

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



DOKTORSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM III. STOPNJE
GRAJENO OKOLJE

Kandidat:

DEJAN HRIBAR

**ANALIZA VPLIVA NIZKIH TEMPERATUR NA
ZNAČILNOSTI BITUMENIZIRANIH ZMESI ZA
OBRABNE PLASTI NA VOZIŠČIH**

Doktorska disertacija števil: 10/GO

**THE ANALYSIS OF THE IMPACT AT LOW
TEMPERATURES ON THE CHARACTERISTICS
OF WEARING COURSES BITUMINOUS MIXTURES
ON PAVEMENTS**

Doctoral thesis No.: 10/GO

Soglasje k temi doktorske disertacije je dala Komisija za doktorski študij Univerze v Ljubljani na 20. seji 21. septembra 2011.

Za mentorja je bil imenovan doc. dr. Marjan Tušar, Kemijski inštitut, za somentorja pa prof. dr. Janez Žmavc, UL FGG, upok.

Ljubljana, 16. junij 2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Janez Žmavc, UL FGG, upok.,
- izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov,
- doc. dr. Marjan Tušar, Kemijski inštitut,
- doc. dr. Andreja Zupančič Valant, UL FKKT,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 19. seji 30. marca 2011.

Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:

- izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov,
- izr. prof. dr. Marijan Žura,
- prof. dr. Goran Turk,
- doc. dr. Marjana Novič, Kemijski Inštitut in UL FKKT,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na konstitutivni seji 29. maja 2013.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- doc. dr. Marjan Tušar, Kemijski inštitut, mentor,
- prof. dr. Janez Žmavc, UL FGG, upok., somentor,
- izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov,
- izr. prof. dr. Marijan Žura,
- prof. dr. Goran Turk,
- doc. dr. Marjana Novič, Kemijski Inštitut in UL FKKT,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 11. seji 28. maja 2014.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **Dejan Hribar** izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom **Analiza vpliva nizkih temperatur na značilnosti bitumeniziranih zmesi za obrabne plasti na voziščih.**

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnih repozitorijih.

Ljubljana, 16. junij 2014

.....
(podpis)

ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
----------------	------------------	---------	--------

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 625.765:697.97:(043)
Avtor: mag. Dejan Hribar
Mentor: doc. dr. Marjan Tušar
Somentor: prof. dr. Janez Žmavc
Naslov: Analiza vpliva nizkih temperatur na značilnosti bitumeniziranih zmesi za obrabne plasti na voziščih
Obseg in oprema: 213 str., 57 pregl., 134 sl., 52 en.
Ključne besede: bitumenizirana zmes, nizke temperature, razpoke, statistika

Izvleček

Razpoke različnih oblik in velikosti sodijo med najbolj razširjene poškodbe na bitumeniziranih voziščih. Osnovni vzrok za nastanek razpok v bitumenizirani plasti je naraščanje nateznih in strižnih napetosti vse do točke prekoračitve trdnosti materiala. Eksperimentalni del disertacije začnemo z laboratorijskimi preskusi bitumeniziranih zmesi AC 8 surf in AC 11 surf pri nizkih temperaturah. Podane so ugotovitve vpliva deleža bitumna ter mehanskih lastnosti bitumenizirane zmesi na rezultate preskusov TSRST, UTST, največje rezerve natezne trdnosti in temperature pri največji rezervi. Nadaljujemo z analiziranjem vpliva različne začetne temperature pri preskusih TSRST izbrane bitumenizirane zmesi AC 8 surf. Preskusi so se izvajali na TU Wien. Predstavljeni sta dve mednarodni primerjalni analizi rezultatov preskusov pri nizkih temperaturah, izvedenih po standardu EN 12697-46, v laboratorijih TU Wien in Ramtech ter TU Wien in ZAG. Na podlagi ugotovitev analize podajamo predlog za izboljšavo standarda EN 12697-46. V okviru statističnih analiz predstavljamo analizo tolerance dolžine preskušanca, poglobljeno statistično analizo bitumeniziranih zmesi SMA, analizo največjega razpona gostote med tremi preskušanci za posamezen preskus in analizo mesta nastanka razpoke na preskušancu. Na koncu dela podajamo priporočila za nadaljnje znanstveno raziskovanje bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah s poudarkom na strižnih napetostih, ki delujejo ob kolesnici.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 625.765:697.97:(043)
Author: Dejan Hribar, M. Sc.
Supervisor: assist. prof. Marjan Tušar, Ph.D.
Co-supervisor: prof. Janez Žmavc, Ph.D.
Title: The analysis of the impact at low temperatures on the characteristics of bituminous mixtures for wearing courses on pavements
Notes: 213 p., 57 tab., 134 fig., 52 eq.
Key words: asphalt mixture, low temperature, cracks, statistics

