

Analiza projektnih parametara poroznog asfalta

Babok, Mateja

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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:157:602496>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



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**

Mateja Babok

Analiza projektnih parametara poroznog asfalta

Diplomski rad

Rijeka, 2019.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

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

**Mateja Babok
JMBAG: 0114025696**

Analiza projektnih parametara poroznog asfalta

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2019.

Naziv studija: **Diplomski sveučilišni studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: **Tehničke znanosti**

Znanstveno polje: **Građevinarstvo**

Znanstvena grana: **Prometnice**

Tema diplomskog rada

ANALIZA PROJEKTNIH PARAMETARA POROZNOG ASFALTA

ANALYSIS OF POROUS ASPHALT MIXTURE PARAMETERS

Kandidatkinja: **MATEJA BABOK**

Kolegij: **SAVITLJIVE KOLNIČKE KONSTRUKCIJE**

Završni rad broj: **UI-2019-9**

Zadatak:

Porozni asfalt je asfaltna mješavina diskontinuiranog granulometrijskog sastava sa sve većom primjenom u europskim zemljama. Uz velike prednosti u primjeni koje takva mješavina sadrži najveći nedostatak je trajnost mješavine koja se očituje kroz gubitak čestica agregata odnosno pojavu krunjenja na izvedenim kolnicima.

Diplomski rad mora sadržavati:

1. Projekt asfaltne mješavine prema važećoj normi
2. Određivanje svojstava izrađenih uzoraka
3. Analizu utjecaja sastava na pojavu krunjenja

Rješenja je potrebno obraditi analitički prema analiziranim podacima.

Tema rada je uručena: 18. veljače 2019.

Komentorica:

Marijana Cuculić, v. pred.

Mentorica:

prof. dr. sc. Aleksandra Deluka Tibljaš,
dipl.ing.građ.

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.

Mateja Babok

U Rijeci, 11. rujna 2019.

IZJAVA

Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001) (voditelj prof. dr. sc. Nevenka Ožanić) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH.

U Rijeci, 16.09.2019.

Mentor:

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Aleksandri Deluka-Tibljaš na mentorstvu.

Posebno se zahvaljujem komentorici Marijani Cuculić i laborantu Robertu Skenderu na dostupnosti, pomoći i stručnim savjetima.

Također, zahvaljujem se svojem dečku i svim prijateljima koji su uvijek bili uz mene.

Na kraju, zahvaljujem se svojoj obitelji za svu potporu i ljubav, a najviše svojim roditeljima bez kojih sve što sam dosada postigla u životu ne bi bilo moguće.

Veliko hvala svima!

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu prikazan je utjecaj projektnih parametara poroznog asfalta na pojavu krunjenja. Porozni asfalt predstavlja tip vruće asfaltne mješavine koja se koristi za habajuće slojeve. Idealna primjena poroznog asfalta je na mjestima s manje prometnog opterećenja te na parkiralištima na kojima dolazi do "stajanja" vode. Porozni asfalt može se koristiti i na autocestama gdje ima ulogu rješavanja problema akvaplaniranja. U novije doba, poboljšanjem kvalitete materijala te poboljšavanjem specifikacija poroznog asfalta, porozni asfalt pokazuje mnogo prednosti u odnosu na klasične asfaltne mješavine. Pokazao se izrazito dobar u smanjenu razine buke u prometu, rješavanju problema prskanja vode, povećanju sigurnosti prometa, jednako tako karakterizira ga velika vodopropusnost, smanjenje toplinskih otoka u urbanim sredinama, te je ekološki pogodan. Glavni nedostaci poroznog asfalta su trajnost, cijena te raspadanje, odnosno krunjenje. Zbog diskontinuiranog granulometrijskog sastava poroznog asfalta omogućeno je procjeđivanje. Budući da ovakva vrsta mješavine ima otvorenu strukturu, javlja se problem trajnosti zbog pojave krunjenja. Krunjenje predstavlja ispadanje zrna agregata koje se događa zbog slabljenja veze između zrna agregata i bitumena. Mjesta na kojima dolazi do krunjenja mogu biti opasna i utjecati na sigurnost u prometu.

Cilj izrade ovog diplomskog rada bio je analizirati i odrediti utjecaj projektnih parametara poroznog asfalta na krunjenje, prema normi HRN EN 12697-17.

Ključne riječi: porozni asfalt, krunjenje, procjeđivanje, habajući sloj, otvorena struktura

ABSTRACT

This paper deals with the subject of influence of the porous asphalt mixture parameters on the ravelling performance. Porous asphalt is a type of hot asphalt mixture that is used as a wearing course. The ideal application of porous asphalt is in places with less traffic load and in parking areas where water "stagnation" occurs. Porous asphalt can also be used on highways where it has the role of solving aquaplaning problems. More recently, by improving the quality of materials and improving the specifications of porous asphalt, porous asphalt has shown many advantages over conventional asphalt mixtures. It has proven to be extremely good at reducing traffic noise, solving water splashes, increasing traffic safety, as well as being characterized by high water permeability, reducing heat islands in urban areas, and being environmentally friendly. The main disadvantages of porous asphalt are durability, cost and disintegration, or ravelling. Due to the discontinuous granulometric composition of the porous asphalt, it is allowed to drain. Because of its discontinuous grading structure, filtering is enabled. Since this type of mixture has an open structure, the problem of durability occurs (because of the ravelling performance). Ravelling represents the loss of aggregate grains that occurs due to the weakening of the bond between aggregate grain and bitumen. Ravelling areas can be hazardous and affect traffic safety. The goal of this paper is to analyze and determine the influence of design parameters of porous asphalt project mixture on the resistance to the ravelling performance, according to HRN EN 12697-17.

Key words: porous asphalt, ravelling, filtering, wearing course, open structure

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. ASFALTNE MJEŠAVINE	3
3. POROZNI ASFALT	4
3.1. Sastavne komponente	4
4. IZVEDBA ASFALTOG ZASTORA OD ASFALTNE MJEŠAVINE DISKONTINUIRANOG SASTAVA (POROZNOG ASFALTA)	11
4.1. Nedostaci asfaltnih zastora od poroznog asfalta	12
4.1.1. Krunjenje	13
4.1.2. Otpornost mješavina poroznog asfalta na krunjenje	14
4.1.3. Održavanje poroznog asfalta	15
5. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE	17
5.1. Podaci iz Tehničkih uvjeta za porozni asfalt	17
5.2. Identifikacija bitumenske mješavine	17
5.3. Priprema kamenog materijala	18
5.4. Određivanje granulometrijske krivulje	20
5.5. Postupak izrade uzoraka od poroznog asfalta	28
5.6. Mjerenje i vaganje uzoraka	30
5.7. CANTABRO ISPITIVANJE PREMA NORMI HRN EN 12697-17	35
5.7.1. Analiza rezultata	37
ZAKLJUČAK.....	41
LITERATURA:.....	43

Popis slika:

Slika 1: Granulometrijske krivulje (SMA, PA i AC10) [4]

Slika 2: Slikovni prikaz prednosti poroznog asfalta u odnosu na klasičnu asfaltnu mješavinu [4]

Slika 3: Agregat od eruptivne stijene

Slika 4: Prikaz razlike porozne mješavine i klasične asfaltne mješavine [8]

Slika 5: Doziranje bitumena

Slika 6: Aditivi [11]

Slika 7: Krunjenje [11]

Slika 8: Pranje agregata

Slika 9: Sijačica

Slika 10: Prosijavanje na situ

Slika 11: Razvrstane podfrakcije

Slika 12: Granulometrijska krivulja "uz donju granicu"

Slika 13: Granulometrijska krivulja "sredina"

Slika 14: Granulometrijska krivulja "uz gornju granicu"

Slika 15: Odvaga materijala

Slika 16: Miješanje mineralnih komponenti

Slika 17: Pripremljena mješavina u komori za zagrijavanje

Slika 18: Uzorci od poroznog asfalta

Slika 19: Mjerenje uzorka digitalnim šublerom

Slika 20: Vaganje uzorka

Slika 21: Los Angeles uređaj

Slika 22: Vaganje uzorka nakon Cantabro ispitivanja

Slika 23: Uzorci nakon provedenog Cantabro ispitivanja

Slika 24: Zavisnost udjela šupljina o udjelu bitumena

Slika 25: Zavisnost gubitka zrnja o udjelu bitumena

Slika 26: Jednadžba dobivena regresijskom analizom [15]

Popis tablica:

Tablica 1: Granulometrijski sastav i minimalni udio bitumena mješavine od poroznog asfalta [7]

Tablica 2: Tehnička svojstva cestograđevnog bitumena [10]

Tablica 3: Svojstva polimerom modificiranog bitumena [10]

Tablica 4: Granulometrijski sastav mješavina za porozni asfalt prema FHWA [3]

Tablica 5: Granulometrijski sastav i minimalni udio bitumena za asfaltne mješavine od poroznog asfalta

Tablica 6: Određivanje granulometrijske krivulje "uz donju granicu"

Tablica 7: Određivanje granulometrijske krivulje "sredina"

Tablica 8: Određivanje granulometrijske krivulje "uz gornju granicu"

Tablica 9: Pregled mješavina za izradu laboratorijskih uzoraka

Tablica 10: AM9-količine agregata i bitumena

Tablica 11: AM9-količine agregata i bitumena

Tablica 12: AM9-količine agregata i bitumena

Tablica 13: AM9-količine agregata i bitumena

Tablica 14: AM9-količine agregata i bitumena

Tablica 15: AM9-količine agregata i bitumena

Tablica 16: AM9-količine agregata i bitumena

Tablica 17: AM9-količine agregata i bitumena

Tablica 18: AM9-količine agregata i bitumena

Tablica 19: Izmjerene visine i promjeri uzoraka te dobivene prosječne vrijednosti

Tablica 20: Gustoće materijala

Tablica 21: Karakteristike asfaltnih mješavina i uzoraka

Tablica 22: Rezultati nakon provedbe Cantabro ispitivanja

Tablica 23: Zavisnost udjela bitumena, šupljina i krunjenja

1. UVOD

Porozni asfalt je posebna vrsta vruće asfaltne mješavine diskontinuiranog sastava koja sadrži veliki udio međusobno povezanih šupljina, čime je omogućena poroznost. Glavne karakteristike poroznog asfalta su: velika vodopropusnost, smanjenje razine buke i veća sigurnost prometa [1].

Prva primjena poroznog asfalta zabilježena je krajem 50-tih godina 19. stoljeća u Velikoj Britaniji. Ministarstvo zračnog prometa koristilo je porozni asfalt kako bi se riješio problem stajaće vode na pistama. Kako bi se taj problem riješio, razvijena je mješavina otvorenog sastava s mnogo međusobno povezanih šupljina. Takva vrsta mješavine pokazala se kao odlična u smanjenju akvaplaniranja i klizanja zrakoplova tijekom slijetanja i polijetanja. Nakon takvog uspjeha, s godinama počelo se raditi na modificiranju mješavine te na dodatnim ispitivanjima poroznog asfalta. Na temelju analiza pokazuju se potencijalni nedostaci i prednosti takve vrste asfalta [2].

Porozni asfalt pruža brojne prednosti u odnosu na klasične vruće asfaltne mješavine. Jedna od prednosti je smanjenje buke čime se povećava kvaliteta života ljudima koji žive uz prometnice, a pokazalo se da i povećava udobnost vozačima i smanjuje umor. Osim smanjenja buke, porozni asfalt ima brojne ekološke prednosti prema klasičnoj vrućoj asfaltnoj mješavini. Budući da se zbog maksimalno povećane infiltracije vode smanjuje otjecanje na poroznim asfaltnim cestama, porozni asfalt potpomaže stablima da se bolje ukorijene, time se lakše izmjenjuju zrak, voda i hranjive tvari s okolinom. U tom smislu porozni asfalt pogoduje stablima da rastu i budu zdravija, što doprinosi kvaliteti okoliša.

Porozni asfalt nije samo pogodan u ekološkom smislu. Takav oblik asfaltnog kolnika ima nižu razinu toplinske vodljivosti i niži toplinski kapacitet, te tako smanjuje učinak toplinskih otoka u gradovima i zato služi za prirodno hlađenje gradova i smanjenje zagađenja. Nadalje, porozni asfalt znatno povećava sigurnost smanjujući akvaplaniranje i klizanje. Povećanje sigurnosti postiže se smanjenjem količine vode koja "stoji" na površini. Smanjenjem količine vode koja "stoji" na površini ceste, smanjuju se prskanja vode i odsjaj u vozilu. Prskanja i odsjaj mogu znatno smanjiti vidljivost vozača te njihovu percepciju. Smanjenjem istih, vozačima se omogućuje ugodna vožnja [2].

Nedostatak poroznog asfalta je trajnost, koja iznosi oko 10 godina. Općenito, porozni asfalti su skuplji od klasičnih asfaltnih mješavina. Glavne razloge povećanja cijene takve vrste asfalta predstavljaju: korištenje visokokvalitetnih agregata, veličina agregata, postrojenja za miješanje, polaganje mješavina i usklađivanje sa specifikacijama. U

povijesti se kao nedostatak poroznog asfalta prikazivao njegov smanjeni učinak u smislu korištenja na područjima s velikim prometom/velikim opterećenjem. Porozni asfalt bio je neprikladan. Međutim, u današnje vrijeme s poboljšanjima u vezivu, porozni asfalt pokazao se kao otporan na deformacije kao i klasični asfalt [2].

