

Primljen / Received: 30.8.2013.

Ispravljen / Corrected: 1.9.2013.

Prihvaćen / Accepted: 10.9.2013.

Dostupno online / Available online: 10.12.2013.

Utjecaj početne temperature na ispitivanje vlačnog naprezanja pridržanih uzoraka asfaltbetona

Autori:



Mr.sc. **Dejan Hribar**, dipl.ing.građ.
 Građbeni inštitut ZRMK d.o.o.
 Centar za prometnice i infrastrukturu
dejan.hribar@gi-zrmk.si



Doc.dr.sc. **Marjan Tušar**, dipl.ing.kem.
 Kemijski inštitut Ljubljana
marjan.tusar@ki.si



Dr.sc. **Bernhard Hofko**, dipl.ing.građ.
 Tehničko sveučilište u Beču, Institut za promet
 Istraživački centar prometnog inženjerstva
bernhard.hofko@tuwien.ac.at



Prof.dr.sc. **Ronald Blab**, dipl.ing.građ.
 Tehničko sveučilište u Beču, Institut za promet
 Istraživački centar prometnog inženjerstva
RBlab@istu.tuwien.ac.at

Prethodno priopćenje

Dejan Hribar, Marjan Tušar, Bernhard Hofko, Ronald Blab

Utjecaj početne temperature na ispitivanje vlačnog naprezanja pridržanih uzoraka asfaltbetona

U ovom se radu prikazuju rezultati ispitivanja vlačnog naprezanja pridržanih uzoraka obavljenog na uzorcima asfaltbetona AC 8 s bitumenom 50/70, pri čemu su korištene dvije početne temperature +10 °C i +20 °C. Analiza rezultata pokazuje da je razlika između tih dviju početnih temperatura beznačajna te da su rezultati u okviru standardnih zahtjeva točnosti. S druge strane, uočena je razlika između rezultata ispitivanja dobivenih u dva laboratorija: TU Beč i ZAG Ljubljana, gdje su ispitivanja obavljena u skladu s EN 12697-46 pri početnoj temperaturi od +20 °C.

Ključne riječi:

asfaltni beton, početna temperatura, niske temperature, pukotine, bitumen

Preliminary note

Dejan Hribar, Marjan Tušar, Bernhard Hofko, Ronald Blab

Influence of start temperature on tensile stress testing of restrained asphalt concrete specimens

This paper presents the result of the Tensile Stress Restrained Specimen Tests on specimens of asphalt concrete AC 8 with bitumen 50/70 depending on two starting temperatures of +10 °C and +20 °C. The analysis of the results shows that there is only a non significant difference between these two start temperatures and the results are within the limit of standard precision. On the other hand, there is a difference between the results of two laboratory TU Wien and ZAG Ljubljana, who carried out the tests in accordance with EN 12697-46 at start temperature +20 °C.

Key words:

asphalt concrete, start temperature, low temperatures, cracks, bitumen

Vorherige Mitteilung

Dejan Hribar, Marjan Tušar, Bernhard Hofko, Ronald Blab

Einfluss der Starttemperatur bei Abkühlversuchen an Asphaltbeton-Probekörpern

In dieser Arbeit werden Resultate von Abkühlversuchen an Proben aus AC 8 Asphaltbeton und 50/70 Bitumen mit zwei verschiedenen Starttemperaturen (+10 °C und +20 °C) dargestellt. Die Analyse der Testresultate zeigt, dass keine signifikanten Unterschiede für diese zwei Temperaturwerte auftreten und die Ergebnisse sich im Bereich der Wiederholbarkeit befinden. Im Gegensatz dazu sind jedoch Unterschiede in den Resultaten zwei verschiedener Versuchsanstalten, der TU Wien und ZAG Ljubljana, die der EN 12697-46 Norm folgend ermittelt worden sind, festgestellt worden.

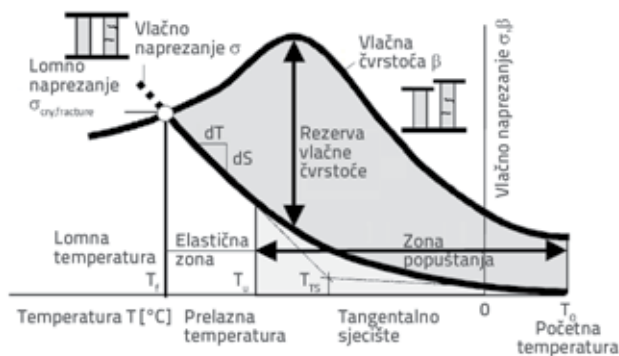
Schlüsselwörter:

Asphaltbeton, Anfangstemperatur, niedrige Temperaturen, Risse, Bitumen

1. Uvod

U prirodi se mnogi materijali, pa tako i asfalt, šire pri zagrijavanju a stežu pri hlađenju. Ako se stezanje zbog hlađenja spriječi, tada u asfaltnom materijalu s padom temperature dolazi do porasta vlačnog naprezanja, što može dovesti do sloma (pojave mikropukotina u veznoj matrici) ako se dosegne maksimalna vlačna čvrstoća [1]. Postupkom ispitivanja vlačnog naprezanja pridržanih uzoraka (eng. Tensile Stress Restrained Specimen Tests – TSRST) simuliraju se uvjeti asfaltnog kolnika pri niskim temperaturama, pri čemu se rezultirajuća toplinski inducirana vlačna naprezanja, koja nazivamo kriogeno naprezanje, prije svega očituju kao poprečne pukotine koje se javljaju u razmacima od 3 do 5 m [2].

Koncept vlačnog naprezanja [3], vlačne čvrstoće i rezerve vlačne čvrstoće prikazan je na slici 1. Toplinski inducirano (kriogeno) naprezanje u asfaltnom uzorku postupno raste usporedno s padom temperature, sve dok ne dođe do loma uzorka. U točki loma, naprezanje doseže svoju maksimalnu vrijednost – lomno naprezanje $\sigma_{cry,fracture}$ – pri lomnoj temperaturi $T_{failure}$ (u daljnjem tekstu T_l). Pri nižim temperaturama nagib krivulje naprezanja i temperature dS/dT postaje konstantan, a krivulja je linearna (elastično ponašanje). Pri prelaznoj temperaturi T_{el} , krivulja se dijeli na dva dijela, a to su zona popuštanja i elastična zona (bez popuštanja), dok je tangentna točka sjecišta T_{TS} zapravo sjecište između tangente krivulje naprezanje-temperatura u elastičnoj zoni i zoni popuštanja. Bitumen u asfaltnom uzorku postaje krući kada se temperatura približava vrijednosti prelazne temperature, a toplinski inducirana naprezanja ne popuštaju ispod te temperature [4].



Slika 1. Arandov koncept (1987) vlačnog naprezanja sa zonom popuštanja i elastičnom zonom [3]

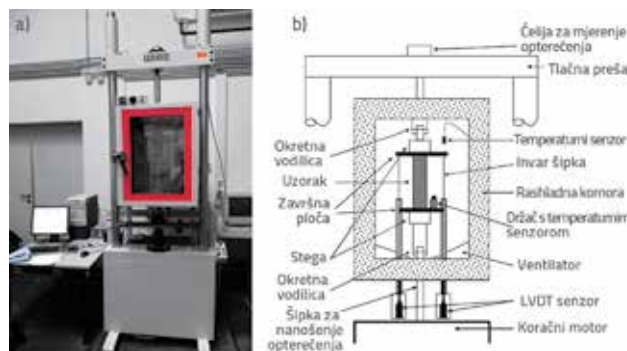
Prema preporuci iz norme EN 12697-46, ispitivanje bi trebalo početi pri temperaturi od $T_0 = +20$ °C. Na Tehničkom sveučilištu u Beču (TU Wien), ispitivanja TSRST tradicionalno se obavljaju pri temperaturi od $T_0 = +10$ °C. U istraživanju koje se prikazuje u ovom radu, cilj je odrediti da li tijekom ispitivanja TSRST početna temperatura T_0 utječe na rezultate pri niskim temperaturama. Stoga je ispitivanje TSRST obavljeno prema normi EN 12697-46 na asfaltnom betonu AC 8 pri početnim temperaturama

$T_0 = +10$ °C i $T_0 = +20$ °C. Ispitivanje TSRST obavljeno je u institutima ZAG Ljubljana na asfaltnim uzorcima koji su sadržavali 6.2 m.-% bitumena, da bi se omogućila usporedba s rezultatima koji su dobiveni u institutu za promet TU Wien. Pritom su spomenute ustanove za ispitivanje TSRST koristile različitu opremu. Tako je u ZAG Ljubljana za ispitivanje TSRST upotrijebljen uređaj za nanošenja tlaka/vlaka proizvođača Frank, dok je TU Wien upotrijebio opremu proizvođača Wille Geotechnik iz Njemačke.

