

Primljen / Received: 17.11.2015.

Ispravljen / Corrected: 29.1.2016.

Prihvaćen / Accepted: 27.3.2016.

Dostupno online / Available online: 10.5.2016.

# Svojstva mješavina za izradu nevezanih nosivih slojeva s dodatkom recikliranog asfalta

## Autori:



Dr.sc. **Josipa Domitrović**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[jdomitrovic@grad.hr](mailto:jdomitrovic@grad.hr)



Prof.dr.sc. **Tatjana Rukavina**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet  
[rukavina@grad.hr](mailto:rukavina@grad.hr)



Izv.prof.dr.sc. **Sanja Dimter**, dipl.ing.građ.  
Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku  
Građevinski fakultet  
[sdimter@gfos.hr](mailto:sdimter@gfos.hr)

Prethodno priopćenje

**Josipa Domitrović, Tatjana Rukavina, Sanja Dimter**

## Svojstva mješavina za izradu nevezanih nosivih slojeva s dodatkom recikliranog asfalta

U radu je istražena mogućnost primjene recikliranog asfalta kao zamjene za prirodni agregat u mješavinama za izradu nevezanih nosivih slojeva. Istraživanje je provedeno na mješavinama u kojima je određeni udio prirodnog agregata (vapnenca, šljunka) zamijenjen recikliranim asfaltom. Programom istraživanja obuhvaćena su ispitivanja granulometrijskog sastava, parametara zbijanja, fizikalno-mehaničkih svojstava i nosivosti mješavina. Rezultati pokazuju da reciklirani asfalt, u određenom udjelu, može biti prikladna zamjena za prirodni agregat.

### Ključne riječi:

nevezani nosivi sloj, reciklirani asfalt, granulometrijski sastav, fizikalno-mehanička svojstva, nosivost

Preliminary report

**Josipa Domitrović, Tatjana Rukavina, Sanja Dimter**

## Properties of unbound base course mixes with recycled asphalt

The possibility of using recycled asphalt as replacement for natural aggregate in unbound base course mixes is explored in the paper. The mixes in which a certain proportion of natural aggregate (limestone, gravel) was replaced with recycled asphalt were analysed. The testing program involved analysis of the grading, compaction parameters, physicommechanical properties and bearing capacity of mixes. The results show that recycled asphalt can be used, in some proportions, as a suitable replacement for natural aggregate.

### Key words:

unbound base course, recycled asphalt, grading, physicommechanical properties, bearing capacity

Vorherige Mitteilung

**Josipa Domitrović, Tatjana Rukavina, Sanja Dimter**

## Eigenschaften von Mischungen mit recykliertem Asphalt zur Ausführung unabhängiger Tragschichten

In dieser Arbeit wird die mögliche Anwendung recyklierten Asphalts als Ersatz für natürliche Gesteinskörnung in Mischungen zur Ausführung unabhängiger Tragschichten erforscht. Die Untersuchungen wurden an Mischungen durchgeführt, bei denen ein Anteil natürlicher Gesteinskörnung (Kalkstein, Kies) mit recykliertem Asphalt ersetzt wurde. Das Forschungsprogramm umfasste die Ermittlung der granulometrischen Zusammensetzung, der Verdichtungsparameter sowie der physikalisch-mechanischen Eigenschaften und der Tragfähigkeit der Mischungen. Aufgrund der Resultate zeigt sich, dass rezykliertes Asphalt in bestimmtem Anteil als angemessener Ersatz für natürliche Gesteinskörnung angesehen werden kann.

### Schlüsselwörter:

unabhängige Tragschichten, recykliertes Asphalt, granulometrische Zusammensetzung, physikalisch-mechanische Eigenschaften, Tragfähigkeit

## 1. Uvod

Na više od 90 % [1] cestovne mreže u Europi, prema nekim izvorima i u svijetu [2], te na gotovo cjelokupnoj cestovnoj mreži u Hrvatskoj [3] završni su slojevi izrađeni od asfaltnih mješavina. Tijekom održavanja i obnove ovih kolnika godišnje se u Europi proizvede više od 50 milijuna [4], a u SAD više od 100 milijuna tona recikliranog asfalta [5].

Reciklirani se asfalt najčešće primjenjuje kao zamjena za prirodni agregat u mješavinama za izradu asfaltnih (habajućih, veznih, nosivih) slojeva kolničkih konstrukcija, pri čemu se primjenjuju postupci hladne ili vruće reciklaže, na gradilištu (in site) ili u postrojenju (in plant). S obzirom na gornje granice dopuštenog udjela recikliranog asfalta, kao i druge zahtjeve koji se postavljaju na asfaltnu mješavinu i od njih izvedene slojeve, još uvijek postoje znatne količine recikliranog asfalta koje se ne mogu iskoristiti na ovaj način [6]. Stoga je, kako bi se izbjegli troškovi postupanja s recikliranim asfaltom, odnosno spriječio njegovo ilegalno odlaganje, potrebno pronaći alternativna rješenja. Jedno je od mogućih upotrijebiti takav materijal kao zamjenu za prirodni agregat u nevezanim nosivim slojevima.

Istraživanja o mogućnosti primjene recikliranog asfalta u nevezanim nosivim slojevima provode se od sredine devedesetih godina prošlog stoljeća. Većina istraživanja potvrdila je da ovaj materijal u određenom udjelu može biti prikladna zamjena za prirodni agregat, pri čemu se na mješavinu recikliranog asfalta i prirodnog agregata postavljaju isti zahtjevi kvalitete kao i na one od prirodnog agregata [7].

Iako se primjena recikliranog asfalta u nevezanim nosivim slojevima smatra inferiornom u odnosu na njegovu primjenu u asfaltnim slojevima, budući da se radi o tehnici uporabe materijala, zbog pozitivnih ekoloških učinaka (očuvanje prirodnih resursa, smanjenje količine otpada) kao i ekonomskih ušteda ova metoda upotrebe recikliranog asfalta postaje sve popularnija. Međutim, zbog nedostatka sustavnih laboratorijskih i terenskih

ispitivanja, kao i problema koji su se javljali prilikom sporadičnih primjena ovakvih mješavina, one još uvijek nisu prihvaćene kao standardni materijal za izradu nevezanih nosivih slojeva [6, 8-10].

