

# RAZISKOVANJE OBNAŠANJA GUMIBITUMNA KOT VEZIVA ZA PROIZVODNJO GUMIRANIH ASFALTNIH ZMESI

## THE INVESTIGATION OF RUBBER MODIFIED BITUMEN AS A BINDER FOR PRODUCTION OF ASPHALT MIXTURES

**mag. Bojana Lukač, univ. dipl. inž. kem. teh.**

ZAG Dimičeva 12, 1000 Ljubljana

e-pošta: bojana.lukac@zag.si

**doc. dr. Andreja Zupančič Valant, univ. dipl. kem. inž.**

Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, Univerza v Ljubljani,

Aškerčeva 5, 1000 Ljubljana

e-pošta: andreja.valant@fkkt.uni-lj.si

**Znanstveni članek**

UDK 665.77:678

**Povzetek** | Uporaba gumenega prahu, pridobljenega iz odpadnih pnevmatik kot modifikator bitumenskega veziva, predstavlja ekološko rešitev in izboljša lastnosti asfaltnih zmesi. V prispevku predstavljamo raziskavo vpliva gumenega prahu odpadnih pnevmatik na lastnosti veziva – gumibitumna, in lastnosti ekstrahiranega bitumna iz gumiranih asfaltnih zmesi. Kot osnovno vezivo smo uporabili cestogradbeni bitumen tipa B 50/70 iz Madžarske.

Mehanske in reološke lastnosti pripravljene gumibitumna smo primerjali z lastnostmi veziva, ki je vsebovalo vhodni bitumen in dodatek amina, pripravljeno pa je bilo pod enakimi pogoji kot gumibitumen. Amin olajša vmešavanje gumenega prahu v vezivo in proces nabrekanja prahu v vezivu. Pripravili smo asfaltno zmes AC 8 surf in gumirane asfaltno zmesi AC 8 surf po suhem in po mokrem postopku, iz katerih smo z ekstrakcijo in destilacijo ponovno pridobili vezivo (bitumen). Raziskali smo mehanske in reološke lastnosti ekstrahiranega bitumna iz gumiranih asfaltnih zmesi in jih primerjali z ekstrahiranim bitumnom iz asfaltno zmesi, ki ni vsebovala gume, da bi lahko napovedali vpliv gumenega prahu na lastnosti v asfaltni plasti.

Preizkusi so pokazali, da dodatek gumenega prahu bitumnu poveča dinamične module, viskoznost in rutting parameter, poleg tega poviša temperaturo zmečkanišča po PK in zniža temperaturo pretrgališča po Fraasu. Ugotovili smo, da lahko z optimiranimi pogoji priprave dobimo z gumo modificirani bitumen (RmB), ki s svojimi dobrimi lastnostmi poveča temperaturni razpon uporabnosti veziva, kar je v času podnebnih sprememb, ki smo jim priča, zelo pomembna ugotovitev.

**Summary** | The use of waste tire rubbers as bitumen modifiers can contribute to alleviate pollution problems derived from discarding scrap tires and improves chemical and mechanical properties of asphalts. The paper examines the influence of waste tire rubber powder on mechanical and rheological properties of rubberised bitumen binder and on the extracted bitumen from rubberised asphalt mixtures. Samples were prepared by using pavement grade bitumen B50/70 from Hungary. Mechanical and rheological properties of rubberised bitumen binders were compared with the properties of native bitumen modified with amine at the same preparation condition as rubberised binders

Amine is added to improve rubber powder swelling and as a mixing agent. The rubberised asphalt mixtures AC 8 surf were prepared according to wet and dry procedures. In order to examine the effect of waste rubber powder on mechanical properties of asphalt mixtures, the mechanical and rheological properties of extracted bitumen from these asphalt mixtures were compared with the properties of extracted bitumen from asphalt mixture AC 8 surf prepared without rubber powder. It was found that the addition of ground tire rubber to bitumen increases both the linear viscoelastic moduli, rutting parameter and viscosity, at high in-service temperatures. From mechanical tests it was observed that the presence of rubber powder in bitumen increases ring and ball temperature and decreases Fraas temperature. As a consequence, a crumb tire rubber modified bitumen displays enhanced mechanical properties, which improves its resistance to both rutting and fatigue cracking. Therefore, the addition of waste rubber tire powder to bitumen extends the application temperature range of binder.

## 1 • UVOD

V Sloveniji se v zadnjih letih zbere približno po 18.000 ton avtomobilskih gum na leto. Več kot polovica zbranih gum se kot gorivo sežge v pečeh v cementni industriji, ostale se tako ali drugače predelajo.

Ena izmed okolju prijaznih metod je drobljenje gum v delce, ki jih uporabimo za modifikacijo bitumna, s katerim proizvajamo asfaltne zmesi. Raziskave na tem področju so obetajoče, kar pomeni koristen rešitev za velike količine zbranih odpadnih gum povsod po svetu.

Dodajanje gumenih delcev v bitumen izboljša lastnosti bitumna, ki so povezane z

obnašanjem (performance-related). Zelo se poveča odpornost proti utrujanju, kar izboljša odpornost proti tvorbi kolesnic. Asfaltne zmesi, ki jih proizvajamo z gumibitumnom so stabilnejše kot podobne zmesi s cestogradbenim bitumnom. Poleg tega izkazujejo večjo odpornost na visoke temperature, zmanjšujejo poškodbe, katerih vzroki so v spodnjih plasteh asfalta, zmanjšujejo hrupnost in zmanjšujejo občutljivost asfaltne plasti na nizke temperature.

Razvili sta se dve metodi dodajanja gumenih delcev v asfaltno zmes – suhi in mokri posto-

pek. V suhem postopku se del kamnitih zrn nadomesti z gumenimi delci, ki se v procesu proizvodnje dozirajo v mešalec.

