

Primljen / Received: 15.7.2013.

Ispravljen / Corrected: 12.9.2013.

Prihvaćen / Accepted: 20.9.2013.

Dostupno online / Available online: 10.11.2013.

# Otpornost na kolotražnje sustava hidroizolacija - asfaltni kolnik na mostovima

## Autori:



Dr.sc. **Miroslav Šimun**, dipl.ing.građ.  
Institut IGH d.d.  
[miroslav.simun@igh.hr](mailto:miroslav.simun@igh.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

**Miroslav Šimun, Tatjana Rukavina, Sanja Dimter**

## Otpornost na kolotražnje sustava hidroizolacija - asfaltni kolnik na mostovima

Na voznim površinama mostova pri primjeni klasičnih sustava hidroizolacije s tankim asfaltnim slojevima učestalo se pojavljuju plastične deformacije, posebice one oblika kolotruga. U okviru istraživanja provedena je analiza postojećih sustava u eksploataciji, laboratorijska ispitivanja i terenska mjerenja relevantnih svojstava pojedinih elemenata sustava, kao i sustava u cjelini, koji utječu na otpornost pojave kolotruga. Dobiveni rezultati su provjereni i potvrđeni na primjenjenom sustavu hidroizolacija – asfaltni kolnik pri izgradnji vijadukta Odra na autocesti A11.

### Ključne riječi:

hidroizolacija mostova, asfaltni kolnik, kolotražnje, polimerom modificirani bitumen, betonska ploča

Preliminary note

**Miroslav Šimun, Tatjana Rukavina, Sanja Dimter**

## Rutting resistance of waterproofing – asphalt pavement systems on bridges

Application of traditional waterproofing systems with thin asphalt courses results in occurrence of plastic deformities on traffic areas of bridges, especially in the form of rutting. The investigations comprised the analysis of the existing systems in exploitation, laboratory testing and on site measurements of relevant properties of individual system elements, as well as the system as whole, which have an impact to the resistance to rutting. The achieved results were controlled and confirmed on the waterproofing – asphalt courses system executed during construction of the Odra viaduct on the A11 motorway.

### Key words:

waterproofing of bridges, asphalt pavement, rutting, polymer modified bitumen, concrete deck

Vorherige Mitteilung

**Miroslav Šimun, Tatjana Rukavina, Sanja Dimter**

## Spurrinnenbeständigkeit des Wasserabdichtungs- und Asphaltbelagsystems von Brücken

Die Anwendung traditioneller Wasserabdichtungssysteme mit dünnen Asphaltsschichten führt zum Auftreten plastischer Verformungen in Verkehrsbereichen von Brücken, insbesondere in der Form von Spurrinnen. Die Untersuchungen in dieser Arbeit umfassen Analysen bestehender Systeme in Betrieb, experimentelle Versuche und, sowohl für individuelle Systemelemente als auch für ganze Systeme, Messungen vor Ort der relevanten Eigenschaften, die Einfluss auf die Spurrinnenbeständigkeit haben. Die erhaltenen Resultate sind im Laufe der Erbauung des Odra Viadukts auf der Autobahn A11 anhand des entsprechenden Wasserabdichtungs- und Asphaltbelagsystems kontrolliert und bestätigt worden.

### Schlüsselwörter:

Wasserabdichtung von Brücken, Asphaltbelag, Spurrinnen, polymermodifiziertes Bitumen, Betondecke

## 1. Uvod

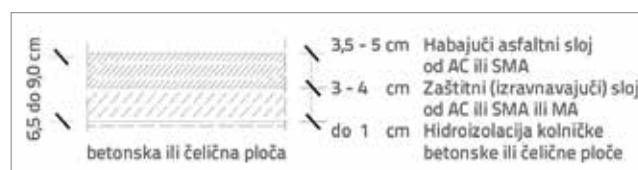
Razinu uslužnosti infrastrukturne građevine iz aspekta sigurnosti i udobnosti vožnje, ali i trajnosti vozne površine, treba promatrati kroz kvalitetu sustava asfaltni kolnik – hidroizolacija. Brtveni sloj hidroizolacije mora biti izveden od postojećih vodonepropusnih materijala ugrađenih na propisani način, što uključuje primjereno uređenu podlogu i postojan zaštitni te završni sloj kolnika. Asfaltni slojevi kolnika mosta imaju ulogu vozne površine pa tijekom uporabe trebaju zadovoljavati uvjete sigurne i udobne vožnje. Projektnim rješenjima klasičnih sustava hidroizolacija-asfalt predviđa se uporaba sitnozrnate asfaltne mješavine koja ima dopuštena relativno mala odstupanja u debljini sloja. Osim nejednolike i slabe zbijenosti ugrađenog sloja na izrazito krutoj betonskoj ili čeličnoj podlozi, takve su podloge manje otporne i na pojavu trajne deformacije kolnika u obliku kolotruga. Zaštitni sloj često ima funkciju izravnavajućeg sloja i izvodi se ispod minimalnih odnosno iznad maksimalnih tehnoloških debljina. Projektom neriješeni detalji završetka hidroizolacije u području prijelaznih dilatacijskih naprava, betonskih rubnjaka i slivnika, te izostanak izvođenja drenažnih kanala ili gnijezda kao i procjednica koje omogućuju dobru odvodnju procjednih voda s kolnika, nedostaci su koji utječu na funkcioniranje sustava hidroizolacija – asfaltni kolnik. Prema dostupnim podacima, prosječne maksimalne ljetne temperature površine kolnika u nekim dijelovima Hrvatske dosežu 60°C. Zbog tako ekstremnih temperatura na kolniku nekih građevina, a traju po nekoliko sati, krutost asfalta je znatno manja i velika je vjerojatnost da će se plastično tečenje u obliku kolotruga pojaviti upravo na temperaturi 60°C. U radu se prikazuje normirano ispitivanje otpornosti na kolotraženje. Svojstva asfalta na građevini obično nisu posebno određena, iako iskustva jasno pokazuju da postoje specifični uvjeti izvođenja i uporabe kolničkog zastora u odnosu na asfaltnu kolničku konstrukciju trase ceste.

