

Primljen / Received: 25.1.2013.

Ispravljen / Corrected: 4.4.2013.

Prihvaćen / Accepted: 26.4.2013.

Dostupno online / Available online: 10.5.2013.

Primjena lokalnih agregata za asfaltbetone visokih modula

Autori:

Prof. dr. sc. **Audrius Vaitkus**

Tehničko sveučilište Gediminas u Vilnius, Litva
Institut za istraživanje cesta
audrius.vaitkus@vgtu.lt

Dr. sc. **Viktoras Vorobjovas**

Tehničko sveučilište Gediminas u Vilnius, Litva
Institut za istraživanje cesta
viktoras.vorobjovas@vgtu.lt

Stručni rad

Audrius Vaitkus, Viktoras Vorobjovas

Primjena lokalnih agregata za asfaltbetone visokih modula

Povećanje intenziteta prometa uvjetuje izradu dugotrajnih kolničkih konstrukcija s vijekom trajanja od 20 do 40 godina. Sredstva koja su sada dostupna za održavanje i rekonstrukciju nisu dostatna za sprečavanje pojave kolotruga na postojećim cestama i ulicama s asfaltnom kolničkom konstrukcijom. Zbog tih se faktora istražuju novi materijali, mješavine i metode za izradu asfaltnih mješavina. Jedno od mogućih rješenja je i primjena asfaltbetona visokih modula. U radu su prikazana laboratorijska ispitivanja asfaltbetona visokih modula pri čemu su korištene razne vrste bitumenskih veziva i mineralnih agregata.

Ključne riječi:

asfaltbeton visokih modula, asfaltna kolnička konstrukcija, pojava kolotruga, modul krutosti

Professional paper

Audrius Vaitkus, Viktoras Vorobjovas

Use of local aggregates in high modulus asphalt concrete layers

High value of traffic flow influenced the need to build long lasting pavement structures with design life of more than 20–40 years. Current budget for maintenance and reconstruction is not sufficient for preventing the rutting on the existing asphalt pavement roads and streets. These factors lead to search for new materials, mixtures, and methods for preparation of asphalt mixes. The high modulus asphalt concrete is regarded as one of possible solutions. The laboratory study of the high modulus asphalt concrete with different types of bitumen binder and mineral aggregates is presented in the paper.

Key words:

high modulus asphalt concrete, asphalt pavement structure, rutting, stiffness modulus

Fachbericht

Audrius Vaitkus, Viktoras Vorobjovas

Anwendung lokaler Gesteinskörnungen für Hochmodul-Asphaltbetons

Hohe Verkehrsflüsse haben zu dem Bedarf nach langanhaltenden Fahrbahnstrukturen mit einer Lebensdauer von sogar 20 – 40 Jahren beigetragen. Derzeitige Wartungs- und Rekonstruktionsbudgets sind oft nicht ausreichend, um der Spurrinnenbildung auf verkehrsreichen Fahrbahnen mit herkömmlichen Asphaltschichten vorzubeugen. Diese Gegebenheiten führen zur verstärkten Erforschung neuer Materialien und Mischungen, sowie Methoden der Asphaltzubereitung. Die Anwendung von Hochmodul-Asphaltbeton kann als mögliche Antwort auf die erhöhten Anforderungen angesehen werden. In der vorliegenden Arbeit sind Laborprüfungen an Hochmodul-Asphaltbeton mit verschiedenen Bindemitteln aus Bitumen und mineralischen Gesteinskörnungen dargestellt.

Schlüsselwörter:

Hochmodul-Asphaltbeton, Asphaltaufbau, Spurrinen, Steifigkeitsmodul

1. Uvod

U razdoblju između 1990. i 2012. broj vozila u Litvi povećao se 2,64 puta, što je utjecalo na povećanje gustoće prometa. Stoga se projektiraju i izrađuju sve deblje asfaltna kolničke konstrukcije, što znatno povećava potrošnju materijala za izgradnju cesta (mineralnih agregata, bitumenskog veziva itd.) te troškove izgradnje. Najveći problem Litve jest nedostatak visokokvalitetnih građevnih materijala, koji se uglavnom uvoze [1]. Troškovi prijevoza na velike udaljenosti i rast cijena bitumena dodatno povećavaju ukupne troškove izgradnje. Standardne metode izgradnje cesta podrazumijevaju određene količine visokokvalitetnih materijala. Stoga istraživači diljem svijeta pokušavaju pronaći materijale za izgradnju cesta koji bi smanjili količinu potrebnog materijala i dopustili uporabu materijala slabije kvalitete [2-9].

U posljednjem desetljeću zemlje zapadne Europe i drugih dijelova svijeta povećale su uporabu asfaltbetona visokog modula krutosti (eng. *high modulus asphalt concrete* - HMA). HMA ima izuzetno visoku otpornost na nastanak kolotruga i pukotina zbog umora materijala te bi se mogao rabiti pri izradi veznog i nosivog asfaltnog sloja. Pri njegovoj se izradi rabe posebna bitumenska veziva, a sastav agregata je optimalan. Mineralni agregati mogu biti i manje kvalitetni [3-6, 8-18].

Na viskozno elastična svojstva asfaltnih materijala veliki utjecaj ima temperatura. Ona je ključni čimbenik pri odabiru tipa veziva za asfaltnu mješavinu. Naime, veziva koja su dovoljno kruta da podnesu visoke temperature često nisu dovoljno elastična na niskim temperaturama [2, 19-21]. Stoga je uz pomoć ispitivanja potrebno pronaći metodu izrade kolničkih konstrukcija odgovarajuće nosivosti i trajnosti koja omogućava uporabu lokalnih materijala i primjenu novih tehnologija izrade asfaltnih mješavina. Odziv i degradacija kolničkih konstrukcija mogu se predvidjeti na temelju rezultata laboratorijskih ispitivanja, no ispitivanje na terenu dalo bi pouzdanije rezultate [22].