S vremenom se struktura poroznog asfalta može zatvoriti te ga je potrebno održavati. Potrebno je osigurati redovito čišćenje pora od onečišćenja. Zimi, pijesak može zatvoriti pore pa se kao rješenje preporučuje raspršivanje soli. Za povećanje učinkovitosti potrebno je izvršiti raspršivanje velike količine vlažne soli [1]. Osim toga, ispitivanja su pokazala da se porozni asfalt zimi lakše smrzava u odnosu na klasični asfalt, ali prilagođenim specifikacijama za određena hladna područja, došlo je do smanjenja ovog problema ili čak do uklanjanja [2]. Kao nedostatak koji utječe na trajnost poroznog asfalta može se navesti i krunjenje. Razlog krunjenja je odvajanje zrna agregata [3]. Više o krunjenju u nastavku rada.

Cilj ovog diplomskog rada je analizirati i utvrditi utjecaj parametara poroznog asfalta na krunjenje.

2. ASFALTNE MJEŠAVINE

Asfaltne mješavine su mješavine mineralnih tvari i veziva, odnosno bitumena. Takve mješavine moguće je prilagoditi različitim zahtjevima. Pravilnim projektiranjem i izvedbom kolničke konstrukcije osigurava se učinkovito prenošenje opterećenja na posteljicu. Slojevi kolničke konstrukcije razlikuju se prema namjeni, a to su: habajući, vezni i nosivi slojevi [3].

Podjela asfaltnih mješavina prema različitim kriterijima [3]:

-sastavu

-temperaturi pripreme

-načinu ugradnje

-načinu pripreme

-namjeni

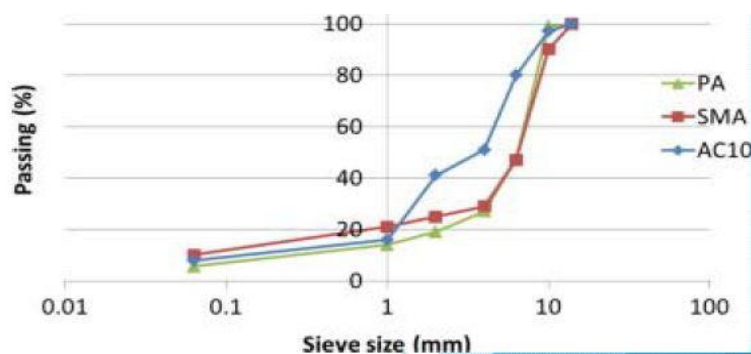
Prema sastavu asfaltna mješavina može biti otvorenog ili zatvorenog sastava. Otvoreni sastav ima veći udio šupljina, dok zatvoreni sastav ima manji udio šupljina [3].

Prema temperaturi pripreme vruće asfaltne mješavine razlikuju se u tri postupka: vrući (135°C-170°C), hladni (do 25°C), te topli postupak (temperature do 135°C). Za postizanje niže temperature dodaju se razni dodaci [3].

Prema načinu ugradnje razlikujemo tri vrste asfaltnih mješavina: valjane asfalte, lijevane, te u novije vrijeme prefabricirane asfalte [3].

Prema načinu uporabe asfaltne mješavine dijele se na mješavine za nosive i habajuće slojeve. Kako bi asfaltne mješavine bile zadovoljavajuće, moraju ispuniti uvjete kojima se osigurava ekonomična, trajna i kvalitetna konstrukcija. Prema tome, u današnje vrijeme sve više se radi na razvoju novih i različitih tipova asfaltnih mješavina. Neke od tih mješavina su: prefabricirani asfalt, kompaktni asfalt i porozni asfalt [3].

Na Slici 1 prikazane su granulometrijske krivulje za različite tipove asfaltnih mješavina (SMA, PA i AC10)



Slika 1: Granulometrijske krivulje (SMA, PA i AC10) [4]

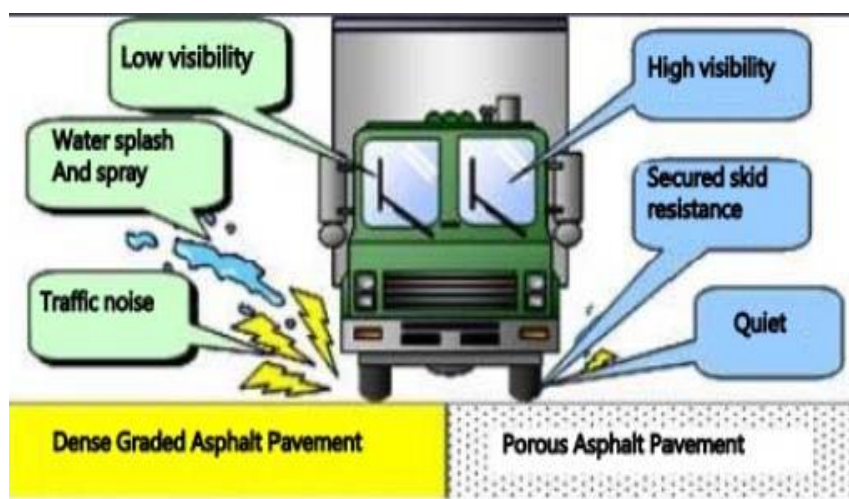
3. POROZNI ASFALT

Porozni asfalt je oblik vruće asfaltne mješavine s međusobno povezanim šupljinama koje osiguravaju površinsku drenažu tijekom oborina. Namijenjen je kao tip mješavine za habajuće slojeve [5].

Oborine se odvođe vertikalno kroz površinski sloj do nepropusne podloge [5].

Porozni asfalt u odnosu na klasičnu vruću asfaltnu mješavinu nudi: smanjeno prskanje vozila oborinama, povećanu vidljivost oznaka kolnika, smanjenu noćnu temperaturu, površinski odsjaj u lošijim vremenskim uvjetima te smanjenu buku na kolniku [5].

Na Slici 2 prikazane su razlike, odnosno prednosti poroznog asfalta u odnosu na klasičnu asfaltnu mješavinu.



Slika 2: Slikovni prikaz prednosti poroznog asfalta u odnosu na klasičnu asfaltnu mješavinu [4]

3.1. Sastavne komponente

Mješavina poroznog asfalta sastoji se od:

- agregata,
- veziva (bitumena), i
- dodataka.

Agregat

Agregat je uz bitumen najvažnija komponenta poroznog asfalta. Prema načinu proizvodnje i s obzirom na porijeklo agregat se dijeli na: prirodni, industrijski i reciklirani, a s obzirom na veličinu zrna agregat se dijeli na: krupni, sitni, miješani agregat i punilo [6].

Prirodni agregati su zapravo granulirane, usitnjene stijene, odnosno kameni materijal. Prema njihovom načinu postanka stijene mogu biti: magmatske koje nastaju kristalizacijom magme (intruzivne, efuzivne, hipabisalne), sedimentne koje nastaju taloženjem (egzogene, endogene i mješovite sedimentne stijene) i metamorfne koje nastaju metamorfozom (tinjčevi škriljavci, zeleni škriljavci, mramor) [6]. Slikom 3 prikazan je agregat od eruptivne stijene.

Prema mineralnom sastavu stijene možemo svrstati u dvije skupine: silikatne koje se sastoje pretežno od silikatnih minerala; u silikatne stijene spadaju sve magmatske stijene osim karbonatita te sve metamorfne stijene osim mramora i veći dio sedimentnih stijena, te karbonatne koje se uglavnom sastoje od karbonatnih minerala; u karbonatne stijene spadaju vapnenci, dolomiti te mramori [6].



Slika 3: Agregat od eruptivne stijene

Na temelju fizikalnih svojstava agregata te manjim dijelom kemijskih svojstava određuje se pogodnost agregata koji se ugrađuje u vruću asfaltnu mješavinu [3].

Iznimno je važno poznavanje mineralošskog sastava agregata i mineralogije kako bi se izbjegao agregat koji u sebi sadrži štetne sastojke. Osnovna svojstva agregata kao što su gustoća, poroznost, čvrstoća, obavijanje, prionjivost i ljuštenje ovise o strukturi i sastavu minerala u agregatu [3].

Agregati koji se koriste za vruće asfaltne mješavine trebaju biti čvrsti, trajni, žilavi i dobro graduirani. Zrna agregata trebala bi biti oštrobridna, imati nisku poroznost s hrapavim, čistim i hidrofobnim površinama. Kako bi se odredila pogodnost agregata za upotrebu u

vrućoj asfaltnoj mješavini potrebno je analizirati određena svojstva: granulometrijski sastav, čistoću, žilavost, trajnost, površinsku strukturu, apsorpciju, oblik zrna i afinitet prema bitumenu [3].

Za vrijeme proizvodnje, ugradnje i zbijanja vruće asfaltno mješavine, agregati su podložni drobljenju i habanju. Stoga agregati moraju biti žilavi i čvrsti da se odupiru drobljenju, raspadanju i propadanju tijekom njihova skladištenja te otporni na trošenje i zaglađivanje tijekom odvijanja prometa [3].

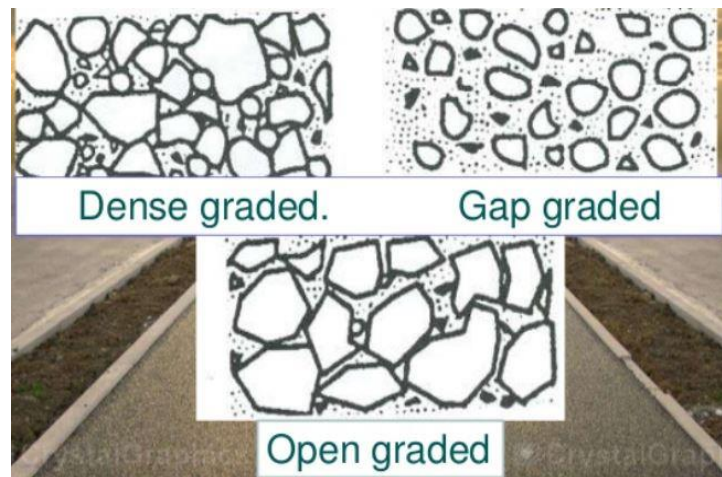
Agregati osim žilavosti i čvrstoće trebaju imati svojstva otpornosti na pucanje ili raspadanje prilikom vlaženja i sušenja i/ili smrzavanja i odmrzavanja. Kod odabira agregata koji se ugrađuje u vruću asfaltnu mješavinu treba obratiti pozornost na zrna agregata koja trebaju biti kockasta. Zrna ne bi trebala biti tanka, izdužena ili plosnata. Oštrobridne čestice dovode do većeg unutrašnjeg trenja i boljeg uklještenja što čini mehaničku stabilnost većom nego kad su čestice agregata zaobljene [3].

Granulometrijski sastav mješavine važan je zato što utječe na više svojstava vrućih asfaltnih mješavina: krutost, otpornost, osjetljivost na vodu, krunjenje i dr. Jednako je važan zbog utjecaja na ugradljivost mješavine. Potrebno je osigurati takvu mješavinu da se izbjegne problem segregacije [3].

Granulometrijski sastavi za različite tipove PA prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1: Granulometrijski sastav i minimalni udio bitumena mješavine od poroznog asfalta [7]

Točka norme HRN EN 13108-7	Otvori okaca sita, mm	Porozni asfalt		
		PA 8	PA 11	PA 16
		Prolaz kroz sito, %(m/m)		
Granulometrijski sastav, točka 5.2.2 ^(a)	22,4			100
	16		100	90 do 100
	11,2	100	90 do 100	20 do 35
	8	90 do 100	20 do 35	-
	5,6	-	-	-
	4	15 do 30	-	-
	2	8 do 18	8 do 18	8 do 18
	1	-	6 do 13	6 do 12
	0,25	3 do 13	-	-
0,063	2,0 do 5,0	2,0 do 5,0	2,0 do 5,0	
Minimalni udio bitumena, točka 5.2.3 ^(b)	$B_{min}^{(c)}$	$B_{min3,0}$	$B_{min3,0}$	$B_{min3,0}$
^(a) ispituje se prema normi HRN EN 12697-2				
^(b) topivi udio bitumena ispituje se prema normi HRN EN 12697-1				
^(c) pri određivanju minimalnog udjela bitumena aktualne bitumenske mješavine (B_{akt}), B_{min} se korigira faktorom α ($\alpha=2,65/\rho_s$) (ρ_s je prividna gustoća smjese agregata u aktualnoj bitumenskoj mješavini, određena prema normi HRN EN 1097-6 i izražena u Mg/m^3)				



Slika 4: Prikaz razlike porozne mješavine i klasične asfaltne mješavine [8]

Razlike porozne i klasične asfaltne mješavine prikazane su na Slici 4.

Bitumen

Bitumen je vezivo, tamnosmeđe do crne boje koje se dobiva destiliranjem nafte ili se javlja u prirodnom stanju. Većina bitumena korištena u današnje vrijeme, a koja se upotrebljava za asfaltiranje dobivena je destilacijom nafte [1].



Slika 5: Doziranje bitumena

Na Slici 5 prikazano je doziranje bitumena.

Bitumen, osim što ima izvrsna svojstva prionjivosti i vodonepropusnosti, otporan je i na djelovanje većine kiselina, soli i alkalija. Zagrijavanjem se dovodi u tekuće stanje kako bi se mogao miješati s agregatom [1].