2. Opis ispitivanja

2.1. Postupak ispitivanja i oprema

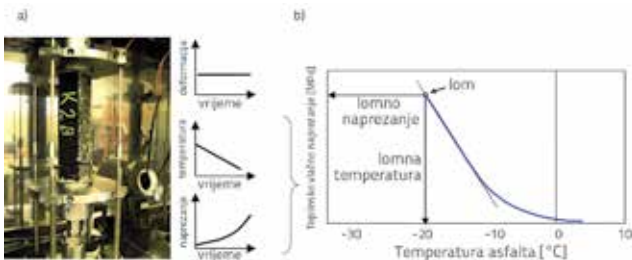
Prije ispitivanja TSRST uzorak asfaltbetona stavlja se u tlačnu prešu koja je smještena u rashladnu komoru. Tijekom ispitivanja održava se konstantna dužina uzorka, a temperatura se smanjuje konstantnom brzinom od $dT = -10$ °C/h. Svaki pomak uzorka uslijed toplinskog skupljanja prati se pomoću LVDT senzora koji aktivira pužasti uređaj kojim se održava prvobitna duljina uzorka. Postupak se nastavlja sve dok vlačno naprezanje ne postane veće od vlačne čvrstoće, a tada dolazi do pojave pukotina i sloma uzorka. Prema preporuci iz norme EN 12697-46, ispitivanje bi trebalo početi pri temperaturi od $T_0 = +20$ °C. Uređaj za provedbu ispitivanja sastoji se od preše za tlačnje, pužnog uređaja, rashladne komore s regulatorom temperature, 4 LVDT senzora, postolja za poravnanje uzorka, te od računalnog sustava za pohranjivanje i kontrolu podataka [5, 6]. U rashladnoj se komori temperatura može regulirati u rasponu od $T = \pm 40$ °C (u TU Wien točnost mjerenja iznosi $\pm 0,1$ °C, a u ZAG Ljubljana $\pm 0,5$ °C). LVDT senzori postavljaju se izvan rashladne komore (njihova točnost iznosi 0,2 %). Gornje i donje ploče i mjerne šipke napravljene su od invar-čelika tako da bi se u što većoj mjeri izbjegao utjecaj temperaturnih promjena na mjerni uređaj, [5]. Slika 2. prikazuje opremu za ispitivanje TSRST koja se koristi u institutu TU Wien, isto kao i dijagram opreme upotrijebljene tijekom ispitivanja.



Slika 2. Oprema za TSRST u TU Wien: a) prikaz cijelog uređaja; b) shematski prikaz uređaja sa svim dijelovima

Ispitivanjem TSRST dobivaju se sljedeći rezultati: kontinuitet kriogenog naprezanja ovisnog o temperaturi $\sigma_{cry}(T)$ [MPa],

lomno naprezanje $\sigma_{\text{cry, failure}}$ [MPa] i lomna temperatura T_{failure} [°C]. Rezultati ispitivanja TSRST koje dobije isti operater na tri uzorka (duplikata) smatraju se sumnjivima ako im se lomna temperatura razlikuje za više od 2 °C te lomno naprezanje za više od 0,5 MPa. Točnost u velikoj mjeri ovisi o rasponu udjela pukotina u uzorcima asfaltne mješavine. Postupak ispitivanja TSRST prikazan je na slici 3.



Slika 3. a) prikaz ispitivanja; b) prikaz dobivenih rezultata [6]

2.2. Materijal

Za ispitivanje je korišten asfaltbeton 0/8 mm (AC 8). Asfaltna mješavina i uzorci pripremljeni su u laboratoriju ZAG Ljubljana. Asfaltne mješavine sadržavale su 6,2 m.-% bitumena. U mješavini su korištene sljedeće frakcije agregata: punilo (zrna manja od 0,125 mm) iz Stahovice (vapnenac), mineralni agregat 0/2, 2/4 i 4/8 mm iz Ljubešćice (silikat), a kao vezivo je korišten cestograđevni bitumen 50/70 koji proizvodi MOL (Mađarska).

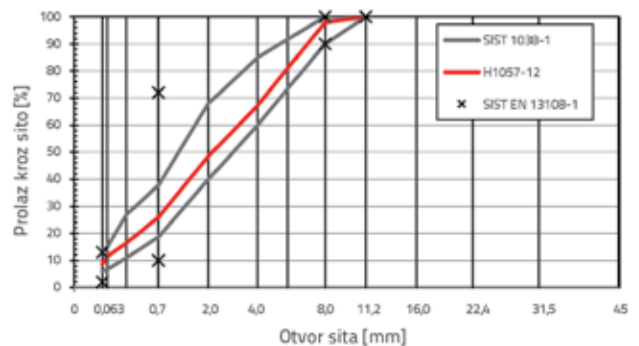
Tablica 1. Svojstva cestograđevnog bitumena 50/70

Tehničke karakteristike	Metoda ispitivanja	Svježi bitumen	Ekstrahirani bitumen
Penetracija pri 25 °C [mm/10]	EN 1426:2007	58	37
Točka razmekšanja R&B [°C]	EN 1427:2007	50	55,6
Indeks penetracije PI	EN 12591:2004, dio B4	-0,4	-0,57
Točka loma (Fraass) [°C]	EN 12593:2007	-8	-7
Gustoća (u vodi) [kg/m ³]	EN ISO 3838	1020	-
BBR - krutost S60 [°C]	EN 14771:2005	-15,6	-
BBR - vrijednost m-60 [°C]	EN 14771:2005	-17,8	-