2. Iskustvo primjene asfaltbetona visokog modula krutosti

Desetak proteklih godina istraživači zagovaraju koncept dugotrajnih kolničkih konstrukcija koje bi se bez obnove iskorištavale dulje od 40 godina. Temelj tog koncepta jest povećanje krutosti i/ili debljine veznih i nosivih asfaltnih slojeva, što smanjuje umor kolničkih konstrukcija smanjenjem vlačnog naprezanja na dnu veznog asfaltnog sloja te tlačnog naprezanja pri vrhu nosivog asfaltnog sloja. To pak smanjuje deformacije habajućeg asfaltnog sloja [23]. HMA je proizveden i prvi put uporabljen 1980. godine u Francuskoj za rekonstrukciju cesta s asfaltnim kolničkim konstrukcijama koje su bile znatno oštećene zbog kolotruga i pukotina [3]. U Francuskoj su rabili dvije vrste mješavine HMA-a: Enrobe a Module Eleve (EME) za izradu nosivih asfaltnih slojeva, a Beton Bitumineux a Module Eleve (BBME) za izradu habajućih asfaltnih slojeva.

HMA su upotrebljavali i za izradu nosivih asfaltnih slojeva u novim kolničkim konstrukcijama radi ekonomske učinkovitosti. Smanjili su debljinu asfaltnih kolničkih slojeva i upotrebljavali mineralne agregate slabije kvalitete. Rezultati ispitivanja o upotrebi HMA-a u posljednjih 18 godina vrlo su dobri [3].

U Poljskoj je ustanovljeno da je na nastanak kolotruga najotporniji HMA s agregatima od drobljenog šljunka, pri čemu najmanji udio veziva mora biti 5%. Eksperimentalna istraživanja dokazala su da kolničke konstrukcije od HMA-a udovoljavaju zahtjevima za ceste sa slabim intenzitetom prometa kad je riječ o degradaciji. Pri ovim ispitivanjima kolničke su konstrukcije 200.000 ciklusa bile opterećene sa 60 kN, a zatim s 80 kN tijekom 100.000 ciklusa te s 80 kN tijekom dodatnih 100.000 ciklusa [4].

Rezultati ispitivanja HMA-a sa sitnim česticama bazalta, pijeska i dolomita te modificiranim asfaltnim veznim slojem provedenih u Brazilu 2008. godine bili su izuzetno dobri i upućivali su na prednosti HMA-a u odnosu na tradicionalnu vruću asfaltnu mješavinu [13]. Ispitivanja HMA-a s recikliranim asfaltnim materijalom iskorištenim pri izradi mješavine pokazala su da se krutost povećala, ali se otpornost na umor materijala smanjila. Unatoč tome, otpornost na umor materijala svih ispitivanih tipova HMA-a veća je od otpornosti tradicionalne vruće asfaltna mješavine [12]. Elliottova [5] istraživanja i analize uporabe HMA-a pri izradi nosivog asfaltnog sloja upućuju na to da je ta tehnologija neutralna ili nepovoljna kad je riječ o trenutnoj isplativosti, no dugoročno zadovoljavajuća uzmemo li u obzir odnos troškova i trajnost tako izgrađenih kolničkih konstrukcija.

Polimerima modificirani bitumen 20/30 povećava nosivost HMA-a na niskim temperaturama. Dinamički modul HMA-a na visokim temperaturama veći je 50 % od modula obične vruće asfaltna mješavine. Otpornost HMA-a na nastanak kolotruga dvaput je veća od otpornosti vruće asfaltna mješavine, a otpornost na umor materijala veća je pet do deset puta [15]. Jaczewski [24] je proveo ispitivanja HMA-a na niskim temperaturama u Poljskoj i dokazao da HMA s polimerom modificiranim bitumenom ima bolja mehanička svojstva od HMA-a s klasičnim cestograđevnim bitumenom i vruće asfaltna mješavine. Sybilski [9] i suradnici proveli su istraživanja kojima su dokazali da su minerali vapnenca pogodan materijal za izradu agregata HMA-a. Uporaba HMA-a pri izradi asfaltnih kolničkih konstrukcija omogućava smanjenje deformacija, odgađa njihov nastanak te povećava otpornost na nastanak kolotruga i trajnost [16].

3. Uporaba lokalnih agregata pri izradi asfaltbetona visokog modula krutosti

Mješavina HMA-a obično se upotrebljava pri izradi nosivih i veznih asfaltnih slojeva. Litvanskim propisima za izgradnju asfaltnih slojeva kolničkih konstrukcija cesta IT ASFALTAS 08 (IT ASFALTAS 08) određeno je da se pri izgradnji cesta s kolničkim konstrukcijama klase SV i I-III za izradu veznih

Tablica 1. Vrste i sastav asfaltnih mješavina

Bitumen \ Agregat	Drobljeni granit	Drobljeni dolomit	Drobljeni šljunak
PMB 45/80-55	AC16AS G	AC16AS D	AC16AS GR
20/30	AC16HMAC G	AC16HMAC D	AC16HMAC GR
PMB 25/55-60	AC16HMAC G PMB	AC16HMAC D PMB	AC16HMAC GR PMB

asfaltnih slojeva upotrebljava asfaltbeton AC 16 AS. Najčešće se izrađuje s polimerom modificiranim bitumenom PMB 45/80-55. Nosivi asfaltni sloj najčešće se izrađuje od asfaltbetona AC 22 PS i bitumena 50/70.