Uloga bitumena, odnosno veziva je da osigura dovoljnu koheziju kako bi mješavina bila otporna na trošenje i segregaciju. Jednako tako važna je i trajnost bitumena koji bi trebao biti ili otporan na oksidaciju ili prisutan kao debeli sloj premazan preko čestica agregata tako da se oksidacijsko stvrdnjavanje koje dovodi do pucanja i gubitka kohezije odgodi do postizanja projektiranog vijeka trajanja mješavine. Modificirana veziva mogu se koristiti za poboljšanje svojstava poroznog asfalta kroz poboljšanje kohezije i trajnosti [9].

Bitumen se klasificira: prema penetraciji, ponašanju i viskoznosti [3].

Klasifikacija bitumena pretežno se izvodi pokusom penetracije. Prema penetraciji, cestograđevni bitumen dijeli se na 5 standardnih vrsta: 40-50, 60-70, 85-100, 120-150 i 200-300 (Tablica 2). Pokus penetracije predstavlja mjerenje prodiranja standardne igle u uzorak bitumena iz čega slijedi da, što je penetracija veća, uzorak bitumena odnosno bitumen je mekši. Druga metoda uz pokus penetracije koja se koristi za klasificiranje bitumena temelji se na određivanju viskoznosti ili izvornog bitumena, ili bitumena nakon starenja. Treća metoda klasificiranja bitumena temeljena je na pokazateljima ponašanja bitumena [1].

Tablica 2: Tehnička svojstva cestograđevnog bitumena [10]

HRN EN 12591					
Tehničko svojstvo	Tip				
	20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Penetracija na 25°C (Pen), 0,1 mm	20 - 30	35 - 50	50 - 70	70 - 100	160 - 220
Točka razmekšanja (PK), °C	55 - 63	52 - 60	46 - 54	43 - 51	35 - 43
Točka loma po Fraassu, °C	-	≤ -5	≤ -8	≤ -10	≤ -15
Indeks penetracije	- 1,5 do +0,7				
<i>Otpornost na otvrdnjavanje pri 163 °C (HRN EN 12607-1)</i>					
Promjena mase, %(m/m)	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,8	≤ 1,0
Zadržana penetracija, %	≥ 55	≥ 53	≥ 50	≥ 46	≥ 37
Porast točke razmekšanja (PK), °C	≤ 10	≤ 11	≤ 11	≤ 11	≤ 12

Polimerom modificirani bitumen predstavlja homogenu smjesu cestograđevnog bitumena uz dodatak polimera. Proizvodi se u posebnim pogonima, rafinerijama ili pridruženim asfaltnim postrojenjima u sklopu asfaltne baze. Polimerom modificirani bitumen koristi se za proizvodnju bitumenskih mješavina od kojih je i porozni asfalt [7].

Svojstva polimerom modificiranog asfalta prikazana su u Tablici 3.

Tablica 3: Svojstva polimerom modificiranog bitumena [10]

HRN EN 14023				
Tehničko svojstvo	Tip			
	10/40-65 E/P	25/55-55 E/P	45/80-65 E/P	40/100-65 E
Penetracija na 25°C (Pen),	10 - 40	25 - 55	45 - 80	40 - 100
Točka razmekšanja (PK), °C	≥ 65	≥ 55	≥ 65	≥ 65
Točka loma po Fraassu, °C	≤ -5	≤ -10	≤ -18	≤ -18
Elastični povrat na 25 °C, %	≥ 50/NR	≥ 50/NR	≥ 80/NR	≥ 80/NR
Stabilnost pri skladištenju	Δ PK, °C	≤ 5	≤ 5	≤ 5
	Δ Pen,	NR	NR	NR
Otpornost na otvrdnjavanje (HRN EN 12607-1)				
Promjena mase, %(m/m)	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,3
Zadržana penetracija, %	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 60
Porast točke razmekšanja, °C	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 8
Pad točke razmekšanja, °C	≤ 2	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Elastični povrat na 25 °C, %	≥ 50/NR	≥ 50/NR	≥ 70/NR	≥ 70/NR

Udjelom bitumena u mješavini utječe se na svojstva kolnika. Većim udjelom bitumena u mješavini povećava se debljina bitumenskog filma čime se smanjuje trenje između bitumena i zrna agregata. Smanjenjem trenja dolazi do plastičnog tečenja zbog prijenosa opterećenja na bitumen. Rezultat smanjenja trenja je pojava kolotruga. Preveliki udio bitumena dovodi do smanjenja šupljina, gdje može doći do guranja asfalta i izbijanja bitumena na površinu. Manjim udjelom bitumena dolazi se do pretankog bitumenskog filma koji je osjetljiv na opterećenja te vrlo često puca. Što je manji udio bitumena, veći je udio šupljina pa dolazi do prodora vlage i vode u kolnik, što kao rezultat daje pojavu pukotina, kolotruga i krunjenja [11].

Aditivi i modifikatori

Kako bi se poboljšala određena svojstva asfalta, u poroznom asfaltu mogu se koristiti razni aditivi i modifikatori, odnosno dodaci. U dodatke spadaju: punila, dopune, oksidansi, antioksidansi, vlakna, ugljikovodici te otpadni materijali [11]. Slika 6 prikazuje aditive koji se mogu dodati asfaltnoj mješavini.



Slika 6: Aditivi [11]

U bitumenske mješavine dodaju se dodaci kako bi se poboljšala prionjivost bitumenskog veziva, povećala otpornost bitumenskog veziva prema starenju, smanjila osjetljivost bitumenskih mješavina na vodu, snizila temperatura proizvodnje i ugradnje bitumenskih mješavina, te kako bi se spriječilo otjecanje bitumenskog veziva sa zrna agregata [7].

Za porozni asfalt preporuča se koristiti veće udjele bitumena kako bi se osigurala veća otpornost na krunjenje i starenje bitumena te veća trajnost, pri tome dolazi do problema s ocjeđivanjem veziva. Ocjeđivanje veziva može se spriječiti ukoliko se koristi polimerom modificirani bitumen [12].

Polimeri se mogu podijeliti u dvije skupine koje čine elastomeri i plastomeri. Elastomeri pružaju otpor nanošenju naprezanja na način da se rastežu i brzo vraćaju u prvotni položaj nakon prestanka djelovanja naprezanja. Elastomeri malo doprinose čvrstoći bitumenskog veziva prilikom rastezanja [3].

Plastomeri imaju krutu i čvrstu trodimenzionalnu mrežu otpornu na deformacije. Karakterizira ih mala čvrstoća na opterećenje, ali može doći do sloma kod deformacije. [3] Ukoliko financijski nije isplativije koristiti polimerom modificirani bitumen, kao dodatak mogu se koristiti vlakna [12].

Vlakna povećavaju vlačnu čvrstoću i koheziju vrućih asfaltnih mješavina. Prilikom korištenja vlakana, u mješavinu se može dodati više bitumena nego kod uobičajenih vrućih asfaltnih mješavina, što znatno utječe na problem ocjeđivanja. Vlakna se najčešće unose u mješavinu u postrojenju za proizvodnju vrućih asfaltnih mješavina [3].

U Europi za mješavine diskontinuiranog sastava najčešće se koriste celulozna vlakna kojima je zadatak povećanje količine bitumena, a da se spriječi, odnosno da ne dođe do ocjeđivanja. Uobičajeni maseni udio vlakana u vrućoj asfaltnoj mješavini iznosi 0,15-0,3% [3].

Niskim udjelom bitumena negativno se utječe na trajnost poroznog asfalta, razlog je ubrzana oksidacija zbog čega dolazi do problema krunjenja asfalta. Problem krunjenja može se pojaviti kao posljedica gubitka adhezije između agregata i bitumena, prema tome potrebno je odabrati odgovarajuće mineralno punilo kako bi se spriječio taj problem. Najčešće, kao mineralno punilo koristi se hidratizirano vapno. Hidratizirano vapno dodatak je bitumenskim mješavinama čijim se dodavanjem u mješavinu produljuje trajanje kolnika do 30% [12].

4. IZVEDBA ASFALTOG ZASTORA OD ASFALTNE MJEŠAVINE DISKONTINUIRANOG SASTAVA (POROZNOG ASFALTA)

Asfaltni zastori koji imaju diskontinuirani sastav u pravilu su vruće asfaltne mješavine koje sadrže veliki udio šupljina kako bi voda mogla prolaziti kroz mješavinu i drenirati se. Veći udio šupljina osigurava se korištenjem većeg postotka krupnog agregata. Mješavina poroznog asfalta proizvodi se na jednaki način u asfaltnom postrojenju kao i vruća asfaltna mješavina, jedina razlika je u granulometrijskom sastavu agregata. Bez obzira na veliki udio šupljina, porozni asfalt sadrži deblji bitumenski film u odnosu na vruću asfaltnu mješavinu kontinuiranog sastava. Ukupna količina bitumena u mješavini poroznog asfalta veća je ili jednaka količini bitumena u mješavinama kontinuiranog sastava koje sadrže istu maksimalnu veličinu zrna agregata. Za projektiranje mješavine poroznog asfalta koristi se postupak prema kojem se odabire određena količina bitumena potrebna za traženu debljinu bitumenskog filma. Ocjenjuju se svojstva, a jedno od njih je procjeđivanje bitumena kroz matricu agregata. Često se primjenjuje postupak projektiranja mješavina razvijen od strane Savezne uprave za ceste FHWA. Savezna uprava za porozni asfalt preporučuje određeni granulometrijski sastav (Tablica 4) [3].

Tablica 4: Granulometrijski sastav mješavina za porozni asfalt prema FHWA [6]

OTVOR SITA	POSTOTAK PROLAZA KROZ SITO
1/2 inča (12,5 mm)	100
3/8 inča (9,5 mm)	95-100
No. 4 (4,75 mm)	30-50
No. 8 (2,36 mm)	5-15
No. 200 (0,075 mm)	2-5

Mješavina agregata treba osigurati dovoljno prostora za prihvatiti određenu količinu bitumena i osigurati povezanost šupljina kako bi bila omogućena odvodnja. Optimalna količina sitnog agregata ispunjava šupljine između krupnog agregata s time da volumen krupnog agregata ostaje isti [3].

Optimalna temperatura miješanja određuje se pokusom procjeđivanja bitumena na različitim temperaturama. Vrijeme skladištenja mješavine poroznog asfalta ograničeno je zbog mogućnosti ocjeđivanja bitumena. Do ocjeđivanja može doći i prilikom transporta mješavine [3].

Prema američkim smjernicama mješavina poroznog asfalta najčešće se polaže u debljini od približno 19 mm, a najveće zrno agregata iznosi 12.5 mm. Mješavina se ne bi trebala polagati na kolnik ukoliko nije ravan. Ukoliko je kolnik neravan, potrebno ga je izravnati veznim slojem kontinuiranog sastava [3]. Hrvatske smjernice, odnosno norme za porozni asfalt prikazane su u poglavlju 3.1.

Mješavina poroznog asfalta jednako tako ne bi se trebala ugrađivati po hladnom vremenu, zbog mogućeg gubitka veze postojećeg kolnika i mješavine poroznog asfalta. Predlaže se temperatura ugradnje između 16 i 20 stupnjeva. Valjanje se sastoji od 2 do 3 prolaza valjka koji ima čelične kotače, u pravilu se ne bi smjeli upotrebljavati valjci s gumenim kotačima. Gumeni kotači mogu "pokupiti" bitumen i prekomjerno zatvoriti šupljine, dok ga vibracijski valjci drobe [3].

4.1. Nedostaci asfaltnih zastora od poroznog asfalta

Najveći nedostaci prilikom izvedbe asfaltnih zastora od poroznog asfalta koji utječu na sigurnost vožnje i trajnost su: krunjenje, zatvaranje pora te ocjeđivanje bitumena.

Krunjenje je jedan od glavnih faktora koji utječu na kvalitetu i trajnost poroznog asfalta, a predstavlja postupno raspadanje kolnika [13]. Više o tome navodi se u nastavku rada.

Zatvaranje pora drugi je glavni faktor koji utječe na porozni asfalt. Začepljenjem pora dolazi do gubitka propusnosti. Zajedno s krunjenjem, na te karakteristike mogu utjecati: najveća veličina agregata, gradacija agregata, vrsta veziva i količina bitumenskog veziva koja čini film oko agregata. Istraživanja su pokazala da općenito veći sadržaj agregata veće frakcije podrazumijeva veću poroznost i propusnost, ali da time dolazi i do smanjenja čvrstoće te nedostatka trajnosti. Iskustveno, u nekim zemljama poput SAD-a, ukazuje se na značajan gubitak propusnosti već nakon dvije do tri godine zbog začepljenja pora [13].

Jedan od glavnih faktora je ocjeđivanje. Ocjeđivanje bitumena se pripisuje teksturi poroznog asfalta koji na površini ima izbočine agregata krupnijeg zrna. Zbog toga dolazi do većeg kontakta gume na vozilu i površine kolnika, te nakon aktiviranja kočnica guma klizi po površini koja stvara dovoljno topline zbog taljenja bitumena. Otopljeni bitumen tvori sklisku površinu koja olakšava klizanje. Taj problem rješava se ograničavanjem brzine na mjestima gdje je na novo postavljen porozni asfalt [13].

