

Utjecaj sastava na deformabilnost asfalta

Andrea Strineka, Jasna Putrić Brkić, Dalibor Sekulić

Ključne riječi

asfaltna mješavina, kolotrazi, oštećenja kolnika, sastav asfalta, svojstva asfalta, trajne deformacije

Key words

asphalt mix, ruttings, pavement damage, asphalt composition, asphalt properties, permanent deformations

Mots clés

mélange d'asphalte, ornières, endommagement de chaussée, composition d'asphalte, propriétés d'asphalte, déformations permanentes

Ключевые слова

асфальтовая смесь, колеи, повреждения мостовой, состав асфальта, свойства асфальта, длительные деформации

Schlüsselworte

Asphaltgemisch, Radspuren, Beschädigungen der Fahrbahn, Asphalzzusammensetzung, Eigenschaften des Asphalts, dauerhafte Verformungen

A. Strineka, J. Putrić Brkić, D. Sekulić

Izvorni znanstveni rad

Utjecaj sastava na deformabilnost asfalta

Opisana je obrada rezultata mjerenja najveće dubine kolotruga koji se stvaraju na asfaltnim uzorcima različitog sastava. Otpornost na stvaranje kolotruga mjerena je uređajem malih dimenzija postupkom B prema normi HRN EN 12697-22, a sastav uzorka određen je prostornim modelom u kojemu su komponente izražene volumenskim koncentracijama. Statističkom obradom rezultata mjerenja nađena je ovisnost dubine kolotruga o sastavu asfaltnog uzorka koja vrijedi za sve ispitane uzorke.

A. Strineka, J. Putrić Brkić, D. Sekulić

Original scientific paper

Influence of composition on the deformability of asphalt

The analysis of results obtained by measuring biggest rutting depths determined on asphalt samples of different composition is described. The resistance to rutting was measured with a small size device according to procedure B as specified in HRN EN 12697-22, and the sample composition was determined through space model in which components are expressed as volume concentrations. The correlation between the rutting depth and the asphalt sample composition, applicable to all samples subjected to testing, was determined through statistical analysis of results.

A. Strineka, J. Putrić Brkić, D. Sekulić

Ouvrage scientifique original

L'influence de composition sur la déformabilité d'asphalte

L'analyse des résultats obtenus par mesure des plus grandes profondeurs d'orniérage déterminées sur les échantillons d'asphalte des compositions différentes est décrite. La résistance à l'orniérage a été mesurée en utilisant le petit dispositif selon la procédure B comme spécifié dans la norme HRN EN 12697-22, et la composition de l'échantillon a été déterminée à travers le modèle spatial dans lequel les composantes sont exprimées comme concentrations de volume. La corrélation entre la profondeur d'orniérage et la composition de l'échantillon d'asphalte, applicable à tous les échantillons soumis à l'essai, a été déterminée par analyse statistique des résultats.

A. Стринека, Џ. Путрич Бркич, Д. Секулич

Оригинальная научная работа

Влияние состава на деформируемость асфальта

Описана обработка результатов измерения самой большой глубины колеи, образованных на образцах асфальта различного состава. Измерение стойкости к образованию колеи производилось устройством небольших размеров по процедуре В в соответствии с нормами HRN EN 12697-22, а состав образца определялся по пространственной модели, в которой компоненты выражены объемными концентрациями. Путем статистической обработки результатов измерений установлена зависимость глубины колеи от состава образца асфальта, распространяющаяся на все испытанные образцы.

A. Strineka, J. Putrić Brkić, D. Sekulić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

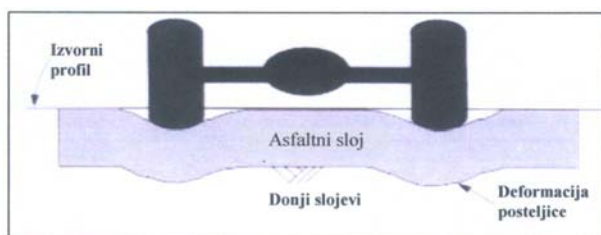
Einfluss der Zusammensetzung auf die Verformbarkeit des Asphalts

Beschrieben ist die Bearbeitung der Messungsergebnisse der grössten Radspurtiefen die an Asphaltproben verschiedener Zusammensetzung entstehen. Die Widerstandsfähigkeit gegen Entstehung von Radspuren wurde mit einer Anlage kleiner Ausmasse nach dem Verfahren B der Norm HRN EN 1269-22 gemessen, und die Zusammensetzung der Probe bestimmte man durch ein räumliches Modell in dem die Komponenten in Volumenkonzentrationen ausgedrückt sind. Durch statistische Bearbeitung der Messungsergebnisse fand man die Abhängigkeit der Radspurtiefe von der Zusammensetzung der Asphaltprobe, gültig für alle bearbeiteten Proben.

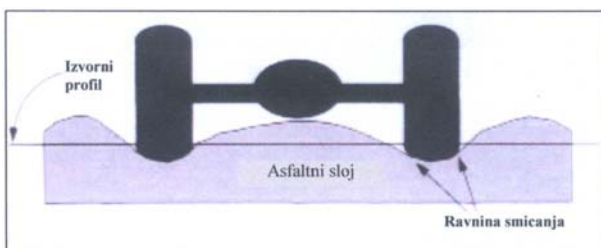
Autori: Dr. sc. **Andrea Strineka**, dipl. ing. kem. teh.; **Jasna Putrić Brkić**, dipl. ing. kem. teh.; mr. sc. **Dalibor Sekulić**, dipl. ing. fiz., Institut IGH, d.d., J. Rakuše 1, Zagreb

1 Uvod

Kolotrazi su plastične deformacije površine kolnika koje se javljaju u tragovima kotača pod djelovanjem prometnog opterećenja. Njihova pojava utječe na smanjenje sigurnosti prometa, udobnosti vožnje i na trajnost kolničke konstrukcije. Pojavljuju se u relativno ranoj fazi uporabe na svim tipovima savitljivih kolničkih konstrukcija. Nastajanje kolotruga može biti posljedica naknadnog zbijanja (konsolidacija) kolničkog sloja uslijed prometnog opterećenja, mehaničke deformacije podloge ispod kolničke konstrukcije (slika 1.) i posmične deformacije unutar asfaltne mješavine (slika 2.).