Tablica 2. Rezultati osnovnih ispitivanja asfaltnih mješavina

Parametri	Udio bitumena [m.-%]	Veličina zrna <0.063 mm [m.-%]	Maksimalna gustoća uzorka [kg/m ³]	Prostorna masa uzorka (Marshall) [kg/m ³]	Udio zračnih šupljina u uzorku (Marshall) [V.-%]	Šupljine ispunjene bitumenom VFB [V.-%]	ITS [kPa]
Ispitivanje							
H1057-12	6.2	8.7	2542	2483	2.3	86.7	1036

Granulometrijski prikaz ove asfaltne mješavine 0/8 mm (AC 8) dan je na slici 4. Bitumen i agregati grijani su prije miješanja na temperaturi od $T = 150$ °C tijekom otprilike pola sata. Isto tako, prije samog nabijanja, mješavina je kondicionirana na temperaturi od $T = 150$ °C u vremenu od pola sata. U ispitivanju TSRST korišten je pravokutni uzorak dimenzija presjeka 40×40 mm², dužine 160 mm. Nakon oblikovanja uzorci su kondicionirani na sobnoj temperaturi $T = 20 \pm 2$ °C te su ispitani nakon nekoliko dana. Svojstva svježeg bitumena 50/70 i u trikloretilenu otopljenog ekstrahiranog bitumena pomoću infratestovog asfaltnog analizatora prema (EN 12697-1) prikazana su u tablici 1. Rezultati osnovnih ispitivanja asfaltnih mješavina prikazani su u tablici 2.



Slika 4. Granulometrijski sastav asfaltbetona AC 8

3. Rezultati i analiza

3.1. Usporedba dviju početnih temperatura

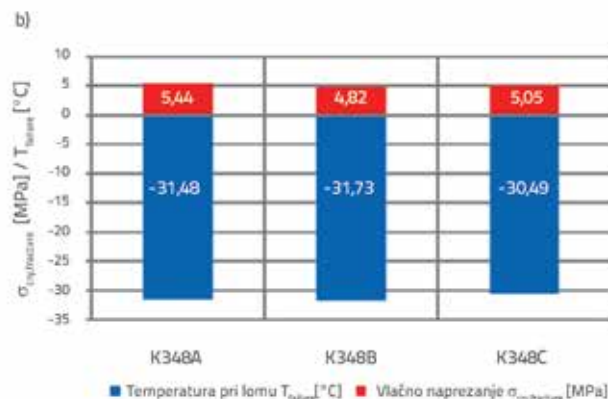
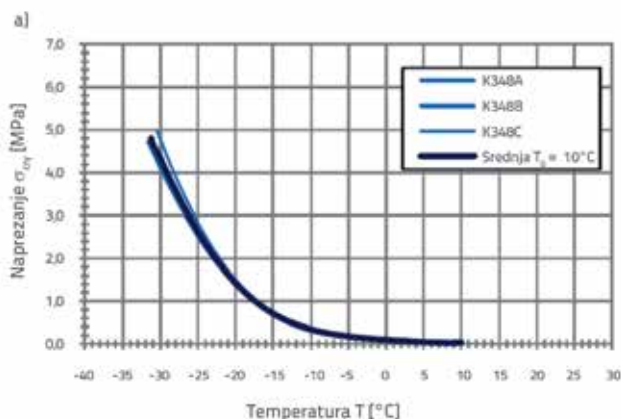
Rezultati dobiveni ispitivanjem asfaltbetona AC 8 koji se koristi za habajuće slojeve kolničkih konstrukcija prikazani su u tablici 3. Tri uzorka K348A-C ispitana su pri početnoj temperaturi od $T_0 = +10$ °C, dok su preostala tri asfaltna uzorka K348D-G ispitana pri temperaturi od $T_0 = +20$ °C. Statistički gledano, svi rezultati lomnog naprezanja pokazuju da su razlike u rezultatima nešto iznad dopuštene granice od 0,5 MPa koja je definirana u normi EN 12697-46. Što se tiče lomne temperature, rezultati su u skladu sa zahtjevima iz norme (<2 °C). Ako rezultate promatramo zasebno za početnu temperaturu od $T_0 = +10$ °C i $T_0 = +20$ °C, možemo vidjeti da niti u jednom od tih slučajeva zahtjevi nisu prekoračeni. Na slikama 5.a i 6.a prikazan je dijagram naprezanja i temperature koji se temelji na ispitivanjima TSRST obavljenima u institutu TU Wien pri početnoj temperaturi od $T_0 = +10$ °C i $T_0 = +20$ °C. Linije su ujednačene na obje krivulje.