4.1.1. Krunjenje

Krunjenje je vid raspadanja asfaltnih slojeva od vruće asfaltne mješavine koje se događa od površine asfalta te nastavlja prema dolje. Razlog krunjenja je odvajanje zrna agregata [3].

Na Slici 7 prikazano je krunjenje na kolniku.



Slika 7: Krunjenje [11]

Odvajanje zrna agregata ubrzava se kako slabi veza između zrna agregata i bitumena. Uzroci odvajanja zrna, odnosno krunjenja su [3]:

-debeli obloga prašine na agregatu dovoljna da bitumenski film ne prijanja uz agregat, već uz prašinu gdje površinske vučne sile oštećuju bitumen te dolazi do odvajanja agregata

-segregirani agregat koji se nalazi na površini gdje gotovo nema sitnozrnatog agregata. Krupna zrna agregata se dodiruju, ali su bitumenom povezana na manjem broju mjesta. S otvrdnjavanjem bitumena može doći do slabljenja veze između bitumena i agregata.

-asfaltni zastor male gustoće. Za osiguravanje kohezije potrebna je velika gustoća. Ukoliko je sloj slabo zbijen, dolazi do izdvajanja agregata.

Mjesta na kolnicima na kojima je došlo do jakog krunjenja mogu biti opasna za korisnike cesta, budući da zbog abrazije može nastati udubina koja zadržava vodu što može dovesti do akvaplaniranja. Problem predstavlja i nevezani materijal koji je odvojen, a zadržava se na kolniku. Količina tog materijala ovisi o krunjenju. Nevezani materijal na kolniku smanjuje otpornost kolnika na klizanje [3].

4.1.2. Otpornost mješavina poroznog asfalta na krunjenje

Porozni asfalt je zbog svoje otvorene strukture podložan krunjenju. Za razliku od asfaltbetona kontinuiranog sastava, kod poroznog asfalta krunjenje nastaje brzo i naglo. Kolnik propada kroz jednu ili dvije godine [12].

Za ocjenu otpornosti na krunjenje asfaltnih uzoraka koristi se Cantabro ispitivanje u "Los Angeles" uređaju za abraziju.

Cantabro ispitivanje

Otpornost na krunjenje ili ispadanje zrna agregata u Europi procjenjuje se laboratorijskim testom zvanim Cantabro test. Ovaj test je razvijen početkom 1980-ih u Španjolskoj. Postoje mnoge verzije izvođenja ovog testa, nekoliko verzija opisano je u nastavku [13]:

1. propisuje da će se tri uzorka Marshalla smjestiti u Los Angeles uređaj s uklonjenim čeličnim kuglicama. Utvrđuje se gubitak težine uzoraka nakon 300 okretaja na temperaturi 25°C. Gubitak ne smije biti veći od 30%.
2. preporučuje se da se Marshallovi uzorci podvrgnu testu jedan po jedan, do 300 rotacija u bubnju Los Angeles-a, bez tradicionalnih čeličnih kuglica. Definirana temperatura je 18°C ili 25°C. Abrazije, izražene gubitkom mase, prikazane su prema sadržaju veziva. Gubitak trošenjem smanjuje se kad se poveća sadržaj veziva. Prihvaća se gubitak mase manji od 30% za temperaturu od 18°, a 25% (ponekad i 20%) za temperaturu od 25°.
3. jedan način opisuje Marshall-ov uzorak zbijen s 50 udaraca. Svaka strana smještena je u Los Angeles bez čeličnih kuglica. Temperatura rada je obično 25°C, vrši se 300 rotacija u bubnju brzinom 30 do 33 okretaja/min. Preporučena maksimalna dopuštena vrijednost gubitaka za zbijene uzorke iznosi 20%.
4. gubitak mase prema Cantabro testu (50 udaraca po licu uzorka, 300 okretaja, bez kuglica), gdje ne smije biti više od 35% i općenito ne više od 30% gubitaka ako se ispitivanje izvodi pri 18°C. Drugi kriterij je da praznine u mješavini trebaju biti više od 18%, te po mogućnosti ne manje od 20%.
5. zbog visokog udjela zračnih šupljina, vezivo u smjesi poroznog asfalta sklono je stvrdnjavanju relativno brzo te može rezultirati smanjenjem kohezije i adhezije što dovodi do krunjenja. Preporuča se učiniti test ubrzanog starenja. Ubrzano starenje provodi se u laboratoriju postavljanjem pet Marshallovih uzoraka zbijenih s 50 udaraca u pećnici postavljenoj na 60°C ili 168 sati (7 dana), uzorci se zatim ohlade na 25°C, te se čuvaju 4

sata prije Cantabro testa. Prosječni gubici ne smiju biti veći od 30%, dok pojedinačni rezultat ne smije biti veći od 50%.

6. zbog velikog udjela zračnih šupljina, mješavina je sklona ljuštenju djelovanjem vode, stoga je potrebno dobro prijanjanje između veziva i agregata u prisustvu vode. Otpornost mješavine na ljuštenje procjenjuje Cantabro testom, gdje su uzorci potopljeni u vodi na 49°C, 4 dana. Nije definirano ograničenje. Ostvaruju se tipični gubici 24% i 32% pri 5,5%, odnosno 4,5% udjela veziva.

7. preporučeno je da se pet primjeraka Marshalla zbijenih sa 50 udaraca čuva na 25°C, najmanje 6 sati prije nego se svaki od njih podvrgne Cantabro testu u bubnju Los Angelesa, na rotaciji pri 188 do 208 rad/s za 300 okretaja bez opterećenja abrazijom. Prosječni gubitak mase ne smije biti veći od 15%.

Otpornost prema krunjenju može se povećati i do 155% kada je izrađen porozni asfalt s maksimalnom veličinom agregata 10 mm u odnosu na maksimalnu veličinu agregata od 20 mm [13].

4.1.3. Održavanje poroznog asfalta

Porozni asfalt potrebno je održavati kako ne bi došlo do začepljenja pora. Održavanje se izvodi na način da se asfalt ispiru vodom pod tlakom što se ujedno pokazalo kao i najbolje rješenje. Porozni asfalt održava se još i specijalnom opremom za održavanje kolnika. Oprema za održavanje kolnika od poroznog asfalta sastoji se od vozila i uređaja za ispiranje nečistoća. Vozilo ispiru kolnik od nečistoća visokotlačnim čistačem te nakon toga usisava suspenziju vode i čestica koja nastaje. U zemljama kao što je Švicarska, donesena je odluka da nema potrebe za ispiranjem poroznog asfalta te se predviđa da je kiša koja padne dovoljna da ispiru kolnik od nečistoća. Problem nastaje kada dođe do taloženja nečistoća u porama zaustavnog traka. Čišćenje takvih pora iznimno je teško jer se uspije očistiti nekoliko milimetara na površini asfaltnog zastora, a pore ostaju začepljene i dalje. Stoga se preporuča čišćenje zaustavnog traka svakih pola godine [12].

Osim začepljenja pora od nečistoća, problem kod poroznog asfalta predstavlja zimsko vrijeme, odnosno snijeg i led. Održavanje je veliki problem i ne preporuča se izvoditi kolnike od poroznog asfalta na takvim područjima. Budući da ralica može zahvatiti krupna zrna, odlomiti ih te na taj način oštetiti kolnik. Preporuka je preventivno posipavanje soli za vrijeme suhog vremena. Za asfaltne zastore od poroznog asfalta učinkovitima su se pokazala mješavine vode s velikim udjelom soli jer ulaze u pore asfalta [12].

Asfaltni zastor od poroznog asfalta ne pruža dovoljno dobru podlogu za nove slojeve diskontinuiranog ili kontinuiranog sastava, stoga ga je potrebno ukloniti [12].

5. LABORATORIJSKO ISPITIVANJE

Cilj izrade ovog diplomskog rada bio je analizirati i odrediti utjecaj projektnih parametara poroznog asfalta na krunjenje. U tu svrhu izrađeno je 9 uzoraka s različitim granulometrijskim krivuljama te različitim udjelima bitumenskog veziva od 3,2%, 4,2% i 5,2%.

5.1. Podaci iz Tehničkih uvjeta za porozni asfalt

Tablica 5: Granulometrijski sastav i minimalni udio bitumena za asfaltne mješavine od poroznog asfalta [7]

Točka norme HRN EN 13108-7	Otvori okaca sita, mm	Porozni asfalt		
		PA 8	PA 11	PA 16
		Prolaz kroz sito, %(m/m)		
Granulometrijski sastav, točka 5.2.2 ^(a)	22,4			100
	16		100	90 do 100
	11,2	100	90 do 100	20 do 35
	8	90 do 100	20 do 35	-
	5,6	-	-	-
	4	15 do 30	-	-
	2	8 do 18	8 do 18	8 do 18
	1	-	6 do 13	6 do 12
	0,25	3 do 13	-	-
	0,063	2,0 do 5,0	2,0 do 5,0	2,0 do 5,0
Minimalni udio bitumena, točka 5.2.3 ^(b)	B_{min} ^(c)	$B_{min3,0}$	$B_{min3,0}$	$B_{min3,0}$
^(a) ispituje se prema normi HRN EN 12697-2				
^(b) topivi udio bitumena ispituje se prema normi HRN EN 12697-1				
^(c) pri određivanju minimalnog udjela bitumena aktualne bitumenske mješavine (B_{akt}), B_{min} se korigira faktorom α ($\alpha=2,65/\rho_s$) (ρ_s je prividna gustoća smjese agregata u aktualnoj bitumenskoj mješavini, određena prema normi HRN EN 1097-6 i izražena u Mg/m^3)				

Tablica 5 prikazuje vrijednosti unutar kojih se mora nalaziti granulometrijska krivulja, te minimalni udio bitumena za bitumensku mješavinu koristeći empirijski pristup izrade mješavine. Mješavina za potrebe ovog rada mora se nalaziti unutar uvjeta koji su navedeni u tablici za PA 8.

5.2. Identifikacija bitumenske mješavine

Mješavina koja se ispituje ima oznaku PA8 BIT 50/70 M2 AG4, gdje su:

- PA-oznaka za porozni asfalt
- 8-najveće zrno agregata
- BIT 50/70- cestograđevni bitumen 50/70
- M2 -srednje teško prometno opterećenje
- AG4 -kategorija agregata

5.3. Priprema kamenog materijala

Za pripremu agregata korištena je norma HRN EN 993-1. Agregat korišten za izradu uzoraka sedimentnog je podrijetla. Agregat je prethodno opran i prosijan u sijačici. Pranje agregata i sijačica prikazani su na Slikama 8 i 9.



Slika 8: Pranje agregata



Slika 9: Sijačica

Budući da agregat sadrži različite podfrakcije, kako bi se što preciznije dozirao kameni materijal, agregat se razvrstava na podfrakcije. Razvrstavanje na podfrakcije provodi se pomoću setova sita. Sita se postave u sijačicu na prosijavanje u trajanju od 5 minuta. Nakon završetka prosijavanja, sita se odvoje, te se vrši ručno prosijavanje kako bi se

dotatno odvojile odredene frakcije. Na Slici 10 prikazano je sito kojim se vrši prosijavanje.



Slika 10: Prosijavanje na situ

Po završetku prosijavanja, odredene frakcije se odvajaju i razvrstavaju. Na Slici 11 prikazane su razvrstane podfrakcije.



Slika 11: Razvrstane podfrakcije

5.4. Određivanje granulometrijske krivulje

Nakon određenih granulometrijskih sastava frakcija, određuje se granulometrijski sastav za uzorke poroznog asfalta. Za potrebe ispitivanja određuju se tri granulometrijska sastava.

Granulometrijski sastav poroznog asfalta dobije se iz izraza (1):

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

Gdje je:

P= postotak materijala koji prolazi kroz određeno sito

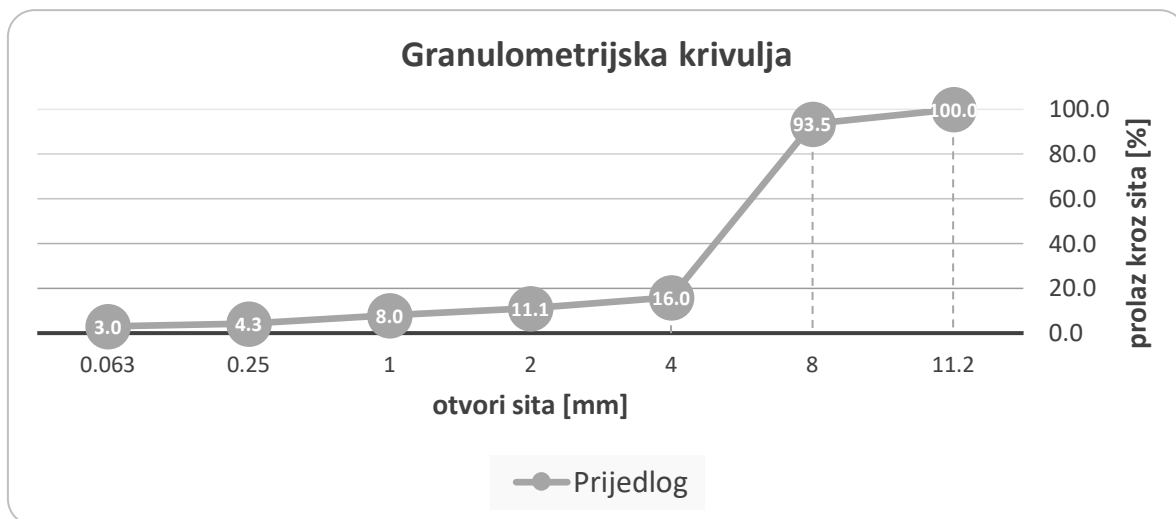
pA, pB, pC= postotak materijala koji prolazi kroz određeno sito za pojedine frakcije agregata u mješavini

a,b,c = udio agregata A, B, C upotrijebljenih u mješavini

Tablicama 6, 7 i 8 prikazani su udjeli pojedinačnih frakcija te tri različita granulometrijska sastava.