## 2. Sustav hidroizolacija – asfaltni kolnik

Na tržištu postoji velik broj hidroizolacijskih građevnih proizvoda i niz tipova asfaltnih mješavina s varijacijama svojstava veziva. U Hrvatskoj se primjenjuje nekoliko tipova hidroizolacije u kombinaciji s asfaltnim slojevima. Najčešće se koriste brtveni slojevi od zavarene predgotovljene bitumenske trake na temeljnom sloju od epoksidne smole te od sitnozrnate (izravnavajućeg) zaštitnog i završnog habajućeg sloja valjanog asfalta. Izvedene sitnozrnate asfaltne mješavine zbog variranja debljine sloja smanjenih su fizikalno-mehaničkih svojstava, pa je pojava nedostataka, posebno u obliku kolotruga učestala. Isto tako, prosječno su ukupne debljine svih slojeva sustava uglavnom oko sedam centimetara. Takva relativno tanka fleksibilna asfaltna konstrukcija na izrazito tvrdoj betonskoj ili čeličnoj kolničkoj ploči ima manju otpornost na pojavu plastičnih deformacija

pod utjecajem teškog kamionskog prometa pri visokim temperaturama okoline. Analizama izmjerenih indeksa ravnosti vozne površine (IRI) [1] utvrđene su bitno veće neravnosti na asfaltnim kolnicima cestovnih građevina u odnosu na ravnosti ostalih dijelova prometnice. Razlog loše ravnosti vozne površine kolnika mosta jest neravnost površine nosive kolničke ploče koju je teško izravnati izvođenjem tankih asfaltnih slojeva od sitnozrnate asfaltne mješavine, a koje ujedno imaju i manju otpornost na kolotraženje. Klasični sustav hidroizolacija – asfalt prikazan na slici 1., sadrži različite slojeve od kojih svaki ima određenu namjenu:

- **Temeljni sloj** od epoksidnih smola ili bitumenskog premaza ima ulogu obrade površine podloge (betonska ili čelična ploča) u svrhu postizanja dobre prionjivosti brtvenog sloja s nosivom pločom. U slučaju lokalnih udubljenja, izvedbi temeljnog sloja prethodi izravnavanje epoksidnim mortom odnosno mehaničko skidanje ispupčenja na razini površine nosive ploče.
- **Brtveni sloj** od bitumenske trake ili poliuretanske membrane ima ulogu osiguranja osnovne funkcije hidroizolacije, a to je vodonepropusnost tekućeg medija procijeđenog kroz asfaltne slojeve do površine betonskog ili čeličnog gradiva nosive ploče kolničke konstrukcije mosta.
- **Zaštitni (izravnavajući) sloj** od valjanog asfalta (asfalt-betona – AC ili splitmastiksasfalt SMA) ili lijevanog asfalta (MA) ima ulogu zaštite, odnosno potrebno ga je izvesti na način da ne dođe do mehaničkog ili temperaturnog oštećenja brtvenog sloja i ugrožavanja vodonepropusnosti. Taj sloj može imati ulogu nosivog, ali i veznog sloja. Unutar sustava može zasebno biti izveden i još jedan dodatni sloj radi poboljšanja ravnosti i otpornosti na pojavu kolotruga.
- **Habajući sloj** od valjanog asfalta tipa AC ili SMA, koji ima ulogu vozne površine kolnika na građevini i mora zadovoljiti uvjete ravnosti (IRI), hvatljivosti (SRT) i teksture, koji su bitni za sigurno i udobno prometovanje.



Slika 1. Skica presjeka klasičnog sustava hidroizolacija - asfaltni slojevi na građevini

### 2.1. Postojeća istraživanja

Istraživanje utjecaja sastava bitumenskog mortu na deformabilnost asfalta detaljno je analizirano u radu [2]. Ustanovljeno je da se brzina kolotraženja linearno smanjuje s porastom volumnog udjela punila u bitumenskom mortu. Primjena ustanovljenih ovisnosti dubine kolotruga i brzine kolotraženja o sastavu asfaltnog uzorka omogućuje projektiranje optimalne asfaltne mješavine, uzimajući u obzir i druga svojstva asfalta koja se zahtijevaju u primjeni. Radi