Laboratorijska ispitivanja opisana u članku provedena su u Institutu za istraživanje cesta Tehničkog sveučilišta Gediminas u Vilniusu. Pri ispitivanjima za referentnu mješavinu odabran je asfaltbeton AC 16 AS, a za njegovu proizvodnju upotrijebljen je drobljeni granitni agregat i polimerom modificirani bitumen PMB 45/80-55. Kako bi se procijenio utjecaj različitih mineralnih agregata na fizikalna i mehanička svojstva HMAC-a, pripremljeno je i ispitano nekoliko mješavina na bazi AC 16 AS s agregatima od drobljenog dolomita i šljunka. Sve asfaltne mješavine s različitim agregatima i bitumenom, koje su pripravljene i proizvedene u laboratoriju, prikazane su u tablici 1. Granulometrijske krivulje upotrijebljenih agregata za izradu asfaltnih mješavina prikazane su na slikama 1. i 2.

Mješavine HMAC-a izrađene su s dvije vrste bitumena: s bitumenom 20/30 i polimerom modificiranim bitumenom PMB 25/55-60. Količina bitumena za pripremu HMAC-a odabrana je na način da postotak šupljina bude dva do četiri posto. Iz svake su mješavine izrađeni uzorci prema Marshallu u skladu s normom LST EN 12697-30, a zatim su pripremljeni uz pomoć valjkastog zbijanja i u skladu s normom LST EN 12697-33.

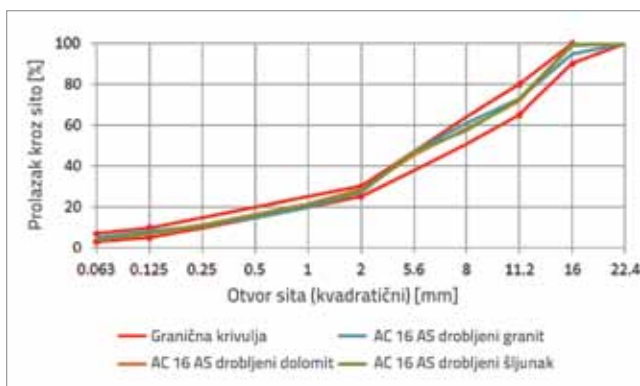
Analiza mješavina pripremljenih u laboratoriju pokazala je sljedeća fizičko-mehanička svojstva:

- modul krutosti, 10°C, u skladu s normom LST EN 12697-26 (IT-CY);

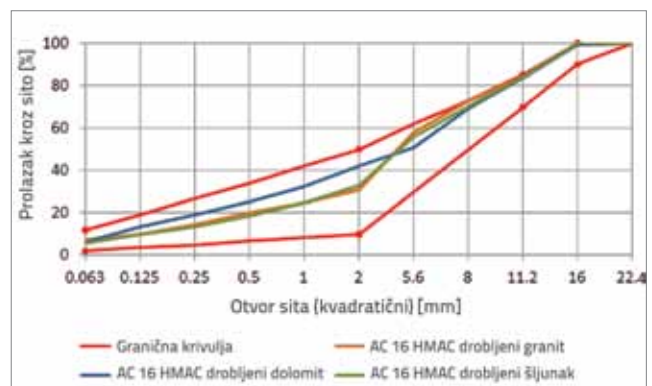
- otpornost na nastanak kolotraga, 60°C i 10000 ciklusa, u skladu s normom LST EN 12697-22;
- otpornost na umor materijala 4PB-PR, 10°C i 10 Hz, u skladu s normom LST EN 12697-24;
- gustoća asfaltne mješavine, u skladu s normom LST EN 12697-5;
- prostorna masa asfaltne mješavine, u skladu s normom LST EN 12697-6;
- udio šupljina, u skladu s normom LST EN 12697-8;
- stabilitet i deformacija, 60°C, u skladu s normom LST EN 12697-34. Ovo je ispitivanje izvršeno na dvije skupine uzoraka. Prva je skupina pri pripremanju podnijela 2x50 udaraca, a druga 2x75.

U nekim državama, primjerice u Poljskoj, pri pripremanju uzoraka HMAC-a nanosi se 2x75 udaraca (uzorci prema Marshallu se pripremaju s 2x50 udaraca), a norma LST EN 12697-30 propisuje 2x50 udaraca. Kako bi bilo lakše usporediti uzorke, uzorci prema Marshallu pri pripremanju za ova ispitivanja podnijeli su 2x50 te 2x75 udaraca. Uzorci prema Marshallu koji su podnijeli različit broj udaraca korišteni su pri mjerenju prostorne mase i udjela šupljina. Rezultati laboratorijskih ispitivanja prikazani su u tablici 2.

U Poljskoj postoji tehnički dokument i zahtjevi koje HMAC mora ispunjavati. S obzirom na to da su klimatske prilike u Poljskoj slične onima u Litvi, dobiveni su rezultati procijenjeni u odnosu na zahtjeve poljskog tehničkog dokumenta koje HMAC mora ispuniti.



