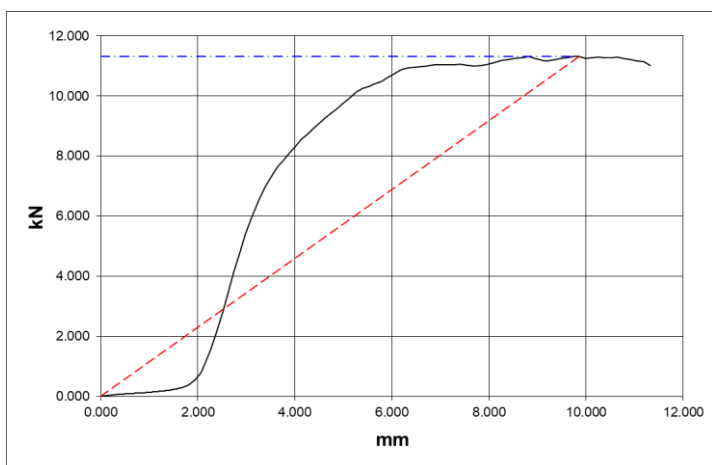


Slika 36: Stabilitet/tečenje za uzorak AM 3-III

Očitani podaci iz grafa jesu:

- Marshallov stabilitet **S=12,39 kN**
- Tečenje **F=8,43 mm**
- Marshallov koeficijent **S/F=1,47 kN/mm**

Za uzorak **AM 4-II** koji sadrži **5.50%** udjela polimerom modificiranog bitumena, Slika 37. stabilitet/tečenje je prikazan u nastavku:

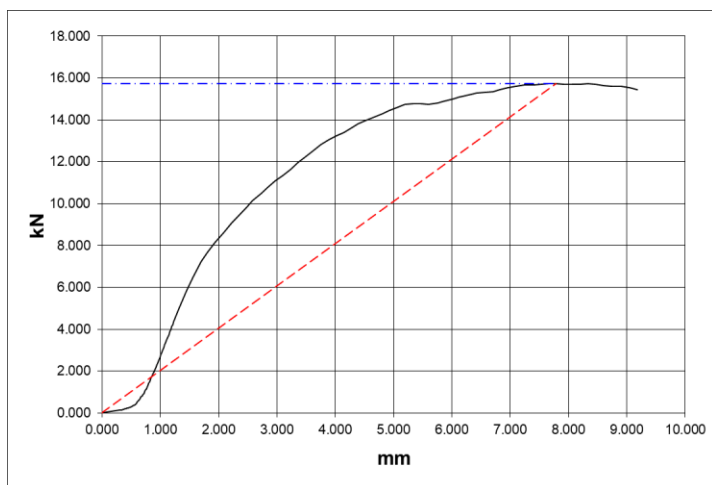


Slika 37: Stabilitet/tečenje za uzorak AM 4-II

Očitani podaci iz grafa jesu:

- Marshallov stabilitet **S=11,87 kN**
- Tečenje **F=9,85 mm**
- Marshallov koeficijent **S/F=1,21 kN/mm**

Za uzorak **AM 6-II** koji sadrži **6.50%** udjela polimerom modificiranog bitumena, Slika 38. stabilitet/tečenje je prikazan u nastavku:



Očitani podaci iz grafa jesu:

- Marshallov stabilitet **S=15,04 kN**
- Tečenje **F=7,79 mm**
- Marshallov koeficijent **S/F=7,93 kN/mm**

Slika 38: Stabilitet/tečenje za uzorak AM 6-II

Uzorci ispitani u Marshallovoj preši prikazani su na Slici 39. Može se primijetiti kako su uzorci nakon ispitivanja deformirani i nije jasno izražen slom uzorka zbog velikog udjela bitumena, punila i velikih zrna koje mješavina sadrži te zbog temperature na kojoj se uzorci ispituju (potopljeni u vodenoj kupelji temperature 60 °C).



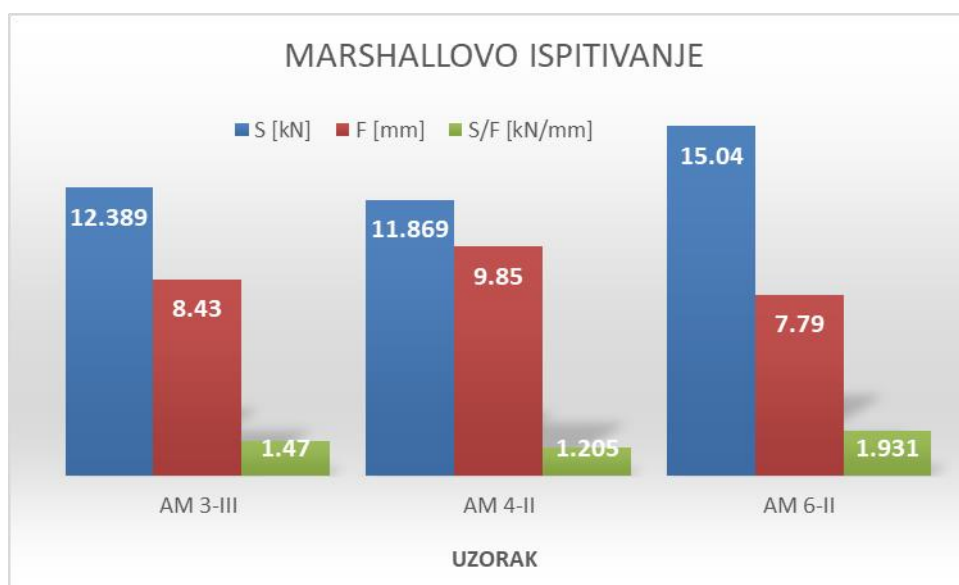
Slika 39: Uzorci nakon ispitivanja u Marshallovoj preši

Tablicom 29. su prikazani svi rezultati Marshallovog ispitivanja:

Tablica 29: Rezultati Marshallovog ispitivanja

	Bitumen [%]	S [kN]	F [mm]	S/F [kN/mm]
AM 3-III	6.5	12.389	8.43	1.47
AM 4-II	5.5	11.869	9.85	1.205
AM 6-II	6.5	15.04	7.79	1.931

Slikom 40. prikazani su dobiveni rezultati Marshallovog ispitivanja:



Slika 40: Rezultati Marshallovog ispitivanja

Prema dobivenim rezultatima najveću vrijednost maksimalnog opterećenja u iznosu od 15,04 kN može podnijeti uzorak AM 6-II koji sadrži 6,50% polimerom modificirani bitumen, a najmanju vrijednost od 11,87 kN, uzorak AM 4-II koji sadrži 5,50 % polimerom modificirani bitumen. Deformacija uzoraka je manja što je veći udio bitumena te uzorci s većim udjelom bitumena mogu podnesti veće maksimalno opterećenje.

Također, u usporedbi s cestograđevnim bitumenom (AM 3-III), uzorak od polimerom modificiranog bitumena (AM 6-II) daje bolja mehanička svojstva za isti udio bitumena u iznosu od 6,50%. Zaključuje se da omjer S/F raste s porastom udjela bitumena.

## 6.8. Određivanje vlačne čvrstoće neizravnom vlačnom metodom

Ispitivanje se provodi prema normi HRN EN 12697-23 *Određivanje vlačne čvrstoće asfaltnih uzoraka neizravnom vlačnom metodom* [38] na uzorku temperature u rasponu 5-25 °C. Uzorak je potrebno postaviti tako da se sila može nanijeti dijametralno u čeljust uređaja koji također treba biti na temperaturi između 15-25 °C. Nakon što se unesu potrebni ulazni podaci u softver ispitivanje započinje te se nanosi kontinuirani prirast deformacije od 50 mm/min. Ispitivanje je završeno nakon što se postigne maksimalna vrijednost sile, odnosno slom uzorka. U ovom radu provedeno je ispitivanje na uzorcima temperature 5 °C i 25 °C. Na Slici 41. je prikazano ispitivanje neizravne vlačne čvrstoće na uzorku.



Slika 41: Ispitivanje neizravne vlačne čvrstoće

Rezultati ispitivanja su:

- Vršno opterećenje **P** [kN]
- Pomak **d** [mm]

Pomoću izraza (14) računa se neizravna vlačna čvrstoća:

$$ITS = \frac{2P}{\pi D H} \quad (14)$$

gdje su:

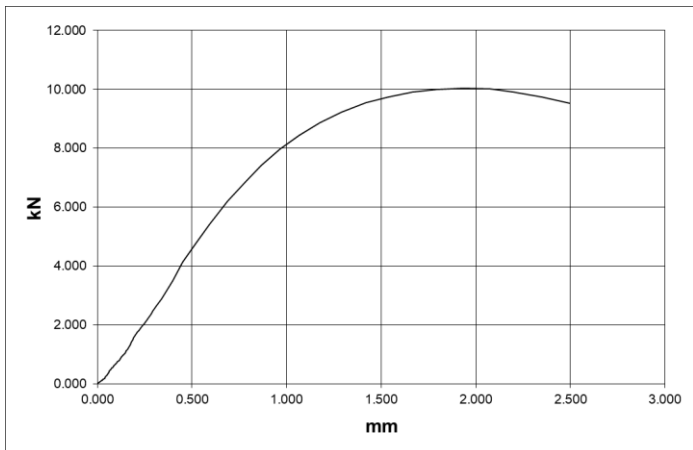
ITS – neizravna vlačna čvrstoća [GPa]

P – vršno opterećenje [kN]

D – srednji promjer uzorka [mm]

H – srednja visina uzorka [mm]

Za uzorak **AM 3-I** koji sadrži **6.50%** udjela cestograđevnog bitumena, Slika 42. za vršno opterećenje/pomak ispitan na **25 °C** prikazan je u nastavku:

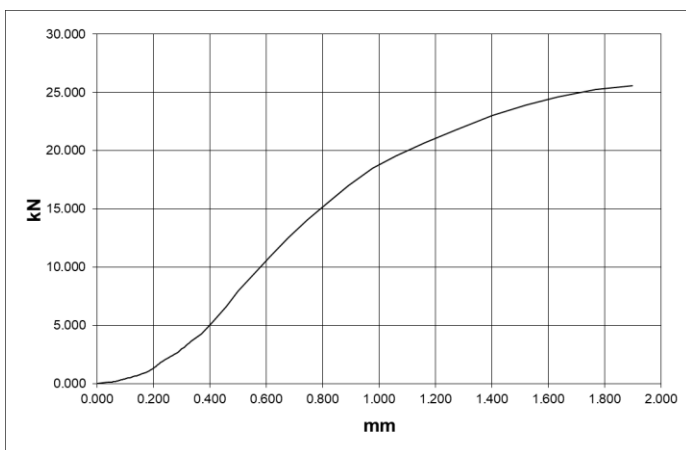


Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(25\text{ °C})}=10,04\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(25\text{ °C})}=1.93\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(25\text{ °C})}=0,000971\text{ GPa}$**

Slika 42: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AM 3-I

Za uzorak **AM 3-II** koji sadrži **6.50%** udjela cestograđevnog bitumena, Slika 43. za vršno opterećenje/pomak ispitan na **5 °C** prikazan je u nastavku:



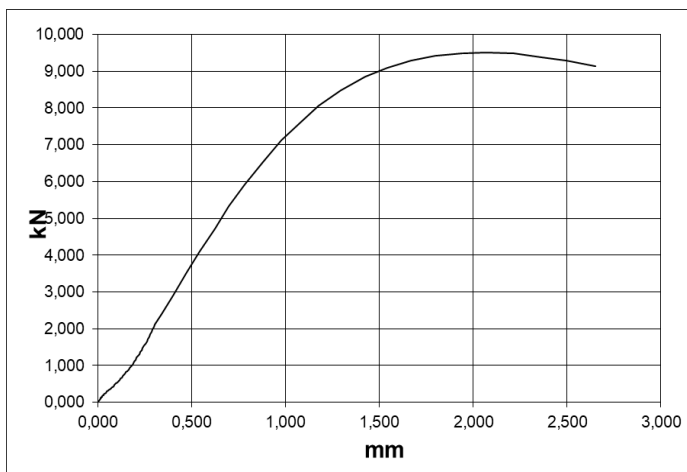
Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(5\text{ °C})}=25,57\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(5\text{ °C})}=1.9\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(5\text{ °C})}=0,002421\text{ GPa}$**

Slika 43: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AM 3-II



Za uzorak **AM 4-I** koji sadrži **5.50%** udjela polimerom modificiranog bitumena, Slika 44. vršno opterećenje/pomak ispitan na **25 °C** prikazan je u nastavku:

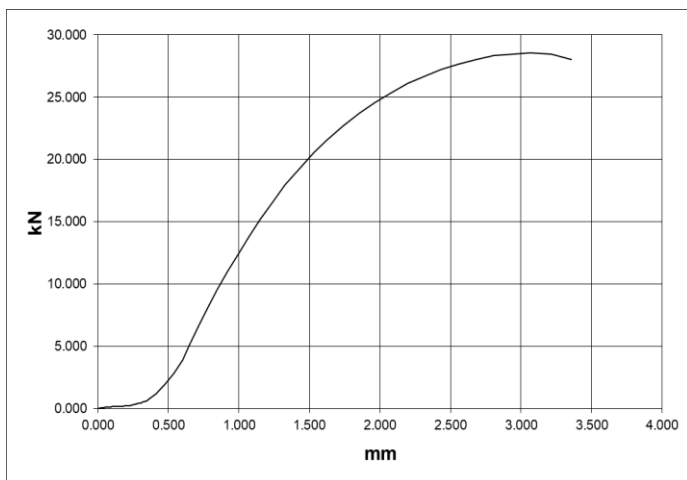


Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(25\text{ °C})}=9,51\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(25\text{ °C})}=2,07\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(25\text{ °C})}=0,000895\text{ GPa}$**

Slika 44: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AM 4-I

Za uzorak **AM 4-III** koji sadrži **5.50%** udjela polimerom modificiranog bitumena, Slika 45. vršno opterećenje/pomak ispitan na **5 °C** prikazan je u nastavku:

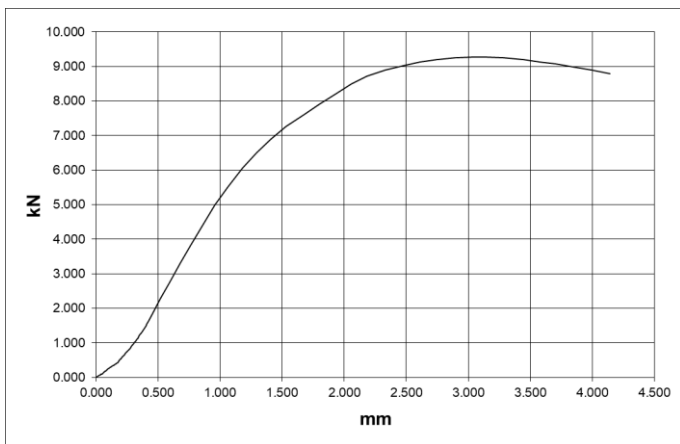


Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(5\text{ °C})}=28,56\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(5\text{ °C})}=3,07\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(5\text{ °C})}=0,002677\text{ GPa}$**

Slika 45: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AM 4-III

Za uzorak **AM 6-I** koji sadrži **6.50%** udjela polimerom modificiranog bitumena, Slika 46. vršno opterećenje/pomak ispitan na **25 °C** prikazan je u nastavku:

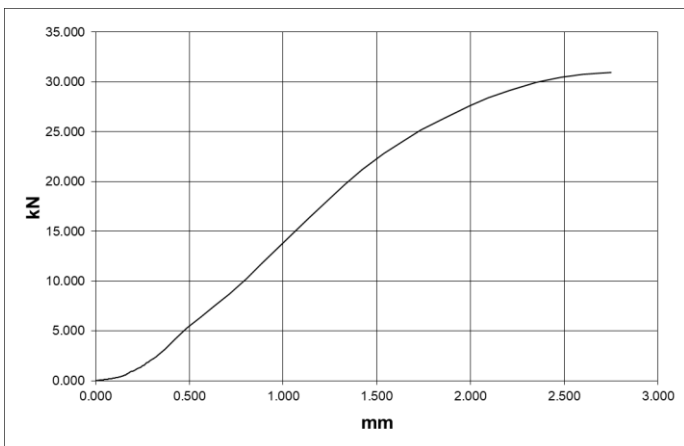


Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(25\text{ °C})}=9,271\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(25\text{ °C})}=3,02\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(25\text{ °C})}=0,000905\text{ GPa}$**

Slika 46: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AM 6-I

Za uzorak **AM 6-III** koji sadrži **6.50%** udjela polimerom modificiranog bitumena, Slika 47. vršno opterećenje/pomak ispitan na **5 °C** prikazan je u nastavku:

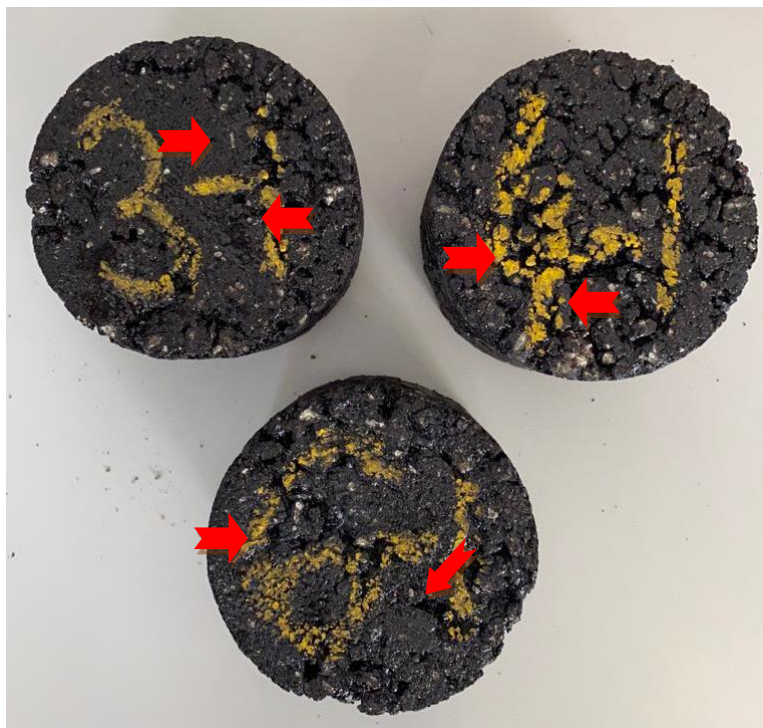


Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(5\text{ °C})}=30,926\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(5\text{ °C})}=2,751\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(5\text{ °C})}=0,002960\text{ GPa}$**

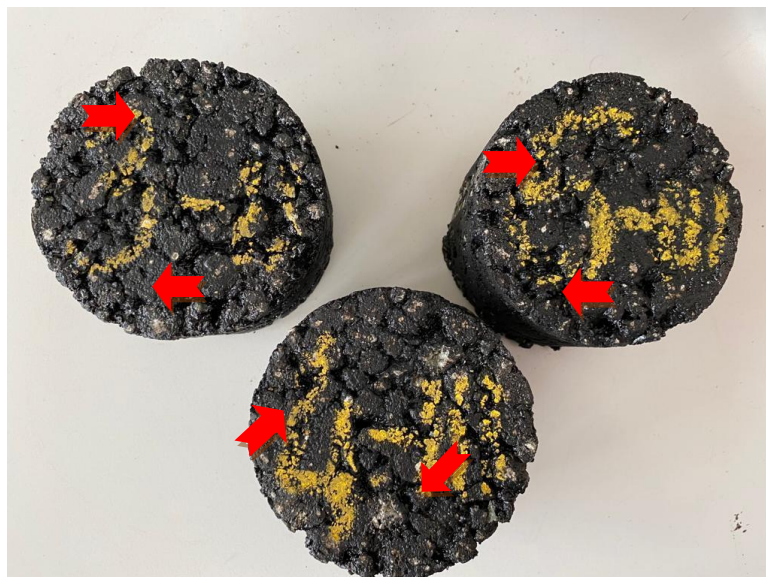
Slika 47: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AM 6-III

Uzorci ispitani na neizravnu vlačnu čvrstoću na temperaturi od 25 °C prikazani su na Slici 48.