Tablica 6: Određivanje granulometrijske krivulje "uz donju granicu"

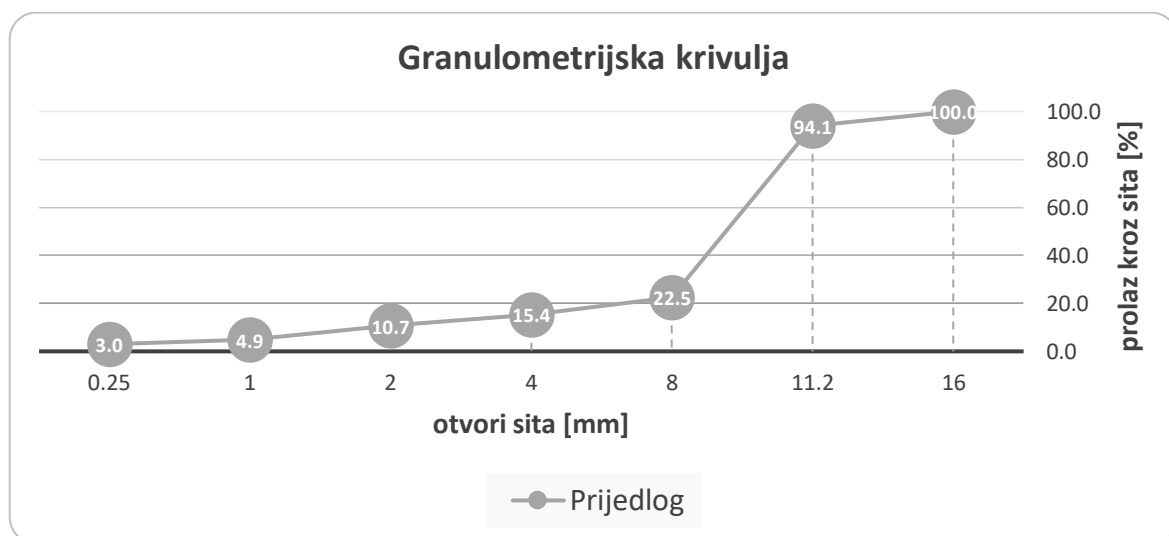
Udjeli poj. frakcija	1.50%	13.55%	84.95%		Σ	100.00%
Otvor sita (mm)	Punilo	0-4	4-8	Donja granična krivulja	Gornja granična krivulja	Prijedlog
16	100	100	100	100	100	100.0
11.2	100	100	100	100	100	100.0
8	100	100	92.4	90	92	93.5
4	100	97	1.6	15	30	16.0
2	100	66	0.8	8	18	11.1
1	100	43.7	0.7	0	0	8.0
0.25	100	16	0.7	3	13	4.3
0.063	100	7.3	0.6	2	5	3.0



Slika 12: Granulometrijska krivulja "uz donju granicu"

Tablica 7: Određivanje granulometrijske krivulje "sredina"

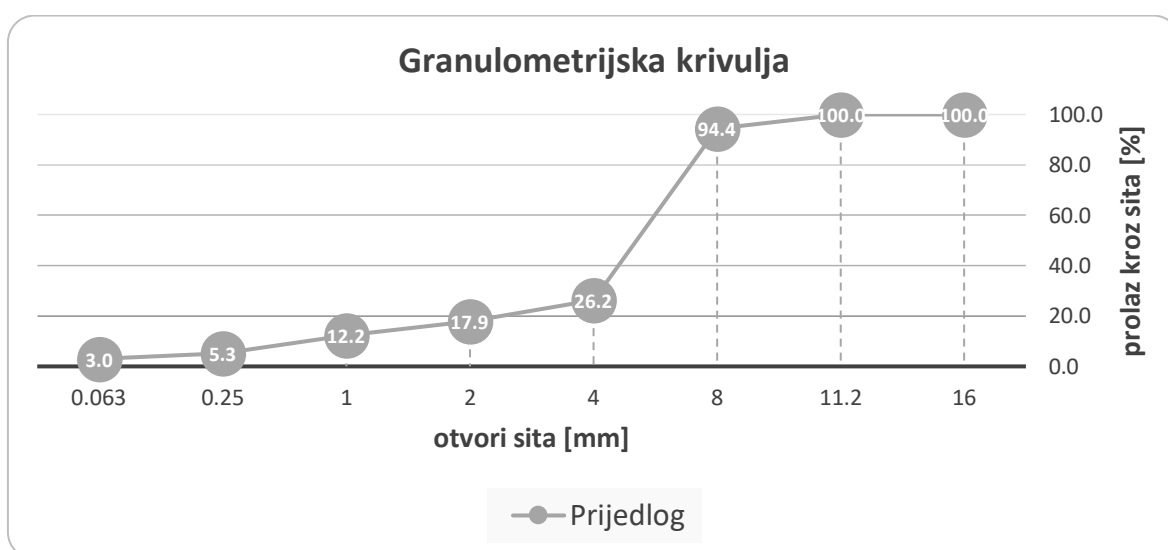
Udjeli poj. frakcija	1.01%	20.87%	78.12%		Σ	100.00%
Otvor sита (mm)	Punilo	0-4	4-8	Donja granična krivulja	Gornja granična krivulja	Prijedlog
16	100	100	100	100	100	100.0
11.2	100	100	100	100	100	100.0
8	100	100	92.4	90	92	94.1
4	100	97	1.6	15	30	22.5
2	100	66	0.8	8	18	15.4
1	100	43.7	0.7	0	0	10.7
0.25	100	16	0.7	3	13	4.9
0.063	100	7.3	0.6	2	5	3.0



Slika 13: Granulometrijska krivulja "sredina"

Tablica 8: Određivanje granulometrijskog sastava "uz gornju granicu"

Udjeli poj. frakcija	0.73%	25.04%	74.23%		Σ	100.00%
Otvor sita (mm)	Punilo	0-4	4-8	Donja granična krivulja	Gornja granična krivulja	Prijedlog
16	100	100	100	100	100	100.0
11.2	100	100	100	100	100	100.0
8	100	100	92.4	90	92	94.4
4	100	97	1.6	15	30	26.2
2	100	66	0.8	8	18	17.9
1	100	43.7	0.7	0	0	12.2
0.25	100	16	0.7	3	13	5.3
0.063	100	7.3	0.6	2	5	3.0



Slika 14: Granulometrijska krivulja "uz gornju granicu"

Slikama 12, 13 i 14 prikazane su granulometrijske krivulje za tri različite oznake granulometrijskih krivulja: „uz donju granicu“, „sredina“ i „uz gornju granicu“.

Nakon što su definirani granulometrijski sastavi potrebno je odrediti količine sastavnih komponenti za svih 9 uzoraka. Masa uzorka prema normi HRN EN 12697-17 iznosi 1070 g. Masa bitumena potrebna za uzorak dobije se množenjem ukupne mase uzorka s udjelom bitumena. Ukupna potrebna masa agregata dobije se kao razlika ukupne mase asfaltnog uzorka i mase bitumena. Masa pojedinih frakcija dobije se tako što se pomnože udio pojedinih frakcija s masom agregata koja je potrebna. Pojedinačne mase podfrakcija dobiju se oduzimanjem postotaka prolaza kroz dva susjedna sita. Dobiveni ostatak pomnoži se s

pojedinačnim masama frakcije, te se tako dobije pojedinačna masa podfrakcije. Po završetku se zbroje sve dobivene količine bez punila.

Tablica 9: Pregled mješavina za izradu laboratorijskih uzoraka

Oznaka asfaltne mješavine	Oznaka granulometrijske krivulje	Udio bitumenskog veziva
1	Uz donju granicu	3,2%
2	Uz donju granicu	4,2%
3	Uz donju granicu	5,2%
4	Sredina	3,2%
5	Sredina	4,2%
6	Sredina	5,2%
7	Uz gornju granicu	3,2%
8	Uz gornju granicu	4,2%
9	Uz gornju granicu	5,2%

Tablica 9 prikazuje popis mješavina za izradu laboratorijskih uzoraka.

U Tablicama 10 do 18 prikazane su potrebne količine materijala i bitumena za svaku mješavinu poroznog asfalta (prema Tablici 9). Na temelju tih podataka izrađuju se uzorci za ispitivanje.

Tablica 10: AM1-količine agregata i bitumena

										Udio bitumena: 3.20%		
Udjeli poj. frakcija	100 % od ukupne mase mineralne mješavine			Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)			Suma: kamen bez punila	Kumulativno: kamen	Punilo	Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena
	1.50%	13.55%	84.95%	15.5	140.3	879.9	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
Otvor sita (mm)	Punilo	0-4	4-8	Punilo	0-4	4-8						
11.2	100	100	100									
8 - 11,2	0	0	7.6	0.0	0.0	66.9	66.9	66.9				
8	100	100	92.4									
4 - 8	0	3	90.8	0.0	4.2	798.9	803.1	870.0				
4	100	97	1.6									
2 - 4	0	31	0.8	0.0	43.5	7.0	50.5	920.6				
2	100	66	0.8									
1 - 2	0	22.3	0.1	0.0	31.3	0.9	32.2	952.7				
1	100	43.7	0.7									
0,25 - 1	0	27.7	0	0.0	38.9	0.0	38.9	991.6				
0.25	100	16	0.7									
0,063 - 0,25	0	8.7	0.1	0.0	12.2	0.9	13.1	1004.7	15.5			
0.063	100	7.3	0.6									
< 0,063	100	7.3	0.6	15.5	10.2	5.3	15.5	1020.2				
							1020.2		1035.8			

Tablica 11: AM2- količine agregata i bitumena

										Udio bitumena:		4.20%
Udjeli poj. frakcija	100 % od ukupne mase mineralne mješavine			Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)			Suma: kamen bez punila	Kumulativno : kamen	Punilo	Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena
	1.50%	13.55%	84.95%	15.4	138.9	870.8						
Otvor sita (mm)	Punilo	0-4	4-8	Punilo	0-4	4-8						
11.2	100	100	100									
8 - 11,2	0	0	7.6	0.0	0.0	66.2	66.2	66.2				
8	100	100	92.4									
4 - 8	0	3	90.8	0.0	4.2	790.7	794.8	861.0				
4	100	97	1.6									
2 - 4	0	31	0.8	0.0	43.1	7.0	50.0	911.0				
2	100	66	0.8									
1 - 2	0	22.3	0.1	0.0	31.0	0.9	31.8	942.9				
1	100	43.7	0.7									
0,25 - 1	0	27.7	0	0.0	38.5	0.0	38.5	981.4				
0.25	100	16	0.7									
0,063 - 0,25	0	8.7	0.1	0.0	12.1	0.9	13.0	994.3	15.4			
0.063	100	7.3	0.6									
< 0,063	100	7.3	0.6	15.4	10.1	5.2	15.4	1009.7				
							1009.7		1025.1			
										1070	1025.1	44.94

Tablica 12: AM3- količine agregata i bitumena

										Udio bitumena:		5.20%
Udjeli poj. frakcija	100 % od ukupne mase mineralne mješavine			Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)			Suma: kamen bez punila	Kumulativno : kamen	Punilo	Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena
	1.50%	13.55%	84.95%	15.2	137.4	861.7						
Otvor sita (mm)	Punilo	0-4	4-8	Punilo	0-4	4-8						
11.2	100	100	100									
8 - 11,2	0	0	7.6	0.0	0.0	65.5	65.5	65.5				
8	100	100	92.4									
4 - 8	0	3	90.8	0.0	4.1	782.4	786.5	852.0				
4	100	97	1.6									
2 - 4	0	31	0.8	0.0	42.6	6.9	49.5	901.5				
2	100	66	0.8									
1 - 2	0	22.3	0.1	0.0	30.7	0.9	31.5	933.0				
1	100	43.7	0.7									
0,25 - 1	0	27.7	0	0.0	38.1	0.0	38.1	971.1				
0.25	100	16	0.7									
0,063 - 0,25	0	8.7	0.1	0.0	12.0	0.9	12.8	983.9	15.2			
0.063	100	7.3	0.6									
< 0,063	100	7.3	0.6	15.2	10.0	5.2	15.2	999.1				
							999.1		1014.4			
										1070	1014.4	55.64