Slika 1. Granulometrijska krivulja agregata za izradu asfaltnih mješavina AC 16 AS



Slika 2. Granulometrijska krivulja agregata za izradu asfaltnih mješavina HMAC-a

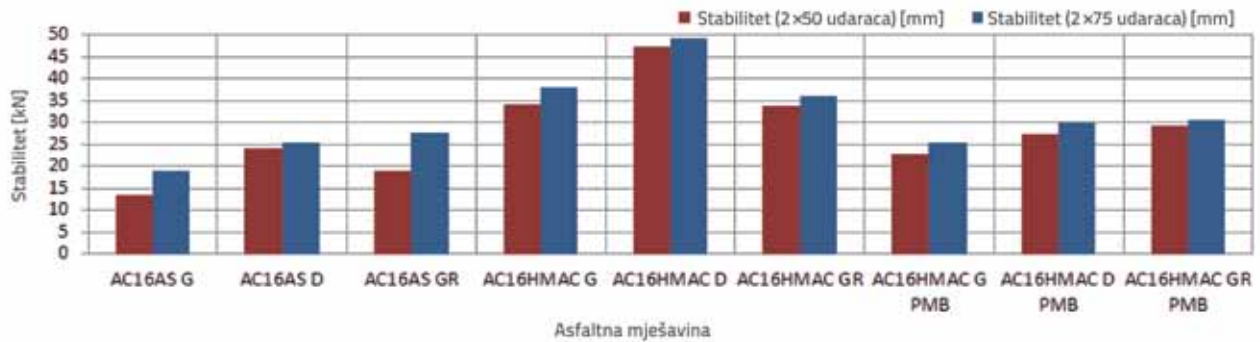
Tablica 2. Rezultati ispitivanja fizikalnim i mehaničkih svojstava HMAC-a i vruće asfaltne mješavine

Svojstva asfaltnih mješavina	AC16AS G	AC16HMAC G	AC16HMAC G PMB	AC16AS D	AC16HMAC D	AC16HMAC D PMB	AC16AS GR	AC16HMAC GR	AC16HMAC GR PMB	Zahtjevi za HMAC u skladu s tehničkim dokumentima u Poljskoj
Udio veziva [%]	4,5	4,0	4,0	4,8	4,0	4,1	4,8	4,0	4,0	4,8
Gustoća asfaltne mješavine [kg/m ³]	2538	2503	2517	2531	2550	2534	2498	2512	2502	-
Prostorna masa asfaltne mješavine (2×50 udaraca) [kg/m ³]	2439	2416	2457	2477	2477	2479	2431	2449	2417	-
Udio šupljina [%]	3,90	3,48	2,38	2,13	2,86	2,17	2,68	2,51	3,40	2,0–4,0
Stabilitet (2×50 udaraca) [kN]	13,5	34,0	22,9	24,1	47,4	27,3	18,8	33,9	29,1	-
Deformacija (2×50 udaraca) [mm]	2,9	1,7	3,3	3,0	1,6	2,5	2,9	2,3	2,1	-
Gustoća asfaltne mješavine (2×75 udaraca) [kg/m ³]	2451	2424	2478	2487	2478	2488	2455	2454	2431	-
Udio šupljina [%]	3,43	3,16	1,55	1,74	2,82	1,82	1,72	2,31	2,84	2,0–4,0
Stabilitet (2×75 udaraca) [kN]	18,9	37,8	25,3	25,5	49,3	29,8	27,5	36,0	30,6	-
Deformacija (2×75 udaraca) [mm]	2,5	2,0	2,8	2,9	1,7	2,6	2,6	2,3	2,6	-
Relativna dubina kolotruga [%]	3,8	1,9	1,3	4,5	2,4	2,8	4,1	2,2	1,9	≤ 5,0
Umor materijala [ε _e]	19	22	34	25	21	23	19	9	19	≥ 130
Krutost [MPa]	14381	17520	18357	15389	25718	19737	16116	22021	17298	≥ 14000