Abstract

Cracks of various shapes and sizes are among the most widespread damages to road surfaces. The main reason for the formation of cracks in the asphalt layer is increasing tensile and shear stress to the point when the strength of the material exceeds. We begin the experimental part of the dissertation with laboratory tests of the asphalt mixture AC 8 surf and AC 11 surf at low temperatures. The thesis continues with findings of the effect of bitumen content, mechanical properties of the test results TSRST, UTST and maximum tensile strength reserves and temperatures at maximum reserve. Laboratory tests continue by analyzing the impact of different start temperature of the test TSRST to the asphalt mixture AC 8 surf at 6.2 m. -% content of bitumen. The tests were carried out at the TU Wien. The paper presents two international comparison analyses of the results at low temperatures, which were carried out at the standard EN 12697-46 between laboratories TU Wien - Ramtech and TU Wien - ZAG. Based on these findings we present a proposal to improve the standard EN 12697-46. The statistical analyses present the analysis of the specimen length tolerance, the statistical analysis of stone mastic asphalt (SMA) mixtures, the analysis of large scale bulk density of three samples for each test and the analysis where the crack occurred in the specimen. At the end of the work there are recommendations for further researches based on the shear stress at low temperatures on the asphalt pavements.

ZAHVALA

Za pomoč in nasvete pri nastajanju doktorske disertacije se iskreno zahvaljujem svojemu mentorju doc. dr. Marjanu Tušarju in somentorju prof. dr. Janezu Žmavcu.

Prav tako gre zahvala Gradbenemu inštitutu ZRMK s sodelavci in podjetju STRABAG, d. o. o., Slovenija – TPA, kontrola kakovosti in inovacij, g. Krniću.

Zahvaljujem se tudi kolegom iz ZAG-a, ge. Lukač, g. Ipavcu, g. Kmetu in g. Justinu, za pomoč pri izvajanju zahtevnih laboratorijskih preskusov. Zahvalil bi se tudi kolegom iz podjetij CGP, CM Celje, SGP Pomgrad, PMA, CPL, Primorje, DRI, DRSC in DARS, ki so prispevali različne podatke k disertaciji.

Hvala kolegom iz TU Wien (A), v prvi vrsti asist. dr. Hofku, prof. dr. Blabu, g. Georgiju Chankovu in g. Matthiasu Maderju, ter kolegom iz Ramtecha (HR), še posebej g. Šafranu za pomoč in ponujeno možnost izvajanja preskusov pri nizkih temperaturah.

Zahvaljujem se svoji družini, še posebej ženi, ki me je vseskozi bodrila in vsestransko podpirala pri mojem življenjskem cilju.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	II
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION	III
ZAHVALA	IV
1 UVOD	1
1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMATIKE	1
1.2 OPREDELITEV IZHODIŠČ IN CILJEV DELA	11
1.3 ZASNOVA DELA	13
2 PREGLED LITERATURE	14
2.1 PRESKUSI BITUMENIZIRANIH ZMESI PRI NIZKIH TEMPERATURAH	14
2.1.1 Statični preskusi.....	14
2.1.2 Oprema za preskušanje in njeno delovanje	15
2.1.3 Hitrost ohlajanja pri preskusu TSRST.....	20
2.1.4 Hitrost raztezka pri preskusu UTST	22
2.1.5 Oblika preskušancev	23
2.1.6 Natančnost preskusa in zahtevane mejne vrednosti	25
2.2 OBNAŠANJE BITUMENIZIRANIH ZMESI PRI NIZKIH TEMPERATURAH.....	25
2.2.1 Napetosti in deformacije.....	25
2.2.2 Vrste bitumeniziranih zmesi	30
2.2.3 Lastnosti bitumna	31
2.2.4 Mehanske lastnosti bitumeniziranih zmesi.....	34
2.2.5 Staranje	38
2.2.6 Vpliv temperaturnega raztezanja	39
2.3 STATISTIČNO VREDNOTENJE	42
2.3.1 Splošno	42
2.3.2 Intervali zaupanja	45
2.3.3 Grubbsov test.....	47
2.3.4 Analiza variance (ANOVA)	49
2.3.5 Metoda glavnih komponent (PCA).....	51
2.3.6 Metoda delnih najmanjših kvadratov (PLS).....	52