Pogostejša metoda je mokri postopek, s katerim se najprej pripravi gumibitumen, ki se nato vodi v proizvodni proces mešanja asfaltne zmesi. Gumirani delci se vmešavajo v bitumen pri temperaturi od 170 do 220 °C in se v ustrezni mešalni napravi mešajo od 30 do 120 minut. Dodatek gume znaša od nekaj do 20 % mase bitumna, lahko pa tudi več, kar zavisi od kemijske sestave vhodnega bitumna.

Članek predstavlja del raziskovalnega dela v okviru doktorskega študija na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo Univerze v Ljubljani.

## 2 • EKSPERIMENTALNI DEL

### 2.1 Vhodni materiali

#### 2.1.1 Bitumen

Kemijska sestava bitumna je zelo raznolika, saj ga sestavlja veliko različnih organskih spojin, katerih natančna identifikacija zaradi velike podobnosti med njimi pogosto ni mogoča. Sestava je odvisna od izvora nafte in rafinacijskega procesa.

Kemijska sestava in temperatura imata močan vpliv na mehanske lastnosti ter na mikrostrukturo bitumna. Pri visokih temperaturah se v asfaltne plasti lahko pojavijo kolesnice, pri nizkih pa razpoke. Da bi razširili uporabni temperaturni razpon veziva, se v bitumen vmešavajo različni dodatki, ki reagirajo z bitumnom in nadzorovano spreminjajo lastnosti bitumenskih veziv. Tako se uporabljajo dodatki, kot so amini, polifosforna kislina, apno, voski, zeoliti itd. Uporabljajo pa se tudi sredstva za modi-

fikacijo bitumna, kot so polimeri in tudi gumeni prah, ki zelo spremeni lastnosti veziva ter s tem asfaltne zmesi in vgrajene plasti.

Za izvedbo preizkusov v tej raziskavi smo izbrali cestogradbeni bitumen tipa B 50/70 madžarskega proizvajalca.

#### 2.1.2 Gumeni delci

Gumena zmes, iz katere je izdelan avtomobilski plašč, je kombinacija naravnega in sintetičnega kavčuka (najpogosteje uporabljen je stiren-butadien – SBR), različnih sestavin nafte, kemikalij in saj. Za podaljšanje življenjske dobe in ohranjanje prvotnih lastnosti prožnosti osnovnim sestavinam dodajajo optimirane zmesi voskov, antioksidantov in antiozonatov.

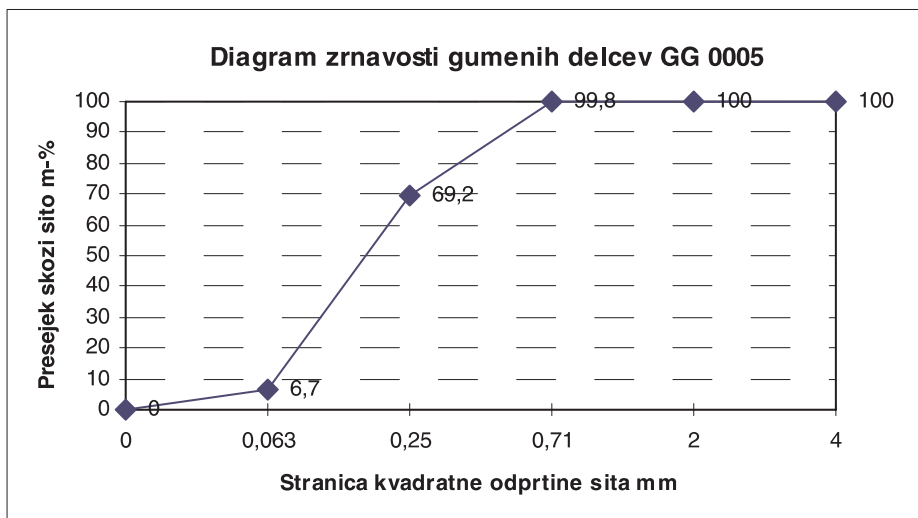
Gumeni prah oz. gumene delce iz odpadnih gum proizvajajo z dvema postopkoma:

mletjem pri temperaturi okolice (ambientni postopek), kjer se delci bolj cefrajo, in mletjem s kriogenim postopkom, kjer se delci gume ohlajajo s tekočim dušikom in drobijo. Pri obeh postopkih se odstranijo kovinski delci (žica v postopku drobljenja z magneti) in delci tkanin z izpihovanjem. Z obema tehnikama sicer pridobimo delce podobne velikosti, ki pa se razlikujejo v površinskih lastnostih.

Na osnovi predhodnih laboratorijskih preizkusov, ki niso vključeni v to predstavitev, smo ugotovili, da je za kakovostno gumirano vezivo primerneje uporabiti manjše delce gume (Štrekelj, 2009).

Uporabili smo gumeni prah z oznako GG0005 proizvajalca Gumiimpres-GPR iz Hrvaške, ki je bil proizveden po ambientnem postopku. Preverili smo njegovo zrnastostno sestavo (slika 1) in gostoto gumenega prahu.

Gostoto gumiranih delcev smo določili v etanolu in znaša 1264 kg/m<sup>3</sup>.



Slika 1 • Sejalna analiza gumenega prahu GG0005

## 2.2 Priprava gumibitumna – RmB

### 2.2.1 Interakcija med gumo in bitumnom

O ugotavljanju interakcije med gumo in bitumnom se najdejo v literaturi o nabreknanju gume različni podatki. Vzrok je lahko v razlikah v topnih parametrih komponent z naraščajočo temperaturo.