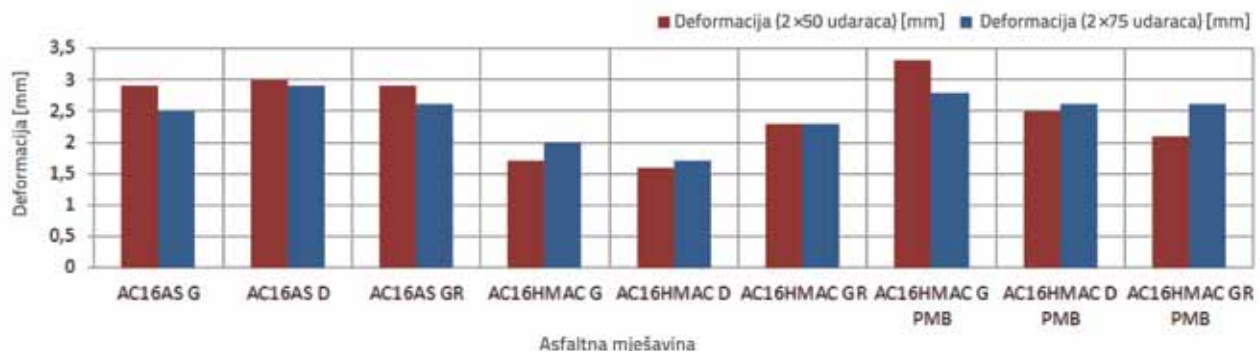
4. Analiza i ocjena rezultata

Stabilitet svih ispitivanih uzoraka asfaltnih mješavina bila je u granicama između 13,5 kN i 49,3 kN. Ispitivanja su pokazala da najveći stabilitet ima mješavina s tvrdim bitumenom 20/30 (slika 3.). Naime, najveći stabilitet (47,4 MPa) pokazala je mješavina asfaltbetona s agregatima od drobljenog dolomita i vezivom 20/30 (AC16HMAC D). Stabilitet uzoraka izrađenih s polimerom modificiranim vezivom PMB 45/80-55 također je bila izuzetno visoka (24,1 MPa za AC16AS D s agregatom od dolomita). Rezultati upućuju na to da je stabilnost uzoraka izrađenih s polimerom modificiranim vezivom PMB 45/80-55 varirala do 16 %, unutar kojih su uzorci s agregatima od drobljenog dolomita (AC16HMAC GR PMB) varirali do 6 %. Stabilitet uzoraka asfaltnih mješavina koji su pri pripremanju podnijeli 2×75 udaraca bila je veća (11,8 %) od stabiliteta uzoraka koji su podnijeli 2×50 udaraca, no pokazalo se da je razdioba najviših i najnižih vrijednosti ovisno o vrsti asfaltne mješavine izuzetno važna.

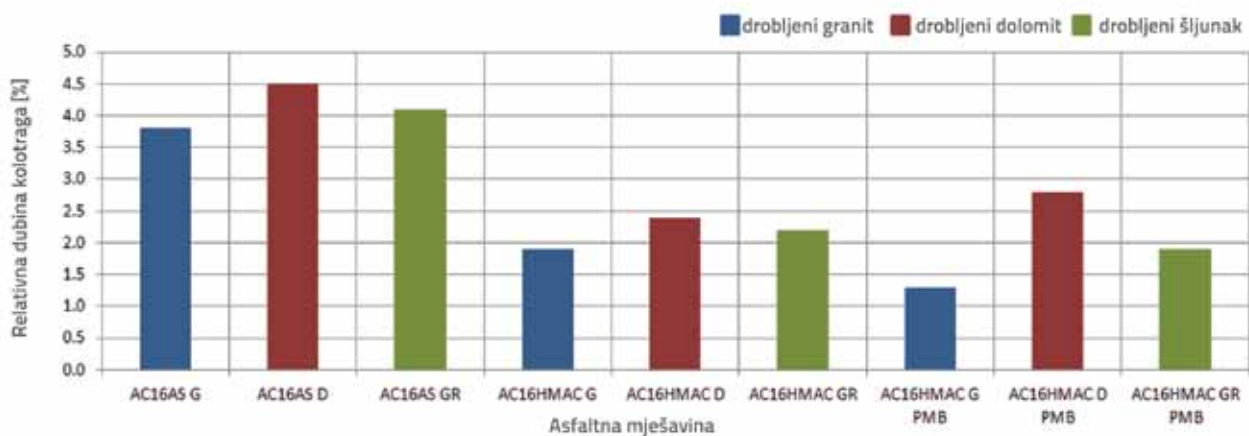
Rezultati za deformaciju uzoraka asfaltne mješavine prikazani su na slici 4. Laboratorijska su ispitivanja dokazala da je deformacija najmanja (1,6 mm) za uzorak AC16HMAC s agregatom od drobljenog dolomita i bitumenskim vezivom 20/30 (AC16HMAC D). Najveća deformacija (3,3 mm) izmjerena je za AC16HMAC s granitnim agregatom i vezivom PMB 25/55-45 (AC16HMAC G PMB). Također je utvrđeno da je deformacija asfaltnih uzoraka s bitumenskim vezivom 20/30 manja 45 % od deformacija izmjerenih kod drugih uzoraka. Ispitivanje otpornosti asfalta na nastanak kolotruga pokazalo je da je relativna dubina nastalih kolotruga za sve vrste uzoraka manja od 5 % (slika 5.). Laboratorijskim ispitivanjima ustanovljeno je da relativna dubina kolotruga nastalih na uzorcima asfalta varira između 1,3 % i 4,5 %. Najmanju relativnu dubinu kolotruga (1,3 %) imali su asfaltni uzorci izrađeni s granitnim mineralnim agregatima i polimerom modificiranim bitumenom (PMB 25/55-60). Mora se istaknuti da su kolotrazi bili najmanji u uzorcima s mekšim polimerom modificiranim bitumenom i agregatima od drobljenog dolomita. Bez obzira



Slika 3. Distribucija stabiliteta asfaltnih mješavina



Slika 4. Distribucija deformacije asfaltnih mješavina



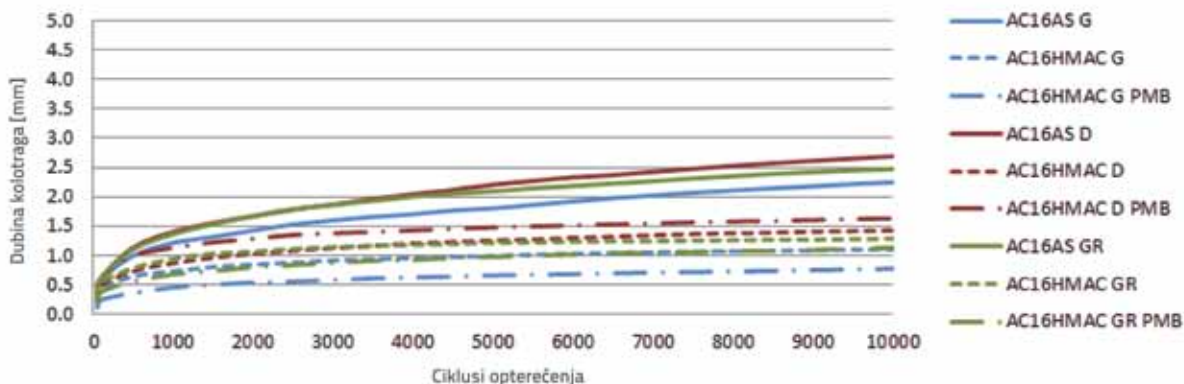
Slika 5. Razdioba relativne dubine kolotruga nakon 10.000 ciklusa (prelazaka kotača)

na vrstu upotrebljenog agregata, relativna dubina kolotruga bila je manja u uzorcima s mekšim bitumenom (20/30 i PMB 25/55-60) nego u uzorcima s bitumenom PMB 45/80-55. Najmanja relativna dubina kolotruga zabilježena je na uzorcima s vezivom PMB 25/55-60, osim u onima s agregatom od drobljenog dolomita.