Slika 48: Uzorci nakon ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće na 25 °C

Uzorci ispitani na neizravnu vlačnu čvrstoću na temperaturi od 5 °C prikazani su na Slici 49.



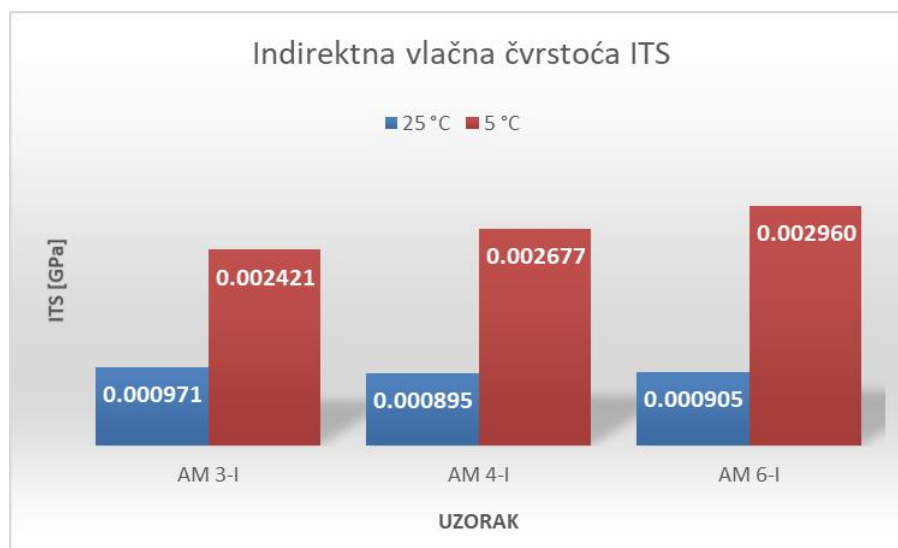
Slika 49: Uzorci nakon ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće na 5 °C

Tablicom 30. su prikazani rezultati dobiveni ispitivanjem neizravne vlačne čvrstoće:

Tablica 30: Rezultati ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće na 25 °C i 5 °C

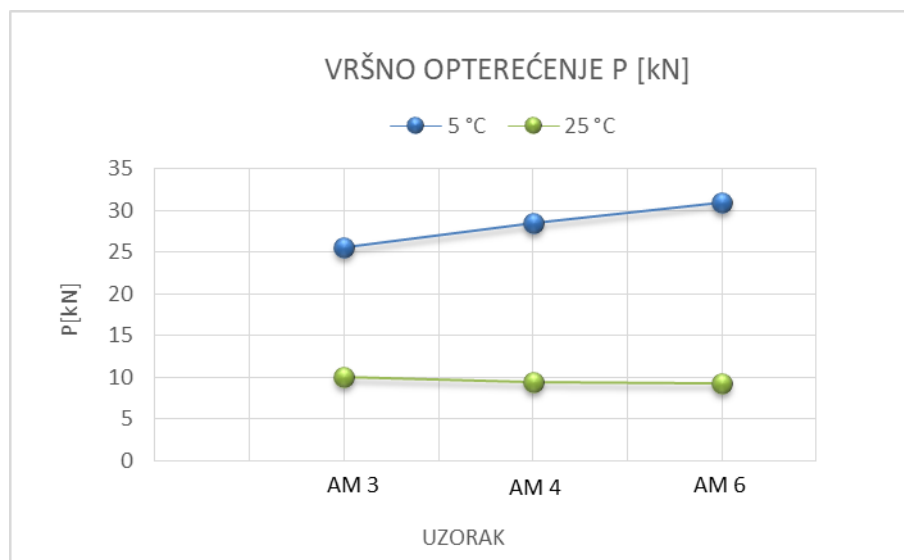
Bitumen [%]	25 °C				5 °C			
	Uzorak	P [kN]	d [mm]	ITS [GPa]	Uzorak	P [kN]	d [mm]	ITS [GPa]
6.5	AM 3-I	10.04	1.93	0.000971	AM 3-II	25.57	1.900	0.002421
5.5	AM 4-I	9.51	2.07	0.000895	AM 4-III	28.56	3.070	0.002677
6.5	AM 6-I	9.271	3.02	0.000905	AM 6-III	30.926	2.751	0.002960

Prema dobivenim rezultatima ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće, uzorci koji su tretirani u zračnoj komori na 5 °C pokazali su puno veću vlačnu čvrstoću od uzoraka tretiranih na 25 °C. Najveću vlačnu čvrstoću u iznosu od 0.002960 GPa ima uzorak broj AM 6-III koji sadrži 6,50% udjela polimerom modificiranog bitumena i koji je tretiran na 5 °C, a najmanju u iznosu od 0,000895 GPa, uzorak AM 4-I koji sadrži 5,50% bitumena i koji je tretiran na 25 °C. Na Slici 50. su uspoređeni rezultati uzoraka ispitanih na 25 °C i 5 °C.



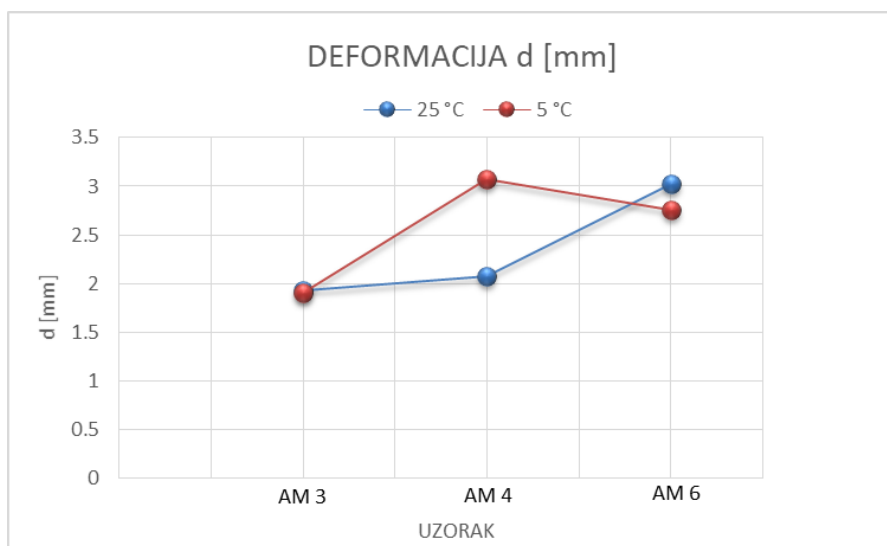
Slika 50: Usporedba vrijednosti ITS-a na različitim temperaturama

Najveće vršno opterećenje u iznosu od 30,926 kN ima uzorak AM 6-III s udjelom bitumena od 6,50% kada je uzorak tretiran na 5 °C te je zanimljivo da ista mješavina (uzorak AM 6-I) ima najmanje vršno opterećenje u iznosu od 9,271 kN kada je uzorak tretiran na 25 °C. Slikom 51. prikazana je usporedba vršnog opterećenja za različite uzorke na različitoj temperaturi.



Slika 51: Usporedba vršnog opterećenja uzoraka

Na temperaturi od 25 °C s porastom udjela bitumena, deformacija uzorka raste, a vršno opterećenje opada, dok na temperaturi od 5 °C je situacija obrnuta, porastom udjela bitumena deformacija uzorka pada, a vršno opterećenje raste. Kao i u ispitivanju u Marshallovoj preši, bolja svojstva imaju uzorci koji sadrže polimerom modificirani bitumen. Slikom 52. prikazana je usporedba deformacije za sve uzorke ispitane na različitim temperaturama.