Ko se gumeni delci potopijo v bitumen, le-ti absorbirajo komponente, podobne topnosti, in hitro nabreknejo. Gre za absorpcijo nizko-molekularnih spojin, kot so na primer aromati. Močne transvezi (cross-links) med elastomernimi verigami preprečujejo gumenim delcem, da bi se v celoti raztopili v tekočem bitumnu. S podaljševanjem reakcijskega časa tekočina penetrira v notranjo strukturo polimera in nabreknanje narašča. Ugotovili so, da poteka

nabreknanje linearno prvih 90 sekund, nato pa narašča z upadajočo hitrostjo (Lesueur, 2009). Gumeni delci lahko nabreknejo 3- do 5-krat glede na začetno prostornino. Zaradi nabreknanja je med delci gume vedno manj prostora, zato je njihova mobilnost znotraj bitumna slabša. Hkrati postaja bitumen bogatejši z asfaltensko fazo, saj se guma oz. drugi polimeri in asfalteni ne mešajo in povzročijo nastanek heterogene zmesi. To povzroči zvišanje viskoznosti veziva v primerjavi z osnovnim bitumnom (Gawel, 2006). Manjši delci začno nabrekati prej in bolj modificirajo vezivo kot večji gumeni delci. Nabreknanje gumenih delcev v bitumnu oziroma absorpcijske kapacitete gumenih delcev so v glavnem povezane z lastnostmi gume, izvorom surove nafte (kemijske sestave) in penetracijskim razredom

bitumna, poleg tega pa še od temperature in kontaktnega časa mešanja ter velikosti delcev. Kemijska narava bitumna določa ravnotežno vrednost nabreknanja, medtem ko viskoznost bitumna določa hitrost nabreknanja (Peralta, 2009).

### 2.2.1 Priprava gumiranega veziva

Pomembno je določiti čas in temperaturo za reakcijo gume in bitumna ter izbrati primeren dodatek, ki olajša vmešavanje gumenega prahu in poveča proces nabreknanja gume v bitumnu. Laboratorijske preiskave meritve so pokazale (Štrekelj, 2009), da je primeren čas vmešavanja 90 minut in temperatura 190 °C. Kot dodatek za vmešavanje smo izbrali amin (Iterlene in/400-S1 (alkilamidimidazopoliamin, Iterchimica, Italija)). V mešanico bitumna in gume smo ga dodali 0,4 ut. %.

Na osnovi predhodnih meritev (Šušteršič, 2009) smo določili primerno koncentracijo gumenega prahu v vezivu. Pripravili smo vzorca s 15 ut. % in 18 ut. % prahu (slika 2).



Slika 2 • Vzorec gumibitumna RmB z 18 ut. % gumenega prahu

## 3 • REZULTATI IN RAZLAGE

Gumiranemu vezivu smo določili mehanske lastnosti po standardnih metodah za klasifikacijo bitumna in reološke lastnosti z rotacijskim reometrom Physica MCR301 (senzorski sistem PP2.5, 1 mm gap) (slika 3). Primerjali smo jih z lastnostmi osnovnega bitumna B 50/70, ki smo mu dodali 0,4 ut. % amina in ga kondicionirali pri 190 °C, 90 minut, enako kot gumirane bitumne (Cankar, 2010).

### 3.1 Lastnosti vhodnega bitumna RmB

#### 3.1.1 Mehanske lastnosti

Za določevanje bitumenskih lastnosti uporabljamo standardizirane mehanske teste, ki



Slika 3 • Rotacijski viskozimenter



Slika 4 • Penetracijo smo izvajali s konusom

nam omogočajo klasifikacijo bitumna po

- trdoti: zmeščišče prstan-kroglica (SIST EN 1427) in penetracija (SIST EN 1426) (slika 4).
- elastičnosti: duktilnost ((SIST EN 13589), (DIN 52 013)).
- pogojih obnašanja bitumna v asfaltni plasti: temperatura zmeščišča po testu prstan-kroglica, temperatura pretgališča po Fraassu (SIST EN 12593).

Rezultati standardnih mehanskih testov so zbrani v preglednicah 1 in 2 ter na sliki 5.

Kot kažejo rezultati preizkusov, dodatek amina in kondicioniranje vplivata na mehanske lastnosti osnovnega bitumna. Gumirani vezivi se močno razlikujeta od bitumna brez gumenega prahu. Dodatek gumenega prahu bitumnu poveča območje uporabnosti veziva (zmeščišče po PK in pretgališče po Fraassu) in zmanjša vrednost penetracije. Preizkus duktilnosti pokaže, da se lastnosti gumiranih veziv približajo polimerno modificiranim bitumnom, vendar ne dosegajo tako visokih vrednosti energije pri pretrgu kot PmB. Za PmB namreč velja, da morajo izpolniti kriterij  $1 \text{ J/cm}^2$ , če jih uporabimo za nosilne ali vezne plasti, za obrabne pa  $2 \text{ J/cm}^2$ , in še to pri izvedbi preizkusa s selektivnejšo metodo po DIN 52 013, to je pri  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , z modificiranimi modelčki (SIST 1035).

### 3.1.2 Reološke lastnosti RmB

Reologija preučuje preoblikovanje in tečenje tistih snovi, ki se ne obnašajo po klasičnih zakonih viskoznosti in elastičnosti, ki sta jih postavila Newton in Hook. Reološke lastnosti bitumna so v veliki meri odvisne od temperature. Segajo od čisto viskoznih lastnosti prave tekočine preko viskoelastičnega območja do čisto elastičnega obnašanja.

Reološke preizkuse smo izvajali na rotacijskem viskozimetru Physica MCR 301, prikazanem na sliki 2.

Pri dinamičnih testih se v primerjavi s statičnimi spreminja strižna deformacija s časom sinusno z določeno frekvenco in amplitudo. Meritve smo izvajali pri majhnih strižnih deformacijah, saj na ta način lahko določimo viskozno in elastično komponento viskoelastične snovi pri nedestruktivnih strižnih pogojih, ki zagotavljajo območje linearno viskoelastičnega odziva. Dinamične teste smo izvajali po standardu SIST EN 14770.