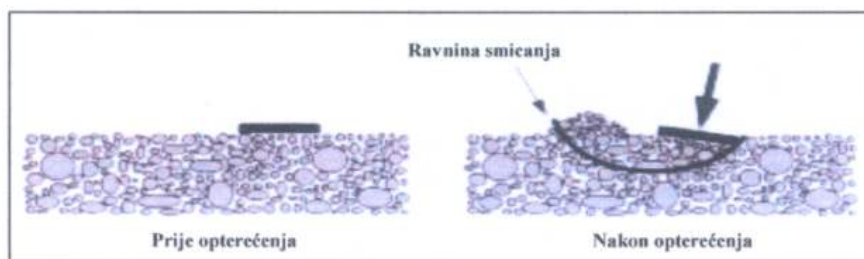
Slika 1. Kolotrazi nastali zbog deformacije slojeva ispod kolničke konstrukcije



Slika 2. Izgled kolotruga nastalih zbog posmične deformacije unutar asfaltne mješavine

Pojava kolotruga uslijed konsolidacije je uobičajena u ranoj fazi uporabe kolnika, no u tom je slučaju njihova dubina najčešće zanemarivo mala u odnosu na ukupnu debljinu kolnika. Međutim, kod asfaltnih slojeva veće debljine pojava kolotruga može biti vrlo izražena ako se proces konsolidacije nastavi i nakon što se po cesti počne odvijati promet.

Prekomjerno opterećenje posteljice uslijed nedovoljne nosivosti slojeva kolničke konstrukcije kao i loše karakteristike materijala posteljice dovode do pojave kolotruga značajne dubine.



Slika 3. Posmična deformacija asfaltne mješavine

Činitelj koji zasigurno najviše doprinosi pojavi kolotruga je smanjena posmična otpornost unutar asfaltne mješavine (slika 3.) zbog neodgovarajućeg sastava asfaltne mješavine.

U radu je istražen utjecaj sastava uzoraka asfaltnih mješavina tipa AB 11E na pojavu i razvoj kolotruga. Nakon definiranja modela sastava asfaltne uzorka provedena su ispitivanja otpornosti na nastajanje kolotruga na uzorcima različitog sastava te analizirani rezultati s ciljem pronalaska ovisnosti sastava o promatranom svojstvu, dubini kolotruga.

2 Model sastava asfaltne uzorka

Istraživanje utjecaja sastava asfaltne uzorka na pojavu kolotruga provedeno je na modelu koji se sastoji od tri komponente:

1. kameni materijal koji se prema ovom modelu dijeli na kameni skelet ($d > 0,09$ mm) i punilo ($d < 0,09$ mm);
2. bitumen je prema ovom modelu vezivo čestica kamenog materijala u asfaltu uzorku i to bez obzira gdje se nalazi (u porama čestica ili u međučestičnom prostoru);
3. zrak u šuplinama asfaltne uzorka.

Navedene komponente u modelu sastava asfaltne uzorka prikazane su obujamskim koncentracijama:

$C_{KM/AU}$ je obujamska koncentracija kamenog materijala u asfaltu uzorku, a predstavlja zbroj koncentracija kamenog skeleta ($C_{KS/AU}$) i punila ($C_{P/AU}$):

$$C_{KM/AU} = C_{KS/AU} + C_{P/AU} \quad (1)$$

$$C_{KS/AU} = \frac{(100 - \%mas_{P/KM}) \cdot (1 - \frac{\%mas_{B/AM}}{100})}{\rho_{KS}} \cdot \rho_{AU} \quad (2)$$

$$C_{P/AU} = \frac{\%mas_{P/KM} \cdot (1 - \frac{\%mas_{B/AM}}{100})}{\rho_P} \cdot \rho_{AU} \quad (3)$$

$C_{B/AU}$ je obujamska koncentracija bitumena u asfaltu uzorku:

$$C_{B/AU} = \frac{\%mas_{B/AM}}{\rho_B} \cdot \rho_{AU} \quad (4)$$

$C_{\$/AU}$ je obujamska koncentracija šupljina (zraka) u asfaltu uzorku, a za njezin proračun potrebni su podaci o gustoći asfaltne uzorka (ρ_{AU}) te gustoći asfaltne mješavine (ρ_{AM}):

$$C_{\$/AU} = (1 - \frac{\rho_{AU}}{\rho_{AM}}) \cdot 100 \quad (5)$$

Gustoća asfaltne mješavine mjeri se ili proračunava iz podataka u udjelima komponenata u asfaltu mješavini, te njihovih gustoća:

$$\rho_{AM} = \frac{100}{\frac{(100 - \%mas_{P/KM}) \cdot (1 - \frac{\%mas_{B/AM}}{100})}{\rho_{KS}} + \frac{\%mas_{P/KM} \cdot (1 - \frac{\%mas_{B/AM}}{100})}{\rho_P} + \frac{\%mas_{B/AM}}{\rho_B}} \quad (6)$$

3 Sastav asfaltnog uzorka

3.1 Sastavni materijali

Za izradu asfaltnih mješavina odabrane su dvije vrste kamenog materijala - kameno brašno (KB) iz kamenoloma Šumber (Istra), proizvedeno mljevenjem vapnenca, karbonatne stijene sedimentnog postanka te frakcije kamenog materijala iz kamenoloma Hruškovec (Moslavina), proizvedene drobljenjem spilita (izmijenjenog bazalta i dijabaza) – silikatne stijene magmatskog postanka.

Za pripremu asfaltnih mješavina upotrijebljene su, pripremljene prosijavanjem, potfrakcije točno definiranog raspona veličine zrna. Gustoće potfrakcija navedenih materijala prikazane su u tablici 1.