3	EKSPERIMENTALNI DEL.....	54
3.1	LABORATORIJSKI PRESKUSI.....	54
3.1.1	Preskušanje bitumna	54
3.1.2	Priprava bitumeniziranih zmesi in preskušancev za preskušanje	57
3.1.3	Statični preskusi bitumeniziranih zmes pri nizkih temperaturah	60
3.1.4	Posredna natezna trdnost (ITS)	64
3.2	MATERIAL.....	65
3.2.1	Bitumen	66
3.2.2	Zmes kamnitih zrn	67
3.2.3	Bitumenizirana zmes.....	73
4	REZULTATI IN ANALIZE PRESKUSOV.....	78
4.1	REZULTATI PRESKUSOV BITUMENIZIRANE ZMESI AC 11 SURF PRI NIZKIH TEMPERATURAH.....	78
4.2	REZULTATI PRESKUSA BITUMENIZIRANE ZMESI AC 8 SURF PRI NIZKIH TEMPERATURAH 83	
4.3	VPLIV DELEŽA BITUMNA PRI NIZKIH TEMPERATURAH	94
4.3.1	Bitumenizirana zmes AC 11 surf	94
4.3.2	Bitumenizirana zmes AC 8 surf	103
4.3.3	Primerjava bitumeniziranih zmesi AC 11 surf in AC 8 surf (ZAG).....	105
4.4	VPLIV MEHANSKIH LASTNOSTI BITUMENIZIRANIH ZMESI PRI NIZKIH TEMPERATURAH 109	
4.4.1	Bitumenizirana zmes AC 11 surf	109
4.4.2	Primerjava bitumeniziranih zmesi AC 11 surf in AC 8 surf.....	112
4.5	VPLIV RAZLIČNE ZAČETNE TEMPERATURE PRI PRESKUSU TSRST.....	114
4.6	PRIMERJALNA ANALIZA REZULTATOV MED LABORATORIJI	117
4.6.1	Primerjava rezultatov iz laboratorijev Ramtech in TU Wien	117
4.6.2	Primerjava rezultatov TSRST med laboratorijema ZAG in TU Wien.....	119
5	STATISTIČNA ANALIZA	121
5.1	STATISTIČNA ANALIZA DOLŽIN PRESKUŠANCEV	121
5.2	STATISTIČNA OBDELAVA REZULTATOV SMA PRI NIZKIH TEMPERATURAH	122
5.2.1	Podatki	123
5.2.2	Normalna porazdelitev	124

5.2.3	Studentova porazdelitev t	126
5.2.4	Analiza variance (ANOVA)	127
5.2.5	Metoda glavnih komponent (PCA).....	131
5.2.6	Metoda delnih najmanjših kvadratov (PLS).....	133
5.3	STATISTIČNA DOLOČITEV NAJVEČJEGA RAZPONA GOSTOTE Z VOTLINAMI PRESKUŠANCA	137
5.4	ANALIZA MESTA NASTANKA RAZPOKE V PRESKUŠANCU (TU WIEN)	140
6	SKUPNI ZAKLJUČKI IN DISKUSIJA	143
6.1	REZULTATI IN UGOTOVITVE PRESKUSOV IN ANALIZ.....	143
6.2	PRISPEVEK DOKTORSKE DISERTACIJE	148
6.3	PRIPOROČILA IN NAPOTKI ZA NADALJNJE DELO	150
7	POVZETEK.....	152
8	SUMMARY	153
	VIRI	154
	PRILOGE.....	164