Pri nedestruktivnih oscilatornih strižnih pogojih smo proučevali temperaturno odvisnost dinamičnih količin.

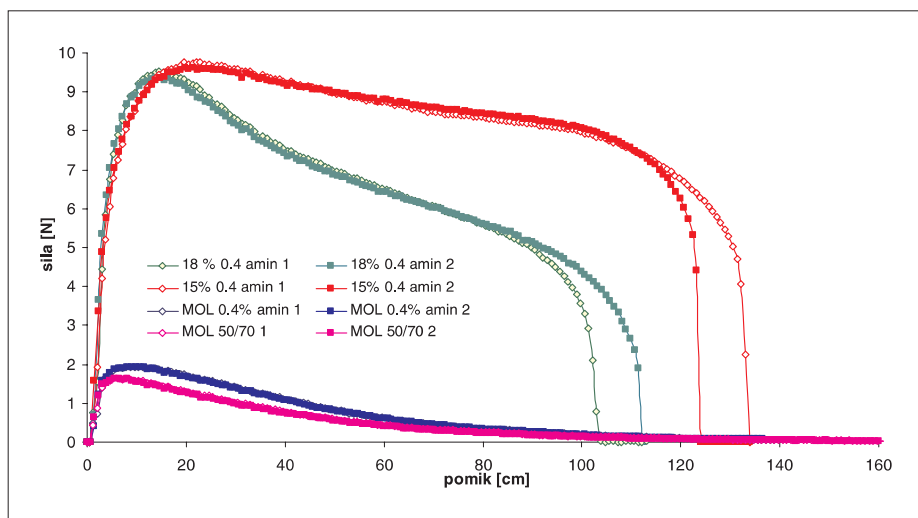
Rezultati meritev so prikazani na slikah 6 in 7. Določili smo temperature, pri katerih rutting

Osnovni bitumen in bitumen z dodatki	penetracija (mm/10)	zmeščišče po PK ( $^\circ\text{C}$ )	pretgališče po Fraassu ( $^\circ\text{C}$ )
B 50/70	62	49,4	-14
0,4 % amini	60	51,2	-15
15 % GG 0,4 % amini	40	72,4	-18
18 % GG 0,4 % amini	44	79	-18

Preglednica 1 • Rezultati standardnih mehanskih meritev za osnovni bitumen, bitumen, kondicioniran z aminom, in gumirani bitumen B 50/70 dveh različnih koncentracij

	$L_{\max}$ (mm)	$F_{\max}$ (N)	$E_{\max}$ ( $\text{J/cm}^2$ )
B 50/70	>1100,6	1,7	0,1
0,4 % amini	>1100,6	1,9	0,1
15 % GG 0,4 % amini	128,2	9,7	1,0
18 % GG 0,4 % amini	106,9	9,4	0,7

Preglednica 2 • Rezultati testa duktilnosti za osnovni bitumen, bitumen, kondicioniran z aminom, in gumirani bitumen MOL 50/70 dveh različnih koncentracij. Preizkus je bil izveden po standardu DIN 52 013 pri  $25 \text{ }^\circ\text{C}$



Slika 5 • Grafični prikaz rezultatov testa duktilnosti v dveh paralelnih vzorcih za osnovni bitumen, bitumen, kondicioniran z aminom, in gumirani bitumen B 50/70 z dvema različnima koncentracijama gumiranih delcev

parameter doseže  $1000 \text{ Pa}$  (slika 9). Vrednosti so prikazane v preglednici 3.

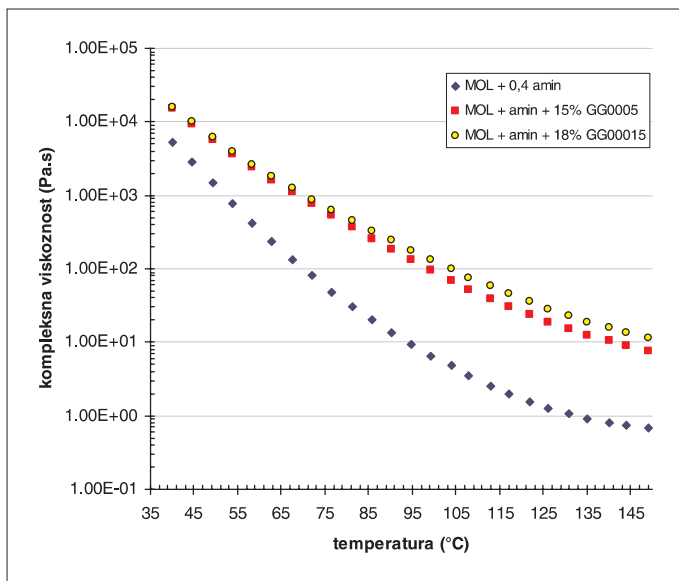
Pomemben parameter, ki je rezultat meritev (po protokolu SHRP), je t. i. rutting parameter ( $G^*/\sin\delta$ ). Sistem PG (Performance Graded System) razvršča bitumne na podlagi temperature, pri kateri je vrednost rutting parametera  $1000 \text{ Pa}$ . Rutting parameter se nanaša na

odpornost bitumenskega veziva proti trajnim deformacijam asfaltni plasti (tvorba kolesnic). Višje vrednosti parametra pomenijo večjo odpornost proti tvorbi kolesnic v asfaltni plasti. Relativni rutting parameter in relativna kompleksna viskoznost (slika 8) sta izračunana iz vrednosti dinamične količine pri enaki temperaturi po formuli:

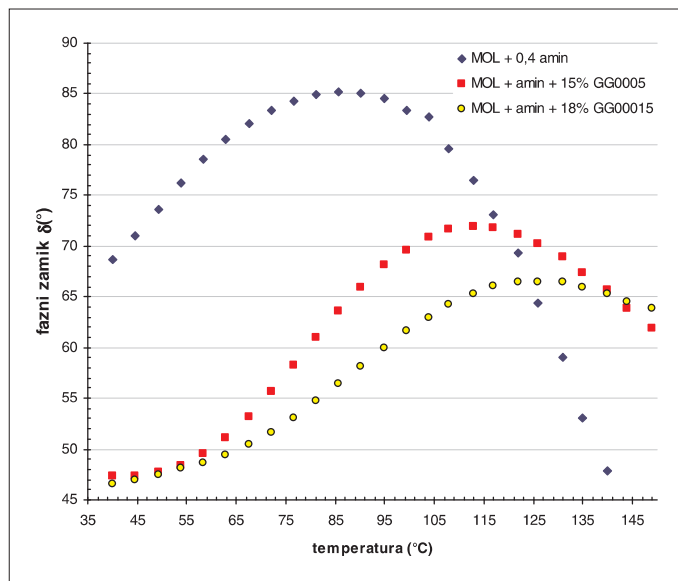


$$\text{relativni rutting parameter} = \frac{G^*/\sin \delta \text{ gumirani bitumen}}{G^*/\sin \delta \text{ kondicionirani bitumen + a min}} \quad (1)$$

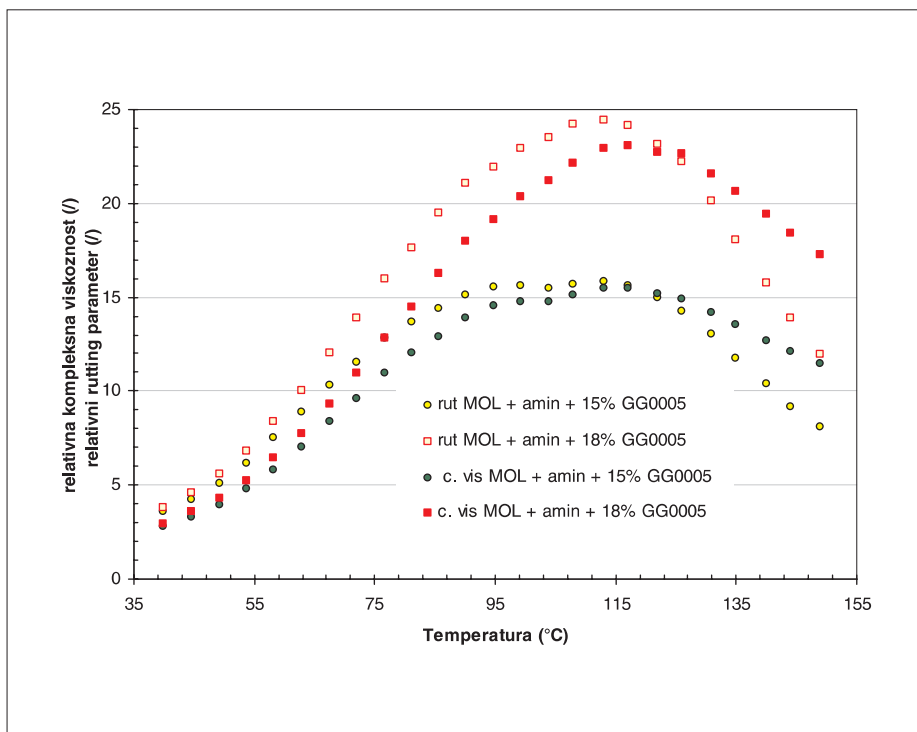
$$\text{relativna kompleksna viskoznost} = \frac{\eta^* \text{ gumirani bitumen}}{\eta^* \text{ kondicionirani bitumen + a min}} \quad (2)$$



Slika 6 • Temperaturna odvisnost kompleksne viskoznosti za bitumen, kondicioniran z aminom, in gumirani bitumen B 50/70 dveh različnih koncentracij



Slika 7 • Temperaturna odvisnost faznega zamika za bitumen, kondicioniran z aminom, in gumirani bitumen B 50/70 dveh različnih koncentracij

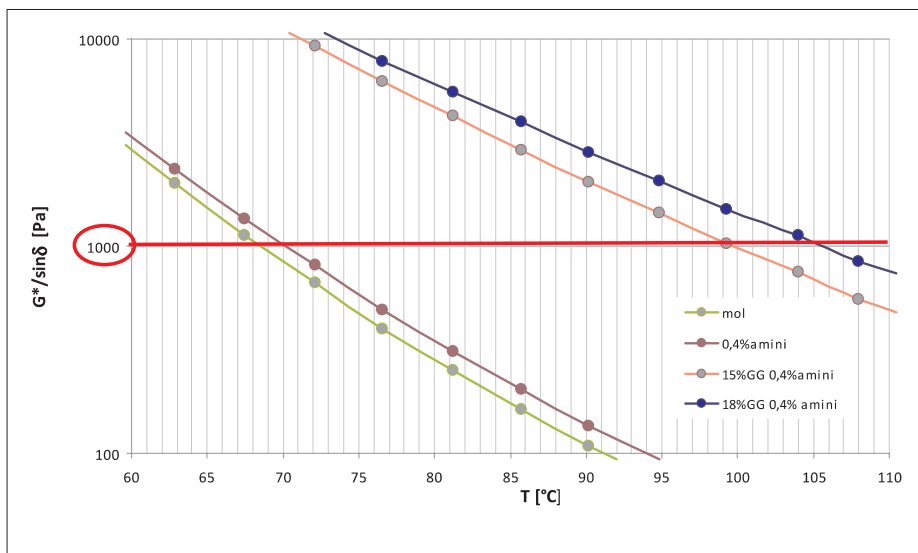


Slika 8 • Temperaturna odvisnost kompleksne viskoznosti in rutting parametra za bitumen, ki smo mu dodali 15 in 18 % gumenega prahu ter amine

vzorec	T (°C)	G*/sinδ (Pa)
osnovni B 50/70	68	1000
0,4 % amini	70	
15 % GG 0,4 % amini	98,5	
18 % GG 0,4 % amini	106	

Preglednica 3 • Temperature, pri katerih imajo osnovni bitumen, bitumen, kondicioniran z aminom, in gumirani bitumen dveh koncentracij vrednost rutting parametra 1000 Pa

Čim večji je dodatek gumenega prahu, tem višja je temperatura, pri kateri doseže rutting parameter 1000 Pa. Pri upoštevanju dejstva, da lahko v poletnih mesecih temperatura asfaltne plasti doseže 60–70 °C, je dvig temperature z dodatkom gumenega prahu kar za 30 °C velika izboljšava te lastnosti.