Tablica 1. Prikaz gustoća potfrakcija kamenog materijala

Gustoće potfrakcija kamenog materijala		
Veličina potfrakcije [mm]	Šumber [g/cm ³]	Hruškovec [g/cm ³]
0,00 - 0,09	2,708	2,857
0,09 - 0,25	2,705	2,873
0,25 - 0,71	-	2,891
0,71 - 2,00	-	2,892
2,00 - 4,00	-	2,876
4,00 - 8,00	-	2,877
8,00 - 11,20	-	2,872

Kao vezivo odabran je cestograđevni bitumen 50/70. Navedenom bitumenu određena su normirana svojstva (tablica 2.).

Tablica 2. Prikaz rezultata ispitivanja bitumena 50/70

Ispitno svojstvo	Mjerna jedinica	Metoda ispitivanja	Bitumen 50/70
Penetracija mjerena na 25 °C	1/10 mm	HRN EN 1426	61
Točka razmekšavanja (PK)	°C	HRN EN 1427	50,2
Točka loma po Fraassu	°C	HRN EN 12593	- 15
Gustoća na 25 °C	g/cm ³	HRN EN 15326	1,011

3.2 Projektiranje sastava serija asfaltnih mješavina

Prethodno opisanim sastavnim materijalima projektirane su asfaltne mješavine različitog sastava:

1. Projektirane su asfaltne mješavine (AM) jednakog granulometrijskog sastava kamenog skeleta ($d > 0,09$) najvećeg zrna 11,2 mm (oznake KS 11). Granulometrijski sastav kamenog skeleta asfaltnih mješavina prikazan je u tablici 3. i slici 1.

2. Na osnovi kamenog skeleta oznake KS 11 projektirane su četiri serije asfaltnih mješavina koje se međusobno razlikuju po masenom udjelu punila u kamenom materijalu ($\%mas_{P/KM}$):

- serija 1: projektirani udio punila u kamenom materijalu jest 3,0 [% (m/m)];
- serija 2: projektirani udio punila u kamenom materijalu jest 6,0 [% (m/m)];
- serija 3: projektirani udio punila u kamenom materijalu jest 9,0 [% (m/m)];
- serija 4: projektirani udio punila u kamenom materijalu jest 12,2 [% (m/m)].

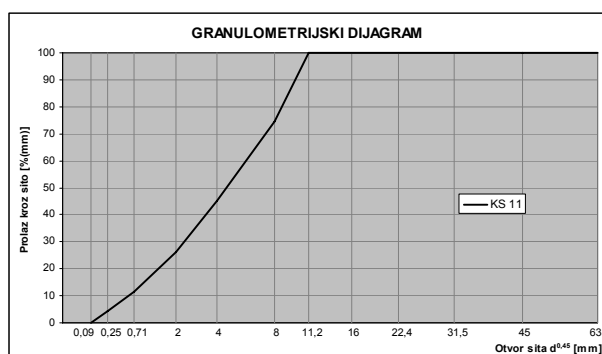
3. Daljnjim postupkom projektiranja u pojedine mješavine u serijama dodavan je bitumen. Obujamska udio bitumena u asfaltnoj mješavini ($C_{B/AM}$) bio je u pojedinim serijama:

- serija 1: od 14,3 [% (m/m)] do 18,5 [% (m/m)];
- serija 2: od 13,0 [% (m/m)] do 16,9 [% (m/m)];
- serija 3: od 10,6 [% (m/m)] do 15,3 [% (m/m)];
- serija 4: od 9,3 [% (m/m)] do 13,0 [% (m/m)].

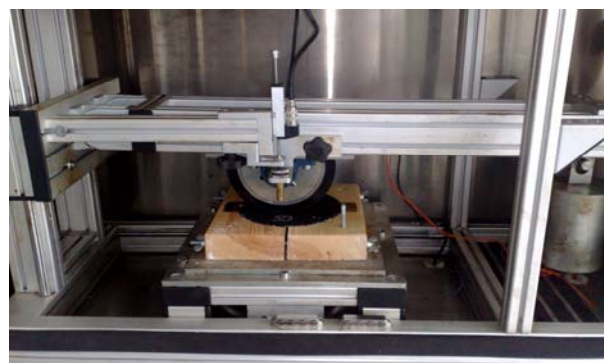
Projektirani sastavi asfaltnih mješavina izraženi masenim udjelom punila u kamenom materijalu ($\%mas_{P/KM}$), obujamskom koncentracijom bitumena ($C_{B/AM}$) te masenim udjelom bitumena u asfaltnoj mješavini ($\%mas_{B/AM}$) prikazani su u tablicama 4. i 5.

Tablica 3. Prikaz granulometrijskog sastava kamenog skeleta asfaltnih mješavina

Otvor sita [mm]	0,09	0,25	0,71	2,00	4,00	11,20	16,00
Prolaz kroz sito [% (m/m)]	0,0	4,2	11,6	26,3	45,3	74,7	100,0



Slika 4. Grafički prikaz granulometrijskog sastava kamenog skeleta asfaltnih mješavina



Slika 5. Uređaj za kolotražnje

Tablica 4. Prikaz sastava asfaltnih mješavina serija 1 i 2

	SERIJA 1				SERIJA 2		
	%mas _{P/KM}	%mas _{B/AM}	C _{B/AM}		%mas _{P/KM}	%mas _{B/AM}	C _{B/AM}
AM 1	3,0	5,5	14,3	AM 6	6,0	5,0	13,0
AM 2	3,0	6,0	15,4	AM 7	6,0	5,5	14,2
AM 3	3,0	6,4	16,3	AM 8	6,0	6,0	15,3
AM 4	3,0	7,0	17,6	AM 9	6,0	6,4	16,2
AM 5	3,0	7,4	18,5	AM 10	6,0	6,7	16,9

Tablica 5. Prikaz sastava asfaltnih mješavina serija 3 i 4

	SERIJA 3				SERIJA 4		
	%mas _{P/KM}	%mas _{B/AM}	C _{B/AM}		%mas _{P/KM}	%mas _{B/AM}	C _{B/AM}
AM 11	9,0	4,0	10,6	AM 16	12,2	3,5	9,30
AM 12	9,0	4,5	11,8	AM 17	12,2	4,0	10,5
AM 13	9,0	5,0	13,0	AM 18	12,2	4,5	11,8
AM 14	9,0	5,5	14,2	AM 19	12,2	4,8	12,4
AM 15	9,0	6,0	15,3	AM 20	12,2	5,0	13,0

3.3 Priprema asfaltnih mješavina i izrada asfaltnih uzoraka

Od svake asfaltne mješavine (AM) (tablice 4. i 5.) pripremljena su po četiri ispitna asfaltna uzorka.