Tablica 13: AM4- količine agregata i bitumena

										Udio bitumena: 3.20%		
Udjeli poj. frakcija	100 % od ukupne mase mineralne mješavine			Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)			Suma: kamen bez punila	Kumulativno: kamen	Punilo	Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena
	1.01%	20.87%	78.12%	10.5	216.2	809.1						
Otvor sita (mm)	Punilo	0-4	4-8	Punilo	0-2	2-4						
11.2	100	100	100									
8 - 11,2	0	0	7.6	0.0	0.0	61.5	61.5	61.5				
8	100	100	92.4									
4 - 8	0	3	90.8	0.0	6.5	734.7	741.2	802.7				
4	100	97	1.6									
2 - 4	0	31	0.8	0.0	67.0	6.5	73.5	876.2				
2	100	66	0.8									
1 - 2	0	22.3	0.1	0.0	48.2	0.8	49.0	925.2				
1	100	43.7	0.7									
0,25 - 1	0	27.7	0	0.0	59.9	0.0	59.9	985.0				
0.25	100	16	0.7									
0,063 - 0,25	0	8.7	0.1	0.0	18.8	0.8	19.6	1004.7				
0.063	100	7.3	0.6									
< 0,063	100	7.3	0.6	10.5	15.8	4.9	20.6	1025.3				
							1025.3		1035.8			

Tablica 14: AM5- količine agregata i bitumena

										Udio bitumena: 4.20%		
Udjeli poj. frakcija	100 % od ukupne mase mineralne mješavine			Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)			Suma: kamen bez punila	Kumulativno : kamen	Punilo	Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena
	1.01%	20.87%	78.12%	10.4	213.9	800.8						
Otvor sita (mm)	Punilo	0-4	4-8	Punilo	0-2	2-4						
11.2	100	100	100									
8 - 11,2	0	0	7.6	0.0	0.0	60.9	60.9	60.9				
8	100	100	92.4									
4 - 8	0	3	90.8	0.0	6.4	727.1	733.5	794.4				
4	100	97	1.6									
2 - 4	0	31	0.8	0.0	66.3	6.4	72.7	867.1				
2	100	66	0.8									
1 - 2	0	22.3	0.1	0.0	47.7	0.8	48.5	915.6				
1	100	43.7	0.7									
0,25 - 1	0	27.7	0	0.0	59.3	0.0	59.3	974.9				
0.25	100	16	0.7									
0,063 - 0,25	0	8.7	0.1	0.0	18.6	0.8	19.4	994.3				
0.063	100	7.3	0.6									
< 0,063	100	7.3	0.6	10.4	15.6	4.8	20.4	1014.7				
							1014.7		1025.1			

Tablica 15: AM6- količine agregata i bitumena

										Udio bitumena: 5.20%		
Udjeli poj. frakcija	100 % od ukupne mase mineralne mješavine			Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)			Suma: kamen bez punila	Kumulativno : kamen	Punilo	Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena
	1.01%	20.87%	78.12%	10.2	211.7	792.4	(g)					
Otvor sita (mm)	Punilo	0-4	4-8	Punilo	0-2	2-4				1070	1014.4	55.64
11.2	100	100	100									
8 - 11,2	0	0	7.6	0.0	0.0	60.2	60.2	60.2				
8	100	100	92.4									
4 - 8	0	3	90.8	0.0	6.4	719.5	725.9	786.1				
4	100	97	1.6									
2 - 4	0	31	0.8	0.0	65.6	6.3	72.0	858.1				
2	100	66	0.8									
1 - 2	0	22.3	0.1	0.0	47.2	0.8	48.0	906.1				
1	100	43.7	0.7									
0,25 - 1	0	27.7	0	0.0	58.6	0.0	58.6	964.7				
0.25	100	16	0.7									
0,063 - 0,25	0	8.7	0.1	0.0	18.4	0.8	19.2	983.9	10.2			
0.063	100	7.3	0.6									
< 0,063	100	7.3	0.6	10.2	15.5	4.8	20.2	1004.1				
							1004.1		1014.4			

Tablica 16: AM7- količine agregata i bitumena

										Udio bitumena: 3.20%		
Udjeli poj. frakcija	100 % od ukupne mase mineralne mješavine			Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)			Suma: kamen bez punila	Kumulativno: kamen	Punilo	Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena
	0.73%	25.04%	74.23%	7.6	259.4	768.8	(g)					
Otvor sita (mm)	Punilo	0-4	4-8	Punilo	0-2	2-4				1070	1035.8	34.24
11.2	100	100	100									
8 - 11,2	0	0	7.6	0.0	0.0	58.4	58.4	58.4				
8	100	100	92.4									
4 - 8	0	3	90.8	0.0	7.8	698.1	705.9	764.3				
4	100	97	1.6									
2 - 4	0	31	0.8	0.0	80.4	6.2	86.6	850.9				
2	100	66	0.8									
1 - 2	0	22.3	0.1	0.0	57.8	0.8	58.6	909.5				
1	100	43.7	0.7									
0,25 - 1	0	27.7	0	0.0	71.8	0.0	71.8	981.3				
0.25	100	16	0.7									
0,063 - 0,25	0	8.7	0.1	0.0	22.6	0.8	23.3	1004.7	7.6			
0.063	100	7.3	0.6									
< 0,063	100	7.3	0.6	7.6	18.9	4.6	23.5	1028.2				
							1028.2		1035.8			

Tablica 17: AM8- količine agregata i bitumena

										Udio bitumena: 4.20%		
Udjeli poj. frakcija	100 % od ukupne mase mineralne mješavine			Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)			Suma: kamen bez punila	Kumulativno : kamen	Punilo	Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena
	0.73%	25.04%	74.23%	7.5	256.7	760.9						
	0											
Otvor sita (mm)	Punilo	0-4	4-8	Punilo	0-2	2-4						
11.2	100	100	100									
8 - 11.2	0	0	7.6	0.0	0.0	57.8	57.8	57.8				
8	100	100	92.4									
4 - 8	0	3	90.8	0.0	7.7	690.9	698.6	756.4				
4	100	97	1.6									
2 - 4	0	31	0.8	0.0	79.6	6.1	85.7	842.1				
2	100	66	0.8									
1 - 2	0	22.3	0.1	0.0	57.2	0.8	58.0	900.1				
1	100	43.7	0.7									
0.25 - 1	0	27.7	0	0.0	71.1	0.0	71.1	971.2				
0.25	100	16	0.7									
0.063 - 0.25	0	8.7	0.1	0.0	22.3	0.8	23.1	994.3				
0.063	100	7.3	0.6									
< 0.063	100	7.3	0.6	7.5	18.7	4.6	23.3	1017.6				
							1017.6		1070	1025.1	44.94	

Tablica 18: AM9- količine agregata i bitumena

										Udio bitumena: 5.20%		
Udjeli poj. frakcija	100 % od ukupne mase mineralne mješavine			Pojedinačne mase podfrakcija agregata (g)			Suma: kamen bez punila	Kumulativno : kamen	Punilo	Ukupna masa asfaltnog uzorka	Ukupna masa mineralne mješavine	Ukupna masa bitumena
	0.73%	25.04%	74.23%	7.4	254.0	753.0						
	0											
Otvor sita (mm)	Punilo	0-4	4-8	Punilo	0-2	2-4						
11.2	100	100	100									
8 - 11.2	0	0	7.6	0.0	0.0	57.2	57.2	57.2				
8	100	100	92.4									
4 - 8	0	3	90.8	0.0	7.6	683.7	691.3	748.5				
4	100	97	1.6									
2 - 4	0	31	0.8	0.0	78.7	6.0	84.8	833.3				
2	100	66	0.8									
1 - 2	0	22.3	0.1	0.0	56.6	0.8	57.4	890.7				
1	100	43.7	0.7									
0.25 - 1	0	27.7	0	0.0	70.4	0.0	70.4	961.0				
0.25	100	16	0.7									
0.063 - 0.25	0	8.7	0.1	0.0	22.1	0.8	22.9	983.9				
0.063	100	7.3	0.6									
< 0.063	100	7.3	0.6	7.4	18.5	4.5	23.1	1007.0				
							1007.0		1070	1014.4	55.64	

5.5. Postupak izrade uzoraka od poroznog asfalta

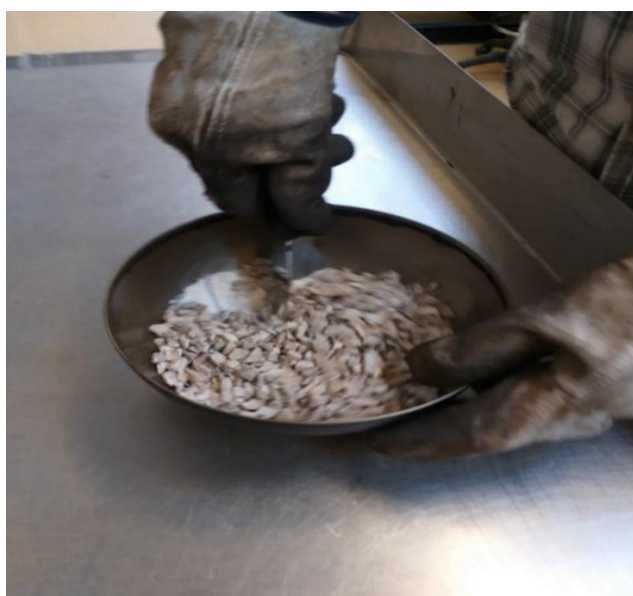
Izrada uzoraka počinje odvagom materijala prema količinama iz gore navedenih tablica. Odvaga se vrši od najsitnijih prema najkrupnijim frakcijama, kumulativno kao što je prikazano na Slici 15.



Slika 15: Odvaga materijala

Nakon odvage materijala, materijal je potrebno promiješati (Slika 16).

Promiješani materijal postavlja se u komoru za zagrijavanje prema normi HRN EN 12697-35 na 160°C.



Slika 16: Miješanje mineralnih komponenti

Po završetku pripreme mineralnih komponenti dodaje se bitumen. Bitumen je potrebno izvagati. Vaganje se vrši na način da se bitumen prvo zagrije, tako da bude u tekućem stanju te se dozira u silikonske kalupe do potrebne mase bitumena. Nakon hlađenja bitumena, ukoliko postoje odstupanja, vrši se korekcija.

Odvagani bitumen dodaje se u posudu s pripremljenom mineralnom mješavinom, zatim se postavlja u komoru za zagrijavanje na 160°C prije miješanja.

Na Slici 17 prikazana je pripremljena mješavina u komori za zagrijavanje.



Slika 17: Pripremljena mješavina u komori za zagrijavanje



Slika 18: Uzorci od poroznog asfalta

Slikom 18 prikazani su izrađeni uzorci od poroznog asfalta.

5.6. Mjerenje i vaganje uzoraka

Postupak mjerenja dimenzija uzoraka definiran je normom HRN EN 12697-29. Uzorci su mjereni digitalnim šublerom. Mjerenje se izvodi na način da se izmjere četiri visine uzorka. Za potrebe dobivanja visina, uzorak se rotira za 90° , očita se visina, zatim se uzima aritmetička sredina istih. Širina uzorka mjerena je na dnu, sredini i na vrhu uzorka. Mjerenje uzorka prikazano je Slikom 19. Nakon tih mjerenja, uzorak se rotira za 90° te se ponavlja isti postupak. Prema tome dobije se šest različitih širina uzorka od kojih se uzima aritmetička sredina. Nakon mjerenja isti uzorci su izvagani (Slika 20) kako bi se na temelju dobivenih masa i dimenzija odredila računski gustoća asfaltne mješavine i gustoća asfaltnog uzorka te ostale potrebne karakteristike.



Slika 19: Mjerenje uzorka digitalnim šublerom



Slika 20: Vaganje uzorka

Tablica 19: Izmjerene visine i promjeri uzoraka te dobivene prosječne vrijednosti

Uzorak	1	2	3	4	5	6	7	8	9
h1	66.4	65.2	63.8	64.3	63.4	62.1	63.6	62.5	61.3
h2	66.3	65.5	63.8	64.3	63.3	62	63.7	62.3	61.5
h3	66.4	65.6	64	64.2	63.2	62.1	63.5	62.2	61.2
h4	66,6	65.2	63.7	64.4	63.3	62.2	63.8	62.3	61.5
h srednje	66.37	65.38	63.83	64.30	63.30	62.10	63.65	62.33	61.38
d1	101.6	101.7	101.7	101.7	101.4	101.4	101.4	101.7	101.5
d2	101.6	101.7	101.6	101.6	101.4	101.4	101.4	101.6	101.6
d3	101.7	101.6	101.6	101.6	101.4	101.4	101.5	101.7	101.6
d4	101.5	101.4	101.4	101.5	101.7	101.5	101.6	101.4	101.6
d5	101.4	101.4	101.5	101.4	101.6	101.6	101.7	101.4	101.4
d6	101.4	101.4	101.5	101.7	101.6	101.7	101.7	101.5	101.4
d srednje	101.53	101.53	101.55	101.58	101.52	101.50	101.55	101.55	101.52
Volumen	537349.90	529320.69	516940.50	521129.64	512351.83	502473.97	515523.12	504791.49	496770.83
% Bitumena	3.20	4.20	5.20	3.20	4.20	5.20	3.20	4.20	5.20

U Tablici 19 prikazane su izmjerene visine i promjeri uzorka te dobivene prosječne vrijednosti za svaki pojedini uzorak.