poboljšanja svojstava asfaltnih kolnika u smislu povećanja otpornosti na trajnu deformaciju u obliku kolotruga, koristi se polimerom (elastomerom ili plastomerom) modificirani bitumen koji ima više ekviviskozne temperature ugradnje. Primjena asfaltnih mješavina s dodatkom bitumenu koji snižava temperaturu proizvodnje i ugradnje pridonosi smanjenju rizika oštećenja brtvenog sloja, ali i umanjuje onečišćenje okoliša sukladno sporazumu iz *Kyota* [3]. Otpornost sustava hidroizolacija - asfaltni slojevi kolnika na pojavu plastične deformacije na betonskim mostovima istražena je u okviru projekta EP1 (*Standfester Gesamtaufbau, Prufung und Bewertung*). Nizom istraživanja modela temeljenih na fizikalnim opažanjima dobiveni su pojedinačni modeli za tlačna odnosno vlačna naprezanja u asfaltnim slojevima: Erkens [4], Bosch [5], Medani i drugi [6], Aireyet i drugi [7] i Jansen [8]. Definiranjem pojedinih svojstava asfaltnih materijala (naprezanje, krutost, pukotine, plastičnost) kao ulaznih podataka, moguće je uz pomoć numeričkih alata dobiti kombinirani model ponašanja asfalta. Bild [9] bavio se trajnošću kao kriterijem za projektiranje asfaltnih kolnika na ortotropnim čeličnim pločama mostova.

## 2.2. Svojstvo otpornosti na kolotraženje

Kolotrazi se uočavaju na asfaltnom kolniku kao uzdužno ulegnuće u putanji kotača s malim uzdignućima na rubovima. Nastaju uslijed progresivnih deformacija pri opetovanim opterećenjima pneumatika vozila. Kolotraženje asfalta može biti uzrokovano plastičnim tečenjem i konsolidacijom. Glavni uzrok kolotraženja asfalta je plastično tečenje koje nastaje uslijed posmične deformacije unutar asfaltna mješavine. Smanjena posmična otpornost može biti uzrokovana neodgovarajućom količinom bitumena u mješavini, neodgovarajućom granulometrijom, a uzrok mogu biti i oštećenja uslijed vlage u mješavini ili loš kameni skelet. Konsolidacija je nastavak zbijanja kolnika u razdoblju nakon ugradnje pod utjecajem prometa. Zbog nedovoljne zbijenosti sloja, ugrađeni asfalt sadrži veći udio šupljina nego što je projektirano. Uslijed kretanja vozila po otprilike istoj putanji dolazi do dodatnog zbijanja u zoni kotača. Kolotrazi uzrokovani dodatnim zbijanjem materijala u području traga kotača imaju relativno mali doprinos u ukupnoj pojavi kolotruga. Kolotraženje je direktan pokazatelj ponašanja asfalta pod prometnim opterećenjem ovisno o temperaturnim uvjetima tijekom uporabe u kolniku. Vrijednosti ispitnih parametara (ukupna dubina kolotruga – RD, odnosno relativna dubina kolotruga – PRD i brzina prirasta kolotruga – WTS) definiraju svojstva realnog asfaltnog uzorka u odnosu na zahtjeve u sustavu asfaltnih slojeva na hidroizolaciji nosive konstrukcije građevine. Upotreba polimerom modificiranog bitumena daje asfaltu veću otpornost na kolotraženje [10]. Na progresiju dubine kolotruga relativno tankog asfaltnog kolnika na izrazito krutoj betonskoj ili čeličnoj ploči mosta utječu teška teretna vozila koja uzrokuju dodatna dinamička opterećenja uslijed neravnosti vozne površine, izrazito u području prijelaznih

dilatacijskih naprava. Sustav hidroizolacija - asfaltni kolnik izložen je utjecajima klimatoloških promjena i prometnog opterećenja, a zadatak mu je zadovoljavati uvjete tijekom uporabe dugi niz godina. Tijekom uporabnog vijeka dolazi do pojave brojnih oštećenja raznih tipova. Uzroci nastanka oštećenja u sustavu hidroizolacija - asfaltni kolnik jesu:

- unutarnji faktori: fizikalno - mehanička svojstva upotrijebljenih materijala i slojeva sustava
- vanjski faktori: klimatski utjecaji tijekom uporabnog razdoblja (temperatura i vlaga), uvjeti opterećenja, gustoća i brzina prometa
- uvjeti izvođenja sustava: temperatura ugradnje, vlažnost zraka i podloge te energija i postupak zbijanja asfalta.

Kao glavni uzrok zašto se kolotrazi na sustavu hidroizolacija - asfaltni kolnik pojavljuju u sve kraćem uporabnom razdoblju, svakako je porast broja kamiona i povećanje osovinskog opterećenja u posljednjih petnaest godina [11].

## 3. Ispitivanje otpornosti na kolotraženje

Da bi se utvrdilo ponašanje elemenata sustava hidroizolacija - asfaltni kolnik i sustava u cjelini te postavile smjernice novog pristupa, provedena su laboratorijska ispitivanja prema normiranim metodama. Prvi dio istraživanja obuhvaća optimiziranje svojstava asfaltnog uzorka tipa asfaltbeton i to udio šupljina, dubina i brzina nastanka kolotruga, dok je u drugom dijelu izvršeno određivanje otpornosti sustava hidroizolacija - asfalt na pojavu kolotruga.