Tablica 3. Rezultati osnovnih ispitivanja pravokutnog uzorka i ispitivanja vlažnog naprezanja pridržanih uzoraka

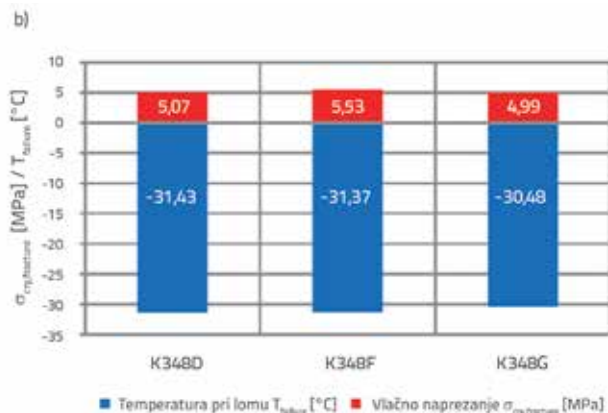
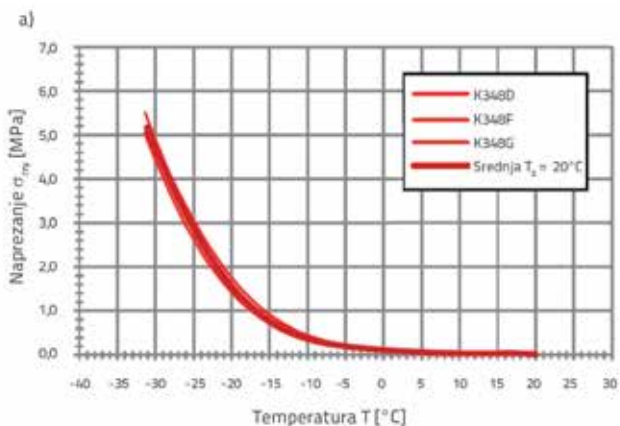
Laboratorij	Oznaka uzorka	Početna temperatura ispitivanja [°C]	Prostorna masa uzorka [kg/m³]	Šupljine u uzorku [V,-%]	Prosječna širina uzorka [mm]	Prosječna dužina uzorka [mm]	Lomno naprezanje $\sigma_{cry, failure}$ [MPa]	Lomna temperatura $T_{failure}$ [°C]
TU Wien	K348A	+10	2507	1,4	40,40	161	5,44	-31,5
	K348B		2505	1,5	40,59	161	4,82	-31,7
	K348C		2503	1,5	40,29	161	5,05	-30,5
	K348D	+20	2513	1,1	40,64	161	5,07	-31,4
	K348F		2497	1,8	40,44	161	5,50	-31,4
	K348G		2512	1,2	40,27	161	4,99	-30,5
ZAG Ljubljana	001	+20	2509	1,3	40,33	161	4,58	-27,0
	002		2504	1,5	40,42	161	4,45	-24,3
	003		2501	1,6	40,38	161	4,83	-26,8
Prosjek - x			2505,67	1,43	40,42	161,0	4,97	-29,46
Standardna devijacija - s			5,17	0,21	0,13	0,0	0,35	2,71
Raspon - r			16	0,70	0,37	0,0	1,05	7,40

Na slikama 5.b i 6.b vidimo rezultate lomnog naprezanja i lomne temperature koji su dobiveni tijekom ispitivanja TSRST pri početnim temperaturama od $T_0 = +10^\circ\text{C}$ i $T_0 = +20^\circ\text{C}$.

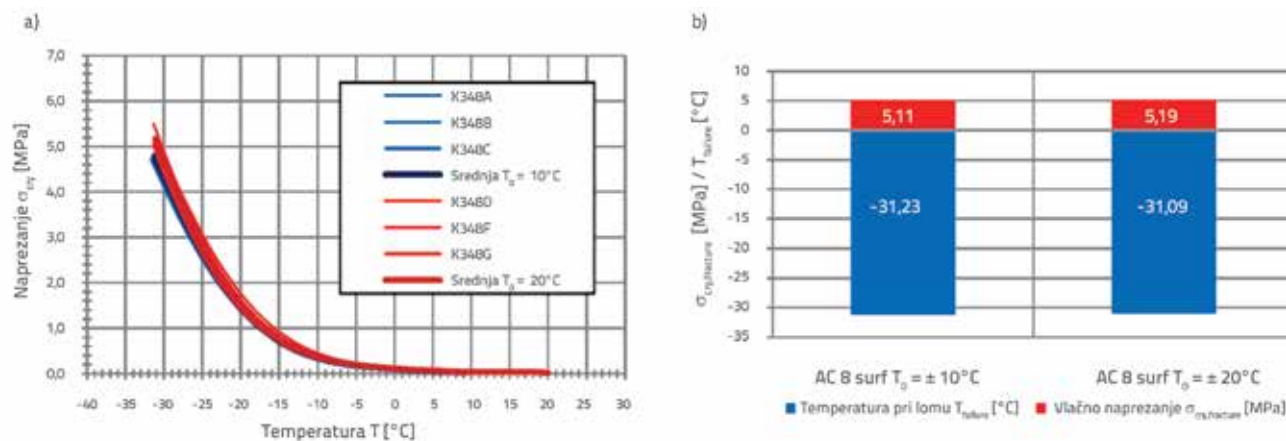
Krivulje naprezanje-temperatura prikazane su na slici 7.a za početnu temperaturu ispitivanja od $T_0 = +10^\circ\text{C}$ (plava linija) i $+20^\circ\text{C}$ (crvena linija). Obje krivulje se praktički podudaraju u