Sve projektirane asfaltne mješavine proizvedene su prema HRN EN 12697-35 u laboratorijskoj miješalici, kapaciteta bubnja za miješanje od 30 litara, opremljenoj automatskim termostatskim grijačem i automatskim regulatorom vremena miješanja.

3.4 Određivanje otpornosti na nastajanje kolotraga

Otpornost pripremljenih asfaltnih uzoraka na nastajanje kolotraga određena je mjerenjem dubine kolotraga uređajem (slika 5.) malih dimenzija postupkom B (na zraku), prema postupku opisanom u normi HRN EN 12697-22.

Ispitivanja su provedena na valjkastim uzorcima promjera 200 mm, visine 50 mm pri temperaturi od 60 °C. Rezultat ispitivanja je krivulja kolotražnja koja prikazuje prirast deformacije tijekom ispitivanja.

Iz krivulje kolotražnja očitana je, nakon završetka ispitivanja (20000 prelazaka kotača), maksimalna dubina kolotraga (RD_{20000}).

Maksimalna dubina kolotraga (RD_{20000}), u ovom istraživanju, jest srednja vrijednost četiriju ispitivanja.

4 Rezultati ispitivanja

4.1 Prikaz sastava i maksimalnih dubina kolotraga serija asfaltnih uzoraka

Za sve serije asfaltnih uzoraka određeni su sastav i maksimalna dubina kolotraga (RD_{20000}). Rezultati tih ispitivanja su u tablici 6.

4.2 Ovisnost dubine kolotraga o koncentraciji bitumena u asfaltnom uzorku

Analizom ovisnosti dubine kolotraga asfaltnog uzorka, nakon 20000 prelazaka kotača (RD_{20000}), o obujamskoj koncentraciji bitumena u asfaltnom uzorku ($C_{B/AU}$) uočeno je da sve promatrane serije uzoraka (konstantnoga masenog udjela punila u kamenom materijalu, %mas_{P/KM} = konst., i jednakog granulometrijskog sastava kamenog skeleta, I = konst.) pokazuju sličan trend ovisnosti (slika 6.).

Dubina kolotraga pada do neke obujamske koncentracije bitumena nakon čega opet raste. Ta ovisnost vrlo dobro korelira s jednadžbom parabole drugog stupnja pa se, prema tome, ovisnost dubine kolotraga, nakon 20000

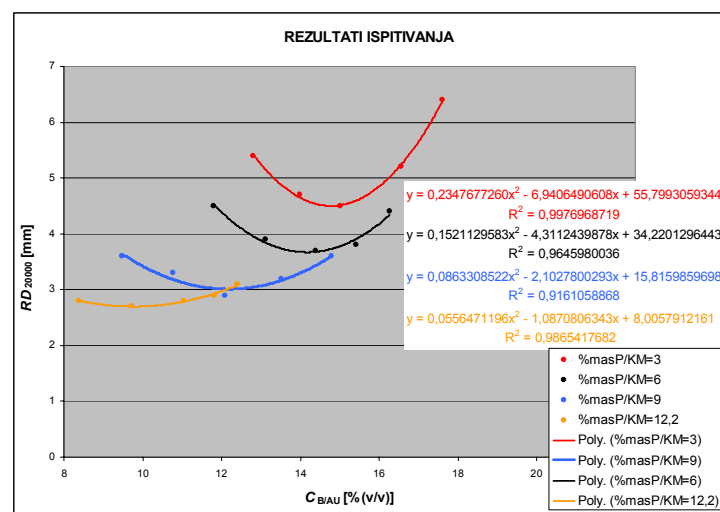
Tablica 6. Prikaz sastava i svojstva ispitanih serija asfaltnih uzoraka

Oznaka serije	Oznaka mješavine u seriji	ASFALTNA MJESHAVINA				
		SASTAV				SVOJSTVO
		$C_{KS/AU}$ [%(v/v)]	$C_{P/AU}$ [%(v/v)]	$C_{B/AU}$ [%(v/v)]	$C_{\dot{S}/AU}$ [%(v/v)]	RD_{20000} [mm]
SERIJA 1	AM 1	74,4	2,4	12,8	10,3	5,4
	AM 2	74,8	2,5	14,0	8,7	4,7
	AM 3	74,7	2,5	15,0	7,9	4,5
	AM 4	75,1	2,5	16,6	5,9	5,2
	AM 5	75,1	2,5	17,6	4,8	6,4
SERIJA 2	AM 6	74,2	5,0	11,8	8,9	4,5
	AM 7	74,2	5,0	13,1	7,7	3,9
	AM 8	74,6	5,1	14,4	5,9	3,7
	AM 9	74,7	5,1	15,4	4,8	3,8
SERIJA 3	AM 10	74,9	5,1	16,3	3,8	4,4
	AM 11	72,7	7,7	9,5	10,1	3,6
	AM 12	73,2	7,7	10,8	8,2	3,3
	AM 13	73,6	7,7	12,1	6,6	2,9
	AM 14	73,9	7,8	13,5	4,8	3,2
SERIJA 4	AM 15	74,0	7,8	14,8	3,4	3,6
	AM 16	71,4	10,6	8,4	9,6	2,8
	AM 17	71,9	10,6	9,7	7,8	2,7
	AM 18	72,3	10,7	11,1	6,0	2,8
	AM 19	72,4	10,7	11,8	5,1	2,9
	AM 20	72,6	10,7	12,4	4,3	3,1

prelazaka kotača (RD_{20000}), o obujamskoj koncentraciji bitumena u asfaltnom uzorku ($C_{B/AU}$) može opisati izrazom:

$$RD_{20000} = L \cdot C_{B/AU}^2 - M \cdot C_{B/AU} + N \quad (7)$$

gdje su L , M i N koeficijenti karakteristični za svaku seriju uzoraka (jednaki granulometrijski sastav kamenog skeleta (I) i jednak maseni udio punila u kamenom