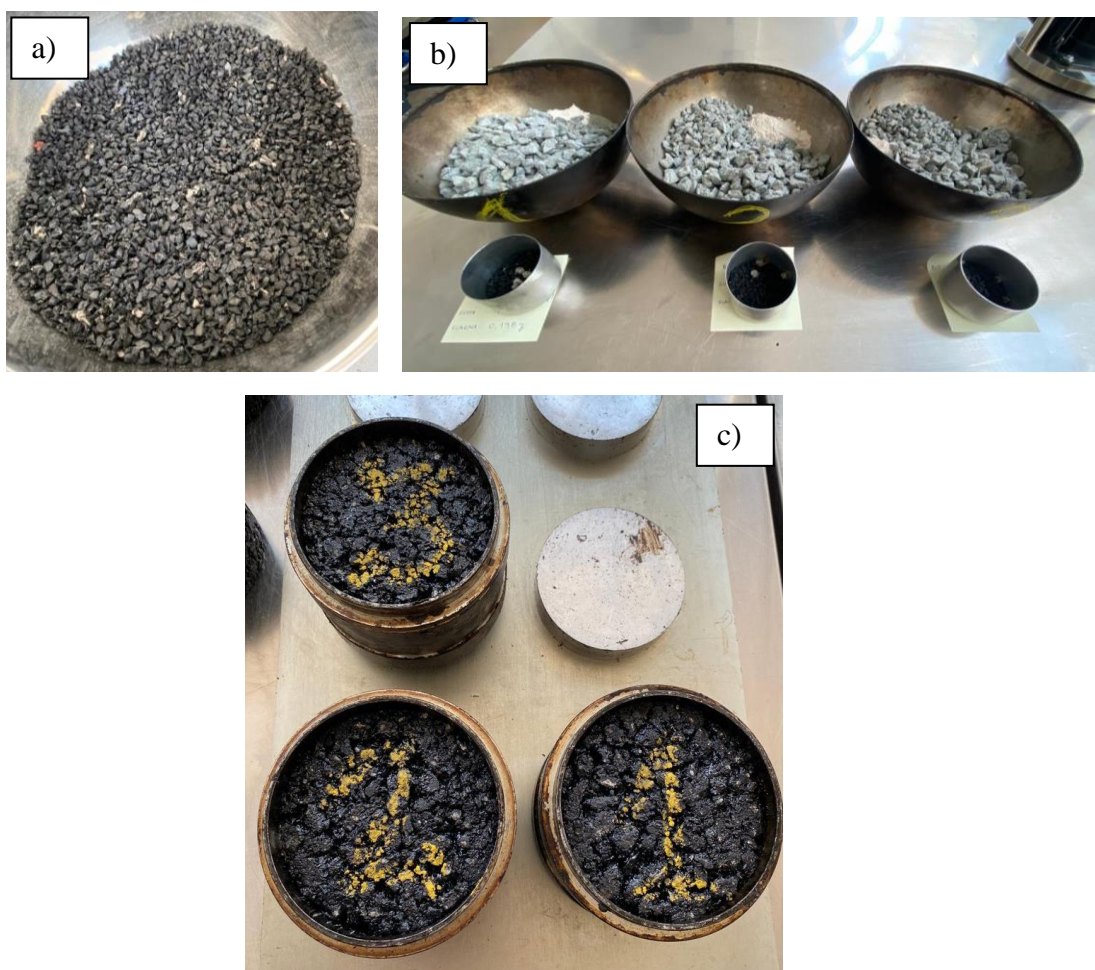


Slika 52: Usporedba deformacija uzoraka

### 6.9. Izrada uzoraka SMA asfalta s dodatkom gume

Za potrebe istraživanja izrade uzoraka s dodatkom gume, izrađeno je tri uzorka prema projektiranim mješavinama: AM 1, AM i AM 3. Navedene mješavine sadrže cestograđevni bitumen u udjelu od 5,50%, 6,00% i 6,50%. U mješavinu je dodan granulat gume u udjelu od 1,00% ukupne mase uzorka, odnosno 12 g.

Dodavanje gume u mješavinu izvršeno je tzv. „mokrim postupkom“. Prilikom zagrijavanja komponenti dodan je granulat gume u bitumen te je sve zajedno pomiješano u homogenu smjesu. Na Slici 53. su prikazani granulat gume te izvagane komponente za uzorke od gume i naposljetku izrađeni uzorci.



Slika 53: a) Granulat gume, b) Izvagane komponente, c) Uzorci s gumom

### 6.10. Fizikalna svojstva SMA s dodatkom gume

Prema prethodno opisanom postupku određivanja fizikalnih svojstva uzoraka, ispitani su uzorci s dodatkom gume. U Tablici 31. su prikazane dimenzije i mase uzoraka:

Tablica 31: Izmjerene dimenzije i mase uzoraka s gumom

	OZNAKA UZORKA		
	AMG 1	AMG 2	AMG 3
h1	69.67	69.26	68.47
h2	68.61	69.09	68.65
h3	68.5	68.09	67.67
h4	68.1	68.71	68
<b>hsr</b>	<b>68.72</b>	<b>68.79</b>	<b>68.20</b>
d1	100.63	101.21	101.35
d2	100.96	101.28	100.71
d3	100.71	101.24	101.04
d4	100.91	101.54	101.26
d5	100.95	101.47	101.32
d6	100.78	101.44	101.61
<b>dsr</b>	<b>100.82</b>	<b>101.36</b>	<b>101.22</b>
MASA UZORKA [g]	<b>1183.7</b>	<b>1184.2</b>	<b>1182.1</b>

UZORAK	MASA SUHOG UZORKA [g]	MASA UZORKA U VODI [g]	MASA ZASIĆENOG POVRŠINSKI SUHOG UZORKA [g]	GUSTOĆA VODE [Mg/m <sup>3</sup> ]
	<b>m<sub>1</sub></b>	<b>m<sub>2</sub></b>	<b>m<sub>3</sub></b>	<b>ρ<sub>w</sub></b>
AMG 1	1183.7	669.1	1201.00	0.9971
AMG 2	1184.2	666.4	1197.3	0.9971
AMG 3	1182.1	658.9	1192.4	0.9971



Tablicom 32. su prikazane vrijednosti gustoće uzoraka:

Tablica 32: Gustoća uzoraka s dodatkom gume

	AMG 1	AMG 2	AMG 3
<b>GUSTOĆA ASFALTNE MJEŠAVINE <math>\rho_{mc}</math> [Mg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>2.435</b>	<b>2.417</b>	<b>2.399</b>
<b>GUSTOĆA ASFALTOG UZORKA <math>\rho_{bdim}</math> [Mg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>2.157</b>	<b>2.133</b>	<b>2.154</b>
<b>GUSTOĆA ASFALTOG UZORKA <math>\rho_{bssd}</math> [Mg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>2.219</b>	<b>2.224</b>	<b>2.209</b>

U Tablici 33. su prikazane vrijednosti volumena šupljina, VMA i VFB:

Tablica 33: Volumen šupljina, VMA i VFB za uzorke s gumom

UZORAK	UDIO BITUMENA [%]	GUSTOĆA BITUMENA [Mg/m <sup>3</sup> ]	GUSTOĆA UZORKA $\rho_{bssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	MAKSIMALNA GUSTOĆA $\rho_{mc}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ŠUPLJINA $V_m$ [%]	VMA [%]	VFB [%]
AMG 1	5.50	1.018	2.294	2.435	5.79	18.18	68.16
AMG 2	6.00	1.018	2.280	2.417	5.67	19.11	70.33
AMG 3	6.50	1.018	2.253	2.399	6.09	20.47	70.27

Od izrađenih uzoraka s gumom fizikalna svojstva zadovoljavaju uzorci AMG 1 i AMG 2, s obzirom da su dopuštene vrijednosti udjela šupljina u uzorku 3%-6%. Udio šupljina u kamenom materijalu i udio šupljina ispunjenih bitumenom nisu definirani propisom, odnosno nema određenih zahtjeva koje moraju ispuniti normom.

### 6.11. Mehanička svojstva SMA s dodatkom gume

Nakon što su napravljene probni uzorci s dodatkom gume, izrađeno je po tri uzorka od svake mješavine (AMG 1, AMG2 i AMG 3) kako bi se ispitala mehanička svojstva uzoraka SMA asfalta s dodatkom gume te usporedila njihova svojstva i moguće razlike u dobivenim rezultatima u odnosu na običnu SMA mješavinu. Izrađeni uzorci SMA s gumom prikazani su na Slici 54.



Slika 54: Izrađeni uzorci s dodatkom gume

Dimenzije i mase uzoraka SMA s dodatkom gume prikazani su u Tablici 34:

Tablica 34: Dimenzije i mase uzoraka s dodatkom gume

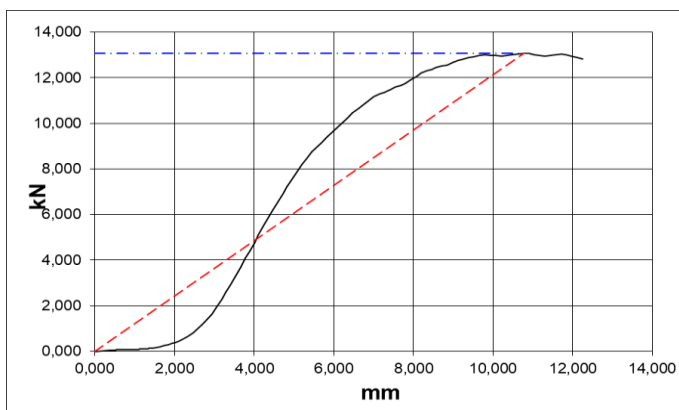
	OZNAKA UZORKA								
	AMG 1-I	AMG 1-II	AMG 1-III	AMG 2-I	AMG 2-II	AMG 2-III	AMG 3-I	AMG 3-II	AMG 3-III
h1	68.2	68.4	68.38	66.57	66.92	70.57	69.5	68.6	68.74
h2	68.7	67.75	68.12	67.56	68.55	68.57	69.37	67.48	68.16
h3	69.27	69.27	68.85	66.72	68.37	68.25	68.15	67.05	67.44
h4	68.11	66.89	68.42	66.52	68.22	70.29	68.17	68.7	67.76
<b>hsr</b>	<b>68.57</b>	<b>68.08</b>	<b>68.44</b>	<b>66.84</b>	<b>68.02</b>	<b>69.42</b>	<b>68.80</b>	<b>67.96</b>	<b>68.03</b>
d1	101.4	101.95	101.37	101.48	101.23	100.07	101.11	101.28	100.4
d2	101.21	101.2	101.1	101.45	101.12	100.45	101.2	101.2	101.3
d3	101.35	101.38	101.08	101.13	101.32	100.16	101.18	101.4	101.13
d4	101.27	101.06	101.26	101.56	101.4	100.4	101.38	101.36	100.7
d5	101.01	101	101.31	101.42	100.9	101.51	101.38	101.28	100.9
d6	101.03	100.5	101.13	101.13	100.97	100.6	101.09	101.14	101.07
<b>dsr</b>	<b>101.21</b>	<b>101.18</b>	<b>101.21</b>	<b>101.36</b>	<b>101.16</b>	<b>100.53</b>	<b>101.22</b>	<b>101.28</b>	<b>100.92</b>
MASA UZORKA [g]	1188.1	1182.3	1184.7	1184	1185.3	1186.8	1186.7	1184.2	1182.1

## 6.12. Marshallovo ispitivanje SMA s dodatkom gume

Prema opisanom postupku Marshallovog ispitivanja za uzorke SMA bez gume, na isti su način ispitana svojstva uzoraka s dodatkom gume:

Za uzorak **AMG 1-I** koji sadrži **5.50%** udjela cestograđevnog bitumen Marshallovo ispitivanje nije uspjelo zbog poteškoća prilikom upravljanja uređaja za ispitivanje.