U radu je prikazano istraživanje utjecaja udjela recikliranog asfalta i tipa prirodnog agregata na fizikalno-mehanička svojstva, parametre zbijanja i nosivost mješavina za izradu nevezanih nosivih slojeva, te je dana ocjena kvalitete mješavina s obzirom na zahtjeve navedene u Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama (OTU) [11].

## 2. Eksperimentalni dio

Da bi se ocijenila mogućnost primjene mješavina recikliranog asfalta i prirodnog agregata za izradu nevezanih nosivih slojeva, proveden je program ispitivanja usklađen sa zahtjevima koji se postavljaju na takve mješavine prema OTU [11]. Program ispitivanja podijeljen je u dvije faze, definiranje sastava mješavina i laboratorijska ispitivanja.

### 2.1. Definiranje sastava mješavina

Prema OTU, za izradu nevezanih nosivih slojeva dopuštena je upotreba drobljenog i/ili nedrobljenog prirodnog kamenog agregata. Uzimajući to u obzir, istraživanja su provedena na mješavinama recikliranog asfalta i vapnenca kao predstavnika drobljenog te šljunka kao predstavnika nedrobljenog prirodnog agregata. Za izradu mješavina odabrani su sljedeći osnovni materijali:

- reciklirani asfalt dobiven postupkom strojnog glodanja (**R**), (Ceste Karlovac d.o.o.);
- vapnenac (**V**), frakcije 0/4, 4/8, 8/16 i 16/32 (kamenolom Zvečaj - ARKADA d.o.o.);
- šljunak (**S**), frakcije 0/4, 4/8, 8/16, i 16/32 (šljunčara Motičnjak - COLAS Hrvatska d.d.).

Tablica 1. Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava osnovnih materijala

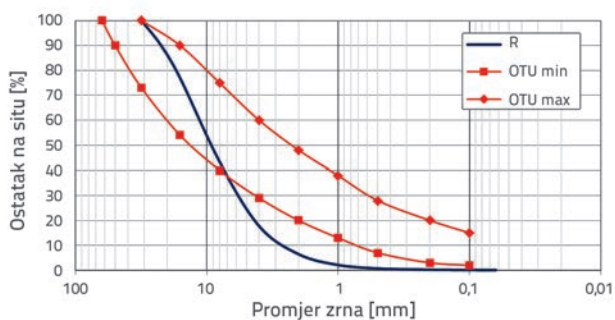
Osnovni materijal	Vapnenac (V)				Šljunak (S)				Reciklirani asfalt (R)
	0/4	4/8	8/16	16/32	0/4	4/8	8/16	16/32	
Otvor sita [mm]	Ostatak na situ [%]								
22,4				66,74				63,46	90,11
16,0			94,42	18,70			94,10	7,74	76,95
8,0		95,81	9,85	0,86		80,38	2,72	0,57	43,36
4,0	98,47	31,94	0,56	0,81	88,62	2,29	0,51		17,72
2,0	73,04	4,30	0,52		66,18	0,63	0,47		6,44
1,0	44,18	4,26	0,50		55,74				2,11
0,500	26,67	4,20			47,72				0,71
0,250	16,89	4,16			26,18				0,30
0,125	11,83	4,11			4,38				0,16

Tablica 2. Udio recikliranog asfalta i frakcija prirodnog agregata u projektiranim mješavinama

Oznaka mješavine	V100R0	V80R20	V65R35	V50R50	S100R0	S80R20	S65R35	S50R50	
Udio osnovnih materijala u mješavini [%]									
Reciklirani asfalt (R)	0	20	35	50	0	20	35	50	
Prirodni agregat (V; S)	16/32	20	15	10	10	15	15	10	5
	8/16	10	5	5	0	20	10	5	0
	4/8	25	20	10	5	20	10	5	5
	0/4	45	40	40	35	45	45	45	40

Nakon odabira osnovnih materijala, što predstavlja prvi korak u postupku definiranja sastava mješavina, provedeno je ispitivanje njihovog granulometrijskog sastava prema normi HRN EN 933-1 [12] (tablica 1.).

Iz grafičkih prikaza granulometrijskog sastava recikliranog asfalta (slika 1.) vidljivo je znatno odstupanje granulometrijske krivulje u odnosu na OTU definirano granično granulometrijsko područje, što upućuje na činjenicu da bez određenih korekcija reciklirani asfalt nije moguće koristiti za izradu nevezanog nosivog sloja.



Slika 1. Granulometrijski sastav recikliranog asfalta

Kako bi se dobile mješavine koje zadovoljavaju postavljene granulometrijske zahtjeve, proveden je postupak projektiranja mješavina tijekom kojeg je određeni udio recikliranog asfalta u ukupnoj masi mješavine zamijenjen prirodnim agregatom. Postupkom projektiranja utvrđeno je da maksimalni udio recikliranog asfalta, koji zadovoljava postavljene granulometrijske zahtjeve na mješavine za izradu nevezanog nosivog sloja, iznosi 50 %. Ukupno je projektirano osam mješavina u kojima je osim udjela recikliranog asfalta (0, 20, 35 i 50 %) variran tip i udio pojedine frakcije prirodnog agregata. Udio recikliranog asfalta te frakcija prirodnih agregata u projektiranim mješavinama prikazan je u tablici 2.

Prema projektiranom sastavu složene su mješavine (slika 2.) na kojima je provedeno ispitivanje granulometrijskog sastava. Rezultati ispitivanja svih osam mješavina te granično granulometrijsko područje prikazani su u tablici 3. Osim granulometrijskog sastava određene su i ostale granulometrijske karakteristike: maksimalna veličina zrna, stupanj neravnomjernosti i udio zrna manjih od 0,02 mm, a dobivene vrijednosti i zahtjevi navedeni u OTU prikazani su u tablici 4.