Slika 5. Rezultati ispitivanja TSRST pri početnoj temperaturi od $T_0 = +10^\circ\text{C}$: a) kriogeno naprezanje $\sigma_{cry}(T)$; b) lomno naprezanje $\sigma_{cry, failure}$ i lomna temperatura $T_{failure}$



Slika 6. Rezultati ispitivanja TSRST pri početnoj temperaturi od $T_0 = +20^\circ\text{C}$: a) kriogeno naprezanje $\sigma_{cry}(T)$; b) lomno naprezanje $\sigma_{cry, failure}$ i lomna temperatura $T_{failure}$



Slika 7. Rezultati ispitivanja TSRST pri početnoj temperaturi od $T_0 = +10^\circ\text{C}$ i $T_0 = +20^\circ\text{C}$: a) kriogeno naprezanje $\sigma_{cry}(T)$; b) lomno naprezanje $\sigma_{cryfailure}$ i lomna temperatura $T_{failure}$

zoni popuštanja. U elastičnoj se zoni krivulje malo razdvajaju, ali ipak ostaju unutar očekivanih vrijednosti. Rezultati lomnog naprezanja i lomne temperature grafički su prikazani na slici 7.b gdje se može uočiti da su rezultati slični. Do određene temperature, asfaltnu mješavinu karakteriziraju unutarnji pomaci koji ne dovode do vidljivih promjena vanjskog oblika (pojava koju nazivamo popuštanjem). Između temperatura od $+10^\circ\text{C}$ i $+20^\circ\text{C}$, te karakteristike popuštanja mješavine smanjuju inducirano toplinsko naprezanje u asfaltnim uzorcima, pa su stoga razlike između vrijednosti TSRST praktički zanemarive pri početnim temperaturama od $+10^\circ\text{C}$ i $+20^\circ\text{C}$.

Ako se tijelo odlikuje jednom dimenzijom koja je puno veća od druge dvije, tada se dvije manje dimenzije mogu zanemariti, pa se u obzir uzima samo povećanje dužine. Promjenu dužine tijela Δx u ovisnosti o promjeni temperature možemo definirati na sljedeći način:

$$\Delta x = \alpha_T \cdot x \cdot \Delta T \quad (1)$$

gdje je x početna dužina tijela, ΔT je promjena temperature, a α_T je koeficijent toplinskog istezanja.

Ako u jednadžbu (1) unesemo vrijednosti: $x = 161$ mm (dužina asfaltnog uzorka), $\Delta T = +20^\circ\text{C} - (+10^\circ\text{C}) = 10^\circ\text{C}$, i $\alpha_T = 2.2 \times 10^{-5}$ [5] (koeficijent toplinske ekspanzije asfaltbetona), tada promjena dužine uzorka iznosi $\Delta x = 0.0354$ mm. Prema zahtjevima iz EN 12697-46 koji se odnose na rezoluciju LVDT senzora ($0.5 \mu\text{m} = 0.0005$ mm), taj bi se pomak trebao izmjeriti, a prvobitna dužina uzorka trebala bi se kontrolirati pomoću ispitnog uređaja. Stoga možemo zaključiti da oprema ne utječe na rezultate pri početnoj temperaturi od $T_0 = +10^\circ\text{C}$.