Za uzorak **AMG 2-I** koji sadrži **6.00%** udjela cestograđevnog bitumena, Slika 55. stabilitet/tečenje je prikazan u nastavku:

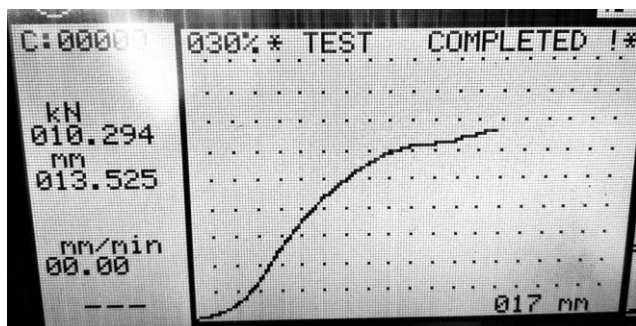


Slika 55: Graf stabilitet/tečenje za uzorak AMG 2-I

Očitani podaci iz grafa jesu:

- Marshallov stabilitet **S=13,069 kN**
- Tečenje **F=10,76 mm**
- Marshallov koeficijent **S/F=1,129 kN/mm**

Za uzorak **AMG 3-I** koji sadrži **6.50%** udjela cestograđevnog bitumen. Slika 56. stabilitet/tečenje je prikazan u nastavku:



Slika 56: Graf stabilitet/tečenje za uzorak AMG 3-I

Očitani podaci iz grafa jesu:

- Marshallov stabilitet **S=10,294 kN**
- Tečenje **F=13,525 mm**
- Marshallov koeficijent **S/F=0,761 kN/mm**

Uzorci SMA s dodatkom gume nakon ispitivanja prikazani su na Slici 57:



Slika 57: Uzorci s dodatkom gume nakon Marshallovog ispitivanja

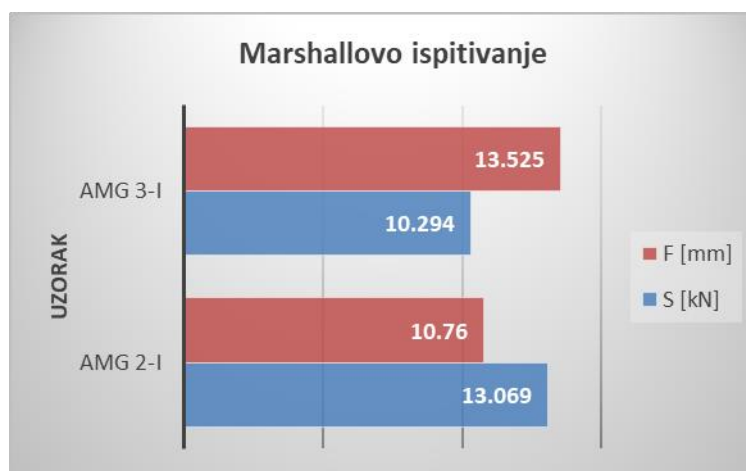
Ispitivanje na uzorku AMG 1-I nije bilo uspješno zbog poteškoća prilikom ispitivanja i uzorak je doživio potpuni slom pa su rezultati istog zanemareni. Ostala dva uzorka AMG 2-I i AMG 3-I imaju jasno izraženu krivulju sloma.

U Tablici 35. su prikazani rezultati ispitivanja Marshallovog testa na uzorcima s dodatkom gume:

Tablica 35: Rezultati Marshallovog ispitivanja na uzorcima s dodatkom gume

	Bitumen [%]	S [kN]	F [mm]	S/F [kN/mm]
<b>AMG 1-I</b>	<b>5.50</b>	/	/	/
<b>AMG 2-I</b>	<b>6.00</b>	13.069	10.76	1.129
<b>AMG 3-I</b>	<b>6.50</b>	10.294	13.525	0.761

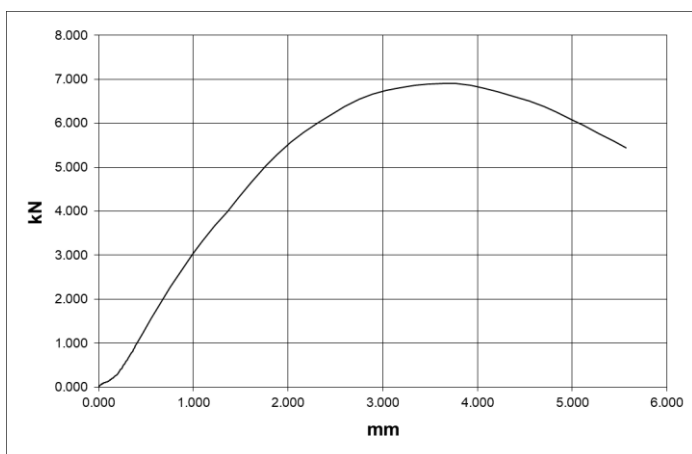
Prema rezultatima Marshallovog ispitivanja na uzorcima SMA s dodatkom gume, povećanjem udjela bitumena pada Marshallov stabilitet odnosno maksimalno opterećenje, a raste deformacija. Povećanjem udjela bitumena omjer maksimalnog opterećenja i deformacije pada. Zaključuje se da uzorci s manjim udjelom bitumena imaju bolja svojstva, preuzimaju veće maksimalno opterećenje uz manje deformacije nego li uzorci s većim udjelom bitumena. (Slika 58.)



Slika 58: Usporedba rezultata Marshallovog ispitivanja

### 6.13. Određivanje vlačne čvrstoće SMA asfalta s dodatkom gume

Za uzorak **AMG 1-II** koji sadrži **5.50%** udjela cestograđevnog bitumena, Slika 59. vršno opterećenje/pomak ispitan na **25 °C** prikazan je u nastavku:

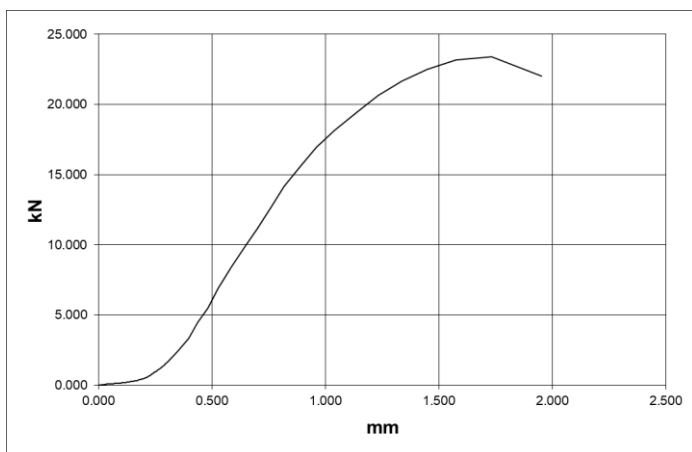


Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(25\text{ °C})}=6,906\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(25\text{ °C})}=3,63\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(25\text{ °C})}=0,000638\text{ GPa}$**

Slika 59: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AMG 1-II

Za uzorak **AMG 1-III** koji sadrži **5.50%** udjela cestograđevnog bitumena, Slika 60. vršno opterećenje/pomak ispitan na **5 °C** prikazan je u nastavku:

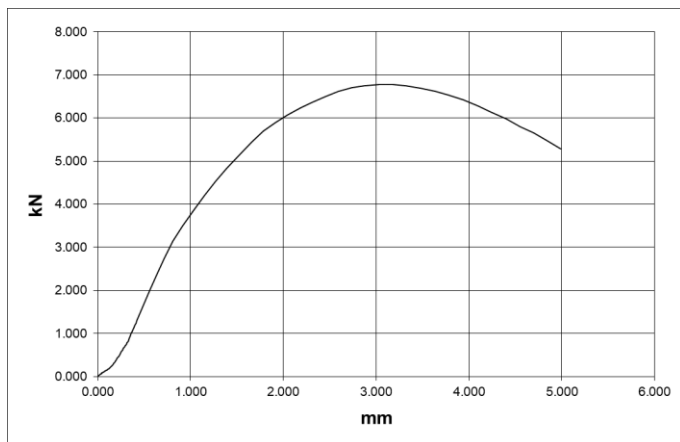


Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(5\text{ °C})}=23,389\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(5\text{ °C})}=1,73\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(5\text{ °C})}=0,002151\text{ GPa}$**

Slika 60: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AMG 1-III

Za uzorak **AMG 2-II** koji sadrži **6,00%** udjela cestograđevnog bitumena, Slika 61. vršno opterećenje/pomak ispitan na **25 °C** prikazan je u nastavku:

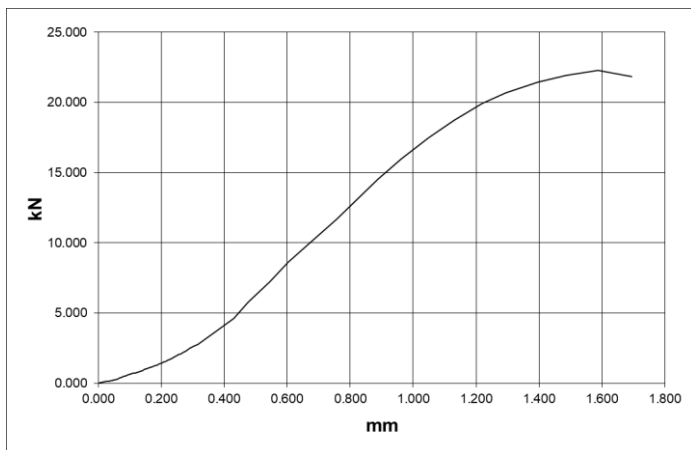


Slika 61: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AMG 2-II

Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(25\text{ °C})}=6,776\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(25\text{ °C})}=3,03\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(25\text{ °C})}=0,000627\text{ GPa}$**

Za uzorak **AMG 2-III** koji sadrži **6,00%** udjela cestograđevnog bitumena, Slika 62. vršno opterećenje/pomak ispitan na **5 °C** prikazan je u nastavku:

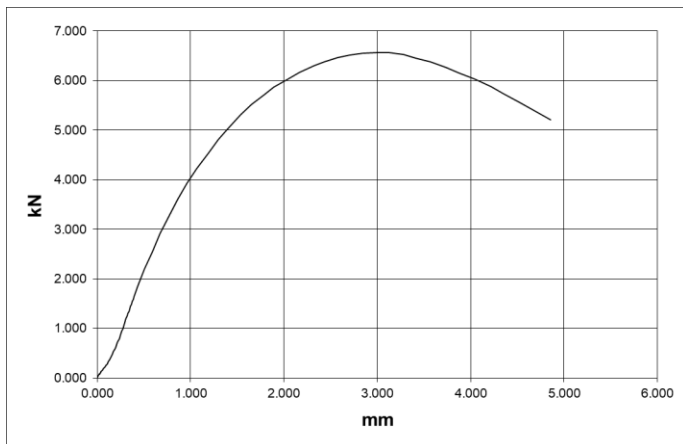


Slika 62: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AMG 2-III

Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(5\text{ °C})}=22,277\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(5\text{ °C})}=1,59\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(5\text{ °C})}=0,002033\text{ GPa}$**

Za uzorak **AMG 3-II** koji sadrži **6,50%** udjela cestograđevnog bitumena, Slika 63. vršno opterećenje/pomak ispitan na **25 °C** prikazan je u nastavku:

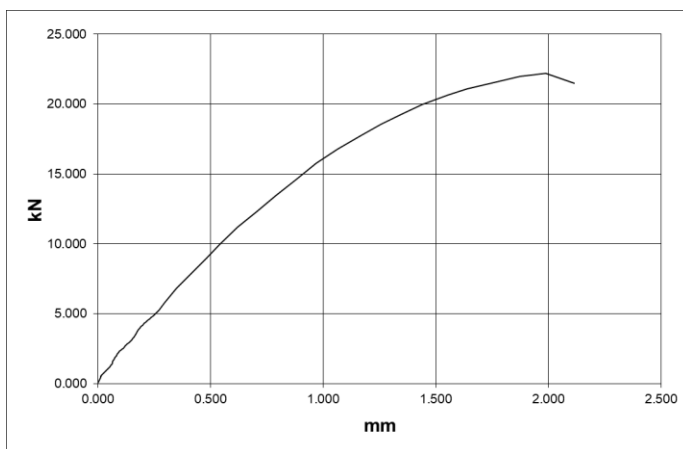


Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(25\text{ °C})}=6,564\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(25\text{ °C})}=3,13\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(25\text{ °C})}=0,000607\text{ GPa}$**

Slika 63: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 25 °C za AMG 3-II

Za uzorak **AMG 3-III** koji sadrži **6,50%** udjela cestograđevnog bitumena, Slika 64. vršno opterećenje/pomak ispitan na **5 °C** prikazan je u nastavku:



Očitani podaci iz grafa jesu:

- Vršno opterećenje  
 **$P_{(5\text{ °C})}=22,185\text{ kN}$**
- Pomak  **$d_{(5\text{ °C})}=1,99\text{ mm}$**
- Neizravna vlačna čvrstoća  
 **$ITS_{(5\text{ °C})}=0,002058\text{ GPa}$**

Slika 64: Vršno opterećenje/pomak ispitan na 5 °C za AMG 3-III



Uzorci ispitani na neizravnu vlačnu čvrstoću na temperaturi od 25 °C prikazani su na Slici 65.



Slika 65: Uzorci nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na temperaturi od 25 °C

Uzorci ispitani na neizravnu vlačnu čvrstoću na temperaturi od 5 °C prikazani su na Slici 66.



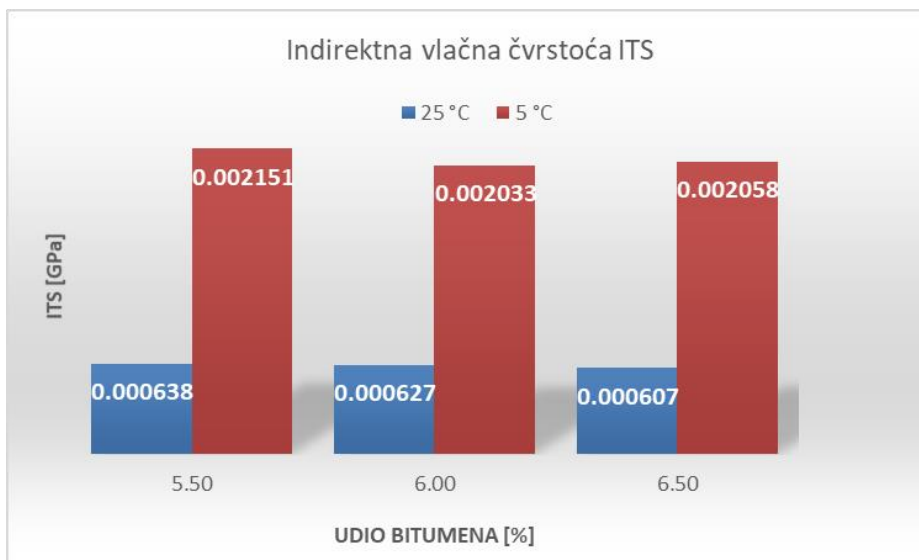
Slika 66: Uzorci nakon ispitivanja vlačne čvrstoće na temperaturi od 5 °C

Tablicom 36. su prikazani rezultati dobiveni ispitivanjem neizravne vlačne čvrstoće:

Tablica 36: Rezultati ispitivanja neizravne vlačne čvrstoće uzoraka s gumom

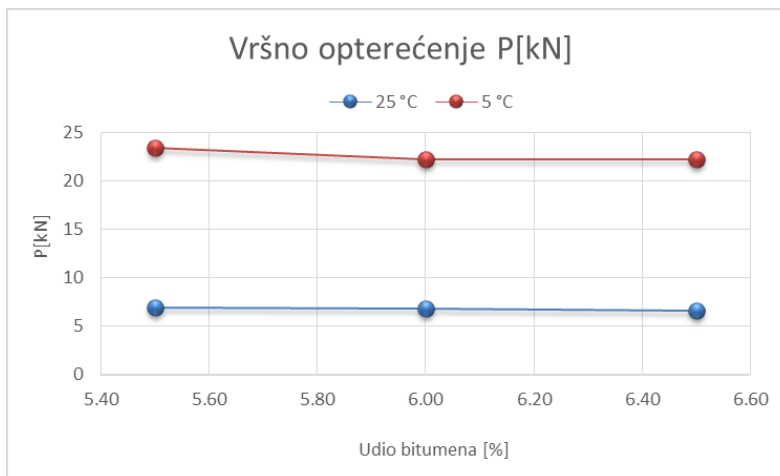
Bitumen [%]	25 °C				5 °C			
	Uzorak	P [kN]	d [mm]	ITS [GPa]	Uzorak	P [kN]	d [mm]	ITS [GPa]
5.50	AMG 1-II	6.906	3.63	0.000638	AMG 1-III	23.389	1.730	0.002151
6.00	AMG 2-II	6.776	3.03	0.000627	AMG 2-III	22.277	1.590	0.002033
6.50	AMG 3-II	6.564	3.13	0.000607	AMG 3-III	22.185	1.99	0.002058

Uzorci s dodatkom gume kao i uzorci bez gume imaju puno veću indirektnu vlačnu čvrstoću pri ispitivanju uzoraka tretiranih na temperaturi od 5 °C, nego li uzorci tretirani na temperaturi od 25 °C. Maksimalnu indirektnu vlačnu čvrstoću u iznosu od 0,002151 GPa ima uzorak AMG 1-III s 5,50% udjela bitumena, ispitanog na temperaturi od 5 °C, a minimalnu uzorak AMG 3-II s 6,50% udjela bitumena, ispitanog na temperaturi od 25 °C. Povećanjem udjela bitumena indirektna vlačna čvrstoća opada. (Slika 67.)



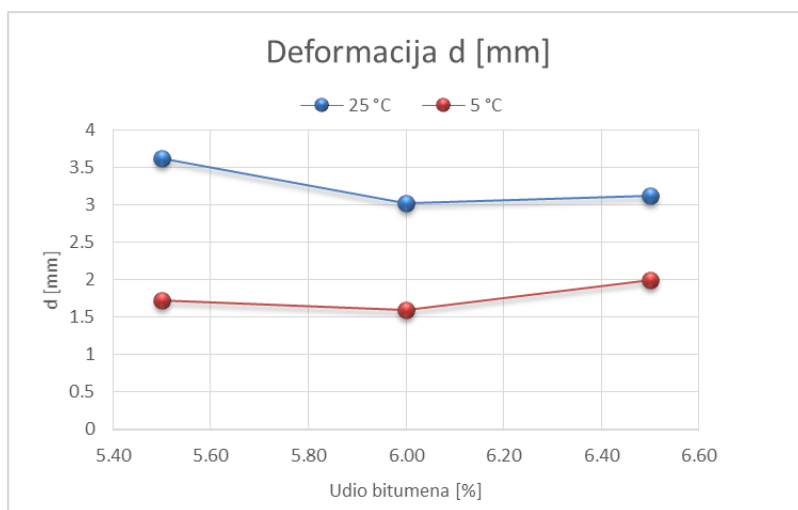
Slika 67: Usporedba rezultata ITS-a na uzorcima s dodatkom gume

Vrijednost vršnog opterećenja najveća je pri ispitivanju uzoraka tretiranih na 5 °C. Maksimalno vršno opterećenje iznosi 23,389 kN za uzorak AMG 1-III koji sadrži 5,50% udjela bitumena, a minimalno vršno opterećenje iznosi 6,564 kN za uzorak AMG 3-II koji sadrži 6,50% udjela bitumena. Vrijednosti vršnog opterećenja opadaju s povećanjem udjela bitumena. (Slika 68.)