Slika 2. Mješavine recikliranog asfalta i vapnenca (lijevo) te šljunka (desno)

Tablica 3. Granulometrijski sastav mješavina recikliranog asfalta i prirodnog agregata

Oznaka mješavine	V100R0	V80R20	V65R35	V50R50	S100R0	S80R20	S65R35	S50R50	Zahtjev OTU
Otvor sita [mm]	Postotak prolazaka kroz sito [%]								
31,5	100	100	100	100	100	100	100	100	73-100
22,4	91,64	94,23	94,80	92,03	93,57	91,96	91,75	90,61	-
16,0	83,25	83,03	81,74	76,74	84,09	80,27	81,14	78,69	54-90
8,0	70,46	66,75	61,88	54,37	61,54	60,34	61,74	61,33	40-75
4,0	52,49	47,24	47,24	41,93	40,52	42,66	44,64	44,13	29-60
2,0	34,68	30,57	31,88	28,81	30,15	31,15	30,10	31,36	20-48
1,0	20,80	18,07	18,44	17,13	25,50	25,75	23,00	24,65	13-38
0,500	12,89	11,18	11,25	10,28	22,04	22,05	19,02	20,57	7-28
0,250*	8,49	7,34	7,27	6,61	11,90	12,34	9,76	11,41	3-20
0,125*	6,03	5,13	5,03	4,56	1,92	2,26	1,58	2,14	2-15
0,063	5,46	4,69	4,66	4,20	0,89	1,14	1,10	1,14	-

\* u OTU je propisan prolazak kroz sita veličine otvora 0,2 i 0,1 mm

Tablica 4. Granulometrijske karakteristike mješavina recikliranog asfalta i prirodnog agregata

Oznaka mješavine	V100R0	V80R20	V65R35	V50R50	S100R0	S80R20	S65R35	S50R50	Zahtjev OTU
Maksimalna veličina zrna [mm]	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	≤63
Koeficijent nejednolikosti $U = d_{60}/d_{10}$	16,87	15,76	17,78	20,83	34,12	35,88	29,65	33,29	15-50* 15-100
Udio zrna manjih od 0,02 mm [%]**	3,28	<3,28	<3,28	<3,28	<0,89	<1,14	<1,10	<1,14	3

\* 15 do 50 za drobljeni kameni materijal; 15 do 100 za šljunak  
 \*\* postupak aerometriiranja kojim se određuje udio zrna manjih od 0,02 mm proveden je za mješavine V100R0 koje su imale najveći postotak zrna manjih od 0,063 mm te je pretpostavljeno da ostale mješavine vapnenca i recikliranog asfalta imaju niži udio zrna od dobivenih 3,28 %; budući da je na mješavinama šljunka udio zrna manjih od 0,063 mm manji od zahtjevanih 3 %, na ovim mješavinama nije proveden postupak aerometriiranja

Temeljem prikazanih rezultata (granulometrijska krivulja, maksimalna veličina zrna, koeficijent nejednolikosti, udio čestica manjih od 0,02 mm) može se zaključiti da svih osam mješavina u pogledu granulometrijskog sastava zadovoljavaju zahtjeve postavljene na materijale za izradu nevezanih nosivih slojeva.

## 2.2. Laboratorijska ispitivanja mješavina

Na prethodno definiranim mješavinama recikliranog asfalta i prirodnog agregata provedena su laboratorijska ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava, parametara zbijanja i nosivosti. Ispitivanja fizikalno-mehaničkih svojstava, oblika zrna [13], upijanja vode [14], trošnih - nekvalitetnih zrna [15] te otpornosti prema drobljenju i habanju po metodi Los Angeles (LA) [16] provedena su na frakcijama osnovnih materijala, a s obzirom na udio pojedine frakcije izračunane su vrijednosti fizikalno-mehaničkih svojstava mješavina. Sva su navedena ispitivanja provedena u skladu sa sadašnjim normama.

Da bi se utvrdili osnovni parametri zbijanja, maksimalna suha prostorna masa i optimalni udio vode, provedeno je ispitivanje

modificiranim Proctorovim pokusom u skladu s normom HRN EN 13286-2 [17]. S obzirom na maksimalnu veličinu zrna agregata, odabrana je metoda zbijanja u velikom kalupu (B), batom težine 4,5 kg (B) i visinom pada bata 45,7 cm. Ispitivanje nosivosti izražene koeficijentom CBR-a provedeno je u skladu s normom HRN EN 13286-47 [18] na uzorcima zbijenim modificiranim Proctorovim postupkom pri optimalnom udjelu vode.

## 3. Analiza rezultata ispitivanja

Analiza rezultata ispitivanja provedena je s obzirom na tip prirodnog agregata i udio recikliranog asfalta u mješavini. Rezultati ispitivanja uspoređeni su sa zahtjevima koji se postavljaju na mješavine za izradu nevezanog nosivog sloja prema OTU [11].

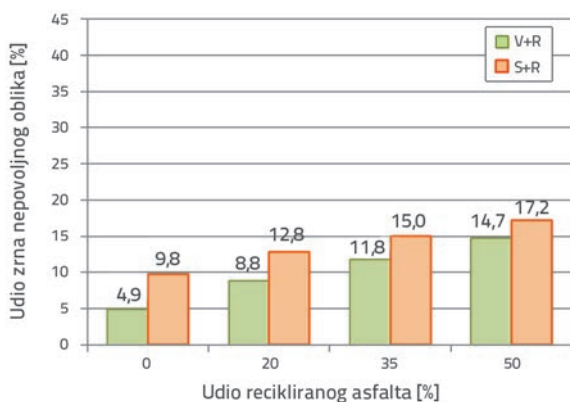
### 3.1. Fizikalno-mehanička svojstva

Pogodnost agregata za primjenu u nevezanim nosivim slojevima dokazuje se ispitivanjem njegovih fizikalno-mehaničkih

svojstava. Ispunjavanjem zahtjeva koji se postavljaju na oblik zrna agregata, upijanje vode, udio trošnih zrna i otpornost prema drobljenju i habanju osigurava se nepromjenjivost mehaničkih svojstava nevezanog nosivog sloja tijekom upotrebe kolničke konstrukcije.