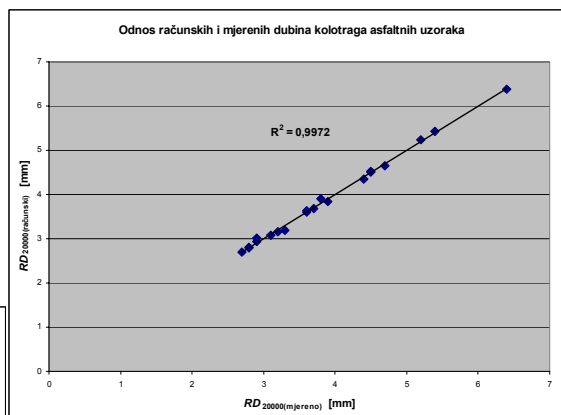


Slika 6. Prikaz ovisnosti dubine kolotruga, nakon 20000 prelazaka kotača (RD_{20000}), o koncentraciji bitumena u asfaltnom uzorku ($C_{B/AU}$)

materijalu ($\%mas_{P/KM}$)).

Statističkom obradom mjerenih podataka za svaku od serija asfaltnih uzoraka (serija 1 = 3 $\%mas_{P/KM}$, serija 2 = 6 $\%mas_{P/KM}$, serija 3 = 9 $\%mas_{P/KM}$ i serija 4 = 12,2 $\%mas_{P/KM}$) određeni su karakteristični koeficijenti L , M i N (tablica 7.). Koeficijenti su određeni prilagođavanjem polinoma drugog stupnja eksperimentalnim podacima.

Usporedbom (tablica 7., slika 7.) rezultata dubine kolotruga, nakon 20000 prelazaka kotača, asfaltnih uzoraka dobivenih mjerenjem ($RD_{20000(mjereni)}$) s rezultatima dobivenim proračunom ($RD_{20000(proračunski)}$) prema relaciji (7), uz upotrebu statistikom određenih koeficijenata (L , M i N) nađeno je vrlo dobro slaganje mjerenih i proračunom dobivenih rezultata (faktor korelacije 0,9972), što upućuje na zaključak da je predloženi oblik funkcijske veze (7) dubine kolotruga (svojstvo) i obujamske koncentracije bitumena u asfaltnom uzorku (sastav) dobro odabran.



Slika 7. Prikaz odnosa izračunatih jednadžbom (7) i mjerenih dubina kolotruga asfaltnog uzorka

Analizom mjerenjem dobivenih rezultata uspostavljena je funkcijska veza koeficijenata (L , M , N) s elementima sastava što je prikazano u nastavku.

4.3 Ovisnost koeficijenata o ostalim elementima sastava

Cilj daljnje analize rezultata ispitivanja bio je pronalaženje veze koeficijenata L , M i N funkcijske ovisnosti dubine kolotruga (nakon 20000 prelazaka kotača) asfaltnog uzorka o koncentraciji bitumena u asfaltnom uzorku.

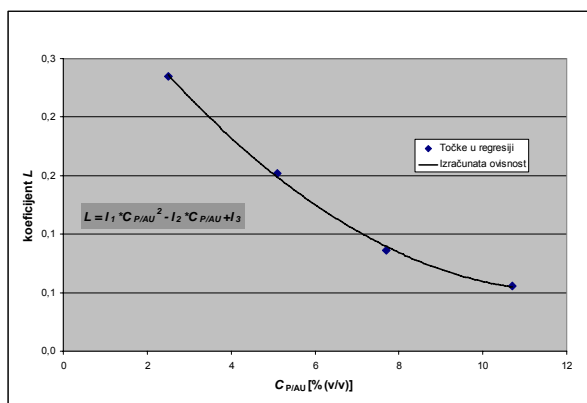
Tablica 7. Prikaz regresijom određenih koeficijenata L, M i N te mjerenih i proračunskih dubina kolotraga

Oznaka serije	Oznaka mješavine u seriji	ASFALJNI UZORAK					
		SASTAV	Koeficijenti			SVOJSTVO	
		$C_{B/AU}$ [%(v/v)]	L	M	N	RD_{20000} (mjereno) [mm]	RD_{20000} (računski) [mm]
SERIJA 1 $\%masp/KM = 3$	AM 1	12,8	0,234768	6,940649	55,799306	5,4	5,4
	AM 2	14,0				4,7	4,6
	AM 3	15,0				4,5	4,5
	AM 4	16,6				5,2	5,2
	AM 5	17,6				6,4	6,4
SERIJA 2 $\%masp/KM = 6$	AM 6	11,8	0,1521130	4,3112440	34,220130	4,5	4,5
	AM 7	13,1				3,9	3,8
	AM 8	14,4				3,7	3,7
	AM 9	15,4				3,8	3,9
	AM10	16,3				4,4	4,3
SERIJA 3 $\%masp/KM = 9$	AM 11	9,5	0,086331	2,102780	15,815986	3,6	3,6
	AM 12	10,8				3,3	3,2
	AM 13	12,1				2,9	3,0
	AM 14	13,5				3,2	3,2
	AM 15	14,8				3,6	3,6
SERIJA 4 $\%masp/KM = 12,2$	AM 16	8,4	0,055647	1,087081	8,005791	2,8	2,8
	AM 17	9,7				2,7	2,7
	AM 18	11,0				2,8	2,8
	AM 19	11,8				2,9	2,9
	AM 20	12,4				3,1	3,1

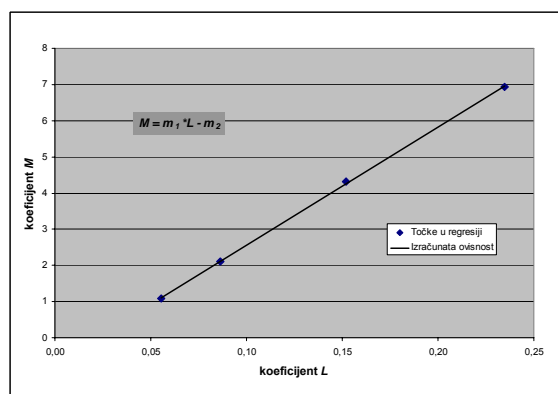
ciji bitumena u uzorku, s ostalim elementima sastava asfaltnog uzorka. Iz prikaza koeficijenata (tablica 8.) vidi se da su koeficijenti karakteristični za pojedine serije uzoraka.