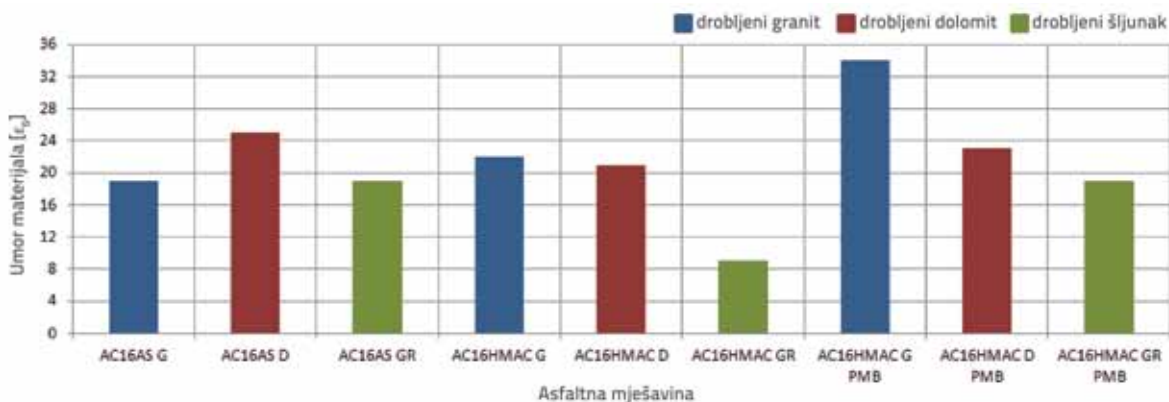
Povećanje relativne dubine kolotruga, koje određuje vrstu kolotruga, prikazano je na slici 6. Tijekom prvih 500 ciklusa kolotrazi su se brže produbljivali u asfaltbetonu s dolomitom i drobljenim šljunkom, no između petstotog i desetotisućitog ciklusa rezultati su bili vrlo slični za sve vrste asfaltbetona. Tijekom prvih 500 ciklusa kolotrazi su se brže produbljivali na

uzorku AC16HMAC D PMB, ali ne i na uzorku AC16HMAC D. Najdublji kolotrazi nastali su na uzorcima asfaltbetona AC 16 AS s vezivom PMB 45/80-55.

Rezultati ispitivanja otpornosti HMAC-a na umor materijala prikazani su na slici 7. Laboratorijski pripremljeni uzorci asfaltnih mješavina čija je otpornost na umor materijala ispitivana očito ne zadovoljava poljske standarde za mješavine HMAC-a ($> 130 \epsilon_0$). Najveća otpornost materijala na umor ($34 \epsilon_0$) izmjerena je za mješavinu asfaltbetona s granitnim mineralnim agregatima i tvrdim bitumenom PMB 25/55-60, a najmanja ($9 \epsilon_0$) za uzorke AC16HMAC GR s bitumenskim vezivom 20/30. Mješavina asfaltbetona s bitumenom PMB



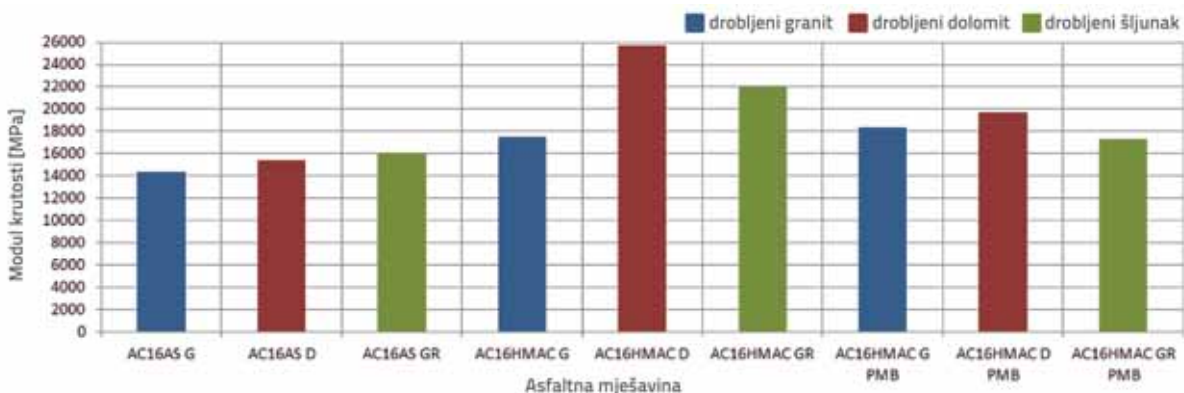
Slika 6. Dubine kolotruga ovisno o ciklusu opterećenja (prelazaka kotača)



Slika 7. Razdioba otpornosti na umor materijala

45/80-55 te s agregatima od drobljenog dolomita i granitnim mineralnim agregatima pokazala je veću otpornost na umor materijala od mješavine asfaltbetona s vezivom PMB 25/55-60. Najmanju su otpornost na umor materijala pokazali uzorci s mineralnim agregatima od drobljenog šljunka. Rezultati ispitivanja modula krutosti asfaltbetona prikazani su na slici 8. Ispitivanja su pokazala da najveći modul krutosti (25.718 MPa) ima AC16HMAC D, a najmanji AC16AS G (14.381 MPa). Od mješavina s tvrdim bitumenom (20/30, PMB 25/55-60) najveći modul krutosti imaju mješavine asfaltbetona s mineralnim agregatima od dolomita.