### 3.1.1. Oblik zrna-udio zrna nepovoljnog oblika

Prema OTU, udio zrna nepovoljnog oblika (3:1) ne smije biti veći od 40 %. Provedenim je ispitivanjima dobiveno da udio zrna nepovoljnog oblika iznosi od 4,9 do 14,7 % na mješavinama recikliranog asfalta i vapnenca te od 9,8 do 17,2 % na mješavinama recikliranog asfalta i šljunka. Utjecaj udjela recikliranog asfalta na udio zrna nepovoljnog oblika prikazan je na slici 3. S obzirom na tip prirodnog agregata vidljivo je da mješavine sa šljunkom imaju veći udio zrna nepovoljnog oblika u odnosu na mješavine s vapnencem. Povećanjem udjela recikliranog asfalta povećava se i udio zrna nepovoljnog oblika, što je izraženiji na mješavinama s vapnencem u odnosu na mješavine sa šljunkom. Takav trend posljedica je velikih razlika u udjelu zrna nepovoljnog oblika između recikliranog asfalta i vapnenca, dok su te razlike između šljunka i recikliranog asfalta izražene samo na frakciji 16/32. Povećanjem udjela recikliranog asfalta s 0 % na 20, 35 i 50 %, udio zrna nepovoljnog oblika se povećao 79, 140 i 200 % za mješavine s vapnencem, odnosno 31, 53 i 76 % za mješavine sa šljunkom.



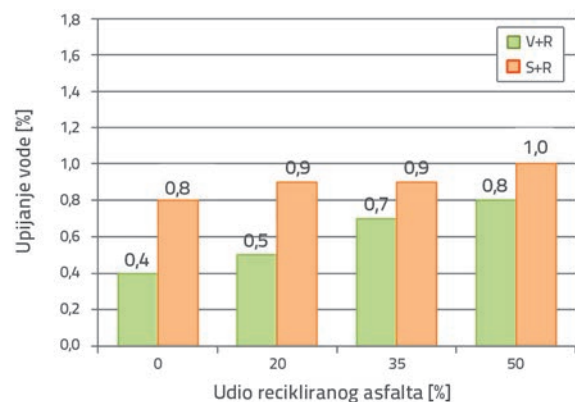
Slika 3. Udio zrna nepovoljnog oblika u ovisnosti o udjelu recikliranog asfalta

Unatoč negativnom utjecaju udjela recikliranog asfalta na udio zrna nepovoljnog oblika, on je na svim mješavinama manji od maksimalno dopuštenih 40 %.

### 3.1.2. Upijanje vode

Maksimalni postotak upijanja vode zrnatog kamenog materijala za izradu nevezanih nosivih slojeva prema OTU iznosi 1,6 %. Provedenim je ispitivanjima dobiveno da upijanje vode iznosi od 0,4 do 0,8 % na mješavinama recikliranog asfalta i vapnenca

te od 0,8 do 1 % na mješavinama recikliranog asfalta i šljunka. Utjecaj udjela recikliranog asfalta na upijanje vode prikazan je na slici 4. S obzirom na tip prirodnog agregata vidljivo je da mješavine sa šljunkom imaju veću sposobnost upijanja vode od onih s vapnencem. Povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavinama povećava se i postotak upijanja vode, samo što je utjecaj recikliranog asfalta na sklonost mješavina prema upijanju vode izraženiji na mješavinama s vapnencem u odnosu na one sa šljunkom. Na mješavinama s vapnencem povećanjem udjela recikliranog asfaltna s 0 % na 20, 35 i 50 % upijanje vode se povećalo 25, 75 i 100 %. Promjena udjela recikliranog asfalta s 0 % na 20 i 35 % na mješavinama sa šljunkom rezultirala je povećanjem upijanja vode za 12,5 % te povećanjem od 25 % promjenom udjela s 0 % na 50 %.



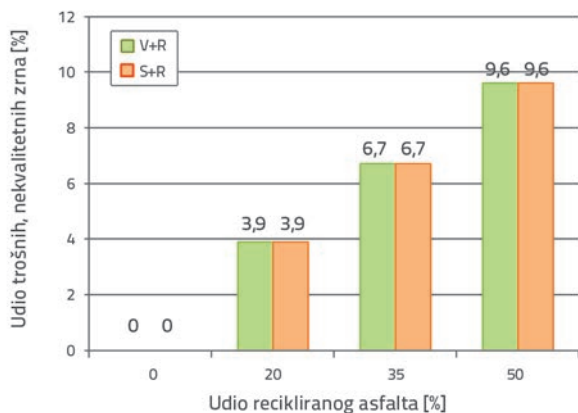
Slika 4. Upijanje vode u ovisnosti o udjelu recikliranog asfalta

Zbog hidrofobnih svojstava bitumena očekivalo bi se da reciklirani asfalt ima manju sposobnost upijanja vode od prirodnog agregata. Dobiveni rezultati u skladu su s prijašnjim istraživanjima Locandera [19], a za njihovo objašnjenje potrebno je provesti detaljna ispitivanja udjela bitumena, volumena pora prirodnog i recikliranog agregata kao i volumena pora ispunjenih bitumenom. Upijanje vode je na svim ispitanim mješavinama manje od maksimalno dopuštenih 1,6 %.

### 3.1.3. Trošna, nekvalitetna zrna

Udio trošnih, nekvalitetnih zrna u mješavinama za izradu nevezanih nosivih slojeva, prema OTU, ne smije biti veći od 7 %. Za prirodne agregate korištene u istraživanju udio trošnih zrna jednak je nuli, a sva trošna zrna u mješavinama su zrna recikliranog asfalta (slika 5.). S povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavini povećava se i udio trošnih zrna. Udio trošnih zrna u mješavinama s 20 % recikliranog asfalta bio je 3,9 %. Daljnjim povećanjem udjela recikliranog asfalta na 35 % i 50 %, udio trošnih zrna prosječno se povećao za 72 % odnosno 146 %.