3.2. Usporedba rezultata dobivenih u dva laboratorija

Na slici 8. vidimo krivulje naprezanja-temperature dobivene tijekom ispitivanja TSRST obavljenog na prizmatičnim

uzorcima asfaltbetona u laboratoriju ZAG (crvena krivulja) i u laboratoriju TU Wien (plava krivulja). Krivulje se dijele na dva dijela pri temperaturi od približno 5°C . Pri nižim temperaturama, krivulje su paralelne. Kod vlačnog naprezanja od 1.0 MPa temperaturna razlika između krivulja iznosi $5-6^\circ\text{C}$. Srednja krivulja dobivena u laboratoriju TU Wien je prosječna vrijednost od tri krivulje (K384D, K384F i K384G), a odgovarajuća jednadžba glasi:

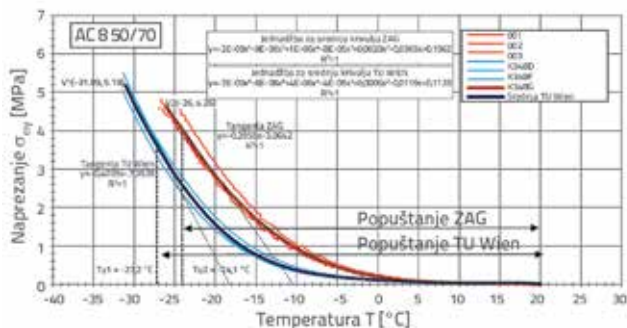
$$y_1(x) = -3E-09x^6 - 6E-08x^5 + 4E-06x^4 - 4E-05x^3 + 0,0006x^2 - 0,0119x + 0,1134 \quad (2)$$

Srednja krivulja dobivena u laboratoriju ZAG Ljubljana prosječna je vrijednost krivulja 001, 002 i 003, a jednadžba glasi:

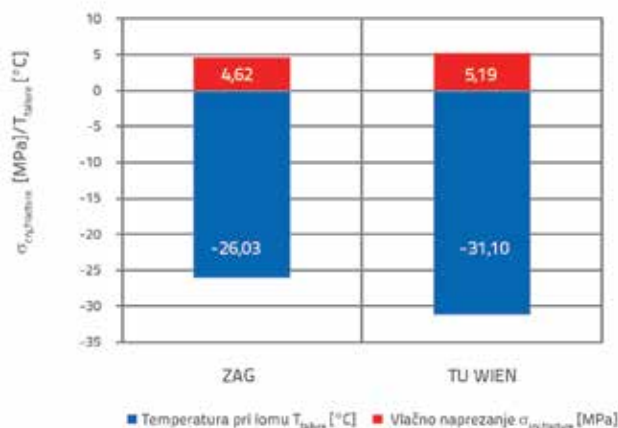
$$y_2(x) = -2E-09x^6 - 8E-09x^5 + 1E-06x^4 - 8E05x^3 + 0,0029x^2 - 0,0365x + 0,1962 \quad (3)$$

Ako se želi dobiti jednadžba tangente linije $y(x) = kx + n$ za krivulju na danoj točki u elastičnoj zoni, tada se treba izvesti funkcija krivulje $y(x)$. U ovom se istraživanju tangenta izračunava u točki loma V1 ($T_f = -31.09^\circ\text{C}$, $\sigma_{cry,f} = 5.19$ MPa) za TU Wien i u točki loma V2 ($T_f = -26^\circ\text{C}$, $\sigma_{cry,f} = 4.26$ MPa) za ZAG. Jednadžba obiju tangenti prikazana je na slici 8. Sjecište tangente i krivulje jest prelazna temperatura T_u . Prelazna temperatura iznosi $T_{u1} = -27.2^\circ\text{C}$ za TU Wien, tj. $T_{u2} = -24.1^\circ\text{C}$ za ZAG. Stoga se može reći da je zona popuštanja iz laboratorija TU Wien duža od one iz laboratorija ZAG Ljubljana. U elastičnoj je zoni nagib krivulje rezultata iz laboratorija TU Wien ($dS/dT = 0.4035$) nešto viši nego iz laboratorija ZAG ($dS/dT = 0.2955$). Na slici 9. vidimo rezultate ispitivanja TSRST pri početnoj temperaturi $T_0 = +20^\circ\text{C}$ za TU Wien i ZAG. Razlika prosječne lomne temperature T_f između TU Wien i ZAG iznosi 5°C , što je prema EN 12697-46 izvan dopuštenog raspona ($<2^\circ\text{C}$). Kod uzoraka iz laboratorija TU Wien, vlačno naprezanje je veće nego kod uzoraka iz laboratorija ZAG Ljubljana (za 0,57 MPa), što je izvan dopuštenog raspona ($<0,5$ MPa). U laboratoriju TU Wien dobiveni su rezultati TSRST koji pokazuju bolju otpornost na pojavu pukotina pri niskim temperaturama.

Sve te razlike mogu biti uvjetovane raznim faktorima kao što su pripremanje i lijepljenje uzoraka, rezolucija senzora LVDT, ili razlike u uređaju koji se koristi za obavljanje ispitivanja.