Modul krutosti uzoraka s bitumenom 20/30 veći je 18 % od modula krutosti uzoraka s PMB 25/55-60, osim kad je riječ o asfaltbetonu s granitnim mineralnim agregatima. Modul krutosti svih uzoraka asfaltbetona veći je od 14.000 MPa, što znači da svi zadovoljavaju poljske norme propisane za mješavine HMAC-a. Modul krutosti uzoraka asfaltbetona s tvrdim bitumenom veći je od 16.000 MPa. Otpornost na umor materijala uzoraka asfaltbetona pripremljenih u laboratoriju relativno je mala i ne zadovoljava poljske standarde za asfalt visokog modula krutosti, što nije u skladu s iskustvima drugih država. Razlog za to može biti niski



Slika 8. Razdioba modula krutosti

udio bitumenskog veziva, no mješavine asfaltbetona visokog modula krutosti u laboratorijima se pripremaju tako da udio zračnih pora bude između dva i četiri posto. Moguće je i da sastav mješavina asfaltbetona pripremljenih u laboratoriju nije odgovarajući jer se kao mineralni agregat upotrebljavao pijesak frakcije 0/2. Analizom sastava HMAC-a u drugim europskim državama ustanovljeno je da su mješavine pripremljene sa stopostotnim drobljenim agregatom, a pijeska uopće nema.

5. Zaključak

Najveći stabilitet pokazale su asfaltne mješavine s tvrdim bitumenom. HMAC s agregatima od drobljenog dolomita i vezivom 20/30 (AC16HMAC D) imao je najbolje rezultate (47,4 MPa). Broj udaraca koji određuje zbijenost uzoraka prema Marshallu ne utječe na stabilnost asfaltne mješavine. Razlika je do 7 %.

Najmanja deformacija (1,6 mm) izmjerena je za HMAC s agregatom od drobljenog dolomita i bitumenskim vezivom 20/30 (AC16HMAC D). Najveća deformacija (3,3 mm) ustanovljena je kod HMAC-a s granitnim agregatom i vezivom PMB 25/55-45 (AC16HMAC G PMB).

Relativna dubina kolotruga za sve je uzorke bila manja od 5 %. Najmanja je vrijednost (1,3 %) izmjerena za HMAC s agregatom od drobljenih granitnih minerala i vezivom PMB 25/55-60. Neovisno o vrsti agregata upotrijebljenog za pripremu HMAC-a, relativna dubina kolotruga manja je za 1,3 do 4,5 % od dubine kolotruga na asfaltbetonu.

Tijekom prvih 500 ciklusa kolotrasi su se brže produbljivali u asfaltbetonu s drobljenim dolomitima i drobljenim šljunkom, no između 500 i 10.000 ciklusa rezultati su bili vrlo slični za sve vrste asfaltbetona. Nakon 10.000 ciklusa najmanju dubinu kolotruga (0,77 mm) imao je HMAC s agregatom od drobljenih granitnih minerala i vezivom PMB 25/55-60.

Najveći modul krutosti ima AC16HMAC D (25.718 MPa), a najmanji AC16AS G (14.381 MPa). Od mješavina s tvrdim bitumenom (20/30, PMB 25/55-60) najveći modul krutosti imaju mješavine asfaltbetona s mineralnim agregatima od dolomita. Modul krutosti uzoraka s bitumenom 20/30 veći je 18 posto od modula krutosti uzoraka s PMB 25/55-60, osim kad je riječ o mješavinama asfaltbetona s granitnim mineralnim agregatima.

HMAC s tvrdim agregatima (granitom) otporniji je na nastanak kolotruga i umor materijala, no i HMAC s manje tvrdim agregatima (dolomitom i šljunkom) imao je bolje rezultate od asfaltbetona. Može se zaključiti da vrsta agregata utječe na fizikalna i mehanička svojstva HMAC-a, ali je utjecaj vrste bitumena mnogo veći. Preporučuje se uporaba polimerom modificiranog bitumena za izradu nosivog sloja HMAC-a te uporaba isključivo takvog bitumena za izradu veznih slojeva HMAC-a budući da je on otporniji na umor materijala i manje osjetljiv na temperature.

Izričito se preporučuje da udio bitumena u HMAC-u bude 5,0 %. Manji bi udio bitumena mogao znatno smanjiti otpornost na umor materijala i trajnost kolničkih konstrukcija izrađenih od HMAC-a.