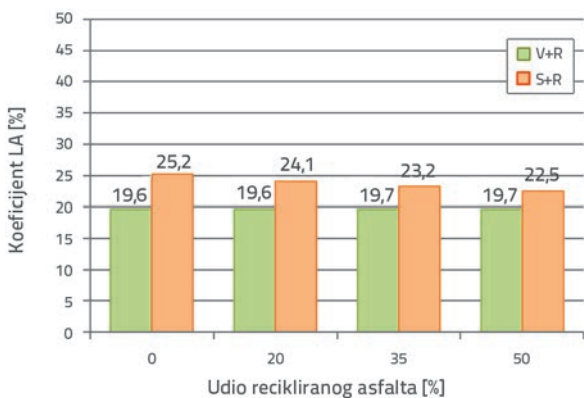
Postavljeni kriterij maksimalnog udjela trošnih zrna od 7 % nisu zadovoljile mješavine koje sadrže 50 % recikliranog asfalta.



Slika 5. Udio trošnih, nekvalitetnih zrna u ovisnosti o udjelu recikliranog asfalta

### 3.1.4. Otpornost prema drobljenju i habanju po metodi Los Angeles

Maksimalna vrijednost koeficijenta Los Angeles agregata koji se koristi za izradu nevezanih nosivih slojeva prema OTU iznosi 45 %. Provedenim je ispitivanjima dobiveno da su vrijednosti koeficijenta LA od 19,6 do 19,7 % na mješavinama s vapnencem, odnosno od 22,5 do 25,2 % na mješavinama sa šljunkom. Utjecaj udjela recikliranog asfalta na vrijednost koeficijenta LA prikazan je na slici 6.



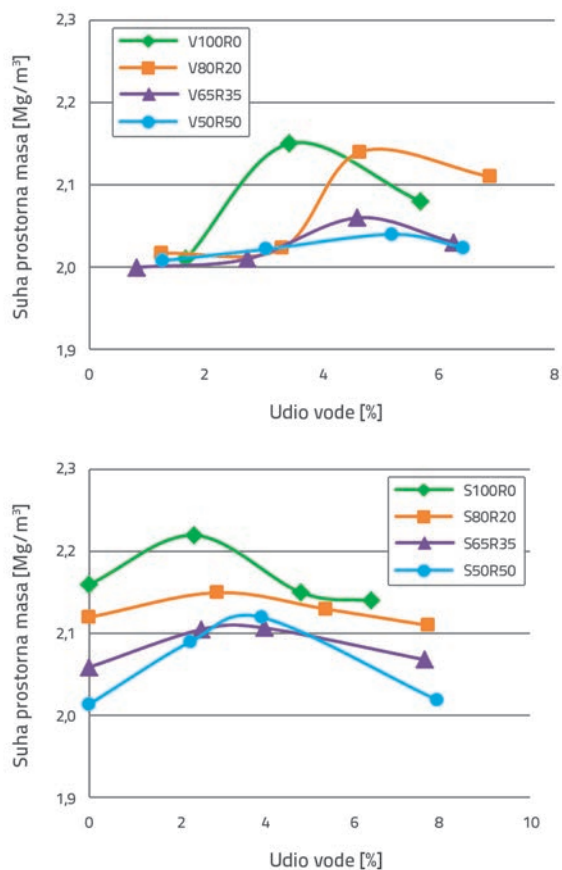
Slika 6. Vrijednost koeficijenta LA u ovisnosti o udjelu recikliranog asfalta

S obzirom na tip prirodnog agregata, vidljivo je da su vrijednosti koeficijenta Los Angeles veće na mješavinama sa šljunkom u odnosu na one s vapnencem. Udio recikliranog asfalta nije znatno utjecao na promjenu vrijednosti koeficijenta Los Angeles na mješavinama s vapnencem, što je i očekivano budući da je agregat korišten pri izradi asfaltne mješavine vapnenačkog podrijetla te iz istog izvora kao vapnenac korišten u istraživanju. S obzirom na otpornost prema drobljenju izraženu koeficijentom LA, može se zaključiti da reciklirani asfalt ima svojstva slična vapnencu. Takvi rezultati u skladu su s prijašnjim istraživanjima Locandera [19] te Mokwa i Peeblesa [20]. Na mješavinama sa šljunkom dolazi do

smanjenja vrijednosti koeficijenta Los Angeles s povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavinama. Povećanjem udjela recikliranog asfalta s 0 % na 20, 35 i 50 %, vrijednosti koeficijenta Los Angeles su smanjene za 4, 8 i 11 %. Vrijednost koeficijenta Los Angeles na svim je ispitanim mješavinama manja od maksimalno dopuštenih 45 %. Temeljem dobivenih rezultata može se zaključiti da su ispitane mješavine, osim mješavina s 50 % recikliranog asfalta koje nisu zadovoljile zahtjev koji se postavlja na maksimalni udio trošnih zrna, s obzirom na fizikalno-mehaničkih svojstva prikladne za izradu nevezanih nosivih slojeva.

### 3.2. Parametri zbijanja

Ugradnja zrnatog kamenog materijala u nevezani nosivi sloj najbolja je pri optimalnom udjelu vode, tj. količini vode koja omogućuje maksimalnu zbijenost pri energiji zbijanja modificiranog Proctorovog postupka. Provedenim ispitivanjem, za svih osam mješavina, određene su Proctorove krivulje kojima je definiran odnos udjela vode i suhe prostorne mase (slika 7).