Slika 8. Rezultati ispitivanja TSRST pri početnoj temperaturi $T_0 = +20$ °C za TU Wien i ZAG Ljubljana: kriogeno naprežanje $\sigma_{cr}(T)$



Slika 9. Rezultati ispitivanja TSRST pri početnoj temperaturi $T_0 = +20$ °C za TU Wien i ZAG Ljubljana: lomno naprežanje $\sigma_{cr/failure}$ i lomna temperatura $T_{failure}$

4. Zaključak

U radu su prikazani rezultati ispitivanja vlačnog naprežanja pridržanih uzoraka (TSRST) koja su obavljena na uzorcima asfaltbetona AC 8 koji sadrži bitumen 50/70, i to za dvije početne temperature ispitivanja: $T_0 = +10$ °C i $T_0 = +20$ °C. Analiza rezultata ispitivanja TSRST obavljenih u laboratoriju TU Wien pokazuje da nema razlika između tih dviju početnih temperatura te da su rezultati unutar granica točnosti koje su zadane u normi EN 12697-46. Na Sveučilištu Nevade u Renou ustanovljeno je da je utjecaj različitih početnih temperatura ($T_0 = +5$ °C i $+20$ °C) manji od utjecaja različitih brzina hlađenja [7]. U zoni popuštanja može se reći da su obje krivulje ($T_0 = +10$ °C i $+20$ °C) dijagrama naprežanje-temperatura podudarne. U elastičnoj zoni krivulje su donekle razmaknute, ali ipak ostaju unutar očekivanih vrijednosti. Kako je pri temperaturama od $+10$ °C i $+20$ °C viskozna komponenta dominantna u asfaltnoj mješavini, te kako karakteristike popuštanja asfaltna mješavine umanjuju inducirano toplinsko naprežanje, razlika između ispitivanja TSRST pri početnim temperaturama od $+10$ °C i $+20$ °C može se smatrati zanemarivom.

Rezultati usporedbe rezultata ispitivanja koji su postignuti u laboratorijima ZAG - Ljubljana i TU Wien pokazuju da postoje značajne razlike, iako su oba laboratorija obavila ispitivanja u skladu s normom EN 12697-46. U ovom slučaju obje se krivulje, TU Wien i ZAG, razilaze kad je temperatura oko 5 °C, ali su paralelne pri nižim temperaturama. Kod vlačnog naprežanja od 1,0 MPa, temperaturna razlika između krivulja iznosi 5-6 °C. Zona popuštanja je u laboratoriju TU Wien duža nego u laboratoriju ZAG dok je u elastičnoj zoni nagib krivulje nešto viši u laboratoriju TU Wien. Sve te razlike mogle bi biti uvjetovane raznim faktorima (npr. lijepljenje uzoraka, oprema).

LITERATURA

- [1] The Shell Bitumen Handbook, 5th edition, Tomas Telford Publishing, London, pp. 196-199, 2003.
- [2] Spiegl, M.: Tieftemperaturverhalten von bituminösen Baustoffen – Labortechnische Ansprache und numerische Simulation des Gebrauchsverhaltens. Dissertation, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, Heft 19, Wien, pp. 13-17, 2008.
- [3] Arand, W.: Kälteverhalten von Asphalt; Teil 1: Bewertungshintergrund zur Beurteilung des Verhaltens von Walzasphalten bei Kälte; Teil 2: Einfluss der Zusammensetzung auf das Verhalten von Walzasphalten bei Kälte. Die Asphaltstraße - Das stationäre Mischwerk 21, 1987.
- [4] Kanerva, H.K., Vinson, T.S., Zeng, H.: SHRP - Strategic Highway Research Program: Low-Temperature Cracking: Field Validation of the Thermal Stress Restrained Specimen Test. (SHRP-A-401), National Research Council, Washington, pp. 7-8, 1994. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-401.pdf> (January, 2013)
- [5] Spiegl, M., Wistuba, M., Lackner, R., Blab, R.: Risk assessment of low-temperature cracking of asphalt – an experimental study, 11th International Conference on fracture, Turin, Italy, 2005. <http://www.icf11.com/proceeding/EXTENDED/4546.pdf> (January, 2013)
- [6] Arand, W., Steinhoff, G., Eulitz, J., Milbradt, H.: Verhalten von Asphalten bei tiefen Temperaturen; Entwicklung und Erprobung eines Prüfverfahrens. Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ des Bundesministers für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Heft 407, Bonn-Bad Godesberg, 1984.
- [7] Hajj, E.Y.: Updates on ARC Work Element E2d: Thermal Cracking Testing of Asphalt Mixtures, Asphalt Mixture & Construction Expert Task Group, University of Nevada Reno, Wisconsin – Madison, September 20-21, 2010., http://www.arc.unr.edu/Presentations/EYHajj_ARC_Update_Thermal_Cracking.pdf