Tablica 8. Prikaz regresijom dobivenih koeficijenata L, M i N te njihova ovisnost o ostalim elementima sastava

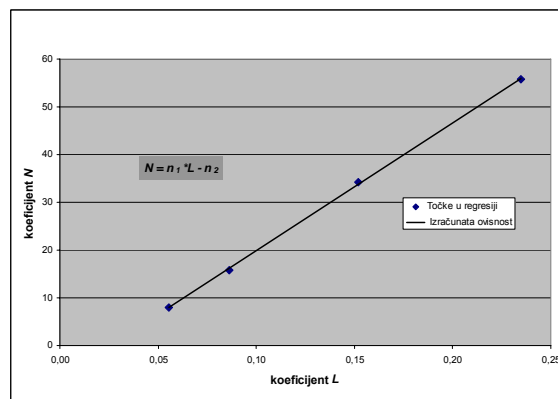
Oznaka serije	$C_{P/AU}$	Koeficijenti		
		L	M	N
SERIJA 1	2,3	0,2347677	6,9406490	55,7993059
SERIJA 2	1,6	0,1521130	4,3112440	34,2201296
SERIJA 3	1,2	0,0863309	2,1027800	15,8159860
SERIJA 4	0,9	0,0556471	1,0870806	8,0057912



Slika 8. Prikaz ovisnosti koeficijenta L o $C_{P/AU}$



Slika 9. Prikaz ovisnosti koeficijenta M o koeficijentu L



Slika 10. Prikaz ovisnosti koeficijenta N o koeficijentu L

Iz prikaza ovisnosti vrijednosti koeficijenta L o obujamskoj koncentraciji punila u asfaltnom uzorku ($C_{P/AU}$) (slika 8.) dobiven je izraz:

$$L = l_1 \cdot C_{P/AU}^2 - l_2 \cdot C_{P/AU} + l_3 \quad (8)$$

gdje je:

$$l_1 = 0,0020304, \quad l_2 = 0,0488878, \quad l_3 = 0,3454004$$

Iz prikaza ovisnosti koeficijenta M i N (slike 9. i 10.) dobiveni su sljedeći izrazi:

$$M = m_1 \cdot L - m_2 \quad (9)$$

gdje je:

$$m_1 = 32,7235329, \quad m_2 = 0,7160925$$

$$N = n_1 \cdot L - n_2 \quad (10)$$

gdje je:

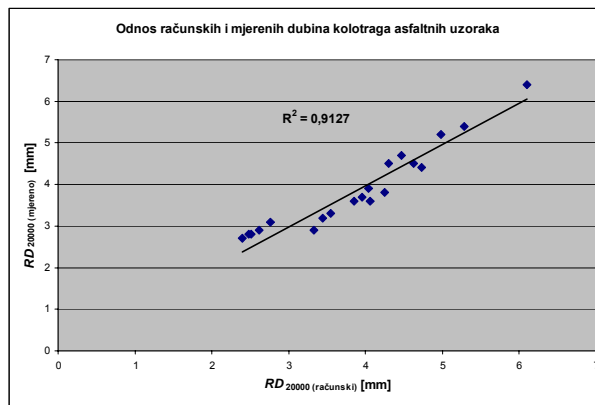
$$n_1 = 268,2397241, \quad n_2 = 7,0049218$$

Uvrštavanjem izraza /8/ u izraz /9/ i izraza /8/ u izraz /10/ dobivamo:

$$M = m_1 \cdot l_1 \cdot C_{P/AU}^2 - m_1 \cdot l_2 \cdot C_P + m_1 \cdot l_3 - m_2 \quad (11)$$

$$N = n_1 \cdot l_1 \cdot C_{P/AU}^2 - n_1 \cdot l_2 \cdot C_P + n_1 \cdot l_3 - n_2 \quad (12)$$

Izvedene vrijednosti koeficijenta $L_{(PRORAČUNSKI)}$, $M_{(PRORAČUNSKI)}$ i $N_{(PRORAČUNSKI)}$ prikazane su u tablici 9. u kojoj se, između ostalog, nalaze i dubine kolotruga asfaltnih uzoraka proračunane pomoću vrijednosti tih koeficijenta ($RD_{20000(proračunski)}$).



Slika 11. Prikaz odnosa mjerenih i proračunanih dubina kolotruga prema jednadžbi /13/

Usporedbom tako proračunanih ($RD_{20000(proračunski)}$) i mjerenih ($RD_{20000(mjereni)}$) dubina kolotruga asfaltnih uzoraka nađeno je vrlo dobro slaganje mjerenih i proračunom dobivenih rezultata (faktor korelacije 0,9127) što upućuje na zaključak da je predloženi oblik funkcijske veze koeficijenta L , M i N o $C_{P/AU}$ dobro odabran (slika 11.).

Tablica 9. Prikaz računski određenih koeficijenta $L_{(PRORAČUNSKI)}$, $M_{(PRORAČUNSKI)}$ i $N_{(PRORAČUNSKI)}$ te mjerenih ($RD_{20000(mjereni)}$) i proračunskih dubina kolotruga ($RD_{20000(proračunski)}$)