Slika 68: Usporedba vršnog opterećenja na različitim temperaturama

Vrijednosti deformacije su maksimalne za uzorke tretirane na 25 °C. Povećanjem udjela bitumena s 5,50% na 6,00% vrijednost deformacije pada, a pri porastu s 6,00% na 6,50% vrijednost deformacije raste. (Slika 69.)



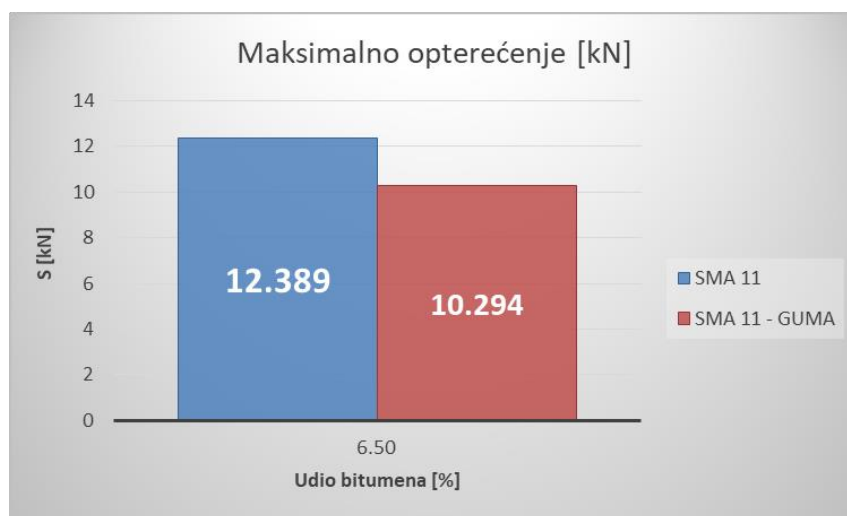
Slika 69: Usporedba deformacija na različitim temperaturama

#### 6.14. Usporedba rezultata uzoraka bez gume i s dodatkom gume

Za ispitivanje fizikalnih i mehaničkih svojstava uzoraka SMA 11 i SMA 11 s dodatkom gume izrađeni su uzorci različitih udjela bitumena. Za SMA 11 bez gume izrađen je jedan uzorak s cestograđevnim bitumenom udjelom od 6.50% te dva uzorka s polimerom modificiranim bitumenom udjelima od 5.50% i 6.50%. Za uzorke SMA 11 s dodatkom gume svi uzorci su izrađeni s cestograđevnim bitumenom u udjelima od 5.50%-6.00%-6.50%. Dakle, od ispitanih svojstava s istom mješavinom i bitumenom mogu se usporediti uzorci izrađeni s 6.50% cestograđevnog bitumena.

- **Marshallovo ispitivanje**

Unatoč dobrim svojstvima gume, projektirana mješavina s gumom pokazala je lošija svojstva u odnosu na one bez gume. Rezultati dobiveni Marshallovim ispitivanjem (Slika 70.) dokazali su da uzorak bez gume može podnijeti maksimalno opterećenje od 12,389 kN dok za istu mješavinu, ali s dodatkom gume u udjelu od 1% ukupne mješavine, uzorak može podnijeti maksimalno opterećenje u iznosu od 10,294 kN, što je za 2,095 kN manje od uzorka bez gume, odnosno može se predočiti kao 209,5 kg s obzirom da 1 kN iznosi 100 kg.

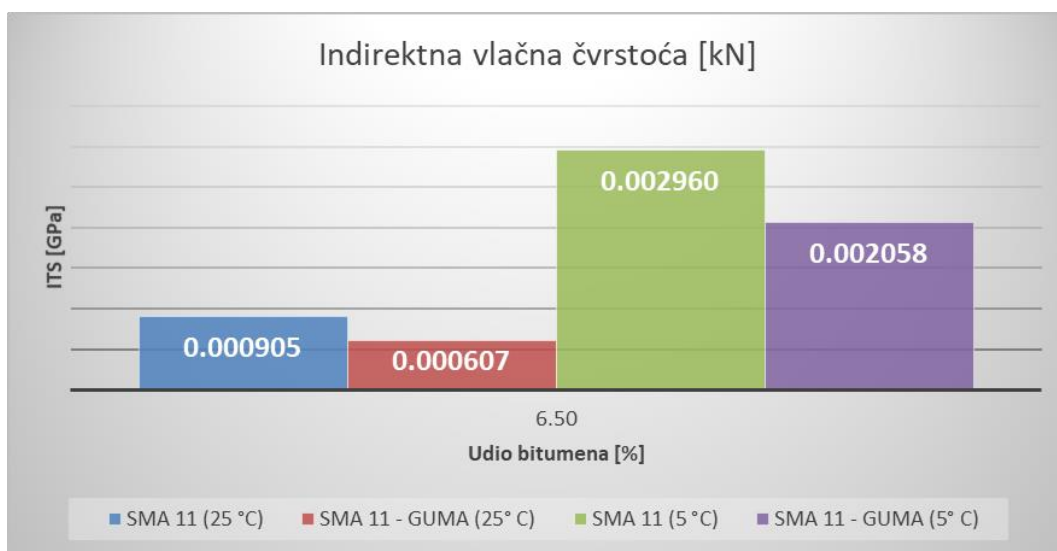


Slika 70: Maksimalno opterećenje uzorka bez gume i s dodatkom gume

- **Indirektna vlačna čvrstoća**

Slično kao i kod rezultata dobivenih Marshallovim ispitivanjem, uzorci s gumom su pokazali lošija svojstva odnosno manju indirektnu vlačnu čvrstoću od uzoraka bez gume. Pri ispitivanju uzoraka tretiranih na 25 °C, indirektna vlačna čvrstoća kod uzoraka bez gume iznosi 0,000905 GPa što je za 0,000298 GPa više od uzoraka s dodatkom gume.

Također, pri ispitivanju uzoraka tretiranih na 5 °C, indirektna vlačna čvrstoća iznosi 0,002960 GPa za uzorke bez gume, što je za 0,000902 GPa više od uzoraka s dodatkom gume. (Slika 71.)



Slika 71: Rezultati ispitivanja vrijednosti ITS-a na različitim temperaturama bez gume i s dodatkom gume

S obzirom da se nije znalo kako će uzorci izrađeni s gumom modificiranim bitumenom reagirati, ovim se laboratorijskim ispitivanjem zaključuje da je potrebno ispitati svojstva bitumena s dodatkom gume tipa penetracije, točke razmekšanja i slično. Također, bitno je poznavati svojstva granulata gume koji se upotrebljava i na posljeticu kako bitumen modificiran gumom utječe na svojstva asfaltne mješavine. Razumijevanjem navedenih podataka, može se krenuti u ispitivanje i proračun optimalne asfaltne mješavine koja bi zadovoljila propise dane normom.

## 7. ZAKLJUČAK

Proizvodnjom asfalta cilj je postići optimalnu mješavinu koja bi zadovoljila sve kriterije propisane normom. U suvremenom svijetu sve se više obraća pozornost na primjenu kružne ekonomije koja ima za cilj uporabu materijala koji su iskorišteni i ne služe više prvobitnoj namjeni kako bi se smanjila količina otpada, ali i produžio vijek vrijednih resursa. Iz tog razloga promatra se primjena otpadne gume u asfaltu umjesto polimernih vlakana, no osim što je guma vrijedna sirovina, dokazano je da ima i povoljna svojstva kada se primjenjuje u asfaltnoj mješavini. Cilj ovog rada bio je ispitati svojstva klasične SMA mješavine i SMA s dodatkom gume te na kraju usporediti dobivene rezultate. Za izradu asfaltnih uzoraka potrebno je bilo odrediti optimalni granulometrijski sastav, a udio bitumena se za ispitivanje povećavao s 5.50% na 6.00% i zatim na 6.50%. U prvoj seriji uzoraka izrađena su tri uzoraka od klasičnog cestograđevnog bitumena s dodatkom celuloznih vlakana u udjelu od 0,30% mase bitumena i tri od polimerom modificiranog bitumena. Zatim su određena osnovna fizikalna svojstva svakog uzorka te su uzorci koji su zadovoljili kriterije, izrađeni ponovo po tri primjerka od svakog kako bi im se odredila osnovna mehanička svojstva. Uzorci koji su zadovoljili kriterije su asfaltna mješavine od klasičnog cestograđevnog bitumena s udjelom bitumena u iznosu od 6.50% te mješavine od polimerom modificiranog bitumena s udjelom bitumena u iznosu od 5.50% te 6.50%. Navedenim uzorcima su određena mehanička svojstva; Mashallovim ispitivanjem i ispitivanjem indirektna vlačna čvrstoće. Rezultati ispitivanja su dokazali da uzorci izrađeni od polimerom modificiranog bitumena imaju bolja mehanička svojstva za isti udio bitumena u odnosu na uzorke izrađene od cestograđevnog bitumena. Uzorak izrađen od polimerom modificiranog bitumena u udjelu od 6.50% postigao je najveći iznos maksimalnog opterećenja i najveći iznos vlačne čvrstoće u odnosu na ostale uzorke. Zaključeno je da porastom udjela bitumena, maksimalno opterećenje raste, a deformacija opada. Vlačna čvrstoća uzoraka klasične SMA mješavine najveća je na uzorcima tretiranim na temperaturi od 5 °C i to za približno trostruko veći iznos nego li na uzorcima tretiranim na 25 °C. Također važno je za istaknuti da uzorcima koji su tretirani na 25 °C, povećanjem udjela bitumena vrijednost vlačne čvrstoće raste, dok kod uzoraka tretiranih na 5 °C opada. Uzorci SMA mješavine s dodatkom gume, izrađeni su od cestograđevnog bitumena s udjelima

bitumena 5.50%-6.00%-6.50% te s dodatkom granulata gume u udjelu od 1% ukupne mase uzorka. Granulat gume je dodan bitumenu tzv. mokrim postupkom, koji prema istraživanju daje najbolja svojstva asfaltnoj mješavini. Uzorcima su zatim određena fizikalna i mehanička svojstva na isti način kao i klasičnoj SMA mješavini. Uzorci s dodatkom gume imali su potpuno suprotna svojstva od uzorka klasične SMA mješavine. Odnosno, povećanjem udjela bitumena, vrijednost maksimalnog opterećenja opada, a deformacija raste, što kod klasične SMA mješavine nije bio slučaj. Također, povećanjem udjela bitumena uzoraka tretiranih na 25 °C, vrijednost vlačne čvrstoće je opadala kao i kod uzoraka tretiranih na 5 °C.