Slika 9 • Temperaturna odvisnost rutting parametra v območju temperatur, ko doseže kriterij 1000 Pa

	Kameni agregat	Bitumen 50/70	Dodatek gumenega prahu	Sekundarni dodatek
<b>Suhi postopek</b>				
Šarža 1	94,5 ut. %	5,5 ut. %		
Šarža 4	94,5 ut. %	4,5 ut. %	1 ut. % G0005	Amin
Šarža 5	94,0 ut. %	5,0 ut. %	1 ut. % G0005	Amin
<b>Mokri postopek</b>		<b>Veživo: gumirani bitumen</b>		
Šarža 6	94,5 ut. %	5,5 ut. %		
Šarža 7	94,0 ut. %	6,0 ut. %		

Preglednica 4 • Priprava asfaltnih zmesi za pridobivanje ekstrahirane bitumna

Bitumen po ekstrakciji	PENETRACIJA (mm/10)	PK (°C)	FRAAS (°C)
B 50 /70	62	49,4	-14
Šarža 1 (AZ brez gume)	46	54,2	-13
Šarža 4 (AZ z dodatkom GG0005)	46	57,4	-14
Šarža 5 (AZ z dodatkom GG0005)	46	56,2	-15
Šarža 6 (AZ z dodatkom GG0005)	45	59,6	-15
Šarža 7 (AZ z dodatkom GG0005)	45	59,4	-15

Preglednica 5 • Mehanske lastnosti ekstrahiranih bitumnov iz asfaltnih zmesi, ki smo jih proizvedli po suhem in mokrem postopku

Iz reoloških meritev je razbrati, da gumirani bitumen z višjo koncentracijo gumene prahu izkazuje višji elastični doprinos k viskoelastičnemu odzivu kot gumirani bitumen z nižjo koncentracijo prahu (fazni zamik je manjši). V območju nizkih temperatur izkazuje gumirani bitumen izrazite elastične lastnosti (slika 7). Bitumen z dodatkom aminov izkazuje v območju nižjih temperatur večji fazni zamik, je torej manj elastičen, v območju visokih temperatur, ko doseže maksimum, pa strmo upade, torej izrazito pridobiva na elastični komponenti.

### 3.2 Lastnosti ekstrahirane bitumna RmB

Za preverjanje lastnosti ekstrahirane bitumna, ki naj bi pokazale obnašanje asfaltnih zmesi pri vgrajevanju in v plasti, smo sprojehtirali in zamešali asfaltno zmes AC 8 surf. Zmes smo pripravili po mokrem in po suhem postopku. Uporabili smo enak gumeni prah, čeprav se v proizvodnji gumiranih asfaltnih zmesi po suhem postopku načeloma uporabljajo bolj grobe frakcije gumenih delcev.

Pri suhem postopku je vsebnost gumenega prahu znašala 1 ut. % glede na asfaltno zmes, pri mokrem postopku pa 15 ut. % glede na bitumensko vezivo, kar prav tako znaša približno 1 ut. % glede na asfaltno zmes.

Pri mokrem postopku smo gumirani bitumen pripravili pri 170 °C in času kontaktiranja 120 minut, da smo dosegli enake temperaturne pogoje, ki jim je izpostavljen bitumen pri suhem postopku.

#### 3.2.1 Mehanske lastnosti ekstrahiranih bitumnov

Opažamo znižanje penetracije in zvišanje točke zmečkšiča v primerjavi z bitumnom brez dodatkov. Vendar je temperatura zmečkšiča nižja, kot kažejo rezultati vhodnega bitumna v preglednici 1. Točka zmečkšiča ekstrahirane bitumna asfaltnih zmesi, ki je proizvedena po suhem postopku, je še nekoliko nižja od točke zmečkšiča ekstrahirane bitumna asfaltnih zmesi, ki je proizvedena po mokrem postopku. Izvedeni so bili tudi preizkusi duktilnosti ekstrahiranih bitumnov vseh šarž. Vrednost energije pri pretrgu vseh ekstrahiranih bitumnov je zelo nizka, kar pomeni, da se ekstrahirani bitumen iz šarž po suhem in po mokrem postopku obnaša kot navadni cestogradbeni bitumen. Pričakovali smo višje vrednosti energije pri pretrgu pri ekstrahiranem bitumnu iz šarž po mokrem postopku glede na druge lastnosti. Preizkusi so bili izvedeni po DIN 52 013 pri 25 °C.