Računska gustoća asfaltne mješavine određuje se prema normi HRN EN 12697-5 procedurom C iz izraza (2):

$$\rho_{mc} = p_a \rho_a \frac{100}{(p_{a1}/\rho_{a1}) + (p_{a2}/\rho_{a2}) + \dots + (p_b/\rho_b)} \quad (2)$$

Gdje je:

ρ_{mc} = računski gustoća asfaltne mješavine (Mg/m³)

p_{a1} = maseni udio agregata 1 u mješavini (%)

ρ_{a1} = gustoća agregata 1 u mješavini (Mg/m³)

p_{a2} = maseni udio agregata 2 u mješavini (%)

ρ_{a2} = gustoća agregata 2 u mješavini (Mg/m³)

p_b = maseni udio bitumena u mješavini (%)

ρ_b = gustoća bitumena u mješavini (Mg/m³)

Gustoća asfaltnog uzorka određuje se prema normi HRN EN 12697-6, procedurom D iz izraza (3):

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

Gdje je:

ρ_{bdim} = gustoća asfaltnog uzorka (Mg/m³)

m_1 = masa suhog asfaltnog uzorka (g)

h = visina uzorka (mm)

d = promjer asfaltnog uzorka (mm)

Šupljine u asfaltnom uzorku određuju se prema normi HRN EN 12697-8. Koristeći dobivenu gustoću asfaltne mješavine, te gustoću asfaltnog uzorka iz dolje navedenog izraza (4) određuje se volumni udio šupljina u asfaltnom uzorku.

$$C_{\text{š/AU}} = \frac{\rho_{AM} - \rho_{AU}}{\rho_{AM}} \times 100 \quad (4)$$

Gdje je:

$C_{\text{š/AU}}$ = volumni udio šupljina u asfaltnom uzorku (%)

ρ_{AM} = gustoća asfaltne mješavine (Mg/m³)

ρ_{AU} = gustoća asfaltnog uzorka (Mg/m³)

Volumni udio šupljina u kamenom materijalu dobiva se iz izraza (5):

$$C_{\check{s}KM/AU} = C_{\check{s}/AU} + \frac{\rho_{AU}}{\rho_B} \times \%mas_{B/AM} \quad (5)$$

Gdje je:

$C_{\check{s}KM/AU}$ = volumni udio šupljina u kamenom materijalu (%)

$C_{\check{s}/AU}$ = volumni udio šupljina u asfaltnom uzorku (%)

ρ_B = gustoća bitumenskog veziva (Mg/m^3)

ρ_{AU} = gustoća asfaltnog uzorka (Mg/m^3)

$\%mas_{B/AM}$ = maseni udio veziva u asfaltnoj mješavini

Ispuna šupljina u kamenom materijalu dobiva se iz izraza (6):

$$ISP_{\check{s}KMB} = \left(\frac{\left(\%mas_{\frac{B}{AM}} \times \rho_{AU} / \rho_B \right)}{C_{\frac{\check{s}KM}{AU}}} \right) \times 100 \quad (6)$$

Gdje je:

$ISP_{\check{s}KMB}$ = ispunjena šupljina bitumenom u kamenom materijalu (%)

$C_{\check{s}KM/AU}$ = volumni udio šupljina u kamenom materijalu (%)

ρ_B = gustoća bitumenskog veziva (Mg/m^3)

ρ_{AU} = gustoća asfaltnog uzorka (Mg/m^3)

$\%mas_{B/AM}$ = maseni udio veziva u asfaltnoj mješavini

Tablica 20. Gustoće materijala

FRAKCIJA	GUSTOĆA	MJERNA JEDINICA
Brašno	2.890	Mg/m ³
0/4	2.710	
4/8	2.710	
BITUMEN	GUSTOĆA	MJERNA JEDINICA
BIT 50/70	1.023	Mg/m ³

U Tablici 20 prikazane su gustoće materijala od kojih se izrađuju uzorci.

Tablica 21: Karakteristike asfaltnih mješavina i uzoraka

	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5	AM6	AM7	AM8	AM9
Masa suhog uzorka	1064.5	1058.7	1051.1	1066.1	1062.5	1053.1	1066.4	1063.8	1059.4
$\rho_{AM\text{rač}}$	2.57	2.53	2.50	2.57	2.53	2.50	2.57	2.53	2.50
ρ_{AU} mjerenjem dimenzija	1.98	2.00	2.03	2.05	2.07	2.10	2.07	2.11	2.13
$C_{S/AU}$	23.04	21.07	18.54	20.52	18.16	16.03	19.64	16.83	14.56
$C_{SKM/AU}$	29.23	29.28	28.87	26.92	26.68	26.69	26.11	25.49	25.40
ISP_{SKMB}	21.20	28.04	35.80	23.77	31.92	39.92	24.79	33.95	42.68

U Tablici 21 prikazane su sve proračunate vrijednosti iz gore navedenih formula i normi.

5.7. CANTABRO ISPITIVANJE PREMA NORMI HRN EN 12697-17

Cantabro ispitivanje koristi se za ispitivanje otpornosti na abraziju raznih materijala, kao i asfaltnih materijala. Više o Cantabro ispitivanju navedeno je u 4.1.2. poglavlju ovog rada. Ispitivanje se provodi u Los Angeles uređaju prikazanom na Slici 21.



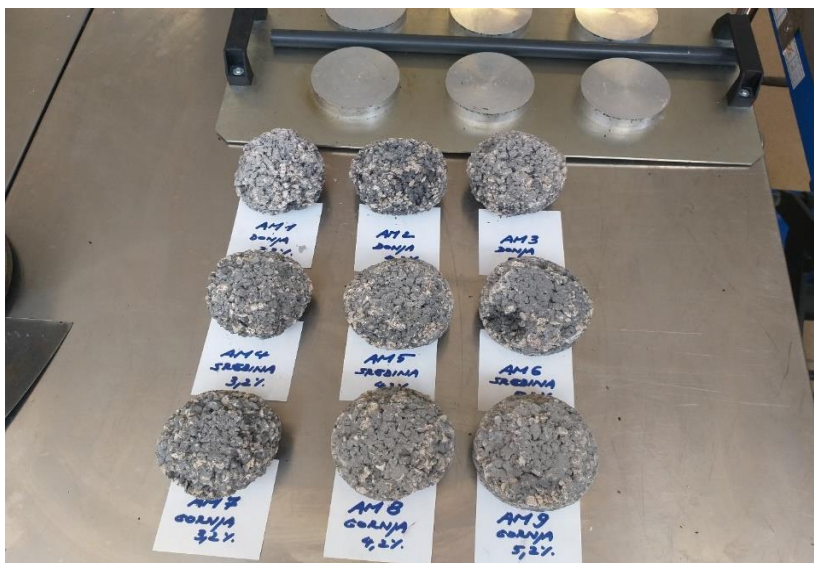
Slika 21: Los Angeles uređaj

Ispitivanje se provodi prema normi HRN EN 12697-17. Uzorci koji ne smiju biti stariji od 42 dana postavljaju se u bubanj Los Angeles uređaja. Bubanj se okreće 300 puta brzinom od 30 okretaja po minuti. Norma navodi, odnosno preporuča vršenje ispitivanja na temperaturi između 15°C do 25°C. Po završetku ispitivanja, uzorci se izvade iz bubnja te ih je potrebno izvagati. Tehnički uvjeti za asfaltna kolnika definiraju najveći dopušteni gubitak čestica koji iznosi 30% [7]. Na Slici 22 prikazano je vaganje uzorka nakon Cantabro ispitivanja.



Slika 22: Vaganje uzorka nakon Cantabro ispitivanja

Na Slici 23 prikazano je 9 uzoraka nakon provedenog Cantabro ispitivanja.



Slika 23: Uzorci nakon provedenog Cantabro ispitivanja

Gubitak zrnja nakon provedenog ispitivanja određuje se izrazom (7):

$$\text{gubitak zrnja} = \frac{A - B}{A} \times 100 [\%] \quad (7)$$

Gdje je:

A= početna masa uzorka

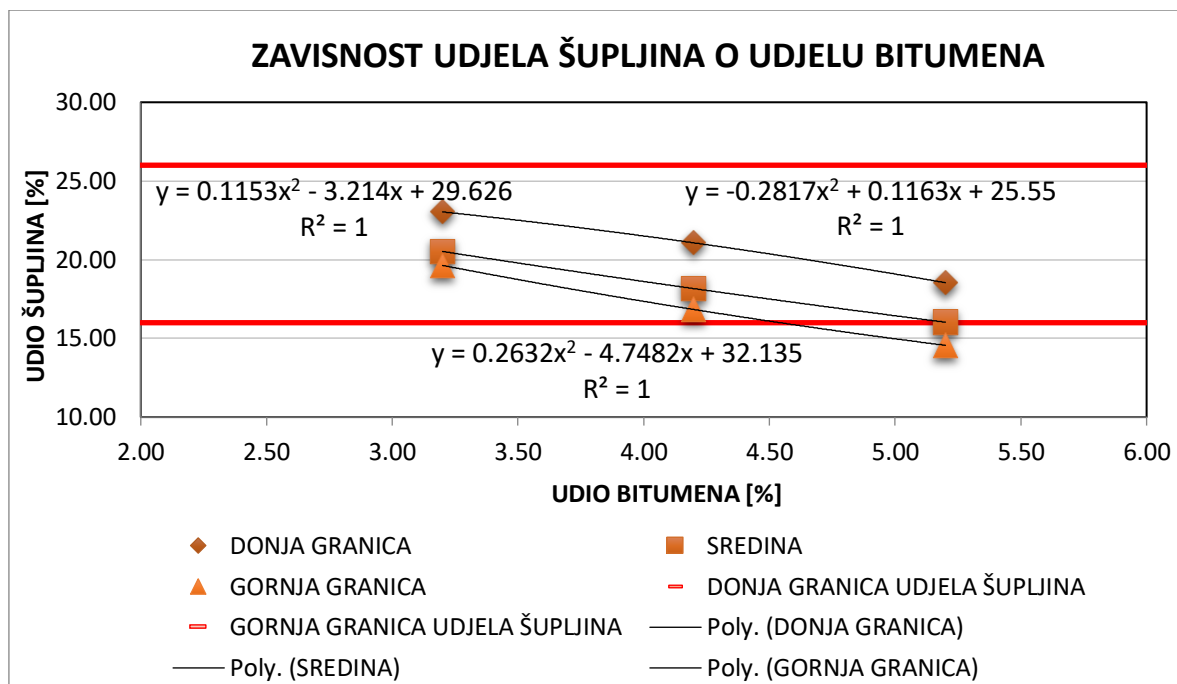
B= masa uzorka nakon ispitivanja

Tablicom 22 prikazani su rezultati dobiveni Cantabro ispitivanjem.

Tablica 22: Rezultati nakon provedbe Cantabro ispitivanja

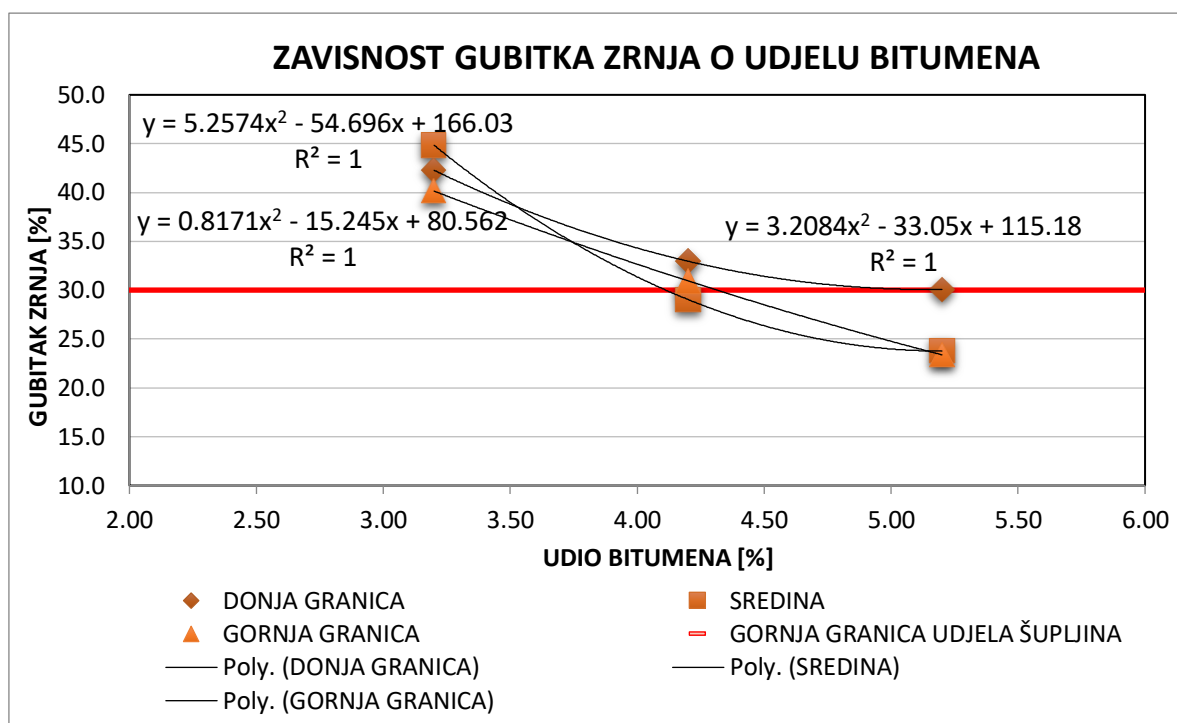
Masa suhog uzorka (g)	1064.5	1058.7	1051.1	1066.1	1062.5	1053.1	1066.4	1063.8	1059.4
Masa uzorka nakon ispitivanja (g)	614.5	709.7	735	588.1	753.9	802.8	638.3	734.6	811.7
Gubitak zrnja (%)	42.3	33.0	30.1	44.8	29.0	23.8	40.1	30.9	23.4

5.7.1. Analiza rezultata



Slika 24: Zavisnost udjela šupljina o udjelu bitumena

Slikom 24 prikazana je zavisnost udjela šupljina o udjelu bitumena. Normom HRN EN 13108-7 određen je najmanji i najveći dopušteni udio šupljina za porozni asfalt, što je u ovom ispitivanju za srednje teško prometno opterećenje. Kako bi mješavina po kriteriju udjela šupljina zadovoljavala, volumni udio šupljina trebao bi se nalaziti unutar granica od 16% do 26%. Može se jasno vidjeti da asfaltna mješavina 9 ne zadovoljava po kriteriju minimalnog udjela šupljina te se ne može koristiti za izvedbu habajućeg sloja od poroznog asfalta. Ostale mješavine, od 1 do 8 nalaze se unutar granica te zadovoljavaju kriterij minimalnog udjela šupljina. Prema grafu na slici može se zaključiti da se povećanjem udjela bitumena smanjuje volumni udio šupljina.