Prema ispitnoj metodi sukladno normi HRN EN 12697-22 [12], opterećenje kotača na asfaltu površinu iznosi 700 N, duljina mjerne putanje kotača na kojoj se registrira kolotrag iznosi 230 mm, a frekvencija nanošenja opterećenja kotača na asfaltu je 26,5 prelazaka u minuti. Temperatura ispitivanja tijekom ciklusa kolotraženja kao i prethodno temperiranog ispitnog uzorka iznosi 60°C, a cjelokupan postupak kolotraženja obuhvaća 20.000 prelazaka ispitnog kotača. Ispitivanju trajne deformacije postupkom kolotraženja prethodi određivanje debljine, gustoće i udjela šupljina ispitnog uzorka. Nakon učvršćivanja uzorka u kalup za ispitivanje, slijedi kondicioniranje uzorka u temperaturnoj komori uređaja za kolotraženje te postavljanje kalupa s uzorkom na hodnu ploču za ispitivanje. Ispitivanje počinje podešavanjem parametara u programu za praćenje tijekom ispitnog ciklusa i puštanja uređaja u postupak kolotraženja opetovanim prolaskom ispitnog kotača. Nakon završetka ispitivanja (20 000 prelazaka kotača - 10 000 ciklusa), iz krivulje kolotraženja očitava se maksimalna dubina kolotruga ( $RD_{20000}$ ), izračunava brzina kolotraženja ( $WTS_{ZRAK}$ ) i relativna maksimalna dubina kolotruga ( $PRD_{ZRAK}$ ) prema sljedećim izrazima (1) i (2):

$$WTS_{ZRAK} = \frac{(RD_{20000} - RD_{10000})}{5} \quad (1)$$

$$PRD_{ZRAK} = \frac{RD_{20000}}{h} \quad (2)$$

gdje je:

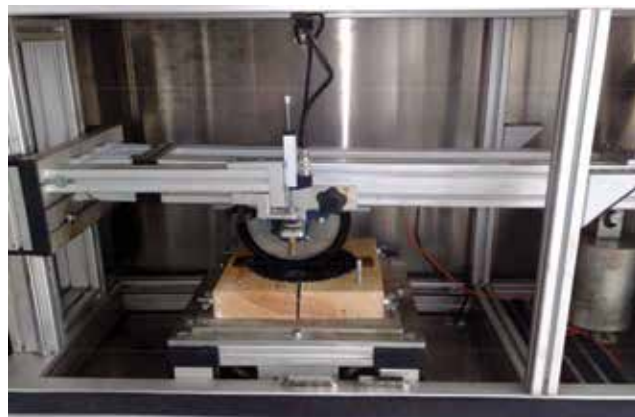
- $WTS_{ZRAK}$  - brzina kolotraženja, [mm/1000 ciklusa]
- $RD_{20000}$  - dubina kolotruga nakon 20.000 prelazaka, [mm]
- $RD_{10000}$  - dubina kolotruga nakon 10.000 prelazaka, [mm]
- $h$  - visina (debljina) ispitnog uzorka, [mm]
- $PRD_{ZRAK}$  - relativna maksimalna dubina kolotruga, [%]

### 3.1. Optimiziranje svojstava asfaltnog uzorka

Nakon vaganja ulaznih sastojaka (kamenog brašna "šumber", potfrakcija kamenog skeleta "hruškovec" i bitumen) u laboratorijskoj miješalici (slika 2.) homogenizirana je vruća asfaltna mješavina tipa asfaltbeton AC 11. Nakon toga su asfaltni slojevi pomoću valjkastih zbijanja (slika 3.) ugrađeni u kalupe za kolotraženje. Uzorci asfaltni ugrađeni valjkastim zbijanjem u čelične kalupe, unutarnjih dimenzija 305x305x50 mm, ispitani su na trajnu deformaciju metodom kolotraženja, uređajem (slika 4.) malih dimenzija, postupkom B (u zraku). Zasebno od iste mješavine pripremljeni su *Marshallovi* ispitni uzorci na kojima je određena prostorna masa, a piknometrijskom metodom je određena prividna gustoća asfaltna mješavine, te je prema izrazu (3) proračunat udio šupljina u ispitnom uzorku. Ekstrakcijom na asfaltanalizatoru u trikloretilenu otopljene asfaltna mješavine određen je udio bitumena te je utvrđen granulometrijski sastav. Kao vezivo kamenog materijala u asfaltnoj mješavini korišteni su standardni cestograđevni bitumen tipa BIT 50/70 i polimerom modificirani bitumen tipa PmB 45/80-65.



Slika 3. Valjkasti zbijatelj asfaltnog sloja u kalup



Slika 4. Uređaj za kolotraženje "Wheel Tracker"



Slika 2. Laboratorijska miješalica za asfalt

Za izračun volumnog udjela šupljina (zraka)  $C_{S/AU}$  u asfaltnom uzorku prema HRN EN 12697-8 [13] potrebni su podaci o prostornoj masi asfaltnog uzorka ( $\rho_{AU}$ ) te o gustoći asfaltna mješavine ( $\rho_{AM}$ ):

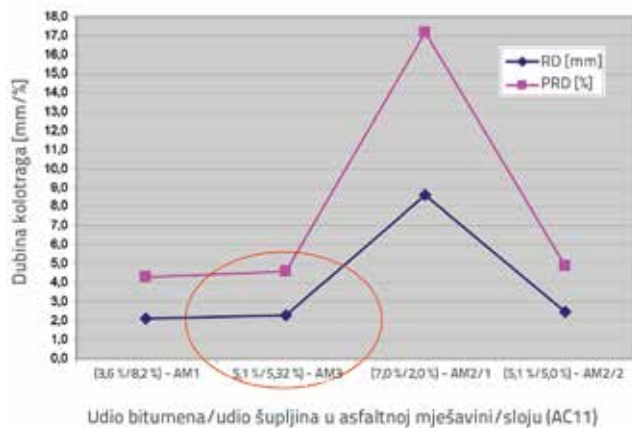
$$C_{S/AU} = \left(1 - \frac{\rho_{AU}}{\rho_{AM}}\right) \cdot 100 \tag{3}$$