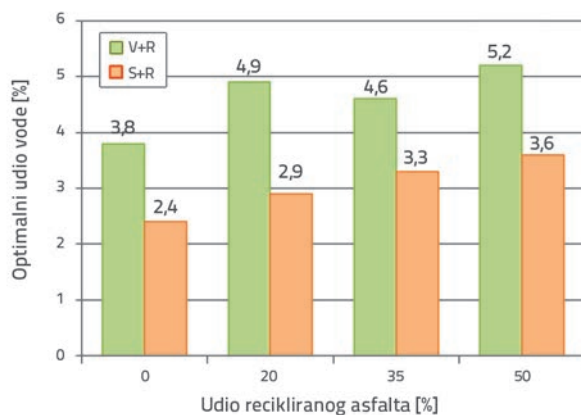
Slika 7. Rezultati Proctorovog pokusa (V - vapnenac, R - reciklirani asfalt, S - šljunak)

Vrijednosti optimalnog udjela vode i maksimalne suhe prostorne mase određene su očitavanjem maksimuma Proctorove krivulje. Utjecaj udjela recikliranog asfalta na vrijednost optimalnog

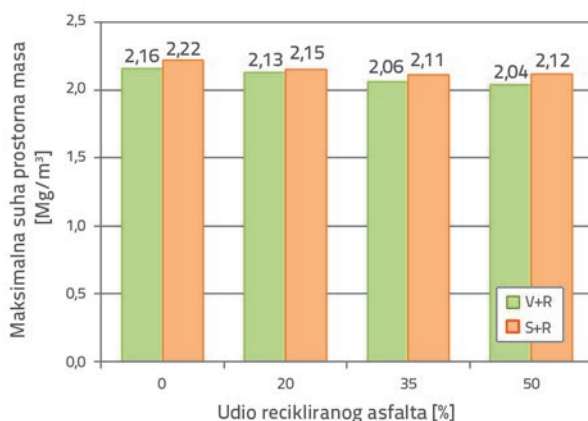
udjela vode i maksimalne suhe prostorne mase prikazan je na slikama 8. i 9.

Vrijednost optimalnog udjela vode veća je na mješavinama s vapnencem u odnosu na one sa šljunkom (slika 8.). Povećanjem udjela recikliranog asfalta raste i vrijednost optimalnog udjela vode za sve ispitane mješavine. Ovakvi rezultati u skladu su s prijašnjim istraživanjima Alama i sur. [21], Attia i Abdelrahmana [22] kao i Tahaa i sur. [23], a mogu biti posljedica promjene granulometrijskog sastava tijekom zbijanja uslijed povećanja broja sitnih čestica te povećanja upijanja vode s povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavinama. Povećanjem udjela recikliranog asfalta s 0 % na 20, 35 i 50 %, vrijednost optimalnog udjela vode se povećala 29, 21 i 37 % za mješavine s vapnencem, odnosno 21, 38 i 50 % za mješavine sa šljunkom.

Iz rezultata ispitivanja vidljivo je da mješavine sa šljunkom imaju veću vrijednost maksimalne suhe prostorne mase u odnosu na mješavine s vapnencem (slika 9.).



Slika 8. Optimalni udio vode u ovisnosti o udjelu recikliranog asfalta



Slika 9. Maksimalna suha prostorna masa u ovisnosti o udjelu recikliranog asfalta

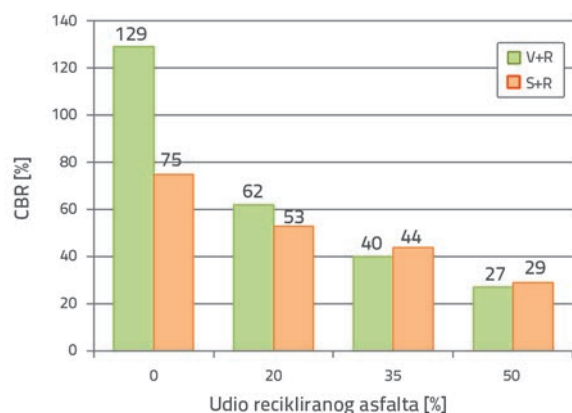
Povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavini smanjuje se vrijednost maksimalne suhe prostorne mase. Ovakvi rezultati u skladu su s prijašnjim istraživanjima Loua [24], Tahaa i sur. [23] te Bennerta i Mahera [25], a posljedica su nižih vrijednosti

specifične gustoće recikliranog asfalta u odnosu na prirodni agregat. Povećanjem udjela recikliranog asfalta s 0 % na 20, 35 i 50 %, vrijednost maksimalne suhe prostorne mase smanjila se 1,39, 4,63 i 5,56 % na mješavinama s vapnencem, odnosno 3,15, 4,95 i 4,50 % na mješavinama sa šljunkom.

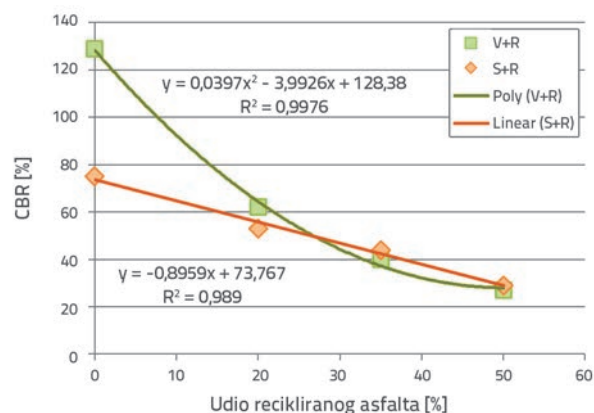
Rezultati modificiranog Proctorovog pokusa korišteni su prilikom izrade uzoraka za ispitivanje kalifornijskog indeksa nosivosti.

### 3.3. Nosivost

Nosivost sloja zrnatog kamenog materijala uobičajeno se ocjenjuje na temelju laboratorijskog ispitivanja kalifornijskog indeksa nosivosti, CBR-a. Utjecaj udjela recikliranog asfalta na nosivost ispitanih mješavina prikazan je na slici 10. Mješavine vapnenca bez recikliranog asfalta imaju 72 % više vrijednosti CBR-a u odnosu na mješavine šljunka bez recikliranog asfalta. Na slikama 10. i 11. vidljivo je da postoji trend smanjenja vrijednosti CBR-a s povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavinama neovisno o tipu prirodnog agregata.