Uzorci izrađeni s dodatkom gume pokazali su lošija mehanička svojstva u odnosu na klasičnu mješavinu SMA asfalta. S obzirom da se nije znalo kako će uzorci izrađeni s gumom modificiranim bitumenom reagirati, ovim se laboratorijskim ispitivanjem zaključuje da je potrebno ispitati svojstva bitumena s dodatkom gume tipa penetracije, točke razmekšanja i slično. Prethodnim istraživanjem i analizom iskustava drugih zemalja dokazano je da asfaltna mješavina s dodatkom gume ima bolja svojstva u odnosu na klasičnu i to u pogledu poboljšanja trajnosti mješavine, otpornosti na kolotražnje, razorno djelovanje vode, otpornost na klizanje te općenito na kvalitetu asfaltna mješavine. Ovim laboratorijskim ispitivanjem nisu obuhvaćena navedena ispitivanja, no svakako bi ih bilo korisno sprovesti te usporediti rezultate.

## 8. LITERATURA

- [1] Narodne novine, *Tehnički propis za asfaltne kolnike*, [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021\\_05\\_48\\_977.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_05_48_977.html), pristup 12.4.2022.
- [2] Cuculić, M., *Predavanja iz predmeta Savitljive kolničke konstrukcije*, skripta, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2021.
- [3] Kofteci, Sevil: *Istraživanje primjenjivosti plovućca kao mineralnog vlakna u splitmastijsk asfaltu*, <https://hrcak.srce.hr/file/303202>, pristup 23.5.2022.
- [4] Hrvatsko asfaltersko društvo, *Proizvodnja asfalta u Hrvatskoj i Europi 2021*, <https://www.h-a-d.hr/proizvodnja-asfalta-asphalt-production/g11>, pristup 18.5.2022.
- [5] Baričević, A., Kovač, D., Didulica, K.: *Primjena betona od recikliranog agregata tijekom izgradnje nove zgrade dnevne bolnice u Zadru* <https://hrcak.srce.hr/file/382092>, pristup 20.5.2022.
- [6] Roberts, F.L., Kandhal P.S., Brown, E.R., Lee, D., Kennedy, T.W., *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*, NAPA Education Foundation, Lanham Maryland, 1996.
- [7] Linarić, Z.: *Postrojenja za proizvodnju gradiva, I. dio, Drobilane, Tvornice betona (betonare), Asfaltne baze (asfaltna postrojenja)*, <https://www.grad.unizg.hr/download/repository/f-postrojenjajnigga.pdf>, pristup 24.5.2022.
- [8] Kudrjavceva, Lj., Micunovic, M., Topalovic, M., Sedmak, S.: *Thermomechanics of soft inelastics bodies with application to asphalt behavior*, [https://www.researchgate.net/figure/Microstructure-of-asphalt\\_fig1\\_274475347](https://www.researchgate.net/figure/Microstructure-of-asphalt_fig1_274475347), pristup 24.5.2022.
- [9] Gnjidić M., *Projektiranje asfaltne mješavine za srednje teško prometno opterećenje*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2018.
- [10] Šimun, M.: *Hladna reciklaža asfaltnog kolnika Autoceste A6*, [https://www.hkig.hr/docs/Opatija\\_2020/prezentacije/Ceste/Hladna%20recikla%9Ea%20asfaltnog%20kolnica%20autoceste%20A6.pdf](https://www.hkig.hr/docs/Opatija_2020/prezentacije/Ceste/Hladna%20recikla%9Ea%20asfaltnog%20kolnica%20autoceste%20A6.pdf), pristup 25.5.2022.



- [11] Demokratska Prigorsko-zagrebačka stranka, *Asfaltiranje i održavanje županijskih i lokalnih cesta u gradu Svetom Ivanu Zelini*, <http://www.dps-hr.com/asfaltiranje-odrzavanje-zupanijskih-lokalnih-cesta-gradu-svetom-ivanu-zelini/>, pristup 26.5.2022.
- [12] HAK revija, <https://revijahak.hr/2019/01/10/kako-nastaju-ostecenja-na-cesti-samo-u-zagrebu-na-krpanje-udarnih-rupa-utrosena-je-1581-tona-asfalta-prosle-godine/>, pristup 14.6.2022.
- [13] HRN EN 12697-30 *Bitumenske mješavine - Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 30. dio: Priprema uzorka udarnim zbijačem* (EN 12697-30:2004+A1:2007)
- [14] Australian Asphalt Pavement Association 2000, *Stone Mastic Asphalt Design & Application Guide*, <https://www.afpa.asn.au/wp-content/uploads/2017/12/AAPA-IG-4-Stone-Mastic-Asphalt.pdf>, pristup 27.5.2022.
- [15] Polifort, *Stone Mastic Asphalt (SMA)*, <https://polifort.com.mt/stone-mastic-asphalt/>, pristup 26.5.2022.
- [16] Kamaluddin, Noor: *Evaluation of stone mastic asphalt using palm oil fuel ash as fillematerial*. [https://www.researchgate.net/figure/Major-Components-of-SMA-mixture\\_fig3\\_43811547](https://www.researchgate.net/figure/Major-Components-of-SMA-mixture_fig3_43811547), pristup 31.3.2022.
- [17] HRN EN 13108-5 *Bitumenske mješavine – Specifikacije materijala – 5.dio: SMA (Stone Mastic Asphalt)* (EN 13108-5:2006)
- [18] Hrvatske ceste, *Tehnički uvjeti za asfaltne kolnike*, [https://hrvatskeceste.hr/uploads/documents/attachment\\_file/file/260/Tehni%C4%8Dki\\_uvjeti\\_za\\_asfaltne\\_kolnike.pdf](https://hrvatskeceste.hr/uploads/documents/attachment_file/file/260/Tehni%C4%8Dki_uvjeti_za_asfaltne_kolnike.pdf), pristup 6.4.2022.
- [19] HRN EN 12697-13:2017 *Bitumenske mješavine - Metode ispitivanja - 13. dio: Mjerenje temperature* (EN 12697-13:2017)
- [20] HRN EN 12591:2009 *Bitumen i bitumenska veziva - Specifikacije za cestograđevne bitumene* (EN 12591:2009)
- [21] HRN EN 14023:2010 *Bitumen i bitumenska veziva - Okvirna specifikacija za polimerom modificirane bitumene* (EN 14023:2010)
- [22] Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021., <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=23771>, pristup 6.6.2022.
-

- [23] Daily Times, *Kuwait's infamous tyre graveyard given environmental makeover*, <https://dailytimes.com.pk/813296/kuwait-infamous-tyre-graveyard-given-environmental-makeover/>, pristup 28.6.2022.
- [24] Scrap Tire News, *The Road To IPR: Re 'tiring' The Old World in Ontario*, <https://scraptirenews.com/2020/01/08/the-road-to-ipr-retiring-the-old-world-in-ontario/>, pristup 12.4.2022.
- [25] Blümich, B., Teymouri, Y. & Clark, R. NMR on the Road: Non-destructive Characterization of the Crumb-Rubber Fraction in Asphalt. *Appl Magn Reson* 50, 497–509 (2019), <https://doi.org/10.1007/s00723-018-1097-8>, pristup 28.6.2022.
- [26] Šimun, M., Mihalina, S.: *Završni sloj asfaltnoga kolnika s dodatkom reciklirane gume*, <https://doi.org/10.14256/JCE.2703.2019>, pristup 23.5.2022.
- [27] Xiao, F., Amirkhanian, S., Juang, C.H.: Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (2007) 6, pp. 475-483
- [28] Paje, S.E., Luong, J.L., Vázquez, V.F., Bueno, M., Miró, R.: Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber – Influence on noise reduction, *Construction and Building Materials*, 47 (2013), pp. 789-798
- [29] Sri Wulandari, P., Tjandra, D.: Use of crumb rubber as an additive in asphalt concrete mixture, *Procedia Engineering*, 171 (2017), pp.1384-1389
- [30] HRN EN 933-1 *Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata – 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda sijanja* (EN 933-1:2012)
- [31] HRN EN 12697-35 *Bitumenske mješavine - Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 35. dio: Laboratorijsko miješanje* (EN 12697-35:2004+A1:2007)
- [32] HRN EN 12697-5 *Bitumenske mješavine - Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 5. dio: Određivanje gustoće asfaltnih mješavina* (EN 12697-5:2009)
- [33] HRN EN 12697-6 *Bitumenske mješavine - Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 6. dio: Određivanje gustoće asfaltnih uzoraka* (EN 12697-6:2003+A1:2007)
- [34] HRN EN 12697-29 *Bitumenske mješavine - Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 29. dio: Određivanje dimenzija asfaltnog uzorka* (EN 12697 29:2002)
- [35] HRN EN 12697-8 *Bitumenske mješavine - Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 8. dio: Određivanje šupljina u asfaltnim uzorcima* (EN 12697-8:2003)
-

[36] Starčić M., *Projektiranje asfaltne mješavine prema kriteriju dozvoljenih odstupanja*, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2016.

[37] HRN EN 12697-34:2020 *Bitumenske mješavine - Metode ispitivanja - 34. dio: Marshallovo ispitivanje* (EN 12697-34:2020)

[38] HRN EN 12697-23:2017 *Bitumenske mješavine – Metode ispitivanja - 23. dio: Određivanje vlačne čvrstoće asfaltnih uzoraka neizravnom vlačnom metodom* (EN 12697-23:2017)