Sastav prve asfaltna mješavine (AM1) bio je s povećanim udjelom punila (10,7 %) i niskim udjelom bitumena (3,6 %), pa je utvrđen visok udio šupljina (8,2 %). Unatoč postignutoj dobroj otpornosti na kolotraženje, radi se o krutoj mješavini pa je trebalo izraditi drugu AM2 izmijenjenog sastava. Umiješane su

Tablica 1. Sastav asfaltnih mješavina i svojstva pripadnih asfaltnih uzoraka i slojeva

Sastav i svojstva Asfaltna mješavina	%mas <sub>P/KM</sub> [%(m/m)]	%mas <sub>B/AM</sub> [%(m/m)]	$\rho_{AU}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_{AM}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$C_{S/AU}$ [%(v/v)]	$RD_{20000}$ [mm]	$PRD_{20000}$ -[%]	$WTS_{ZRAK}$ [mm/10 <sup>3</sup> C]
AM1	10,7	3,6	2429	2648	8,2	2,2	4,3	0,07
AM2/1	9,4	7,0	2455	2504	2,0	8,6	17,2	0,13
AM2/2	9,0	5,1	2464	2593	5,0	2,5	4,9	0,07
AM3	8,2	5,1	2444	2581	5,3	2,3	4,6	0,06

dvije asfaltnje mješavine istog kamenog skeleta, prva (AM2/1) s povećanim udjelom bitumena (7,0 %) i druga mješavina AM2/2 s normalnim udjelom bitumena (5,1 %). Kod AM2/1 utvrđen je nizak udio šupljina (2,0 %) u pokusnom asfaltnom uzorku, dok je kod AM2/2 utvrđen odgovarajući udio šupljina (5,0 %). Asfaltna mješavina AM2/1 pokazala se slabo otpornom na pojavu kolotruga zbog visokog udjela bitumena (28 % veći RD odnosno 27 % veći PRD), dok se mješavina AM2/2 pokazala otpornom na kolotražnje. Kod obje asfaltnje mješavine je udio punila bio nešto viši od uobičajenog za ovaj tip asfaltbetona. Temeljem prikupljenih podataka pristupilo se izradi optimalne asfaltnje mješavine tipa asfaltbeton AC 11 (AM3) s udjelom punila (8,2 %) i bitumena (5,1 %) te je postignut odgovarajući udio šupljina (5,3 %) i utvrđene su zadovoljavajuće dubine kolotruga (RD = 2,3mm; PRD = 4,6 %) i brzina prirasta deformacije (WTS = 0,06 mm/10<sup>3</sup> ciklusa).



Slika 5. Kolotražnje asfaltnog sloja u ovisnosti o udjelu bitumena i udjelu šupljina

U tablici 1. prikazane su utvrđene vrijednosti sastava i svojstava asfaltnih mješavina (AM) tipa asfaltbeton (AC). Fizikalno-mehanička svojstva su utvrđena na pripadnom *Marshallovom* asfaltnom uzorku, a vrijednosti parametara otpornosti na kolotražnje su određene na ispitnom sloju ugrađenog asfaltnog uzorka u kalupu.

Na slici 5. grafički je prikazano kretanje vrijednosti dubine kolotruga (RD-maksimalna dubina kolotruga i PRD-relativna maksimalna dubina kolotruga) asfaltnog sloja s promjenom udjela bitumena u asfaltnoj mješavini i udjela šupljina u zbijenom sloju. Optimalna asfaltna mješavina tipa asfaltbeton AC 11 (AM3) odgovarajućega granulometrijskog sastava sadržava 5,1 % bitumena i 5,3 % šupljina.

### 3.2 Otpornost sustava na kolotražnje

Nakon potvrđivanja otpornosti na kolotražnje optimizirane asfaltnje mješavine AM3, pristupilo se izradi varijantnih rješenja sustava hidroizolacija – asfalt, koji će se ispitati na kolotražnje. Na betonske ploče propisane površinske čvrstoće i teksture (debljine 38 mm), tlocrtno površine ispitnog kalupa 305x305 mm, nanesen je temeljni sloj od epoksidne smole obrađen kvarcnim pijeskom. Nakon provjere propisanih svojstava, na temeljni sloj su nanosena tri tipa brtvenog sloja hidroizolacije:

- poliuretansko/bitumenska elastična membrana na dva varijantna uzorka (P)
- jednoslojna bitumenska plastomerna traka na četiri varijantna uzorka (HI)
- dvoslojna bitumenska plastomerna traka na jednom varijantnom uzorku (HII).