Slika 10. Vrijednost CBR-a u ovisnosti o udjelu recikliranog asfalta



Slika 11. Korelacija CBR-a i udjela recikliranog asfalta

Ovakvi rezultati u skladu su s prijašnjim istraživanjima [23, 25-28], a posljedica su veće kompresibilnosti recikliranog asfalta u odnosu na prirodni agregat. Iako je trend smanjenja nosivosti

jasan i dobro definiran, ispitivanja su pokazala da brzina smanjenja vrijednosti CBR-a s povećanjem udjela recikliranog asfalta uvelike ovisi o karakteristikama prirodnog agregata. Na mješavinama sa šljunkom vrijednost CBR-a se mijenja gotovo linearno s povećanjem udjela recikliranog asfalta, dok se na mješavinama s vapnencem ovakav trend može opisati polinomom drugog stupnja (slika 11.).

Povećanjem udjela recikliranog asfalta s 0 % na 20, 35 i 50 %, vrijednost CBR-a se smanjila 52, 69 i 79 % na mješavinama s vapnencem, odnosno 29, 41 i 61 % na mješavinama sa šljunkom. Objektivno se može pretpostaviti da do smanjenja vrijednosti CBR-a dolazi uslijed obavijenosti zrna recikliranog asfalta bitumenom, pri čemu se smanjuje hrapavost a samim time i trenje između zrna agregata. Vrijednosti CBR-a na mješavinama s 35 % odnosno 50 % recikliranog asfalta istog su reda veličina neovisno o tipu prirodnog agregata, zbog čega možemo zaključiti da se pri određenom udjelu recikliranog asfalta smanjuje utjecaj svojstava prirodnog agregata na nosivost takvih mješavina.

Prema OTU [11], minimalna vrijednost CBR-a za drobljeni agregat ili mješavinu šljunka s više od 50 % drobljenog kamenog materijala iznosi 80 %, odnosno 40 % za prirodni šljunak ili mješavinu šljunka s manje od 50 % drobljenog kamenog materijala. Budući da u OTU nisu definirani zahtjevi nosivosti za mješavine prirodnih agregata i recikliranog asfalta, te s obzirom na to da su ispitivanja rezilientnih modula [29] pokazala da se mješavine s recikliranim asfaltom pod prometnim opterećenjem ponašaju slično šljunku, na takve mješavine može se postaviti jedinstven zahtjev nosivosti izražen minimalnom vrijednošću CBR-a od 40 %. Taj zahtjev nisu zadovoljile mješavine s udjelom recikliranog asfalta 50 %. S obzirom na dobivene vrijednosti CBR-a, može se usvojiti da, u pogledu nosivosti, maksimalni udio recikliranog asfalta u mješavinama za izradu nevezanih nosivih slojeva iznosi 35 %.

#### 4. Zaključak

Kako bi se ocijenila mogućnost primjene mješavina recikliranog asfalta i prirodnog agregata za izradu nevezanih nosivih slojeva, provedena su ispitivanja granulometrijskog sastava, parametara zbijanja (maksimalna suha prostorna masa, optimalni udio vlage), fizikalno-mehaničkih svojstava (oblik zrna, upijanje vode, trošna zrna, koeficijent LA) i nosivosti izražene vrijednošću CBR-a. Ispitivanja su provedena na mješavinama dva tipa prirodnog agregata, drobljenom vapnencu i nedrobljenom riječnom šljunkom, te recikliranom asfaltu dobivenom glodanjem. U mješavinama je variran udio recikliranog asfalta u masenom postotku 0, 20, 35 i 50 % u odnosu na prirodni agregat. Rezultati ispitivanja uspoređeni su sa zahtjevima koje mješavine za izradu nevezanih nosivih slojeva moraju ispuniti prema Općim tehničkim uvjetima za radove na cestama.

Za materijale korištene u istraživanju temeljem dobivenih rezultata i provedenih analiza doneseni su sljedeći zaključci:

- Maksimalni udio recikliranog asfalta korištenog u ovom istraživanju koji zadovoljava granulometrijske zahtjeve za izradu nevezanih nosivih slojeva iznosi 50 %.
- Veći udio zrna nepovoljnog oblika imaju mješavine sa šljunkom u odnosu na mješavine s vapnencem. Povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavinama povećava se i udio zrna nepovoljnog oblika. Sve mješavine zadovoljavaju kriterij maksimalnog udjela zrna nepovoljnog oblika koji iznosi 40 %.
- Mješavine šljunka i recikliranog asfalta imaju veću sposobnost upijanja vode u odnosu na mješavine s vapnencem. Povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavini povećava se sposobnost upijanja vode mješavina. Sve mješavine zadovoljavaju kriterij maksimalnog upijanja vode koji iznosi 1,6 %.
- Prirodni agregati korišteni u istraživanju nemaju trošnih zrna, a udio trošnih zrna u mješavinama proporcionalan je udjelu recikliranog asfalta. Kriterij maksimalnog udjela trošnih zrna koji iznosi 7 % nisu zadovoljile mješavine s 50 % recikliranog asfalta.
- Mješavine recikliranog asfalta i vapnenca imaju približno iste vrijednosti koeficijenta LA neovisno o udjelu recikliranog asfalta. Povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavinama sa šljunkom, vrijednost koeficijenta LA se smanjuje. Sve mješavine zadovoljavaju uvjete s obzirom na maksimalno dopuštenu vrijednost koeficijenta Los Angeles koja iznosi 45 %.
- Mješavine šljunka imaju veće vrijednosti maksimalne suhe prostorne mase i niže vrijednosti optimalnog udjela vlage u odnosu na mješavine s vapnencem. Povećanjem udjela recikliranog asfalta, na svim mješavinama je uočen trend smanjenja maksimalne suhe prostorne mase i povećanja optimalnog udjela vlage.
- Vrijednost CBR-a mješavina recikliranog asfalta i prirodnog agregata smanjuje se povećanjem udjela recikliranog asfalta u mješavini, a brzina smanjenja uvelike ovisi o karakteristikama prirodnog agregata. Postavljeni uvjet minimalne vrijednosti CBR-a od 40 % nisu zadovoljile mješavine s 50 % recikliranog asfalta.