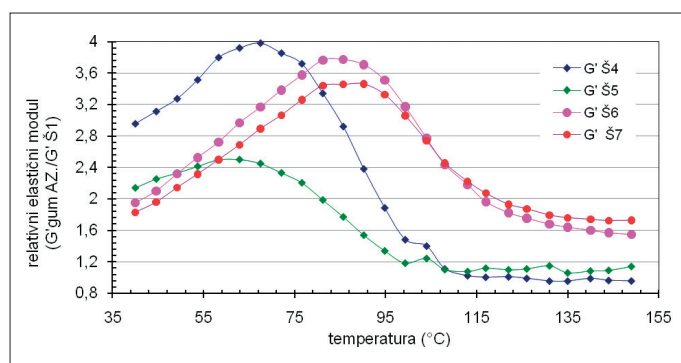
### 3.2.2 Reološke lastnosti ekstrahiranih bitumnov

Rezultati reoloških meritev so podani kot relativne vrednosti glede na reološke lastnosti ekstrahiranega bitumna iz šarže 1 (referenčna šarža), ki ni vsebovala prahu gume. S slik od 10 do 15 je razvidno, da gumeni prah vpliva na vse reološke količine, neodvisno od načina priprave. Povečajo se elastični in

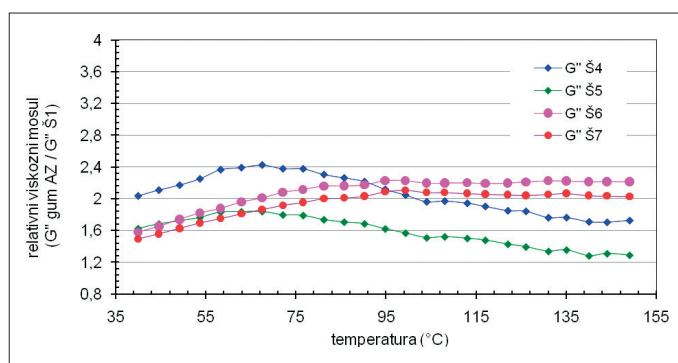
viskozni strižni modul, kompleksna viskoznost in rutting parameter. Največji vpliv ima gumeni prah na elastični doprinos k viskoelastičnemu odzivu ekstrahiranega bitumna. Reološki parametri šarž 6 in 7, ki sta bili pripravljene po mokrem postopku, se med seboj manj razlikujejo kot parametri šarž 4 in 5, pripravljene po suhem postopku. Očitno količina veziva v asfaltu, pripravljenem po suhem postopku,

bolj vpliva na reološke lastnosti ekstrahiranih bitumnov. Vpliv gumenega prahu na lastnosti ekstrahiranih bitumnov je za elastični doprinos največja v temperaturnih območjih 60–70 °C (suhi postopek) in 70–80 °C (mokri postopek). Na slikah 10 do 14 so prikazane relativne vrednosti za elastični modul, viskozni modul, kompleksno viskoznost in fazni zamik ter rutting parameter.

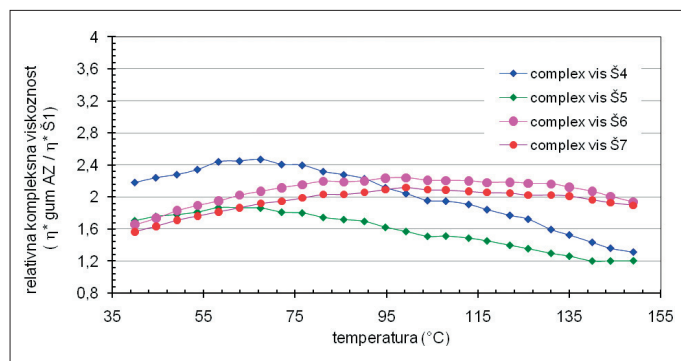
$$\text{relativni reološki parameter} = \frac{\text{parameter od ekstrahirani bitumen iz gumiranega asfalta}}{\text{parameter ekstrahirani bitumen } \text{Š1}} \quad (3)$$



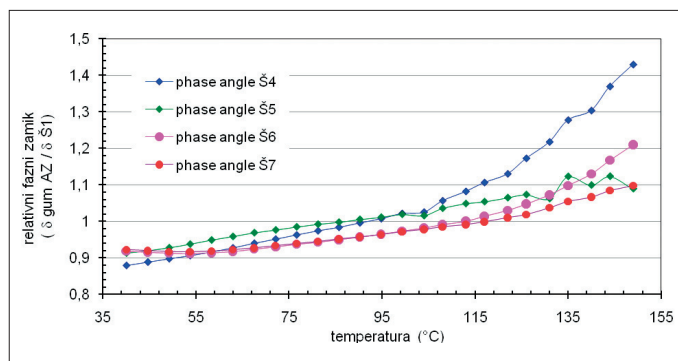
Slika 10 • Temperaturna odvisnost relativne vrednosti elastičnega modula ( $G'$ ) za ekstrahirani bitumen iz šarž 4, 5, 6 in 7



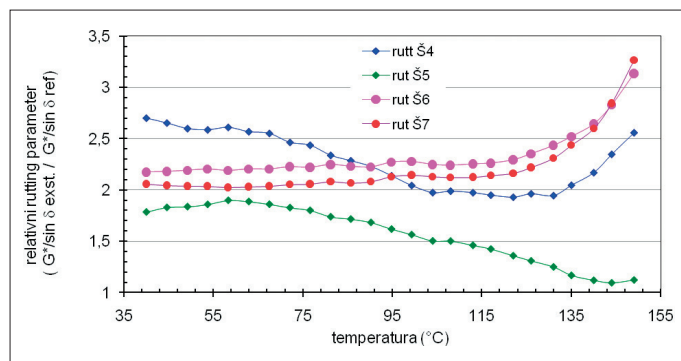
Slika 11 • Temperaturna odvisnost relativne vrednosti viskoznega modula ( $G''$ ) za ekstrahirani bitumen iz šarž 4, 5, 6 in 7



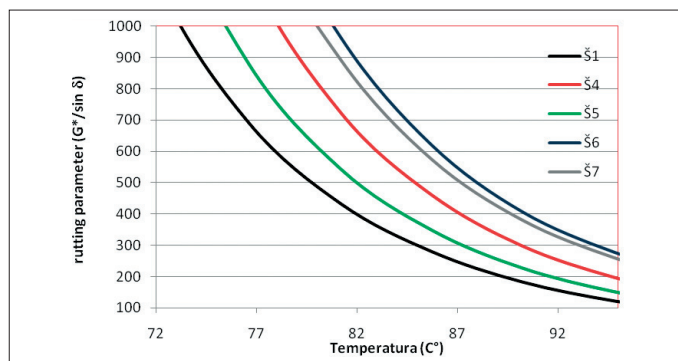
Slika 12 • Temperaturna odvisnost relativne vrednosti kompleksne viskoznosti za ekstrahirani bitumen iz šarž 4, 5, 6 in 7