U ispitne kalupe na betonske ploče s nanesenim određenim tipom hidroizolacije ugrađen je asfaltni sloj/slojevi različitih

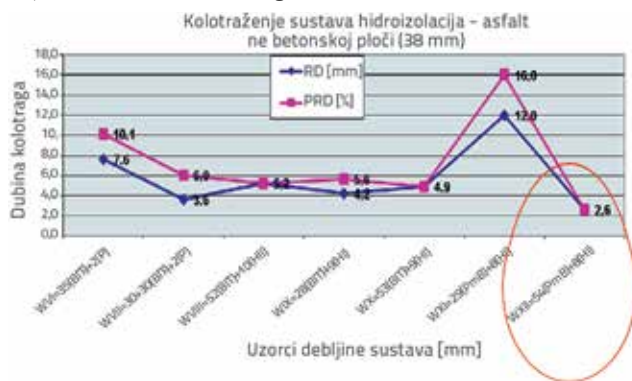
Tablica 2. Vrijednosti parametara kolotražnja sedam tipov sustava hidroizolacija – asfaltni kolnik

Oznaka sustava	Debljina slojeva sustava [mm]	Tip bitumena	Tip brtvenog sloja	Zbijenost sloja min 98 [%]	Udio šupljina u sloju 3,5-8 [%]	Dubina kolotruga RD <sub>20000</sub> max 3 [mm]	Relativna dubina PRD <sub>20000</sub> max 7 [%]	Brzina nastanka WTS <sub>ZRAK</sub> max 0,07 [mm/10 <sup>3</sup> Ci]
WVI	35(BIT)+2(P)	BIT 50/70	poliuretan	98,5	6,4	7,6	10,1	0,25
WVII	30+30(BIT)+2(P)	BIT 50/70	poliuretan	101,1	4,0	3,6	3,6	0,11
WVIII	52(BIT)+10(HII)	BIT 50/70	dvije bitumenske trake	102,2	3,3	5,2	5,2	0,22
WIX	28(BIT)+9(HI)	BIT 50/70	jedna bitumenska traka	-	5,4	4,2	5,6	0,16
WX	53(BIT)+9(HI)	BIT 50/70	jedna bitumenska traka	-	5,4	4,9	4,9	0,16
WXI	29(PmB)+8(HI)	PmB 45/80-65	jedna bitumenska traka	-	4,7	12,0	16,0	0,73
WXII	54(PmB)+ 8(HI)	PmB 45/80-65	jedna bitumenska traka	-	4,7	2,6	2,6	0,07

debljina (28 - 54 mm) s cestograđevnim bitumenom BIT 50/70 i polimerom modificiranim bitumenom PmB 45/80 - 65. Pripremljeno je sedam tipova sustava (WVI-WXII) s optimalnom asfaltnom mješavinom (AM3), koji su ispitani na kolotražnje uređajem *Wheel Tracker*.

U tablici 2. su prikazani rezultati ispitanih parametara kolotražnja (RD/PRD/WTS) za sedam varijantnih sustava hidroizolacija – asfaltni slojevi kolnika mostova s utvrđenim svojstvima ugrađenih slojeva. Utvrđene vrijednosti otpornosti na kolotražnje zadovoljavaju samo na jednom sustavu (WXII) gdje je 54 mm asfalta s polimernim bitumenom na 8 mm jednoslojne hidroizolacije bitumenskom trakom. Najniža otpornost na kolotražnje utvrđena je na sustavu (WXI) gdje je 29 mm asfalta s polimernim bitumenom na 8 mm jednoslojne hidroizolacije bitumenskom trakom. Dobiveni rezultati upućuju na vrlo velik utjecaj tehnološke debljine asfaltnog sloja. Asfalt se ugrađuje na ekvivalentnoj temperaturi bitumena (ako je vezivo PmB, ona je još viša), a na ugradbenim temperaturama asfalta dolazi do penetriranja bitumenskog morta iz brtvenog sloja hidroizolacije. Kod sitnozrnatog asfaltnog sloja izvedenog ispod minimalne tehnološke debljine (WXI) tijekom ugradnje dolazi do visokog stupnja zapunjavanja kamenog skeleta bitumenskim mortom, što uzrokuje malu otpornost sloja na pojavu kolotruga.

Na slici 6. grafički su prikazani parametri dubine kolotražnja (RD/PRD) sedam varijantnih sustava hidroizolacija – asfalt na betonskoj ploči. Evidentna je velika oscilacija i visoke utvrđene vrijednosti dubina kolotruga.



Slika 6. Grafički prikaz dubine kolotruga za varijantne sustave hidroizolacija – asfalt

U laboratoriju su izrađena tri tipa uzoraka od tvornički proizvedene asfaltna mješavine, uzorkovane tijekom ugradnje asfaltnih slojeva kolnika vijadukta "Odra" na autocesti A11 Zagreb - Sisak:

- zaštitni asfaltni sloj (AC-ZSH-L 16) u debljini 50 milimetara
- habajući asfaltni sloj (SMA 16) u debljini 50 milimetara
- zaštitni asfaltni sloj (AC-ZSH 16) i habajući asfaltni sloj (SMA 16) u debljini 100 milimetara (50+50).