Analizom dobivenih rezultata i s tim u vezi donesenih zaključaka, a uzimajući u obzir zahtjeve koje OTU postavljaju na mješavine za nevezane nosive slojeve, može se konačno zaključiti da je u ovim mješavinama prirodni agregat može zamijeniti recikliranim asfaltom, ali uz ograničavanje njegovog udjela na 35 %. Primjena recikliranog asfalta u nevezanim nosivim slojevima značila bi doprinos očuvanju prirodnih neobnovljivih izvora agregata te smanjenju količina ovog otpadnog materijala.



## LITERATURA

- [1] Monier, V., Mudgal, S., Hestin, M., Trarieux, M., Mimid, S.: Service Contract on Management of Construction and Demolition Waste – SR1 Final Report Task 2, European Commission DG ENV, 2011.
- [2] White P., Golden J.S., Biligiri K.P., Kaloush K.: Modeling climate change impacts of pavement production and construction, Resources, Conservation and Recycling, (2010) 54, pp. 776-782, <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.12.007>
- [3] Schwabe, Ž.: Recikliranje asfaltnih kolničkih konstrukcija, Gospodarenje prometnom infrastrukturom, Dani prometnica 2009 (ur. Lakušić, S.), Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, Zagreb, 2009.
- [4] Arguments to stimulate the government to promote asphalt reuse and recycling, European Asphalt Pavement Association, [http://www.eapa.org/usr\\_img/position\\_paper/arguments\\_stimulate\\_asphalt\\_May2008.pdf](http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/arguments_stimulate_asphalt_May2008.pdf)
- [5] Abbas, M.H., Sultan, S.A., Abduljabar, M.B.: Improvement of the Mechanical Characteristics of Reclaimed Asphalt Pavement in Iraq, International Journal of Structural and Civil Engineering, 2 (2013) 4, pp. 22-29.
- [6] Dong, H.: Laboratory Evaluation on Resilient Modulus and Rate Dependencies of RAP Used as Unbound Base Material, Journal of Materials in Civil Engineering, 26 (2014) 2, pp. 297-383.
- [7] Thøgersen, F., Gregoire, C., Stryk, J., Hornych P., Descantes, Y., Chazallon, C., Blasl, A., Broere, P., Fifer Bizjak, K., Hellman, F., Arm, M.: Recycling of road materials into new unbound road layers – main practice in selected European countries, Road Materials and Pavement Design, 14 (2013) 2, pp. 438-444.
- [8] He, W.: Laboratory Evaluation of Unbound RAP as a Pavement Base Material, doktorski rad, The University of Tennessee, Knoxville, 2006.
- [9] Kim, W., Labuz, J.F., Dai, S.: Resilient Modulus of Base Course Containing Recycled Asphalt Pavement, Journal of the Transportation Research Board, 2005 (2007), pp. 27-35, <http://dx.doi.org/10.3141/2005-04>
- [10] Wu, M.: Evaluation of High Percentage Recycled Asphalt Pavement as Base Course Materials, doktorski rad, Washington University, Department of Civil and Environmental Engineering, 2011.
- [11] Opći tehnički uvjeti za radove na cestama – Knjiga III: Kolnička konstrukcija, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 2001.
- [12] HRN EN 933-1, Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata -- 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava -- Metoda sisanja
- [13] HRN B.B8.048, Oblik zrna kamenih agregata
- [14] HRN B.B8.031, Prostorna masa i upijanje vode
- [15] HRN B.B8.037, Određivanje slabih zrna
- [16] HRN B.B8.045, Otpornost prirodnog i drobljenog agregata na drobljenje i habanje postupkom Los Angeles
- [17] HRN EN 13286-2, Nevezane i hidrauličkim vezivom vezane mješavine – Dio 2: Postupci ispitivanja laboratorijske referentne prostorne mase i udjela vode – Zbijanje Proctorovim postupkom
- [18] HRN EN 13286-47, Nevezane i hidrauličnim vezivom vezane mješavine - 47. dio: Metoda ispitivanja za određivanje kalifornijskog indeksa nosivosti, neposrednog indeksa nosivosti i linearnog bubrenja
- [19] Locander, R.: Analysis of Using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) As a Base Course Material, Colorado Department of Transportation - Research, Denver, 2009.
- [20] Mokwa, R.L., Peebles, C.S.: Evaluation of the Engineering characteristics of RAP/Aggregate Blends, Civil Engineering Department, Montana State University, Bozeman, Montana, 2005.
- [21] Alam, T.B., Abdelrahman, M., Schram, S.A.: Laboratory characterisation of recycled asphalt pavement as a base layer, International Journal of Pavement Engineering, 11 (2010) 2, pp. 123-131.
- [22] Attia, M., Abdelrahman, M.: Sensitivity of Untreated Reclaimed Asphalt Pavement to Moisture, Density, and Freeze Thaw, Journal of Materials in Civil Engineering, 22 (2010) 12, pp. 1260-1269.
- [23] Taha, R., Ali, G., Basma, A., Al-Turk, O.: Evaluation of reclaimed asphalt pavement aggregate in road bases and subbases, Transportation Research Record, 1652 (1999) 1, pp. 264-269.
- [24] Luo, C.: High Performance Granular Base and Subbase Materials Incorporating Reclaimed Asphalt Concrete Pavement, doktorski rad, McMaster University, Hamilton, Ontario, 2014.
- [25] Bennert, T., Maher, A.: The Development of a Performance Specification for Granular Base and Subbase Material, New Jersey Department of Transportation, Trenton, 2005.
- [26] Taherkhani, H., Fazel Pour, A.: Investigating the Viability of using Recycled Aggregates in Unbound Base layer, MAGNT Research Report, 2 (2014) 4, pp.124-135.
- [27] Cooley, D.A.: Effects of Reclaimed Asphalt Pavement on Mechanical Properties of Base Materials, doktorski rad, Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University, 2005.
- [28] Stolle, D.F.E., Guo, P., Emery, J.J.: Mechanical properties of reclaimed asphalt pavement - natural aggregate blends for granular base, Canadian Journal of Civil Engineering, 41 (2014) 6, pp. 493-499.
- [29] Domitrović, J.: Optimizacija sastava nevezanih nosivih slojeva kolničkih konstrukcija s dodatkom recikliranog asfaltnog agregata, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2015.