Slika 13 • Temperaturna odvisnost relativne vrednosti faznega zamika za ekstrahirani bitumen iz šarž 4, 5, 6 in 7



Slika 14 • Temperaturna odvisnost relativne vrednosti rutting parametera ( $G^*/\sin \delta$ ) za ekstrahirani bitumen iz šarž 4, 5, 6 in 7



Slika 15 • Temperaturna odvisnost rutting parametera,  $G^*/\sin \delta$  za ekstrahirane bitumne iz šarž 1, 4, 5, 6 in 7

Suhi postopek	T (°C)	G*/sinδ (Pa)	Mokri postopek	T (°C)	G*/sinδ (Pa)
šarža 1	73	1000	šarža 1	73	1000
šarža 4	77,1		šarža 6	80,1	
šarža 5	73,8		šarža 7	82,3	

Preglednica 6 • Temperature, pri katerih imata osnovni ekstrahirani bitumen in ekstrahirani bitumen iz posameznih asfaltnih zmesi vrednost rutting parametra 1000 Pa

Ker gumeni prah v bitumnu nabreka in tvori gelsko strukturo, nekaj elastomera preide iz gumenih delcev v bitumensko vezivo. Fazni

zamik takega ekstrahirane bitumna je pri nižjih temperaturah manjši od referenčnega kondicioniranega bitumna (manj kot 1). To

pomeni, da ekstrahirani bitumen pri nizkih temperaturah postane elastičnejši, kar je ugodna lastnost glede pojava razpok. Pri višjih temperaturah je ravno obratno, fazni zamik raste, kar pomeni, da je bolj prisotna viskozna komponenta. To pa je ponovno ugodna lastnost glede pojava kolesnic. To dejstvo potrjujejo tudi temperature, pri katerih ekstrahirani bitumen, ki je bil pridobljen iz asfaltnih zmesi, proizvedenih po suhem in mokrem postopku, z dodatkom gumenega prahu in aminov, doseže vrednost rutting parametra 1000 Pa (slika 15 in preglednica 6).

#### 4 • SKLEP

Bitumen z dodatki predstavlja v asfaltni zmesi vezivo in je viskoelastična snov, ki kaže elastične in viskozne lastnosti glede na temperaturo in čas obremenitve. Vezivo mora biti dovolj elastično, da v asfaltni plasti ne prihaja do tvorjenja razpok pri nizkih temperaturah, in dovolj togo, da se pri visokih temperaturah ne zmehta in povzroči tvorjenja kolesnic.

S pomočjo določitve reoloških in mehanskih lastnosti vhodnega bitumenskega veziva, nato pa s primerjavo reoloških in mehanskih lastnosti iz asfaltnih zmesi ekstrahirane veziva lahko ugotovimo učinek modificiranja bitumna

z gumenim prahom. Razberemo lahko tudi optimalno količino dodatka gumenega prahu in najugodnejši način vnosa gumenega prahu v asfaltno zmes, da dobimo optimalne lastnosti vgrajene asfaltni plasti.

Rezultati mehanskih preizkusov so pokazali, da dodatek gumenega prahu v bitumnu zviša viskoznost, temperaturo zmehtačišča in odpornost proti trajnim deformacijam, zniža pa penetracijo. Vrednosti energije pri pretrgu pri preizkusu duktilnosti se povečajo, vendar ne dosegajo zahtev, ki veljajo v Sloveniji za polimerne bitumne po standardu DIN 52 013 pri 25 °C.

V vezivo gumirane asfaltni zmesi, pripravljene po mokrem postopku, pride do močnejših interakcij med solvacijskim ovojem nabrekelega gumenega prahu in polimernimi komponentami nižjih molekularnih mas bitumna. Vrednosti temperature ekstrahirane bitumna za doseg kriterija rutting parametra (1000 Pa) vzorcev iz šarž, pripravljenih po mokrem postopku, so v primerjavi z vzorci iz šarž, ki so pripravljene po suhem postopku, višje. Iz tega lahko sklepamo, da gumirana asfaltna zmes, pripravljena po mokrem postopku, izkazuje boljše lastnosti v visokotemperaturnem območju.

Tako lahko potrdimo, da gumeni prah GG0005 intenzivneje deluje kot modifikator bitumna v primeru priprave asfaltni zmesi po mokrem postopku kot po suhem postopku.

#### 5 • LITERATURA

Cankar, A., Priprava gumirane asfaltni zmesi po mokrem in suhem postopku, Diplomsko delo, UL FKKT, 2010.

Gawel, I., Stepkowski, R., Czechowski, F., Molecular Interactions between Rubber and Asphalt, Ind. Eng. Chem. Res. 45, 3044–3049, 2006.

Lesueur, D., The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanism of bitumen modification, Advances in Colloid and Interface Science 145, Pages 42–82, 2009.

Peralta, E., J., F., Study of the Interaction Between Bitumen and Rubber, Dissertacao de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Mincho, jun. 2009.

Standardi SIST in EN ter DIN 52 013 za področje bitumenskih veziv.

Štrekelj, S., Vplivi priprave zmesi bitumnov in gumenega prahu na reološke in mehanske lastnosti zmesi, Diplomsko delo, ULFKKT, 2009.

Šuštaršič, E., Vplivi različnih modifikatorjev na reološke in mehanske lastnosti gumiranega bitumenskega veziva, Diplomsko delo, UL FKKT, 2009.