Utvrđivanje otpornosti na pojavu kolotruga na asfaltnoj mješavini zaštitnog sloja hidroizolacije tipa asfaltbetona AC-

ZSH 16 ugrađene valjkastim zbijračem u kalup 305x305x50, metodom kolotražnja na zaštitnom sloju (AC-ZSH-L) potvrđeni su sljedeći ispitni parametri: ukupna dubina kolotruga RD = 3,5 mm / relativna dubina kolotruga PRD = 7 % / brzina prirasta deformacije WTS = 0,07 mm/10<sup>3</sup>ciklusa. Parametri kolotražnja PRD i WTS zadovoljavaju propisane uvjete za zaštitni asfaltni sloj hidroizolacije (AC-ZSH-L), ali se nalaze na samoj granici maksimalno dopuštenih vrijednosti jer je upotrijebljeno vezivo cestograđevni bitumen BIT 50/70. Na asfaltnoj mješavini habajućeg asfaltnog sloja tipa splitmastiksasfalta (SMA) utvrđena je izrazito dobra otpornost na pojavu kolotruga. Splitmastiksasfalt ima dobru skeletnu strukturu (diskontinuirana granulometrija) i uporabljen je polimerom modificirani bitumen. Otpornost na kolotražnje dvoslojnog uzorka zaštitni sloj hidroizolacije i habajući sloj zajedno kao u sustavu na kolniku (AC-ZSH+SMA) identična je otpornosti uzorka samo habajućeg sloja SMA 16, što potvrđuje da ispitna metoda kolotražnja uređajem malih dimenzija postupkom B na zraku daje najtočnije rezultate na asfaltnim slojevima debljine oko 50 milimetara.

Sustav brtvenog sloja hidroizolacije i zaštitni asfaltni sloj od asfaltbetona (AC-ZSH-G) uzorkovan na gradilištu (slika 7.) na tri pozicije (Φ = 200mm), u laboratoriju je ispitivan na kolotražnje. Na uzorku izvađenom iz kolnika vrijednosti parametara kolotražnja ne zadovoljavaju propisane uvjete: PRD = 10,2 % (uvjet ≤ 7 %) / WTS = 0,21 (uvjet ≤ 0,07), cestograđevni bitumen BIT 50/70. Utvrđen je pad otpornosti na pojavu kolotruga u odnosu na uzorak pripremljen u laboratoriju (AC-ZSH-L).



Slika 7. Izvađeni uzorak iz izvedenog sustava hidroizolacija – asfalt na vijaduktu "Odra"

U tablici 3. prikazane su vrijednosti ispitanih parametara kolotražnja zajedno s pripadnim sastavom i fizikalno-mehaničkim svojstvima za uzorke:

- proizvedene mješavine zaštitnog (AC-ZSH16-L) i habajućeg (SMA16) sloja, te
- dvoslojno zaštitni i habajući sloj zajedno (AC-ZSH+SMA) i zaštitnog i brtvenog sloja sustava (AC-ZSH16-G) uzorkovanog iz izvedenog kolnika vijadukta.

Da bi se potvrdio razlog zašto pada otpornost na kolotražnje, provjeren je sastav asfaltnog sloja. Piknometarskom metodom određena je gustoća asfaltna mješavine otopljene

Tablica 3. Sastav i svojstva asfaltnih mješavina s parametrima kolotražanja asfaltnih slojeva

Asfaltna mješavina	Parametri kolotražanja	%mas <sub>P/KM</sub> [% (m/m)]	%mas <sub>B/AM</sub> [% (m/m)]	$\rho_{AU}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_A$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$C_{S/AU}$ 4-9 [% (v/v)]	RD <sub>20000</sub> [mm]	PRD <sub>20000</sub> max 7 [%]	WTS <sub>ZRAK</sub> max 0,07 [mm/10 <sup>3</sup> C]
AC-ZSH16-L		6,0	4,0	2500	2656	5,9	3,5	7,0	0,07
AC-ZSH16-G		7,0	4,6	2502	2626	4,7	5,1	10,2	0,21
SMA16		10,0	5,0	2468	2583	(4,5)	1,6	3,2	0,02
AC-ZSH + SMA		-	-	-	-	-	1,6	1,6	0,03

u trikloretilenu. Na uzorcima zaštitnog asfaltnog sloja hidroizolacije određen je topivi udio bitumena, te je utvrđen granulometrijski sastav s ciljem utvrđivanja udjela punila. Provedenim dodatnim ispitivanjem sastava potvrđeno je penetriranje bitumena iz brtvenog u zaštitni sloj sustava hidroizolacija – asfaltni kolnik, utvrđen je udio %mas<sub>B/AS</sub> = 4,6 %, dok je udio prije ugradnje u sloj bio %mas<sub>B/AM</sub> = 4,0 %. Manji udio šupljina u izvedenom zaštitnom sloju ( $C_{S/AU}$  = 4,7 %) u odnosu na *Marshallov* uzorak ( $C_{S/AU}$  = 5,9 %) potvrđuje penetriranje bitumenskog morta te pad otpornosti na kolotražanje, jer je došlo do popunjavanja šupljina u sloju tijekom asfaltiranja.

#### 4. Zaključak

U okviru istraživanja provedena je detaljna analiza tipskih sustava hidroizolacija – asfaltni kolnik, koji se razlikuju po vrsti temeljnog, brtvenog, zaštitnog (izravnavajućeg) i habajućeg sloja. Izvedeni sustavi su analizirani na jedanaest građevina (mostovi, vijadukti, pothodnici) iz aspekta pojavnosti nedostataka, koji utječu na ponašanje tijekom uporabe. Utvrđeno je da su trajne (plastične) deformacije kolnika u obliku kolotruga najčešći nedostatak vozne površine asfaltnih kolnika mostova i znatno su izražajnije od onih na trasi ceste ispred odnosno iza građevina.