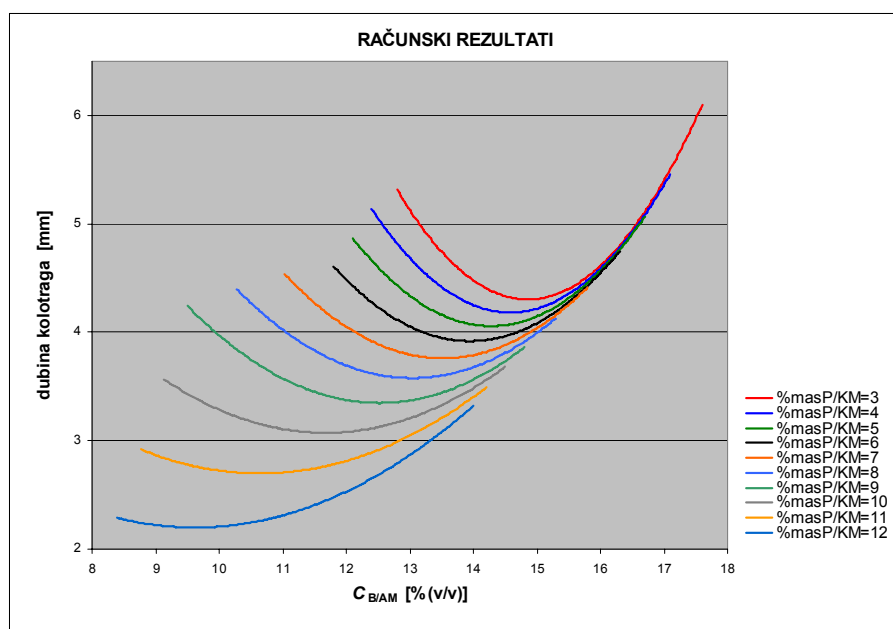
Oznaka serije	Oznaka mješavine u seriji	ASFALJNI UZORAK					
		SASTAV	Koeficijenti			SVOJSTVO	
		$C_{B/AU}$ [%(v/v)]	$L_{(PRORAČUNSKI)}$	$M_{(PRORAČUNSKI)}$	$N_{(PRORAČUNSKI)}$	$RD_{20000(mjereni)}$ [mm]	$RD_{20000(proračunski)}$ [mm]
SERIJA 1 $\%_{masP/KM} = 3$	AM 1	12,8	0,2358707	7,0024305	56,2649724	5,4	5,3
	AM 2	14,0				4,7	4,5
	AM 3	15,0				4,5	4,3
	AM 4	16,6				5,2	5,0
	AM 5	17,6				6,4	6,1
SERIJA 2 $\%_{masP/KM} = 6$	AM 6	11,8	0,1488828	4,1558783	32,9313563	4,5	4,6
	AM 7	13,1				3,9	4,0
	AM 8	14,4				3,7	4,0
	AM 9	15,4				3,8	4,2
	AM10	16,3				4,4	4,7
SERIJA 3 $\%_{masP/KM} = 9$	AM 11	9,5	0,0893457	2,2076136	16,9611373	3,6	4,1
	AM 12	10,8				3,3	3,5
	AM 13	12,1				2,9	3,3
	AM 14	13,5				3,2	3,4
	AM 15	14,8				3,6	3,9
SERIJA 4 $\%_{masP/KM} = 12,2$	AM 16	8,4	0,0547595	1,0758310	7,6837450	2,8	2,5
	AM 17	9,7				2,7	2,4
	AM 18	11,0				2,8	2,5
	AM 19	11,8				2,9	2,6
	AM 20	12,4				3,1	2,8

Primjereno tome i konačni oblik funkcijske ovisnosti dubine kolotruga asfaltnog uzorka o njegovu sastavu zadovoljavajući je i prihvatljiv.

4.4 Ovisnost dubine kolotruga asfaltnog uzorka o njegovom sastavu

Uvrštavanjem izraza (8), (11) i (12) u osnovnu jednadžbu (7) ovisnosti dubine kolotruga o koncentraciji bitumena u asfaltnom uzorku, dobivamo konačnu ovisnost dubine kolotruga o sastavu asfaltnog uzorka koja je valjana za sve ispitane serije uzoraka:

$$RD_{20000} = \left(l_1 \cdot C_{P/AU}^2 - l_2 \cdot C_{P/AU} + l_3 \right) \cdot C_{B/AU}^2 - \left(m_1 \cdot l_1 \cdot C_{P/AU}^2 - m_1 \cdot l_2 \cdot C_P + m_1 \cdot l_3 - m_2 \right) \cdot C_{B/AU} + \left(n_1 \cdot l_1 \cdot C_{P/AU}^2 - n_1 \cdot l_2 \cdot C_P + n_1 \cdot l_3 - n_2 \right) \quad (13)$$



Slika 12. Grafički prikaz dubina kolotruga proračunanih jednadžbom (13) za asfaltno mješavine različitog sastava ($C_{B/AM}$ i $\%mas_{P/KM}$)

Na slici 12. prikazane su dubine kolotruga proračunane pomoću jednadžbe (13) za asfaltno mješavine različitog sastava ($C_{B/AM}$ i $\%mas_{P/KM}$)

5 Zaključak

Sastav i dubina kolotruga (nakon 20000 prelazaka kotača) određeni su serijama asfaltnih mješavina jednakog granulometrijskog sastava kamenog skeleta, a različitog masenog udjela punila u kamenom materijalu. Unutar svake serije asfaltno mješavine mijenjana je koncentracija bitumena.

Analizom ovisnosti maksimalne dubine kolotruga o koncentraciji bitumena u uzorku nađena je funkcija koja na zadovoljavajući način opisuje utjecaj sastava na deformabilnost asfalta. Daljnjom analizom koeficijenata nađena je ovisnost koeficijenata o koncentraciji punila u

uzorku. Usporedbom mjerenjem dobivenih dubina kolotruga s proračunanim vrijednostima potvrđena je valjanost te funkcije za sve serije asfaltnih uzoraka.

Primjena dobivene ovisnosti u postupku projektiranja sastava asfaltno mješavine, pronalaženje sastava mješavine omogućuje optimalne vrijednosti dubine kolotruga.

Projektiranjem takvih asfaltnih mješavina moguće je poboljšati kvalitetu vožnje, sigurnost prometovanja uz smanjenje ukupnih troškova održavanja.

Daljnjim istraživanjem potrebno je potvrditi valjanost te funkcije i za druge tipove asfalta šireg raspona sastava.