LITERATURA

- [1] Skrinškas, S., Gasiūnienė, V. E., Laurinavičius, A., Podagėlis, I.: Lithuanian Mineral Resources, Their Reserves and Possibilities for Their Usage in Road Building, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 5(4), pp. 218–228, 2010.
- [2] Čygas, D., Laurinavičius, A., Vaitkus, A., Perveneckas, Z., Motiejūnas, A.: Research of Asphalt Pavement Structures on Lithuanian Roads (I), *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 3(2), pp. 77–83, 2008.
- [3] Corte, J.: Development and Uses of Hard-Grade Asphalt and of High-Modulus Asphalt Mixes in France, *Transportation Research Circular 5003: Perpetual Bituminous Pavements*, pp. 12–30, 2003.
- [4] Bankowski, W., Tusar, M., Wiman, L. G., Sybliski, D., Gajewski, M., Horodecka, R., Maliszewski, M., Mirski, K.: *Laboratory and Field Implementation of High Modulus Asphalt Concrete. Requirements for HMAC Mix Design and Pavement Design*, European Commission, Sixth Framework Programme, Sustainable Surface Transport, 63 p., 2009.
- [5] Elliott, R.: Implementing High Modulus Asphalt Technology in The United Kingdom, *The International Seminar Maintenance Techniques to Improve Pavement Performance*, 10 p, 2009.
- [6] Tusar, M., Turk, M. R., Bankowski, W., Wiman, L. G., Kalman, B.: Evaluation of Modified Bitumen, High Modulus Asphalt Concrete and Steel Mesh as Materials for Road Upgrading, in *Proceedings of the 7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterisation of Bituminous Materials*, pp. 443–452, 2009.
- [7] Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A., Perveneckas, Z.: Analysis and Evaluation of Possibilities for the Use of Warm Mix Asphalt in Lithuania, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 4(2), pp. 80–86, 2009.
- [8] Celauro, C., Bernardo, C., Gabriele, B.: Production of Innovative, Recycled and High-Performance Asphalt for Road Pavements, *Resources, Conservation and Recycling*, 54, pp. 337–347, 2010.

- [9] Sybilski, D., Bankowski, W., Krajewski, M.: High Modulus Asphalt Concrete with Limestone Aggregate, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3(2), pp. 96–101, 2010.
- [10] Santos, L. P., Capitaó, S. D., Pais, J. C.: Stiffness Modulus and Phase Angle Prediction Models For High Modulus Asphalt Concrete, *International Journal of Pavements*, 2(2), pp. 37–49, 2003.
- [11] Maupin, G. W., Diefenderfer, B. K.: *Design of High-Binder-High-Modulus Asphalt Mixture*, Final Report VTRC 07-R15, Virginia Transportation Research Council, 28 p., 2006.
- [12] De Backer, C., De Visscher, J., Glorie, L., Vanelstraete, A., Vansteenkiste, S., Heleven, L.: A Comparative High-modulus Asphalt Experiment in Belgium, in *Proceedings of Transport Research Arena*, 6 p., 2008.
- [13] Rohde, L., Ceratti, J. A. P., Nunez, W. P., Vitorello, T.: Using APT and Laboratory Testing to Evaluate the Performance of High Modulus Asphalt Concrete for Base Courses in Brazil, in *Proceeding of the 3rd International Conference on Impacts and Benefits from APT Programs*, 11 p, 2008.
- [14] Vervaecke, F., Maeck, J., Vanelstraete, A.: Comparison of the Modulus of High-modulus Asphalt Mixtures – Experimental Determination and Calculation, in *Proceedings of the 6th RILEM International Conference on Cracking in Pavements*, pp. 491–499, 2008.
- [15] Lee, H. J., Lee, J. H., Park, H. M.: Performance Evaluation of High Modulus Asphalt Mixtures for Long Life Asphalt Pavements, *Construction and Building Materials* 21, pp. 1079–1087, 2007.
- [16] OuYang, W., Yu, G., Zhu, F.: Research on Anti-Rutting Performance of High Modulus Asphalt Concrete Pavement, *Advanced Materials Research*, 163–167, pp. 4474–4477, 2011.
- [17] Xiushan, W., Tuanjie, C., Xiaojun, D.: Analysis of the Mechanical Impact of High-Modulus Asphalt Concrete on Road Structure, *Applied Mechanics and Materials*, 97–98, pp. 334–339, 2011.
- [18] Yunliang, L., Yiqiu, T., Liang, M.: Application Study on High Modulus Asphalt Concrete in Bridge Pavement, *Advanced Materials Research*, 243–249, pp. 4244–4247, 2011.
- [19] Čygas, D.; Laurinavičius, A.; Vaitkus, A.; Paliukaitė, M.; Motiejūnas, A.: A Test Road Section of Experimental Pavement Structures in Lithuania (II), *The 8th International Conference Environmental Engineering*, pp. 1064–1069, 2011.
- [20] Motiejūnas, A., Paliukaitė, M., Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A.: Research on The Dependence of Asphalt Pavements Stiffness Upon The Temperature of Pavement Layers, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 5(1), pp. 50–54, 2010.
- [21] Paliukaitė, M., Vaitkus, A.: Analysis of Temperature and Moisture Influence on Asphalt Pavement Strength, *The 8th International Conference Environmental Engineering*, pp. 1160–1165, 2011.
- [22] Vaitkus, A., Laurinavičius, A., Oginskas, R., Motiejūnas, A., Paliukaitė, M., Barvidienė, O.: The Road of Experimental Pavement Structures: Experience of Five Years Operation, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 7(3), pp. 220–227, 2012.
- [23] Nunn, M.: Long-life Flexible Roads, *The 8th International Conference on Asphalt Pavements*, pp. 3–16, 1997.
- [24] Jaczewski, M.: Evaluation of Low Temperature Behaviour of High Modulus Asphalt Mixes, *Abstract for YEAR2010 Design and Production of Vehicles and Infrastructure*, 2 p, 2010.