Rezultati ovog istraživanja upućuju na zaključak da se uporabom veziva od polimerom modificiranog bitumena povećava otpornost na pojavu kolotruga s faktorom  $\geq 1,5$ . Na osnovi rezultata ispitivanja otpornosti različitih laboratorijski pripremljenih tipova sustava hidroizolacija – asfaltni slojevi na trajnu deformaciju u obliku kolotruga – dobivene su pretpostavke koje su provjerene *in situ*.

Na uzorcima iz izvedenog sustava hidroizolacija – zaštitni valjani asfaltni sloj (vijadukt "Odra") istom ispitnom metodom otpornosti na kolotražanje utvrđene su vrijednosti koje su iznad maksimalno propisanih. Ovim ispitivanjem je potvrđena u laboratoriju postavljena teza da zaštitni asfaltni sloj tijekom ugradnje na brtveni sloj od bitumske trake mijenja sastav i svojstva. Ispitivanjem sastava asfaltnih mješavina asfaltbetona AC-ZSH 16 na izbušenoj jezgri iz izvedenog kolnika potvrđeno je granulometrija kamenog skeleta i povećanje punila te je utvrđen povećani udio bitumena i smanjen udio šupljina u odnosu na asfaltnu mješavinu uzetu prije ugradnje zaštitnog valjanog asfaltnog sloja. Utvrđene vrijednosti pokazuju da bitumska komponenta brtvenog sloja, koja ima veliku temperaturnu osjetljivost, tijekom ugradnje vruće valjanog asfaltnog sloja penetrira iz brtvenog u zaštitni sloj, što uzrokuje mijenjanje fizikalno – mehaničkih svojstava asfalta, odnosno smanjenje otpornosti kolnika na plastičnu deformaciju.

Istraživanjem je definirana potreba novog pristupa sustavu hidroizolacija – asfaltni kolnik mosta i to izborom odgovarajućeg tipa bitumena i asfaltnih mješavina, uzimajući u obzir dopuštene oscilacije tehnološke debljine sloja. Veličina maksimalnog zrna u kamenom skeletu i broj asfaltnih slojeva u sustavu vezani su za geometrijska odstupanja nivelete nosive kolničke ploče građevine. Projektiranjem asfaltnih mješavina otvorenijeg granulometrijskog sastava i primjenom diskontinuirane granulometrijske krivulje postižu se bolje otpornosti sustava hidroizolacija – asfaltni slojevi kolnika na kolotražanje. U okviru daljnjih istraživanja sustava hidroizolacija – asfaltni kolnik građevina bilo bi korisno ispitati primjenu asfaltnih mješavina s dodatkom bitumenu koji snižava temperaturu proizvodnje i ugradnje asfalta.

#### LITERATURA

- [1] Šimun, M., Rukavina, T.: Kriteriji uzdužne ravnosti vozne površine asfaltnih kolnika, *Građevinar* 61 (2009)12, 1143-1152.
- [2] Strineka, A.: "Utjecaj sastava bitumenskog morta na deformabilnost asfalta", disertacija, *Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije*, Zagreb (2010).
- [3] Henigman, S., Žmavc, J.: 2006. Ljubljana "Asfalt", *Združenje asfalterjev Slovenije*, ISBN 961- 90448-6-X
- [4] Erkens, S.M.J.G.: "Asphalt Concrete Response (ACRe), Determination, Modelling and Prediction" PhD Thesis, *Delft University of Technology*, The Netherlands, 2002.

- [5] Bosch, A.: *Material Characterisation of Mastic Asphalt Surfacing on Orthotropic Steel Bridges*, MSc Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 2001.
- [6] Medani, T.O., Scarpas, A., Kolstein, M.H., Bosch, A., Huurman M., Molenaar A.A.A.: *Estimation of the ACR<sub>e</sub> Material Model Parameters of Mastic Asphalt for Orthotropic Steel Deck Bridges*, CROW 2002, Ede, The Netherlands, 2002.
- [7] Airey, G.D., Collop, A.C., Dunhill, S.T.: *A Constitutive Material Modelling Methodology for Asphalt Mixtures*, ISAP 2002, Copenhagen, Denmark, 2002.
- [8] Jansen, P.M.: *Characterising EME, Enrobé á Modele Elevé*, MSc Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 2002.
- [9] Bild, S.: *Durability design criteria for bituminous pavement on orthotropic steel bridge decks*, Canadian Journal of Civil Engineering, 14(1): 41–48 (1987) 10.1139/I87-006 NRC Canada
- [10] Jian - Shuih Chen, Min - Chin Liao, Ming - Shen Shiah: *Asphalt Modified by Styrene - Butadiene Triblock Copolymer, Morphology and Model*, J. Mat. In Civ. Engrg., Vol. 14, Issue 3, pp. 224 - 229.
- [11] Medani, T.O.: *Design Principles of Surfacing on Orthotropic Steel Bridge Decks*, Ph D Dissertation, Delft University of Technology, The Netherland 2006.
- [12] HRN EN 12697-22 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 22 dio: *Kolotraženje*
- [13] HRN EN 12697-8:2003 Bitumenske mješavine – Ispitne metode za asfalt proizveden vrućim postupkom – 8. dio: *Određivanje šupljina u asfaltnim uzorcima*