LITERATURA

- [1] Strineka, A.: *Svojstva asfalta u ovisnosti o njegovom sastavu*, magistarski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, svibanj 2005.
- [2] Ramljak, Z.; Rukavina, T.: *The effect of Type on the Asphalt Mix Resistance to Rutting*, Proceedings of the 3rd International Symposium Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Lisabon, 2003, pp. 369-378
- [3] Roberts, F. L.; Kandhal, P. S.; Brown, E.R.; Lee, D.; Kennedy, W.: *Vruće asfaltno mješavine - Materijali, projektiranje i ugradnja*, II izdanje, Hrvatski savez građevinskih inženjera i Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 2007
- [4] Kandhal, P. S.; Cross S. A.; Brown, E. R.: *Evaluation of Bituminous Pavements for High Pressure Truck Tires*, FHWA REPORT No. FHWA-PA-90-008-87-01, Pennsylvania Department of Transportation, December 1990.
- [5] Ramljak, Z.: Funkcionalna ovisnost optimalnog udjela bitumena u asfaltnoj mješavini o uvjetima projektiranja te o gustoći ingredijenata, Zbornik referatov 7. kolokvija o bitumnih, Gozd Martuljek, 2002, str. 44 – 54.
- [6] Pejnović, V.; Ramljak, Z.; Čipek, V.; Barlek, M.: Utjecaj koncentracije komponenta asfalta na naponsko-deformacijsko ponašanje asfaltnog uzorka u sistemu sa sprječenom lateralnom deformacijom, Zbornik radova drugog jugoslavenskog

- simpozija o bitumenu i asfaltu, Poreč, travnja 1981, Znanstveni savjet za naftu JAZU, Serija C, knjiga 5, str. 157-170.
- [7] Ramljak, Z.; Pejnović, V.; Fučić, B.: *Utjecaj vrste punila i bitumena na fizikalna svojstva bitumenskih mortova*, Zbornik radova drugog jugoslavenskog simpozija o bitumenu i asfaltu, Poreč, travnja 1981, Znanstveni savjet za naftu JAZU, Serija C, knjiga 5, str. 225-242.
- [8] Pejnović, V.; Ramljak, Z.; Besedeš, D.; Mikulić, N.: Utjecaj viskoznosti veziva i prostornih karakteristika asfaltnog uzorka na stabilitet određen Marshall metodom, Ceste i mostovi 27, (1981) (7/8), str. 195-201.
- [9] Ramljak, Z.; Pejnović, V.: Ovisnost pojave trajnih deformacija o prostornim karakteristikama asfaltnog sloja, Ceste i mostovi, 29 (1983) (9), str. 273-280.
- [10] O'Flaherty, C. A.: Highways, The location, design, construction and maintenance of road pavements, Fourth Edition, Elsevier Ltd, GB, 2002
- [11] Wensel, M.; Shalaby, A.; Thiessen, M.; Mah, V.: *Investigation of asphalt pavement rutting at two Canadian airfields*, 4th Transportation Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Canada, June 5-8, 2002
- [12] Khodaii, A.; Mehrara, A.: Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test, Construction and Building Materials, Vol. 23, Issue 7, 2009, pp 2586-2592
- [13] Lu, Y.; Wright, P.J.: *Numerical approach of visco-elastoplastic analysis for asphalt mixtures*, Computers and Structures, Vol. 69, Issue 2, 1998, pp 139-147
- [14] Suo, Z.; Wong, W. G.: Nonlinear properties analysis on rutting behaviour of bituminous materials with different air void contents, Construction and Building Materials, Vol. 23, Issue 12, 2009, pp 3492-3498
- [15] Bekheet, W.; Abd El Halim, A. O.; Easa, S. M.; Ponniah, J.: *Investigation of shear stiffness and rutting in asphalt concrete mixes*, Can. J. Civ. Eng., Vol. 31, Issue 2, 2004, pp 253-262
- [16] Reinke, G.; Gildden, S.; Herlitzka, D.; Jorgenson, J.: *Laboratory Investigation of HMA Performance Using Wheel Tracking and DSR Torsional Creep Tests*, Journal of ASTM International, Vol. 2, Issue 10, 2005
- [17] HRN EN 933-1:2003/A1:2007 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata – 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda sijanja
- [18] HRN EN 933-10:2004 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata – 10. dio: Procjena sitnih čestica – Razvrstavanje punila (sijanje strujanjem zraka)
- [19] HRN EN 1097-6:2004/A1:2007 Ispitivanje mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata - 6. dio: Određivanje gustoće i upijanja vode
- [20] HRN EN 1097-7:2:2008 Ispitivanje mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata – 7. dio: Određivanje gustoće punila – Piknometrijska metoda
- [21] HRN EN 1426:2008 Bitumen i bitumenska veziva – Određivanje penetracije iglom
- [22] HRN EN 1427:2008 Bitumen i bitumenska veziva – Određivanje točke razmekšanja - Metoda prstena i kuglice
- [23] HRN EN 15326:2007 Bitumen i bitumenska veziva – Mjerenje gustoće i relativne gustoće – Metoda s pomoću piknometra s kapilarnim čepom
- [24] HRN EN 12697-1:2007 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 1. dio: Topivi udio veziva
- [25] HRN EN 12697-2:2008 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt - proizveden vrućim postupkom – 2. dio: Određivanje granulometrijskog sastava
- [26] HRN EN 12697-5:2008 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 5. dio: Određivanje gustoće asfaltnih mješavina
- [27] HRN EN 12697-6:2008 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 6. dio: Određivanje gustoće asfaltnih uzoraka
- [28] HRN EN 12697-8:2003 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt - proizveden vrućim postupkom – 8. dio: Određivanje šupljina u asfaltnim uzorcima
- [29] HRN EN 12697-22:2008 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 22. dio: Kolotražnje
- [30] HRN EN 12697-28:2003 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 28. dio: Priprema uzorka za određivanje udjela veziva, udjela vode i granulometrijskog sastava
- [31] HRN EN 12697-29:2003 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt - proizveden vrućim postupkom – 29. dio: Određivanje dimenzija asfaltnog uzorka
- [32] HRN EN 12697-33:2008 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 33. dio: Priprema asfaltnog uzorka valjkastim zbijanjem
- [33] HRN EN 12697-35:2008 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 35. dio: Laboratorijsko miješanje