Slika 25: Zavisnost gubitka zrnja o udjelu bitumena

Slikom 25 prikazana je zavisnost gubitka zrnja o udjelu bitumena za uzorke od poroznog asfalta. Tehničkim uvjetima definirano je da gubitak zrnja mora biti manji od 30% [7].

Grafovima na Slici 24 i 25 može se pokazati zavisnost udjela šupljina, udjela bitumena te gubitka zrnja. Prema grafu vidljivo je da po kriteriju gubitka zrnja mješavine 5, 6 i 9 zadovoljavaju dok mješavine 1, 2, 3, 4, 7 i 8 imaju prevelik gubitak zrnja, te se ne bi mogle upotrebljavati za izvedbu habajućeg asfaltnog sloja. Međutim, mješavina 9 ne zadovoljava kriterij minimalnog udjela šupljina te je time ista eliminirana.

Prema tome, uključujući udio šupljina te krunjenje, mješavine koje zadovoljavaju oba kriterija jesu 5 i 6 koje sadrže udio bitumena od 4,2% i 5,2%. Mješavine s udjelom bitumena od 3,2% ne zadovoljavaju.

Za poboljšanje otpornosti mješavine na krunjenje u svome diplomskom radu Vasić, F. (2018.) utvrđuje da zamjena cestograđevnog bitumena polimerom modificiranim bitumenom znatno utječe na smanjenje krunjenja. Dodaci poput celuloznih vlakana i hidratiziranog kalcijevog vapna ne utječu na poboljšanje svojstava mješavine u pogledu krunjenja [12]. Što se može primijeniti i na mješavine u ovom diplomskom radu.

Povećanjem udjela bitumena, smanjuje se udio šupljina te se time smanjuje i gubitak zrnja. Takav odnos potvrđen je regresijskom analizom.

Regresijska analiza je statistički postupak koji se koristi kako bi se pokazao odnos između više varijabla. Za cilj ima utvrditi statističku ovisnost između varijabli te jakost takve veze, odnosno ovisnosti. Regresijska analiza često se koristi za prognoziranje i predviđanje. [14] Prema grafovima na Slici 24 i 25 vidljiva je pozitivna funkcionalna veza između varijabli (udio šupljina, udio bitumena, postotak krunjenja) te se regresijska analiza pokazala kao dobar postupak za prikazivanje zavisnosti gore spomenutih parametara.

	x_1	x_2	y	Calculated y	Error
1.	3.20	23.03736153	42.27336778	42.66290139	$3.895336148 \cdot 10^{-1}$
2.	4.20	21.06903168	32.96495702	33.24497105	$2.800140305 \cdot 10^{-1}$
3.	5.20	18.53728227	30.07325659	29.48139036	0.591866232
4.	3.20	20.52260438	44.83631929	42.02748329	2.808835997
5.	4.20	18.16218255	29.04470588	29.9087267	$8.640208157 \cdot 10^{-1}$
6.	5.20	16.03245306	23.76792327	24.57464977	$8.067265001 \cdot 10^{-1}$
7.	3.20	19.63564767	40.1444111	42.56371347	2.419302371
8.	4.20	16.83485455	30.94566648	29.80163162	1.144034856
9.	5.20	14.56038104	23.38115915	23.16629888	$2.148602747 \cdot 10^{-1}$

Calculate

$$\text{Result: } y = 6.5294183 x_1^2 + 1.985909703 x_1 x_2 + 2.520049827 \cdot 10^{-1} x_2^2 - 98.80842728 x_1 - 17.07956378 x_2 + 405.3122364$$

Residual Sum of Squares: $\text{rss} = 17.07535386$

Coefficient of Determination: $R^2 = 9.646692987 \cdot 10^{-1}$

Slika 26: Jednadžba dobivena regresijskom analizom [15]

$$y = 6,5294x_1^2 + 1,9859x_1x_2 + 0,2520x_2^2 + 98,8084x_2^2 - 17,0795x_2 + 405,3122 \quad (8)$$

Gdje je:

y = krunjenje (%)

x_1 = udio bitumena u asfaltnom mješavini (%)

x_2 = volumni udio šupljina (%)

R^2 je koeficijent determinacije koji pokazuje reprezentativnost regresijskog modela koji se temelji na analizi varijabli. Koeficijent R^2 daje nam informaciju o jačini funkcijske veze između x i y . Ukoliko je vrijednost koeficijenta R^2 bliža 1, zavisnost x i y je jača [14].

Na Slici 26 prikazana je jednadžba i koeficijent determinacije dobiven regresijskom analizom. R^2 iznosi 0,965 što je blizu 1 te pokazuje dovoljno jaku vezu između x i y , u ovom slučaju x_1 , x_2 i y , gdje y predstavlja krunjenje, a x_1 i x_2 udio bitumena u mješavini i volumni udio šupljina.

Tablica 23: Zavisnost udjela bitumena, šupljina i krunjenja

Gubitak zrnja (%)		Udio bitumena (%)										
		3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.20	4.40	4.60	4.80	5.00	5.20
Udio šupljina (%)	16	48.8	44.0	39.8	36.0	32.8	30.1	27.9	26.2	25.1	24.5	24.4
	17	46.4	42.0	38.1	34.8	32.0	29.7	27.9	26.6	25.9	25.6	25.9
	18	44.5	40.5	37.0	34.1	31.6	29.7	28.3	27.5	27.1	27.3	28.0
	19	43.1	39.5	36.4	33.9	31.8	30.3	29.3	28.8	28.9	29.5	30.6
	20	42.2	39.0	36.3	34.2	32.5	31.4	30.8	30.7	31.2	32.1	33.6
	21	41.8	39.0	36.7	35.0	33.7	33.0	32.8	33.1	34.0	35.3	37.2
	22	41.9	39.5	37.6	36.3	35.4	35.1	35.3	36.0	37.2	39.0	41.3
	23	42.5	40.5	39.0	38.1	37.6	37.7	38.3	39.4	41.0	43.2	45.9
	24	43.7	42.0	40.9	40.4	40.3	40.8	41.8	43.3	45.3	47.9	51.0
	25	45.3	44.1	43.4	43.2	43.5	44.4	45.8	47.7	50.1	53.1	56.5
26	47.4	46.6	46.3	46.5	47.2	48.5	50.3	52.6	55.4	58.8	62.6	

Rezultati analize dani su u Tablici 23 gdje se jasno uočava da se krunjenje, odnosno odvajanje zrna smanjuje porastom udjela bitumena i manjim udjelom zračnih šupljina.

ZAKLJUČAK

Ovim diplomskim radom analiziran je utjecaj projektnih parametara poroznog asfalta na krunjenje, odnosno prikazana je međusobna zavisnost udjela bitumena, volumnog udjela šupljina te bitumena u različitim udjelima.

Porozni asfalt je tip vruće asfaltne mješavine koji se najčešće upotrebljava za habajuće slojeve, osim poroznog asfalta PA 16 koji je isključivo namijenjen izvedbi donjeg sloja u sustavima izvedbe dvoslojnih asfaltnih konstrukcija, a u svrhu smanjenja buke [7].

Porozni asfalt pokazao se izrazito dobar u korištenju za potrebe odvodnje vode s prometnica, budući da mu je jedna od odlika velika vodopropusnost. Jednako tako, porozni asfalt pokazao se boljim u odnosu na klasičnu vruću asfaltnu mješavinu u pogledu smanjenja razine buke u prometu te povećanja sigurnosti prometa. Glavni nedostaci poroznog asfalta su njegova trajnost i cijena. Jedan od parametara koji utječe na trajnost poroznog asfalta je krunjenje. Krunjenje predstavlja raspadanje asfaltnih slojeva, razlog takve pojave je odvajanje zrna agregata [3].

Za potrebe diplomskog rada provedeno je laboratorijsko ispitivanje te su određena tri granulometrijska sastava s različitim udjelima bitumena. Granulometrijski sastavi poredani su prema diskontinuitetu, gdje najveći diskontinuitet ima sastav nazvan "uz donju granicu", a najmanji "uz gornju granicu". Agregat korišten za ovo ispitivanje sedimentnog je podrijetla, a bitumen koji se koristi je cestograđevni BIT 50/70. Izrađeno je 9 uzoraka.

Otpornost asfaltne mješavine poroznog asfalta na krunjenje ispituje se Cantabro postupkom. Cantabro postupak izvršen je u "Los Angeles" uređaju za abraziju.

Analizom podataka dobivenih ispitivanjem zaključeno je sljedeće:

- Cantabro postupak ispitivanja pokazao se dobrim za određivanje postotka krunjenja asfaltnih uzoraka
- povećanjem udjela bitumena, volumni udio šupljina opada
- povećanjem udjela bitumena, postotak krunjenja se smanjuje
- postoji zavisnost između krunjenja, udjela šupljina te udjela bitumena
- najbolju otpornost na krunjenje pokazale su mješavine manje diskontinuiranih granulometrijskih sastava, a s većim udjelom bitumena
- manjim diskontinuitetom granulometrijskog sastava utječe se na smanjenje volumnog udjela šupljina, a time se povećava otpornost uzoraka na krunjenje

Prema navedenim zaključcima kao najoptimalnije mješavine za izvedbu habajućih asfaltnih slojeva odabrane su mješavine 5 i 6. Mješavine 5 i 6 zadovoljavaju kriterije granica volumnog udjela šupljina te otpornosti na gubitak zrnja, odnosno krunjenja. Mješavina 5 sadrži manji udio bitumena čime se smanjuje moguće ocjeđivanje veziva iz asfaltne mješavine. Iz prethodnih istraživanja utvrđeno je da korištenje polimerom modificiranog bitumena poboljšava otpornost poroznog asfalta na krunjenje. Stoga se za daljnja istraživanja preporučuje zamijeniti cestograđevni bitumen polimerom modificiranim bitumenom.

LITERATURA:

- [1] Jovanović, R., Močibob I., Nežić D., Šaravanja T. (2016). Porozni asfalt. URL: <https://www.slideshare.net/ivamocibob/porozni-asfalt> (22. 4.2019.)
- [2] Boudreau III, Harold & Taylor, Michael & Yu Huang, Tsang & Tatel, Samuel & Najafi, Fazil. (2009). *The Real-World Advantages and Disadvantages of Permeable Pavement as Roadways*. International Journal of Interdisciplinary Social Sciences
- [3] Freddy L. Roberts, Prithvi S. Kandhal, E. Ray Brown, Dah-Yinn Lee, Thomas W. Kennedy, *Vruće asfaltne mješavine, materijali, projektiranje i ugradnja*, 1996.
- [4] Cuculić, M., *Predavanja iz predmeta Savitljive kolničke konstrukcije*, skripta
- [5] National Asphalt Pavement Association, *Design, Construction, and Maintenance of Open-Graded Asphalt Friction Courses*, 2002.
- [6] d. i. g. Mr. sc. Mladen Fistrić, *Korištenje različitih vrsta agregata u cilju postizanja optimalnih svojstava asfalta i doprinosa očuvanju okoliša i prirodnih resursa*, 2014.
- [7] *Tehnički uvjeti za asfaltne kolnike*, Hrvatske ceste d.o.o., Zagreb, 2015.
- [8] Tariq, U. (2013). Open graded friction course. URL: <https://www.slideshare.net/UmairTariq10/open-graded-friction-course-ogfc>
- [9] Australian Asphalt Pavement Association, *Open Graded Asphalt Design Guide*, 1997.
- [10] Krnić, L. (2014.) *Odabir nosivih i završnih slojeva asfaltnog kolnika*, Hrvatsko asfaltersko društvo, Zagreb.
- [11] Gnjidić, M. (2018.) *Projektiranje asfaltne mješavine prema kriteriju dozvoljenih odstupanja*. Diplomski rad. Rijeka: Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
- [12] Vasić, F. (2018.) *Utjecaj projektne mješavine poroznog asfalta na pojavu krunjenja*. Diplomski rad. Rijeka: Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci
- [13] Ahmad Kamar, F.H.; Sarif J.N. (2008.) Design of porous asphalt mixture to performance related criteria: Public Works Department, Malaysia.

[15] Lulić, I. (2014.) *Uporaba metode regresijske analize u rješavanju problema vezanih za inženjersku praksu*. Završni rad. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

[16] <http://www.xuru.org>, 01.09.2019.