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1.5.1: Dimenzije prizmatičnih in cilindričnih preskušancev (SIST EN 12697-46).....	24
Preglednica 2.1.6.1: Temeljne zahteve za obrabne bitumenizirane plasti (RVS 08.16.06:2012)	25
Preglednica 2.3.1.1: Odstopanja od mejne vrednosti lastnosti bitumeniziranih zmesi, vgrajenih v asfaltne krovne plasti (TSC 06.300/06.410:2009).....	43
Preglednica 2.3.1.2: Parametri za celotno populacijo in ustrezni statistični parametri za posamezne preskušance	44
Preglednica 2.3.3.1: Grubbove kritične vrednosti za enostranski test (Grubbs, 1969).....	48
Preglednica 3.2.1: Ciljne sestave bitumeniziranih zmesi	65
Preglednica 3.2.1.1: Lastnosti vhodnega cestogradbenega bitumna B50/70	66
Preglednica 3.2.1.2: Lastnosti cestogradbenega bitumna B50/70, ekstrahiranega iz zmesi AC 11 surf	67
Preglednica 3.2.1.3: Lastnosti cestogradbenega bitumna B50/70, ekstrahiranega iz zmesi AC 8 surf	67
Preglednica 3.2.2.1: Lastnosti drobljene kamene moke Calcit VP iz separacije Stahovica.....	68
Preglednica 3.2.2.2: Lastnosti posameznih frakcij drobljenih kamnitih zrn Ljubeščica iz nahajališča Hruškovec.....	69
Preglednica 3.2.2.3: Sejalna analiza zmesi kamnitih zrn 0/11 mm	69
Preglednica 3.2.2.4: Sejalna analiza zmesi kamnitih zrn 0/8 mm	70
Preglednica 3.2.2.5: Podatki o lastnostih zmesi kamnitih zrn 0/11 mm	72
Preglednica 3.2.2.6: Podatki o lastnostih zmesi kamnitih zrn 0/8 mm	72
Preglednica 3.2.3.1: Lastnosti bitumeniziranih zmesi AC 11 surf	74
Preglednica 3.2.3.2: Lastnosti bitumeniziranih zmesi AC 8 surf	75
Preglednica 4.2.1: Program preskusov TSRST in UTST bitumenizirane zmesi AC 8 surf	83
Preglednica 4.3.1.1: Rezultati preskusa TSRST bitumenizirane zmesi AC 11 surf (ZAG)	95
Preglednica 4.3.1.2: Rezultati preskusa UTST bitumenizirane zmesi AC 11 surf – natezna trdnost	97
Preglednica 4.3.1.3: Rezultati preskusa UTST bitumenizirane zmesi AC 11 surf – raztezek ob porušitvi	97
Preglednica 4.3.1.4: Rezultati rezerve natezne trdnosti bitumenizirane zmesi AC 11 surf	100
Preglednica 4.3.2.1: Rezultati preskusa TSRST bitumenizirane zmesi AC 8 surf.....	103
Preglednica 4.5.1: Rezultati preskusa TSRST pri različni začetni temperaturi preskusa.....	115
Preglednica 5.2.1.1: Rezultati preskusa pri nizkih temperaturah za SMA	123
Preglednica 5.2.3.1: Osnovna statistika	126
Preglednica 5.2.3.2: Rezultati dvovzorčne porazdelitve t (TSRST $\sigma_{cry,f}$)	126
Preglednica 5.2.3.3: Rezultati dvovzorčne porazdelitve t (TSRST T_f)	127
Preglednica 5.2.4.1: Osnovna statistika	127
Preglednica 5.2.4.2: Rezultati analize variance	129
Preglednica 5.2.5.1: Lastne vrednosti	131
Preglednica 5.2.5.2: Korelacije med spremenljivkami in faktorji.....	131
Preglednica 5.2.6.1: Kakovostni model	134
Preglednica 5.2.6.2: Matrika korelacij spremenljivk s komponentami t	134
Preglednica 5.3.2: Standardni odklon in razpon za UTST 20 °C (ZAG)	139
Preglednica 5.3.3: Izračun največjega dovoljenega razpona gostote z votlinami preskušancev za UTST 20 °C	139

Preglednica 5.4.1: Območja porušitev pri AC 8 surf – sestava 2 (5 m.-%).....	141
Preglednica 5.4.2: Območja porušitev pri AC 8 surf – sestava 4 (5,8 m.-%).....	141
Preglednica 5.4.3: Območja porušitev pri AC 8 surf – sestava 5 (6,2 m.-%).....	142
Preglednica A.4.1.1: Rezultati preskusov TSRST in rezerve natezne trdnosti bitumeniziranih zmesi AC 11 surf. 1	
Preglednica A.4.1.2: Rezultati preskusov UTST – sestava 1 (4 m.-%)	2
Preglednica A.4.1.3: Rezultati preskusov UTST – sestava 2 (5 m.-%)	2
Preglednica A.4.1.4: Rezultati preskusov UTST – sestava 3 (5,4 m.-%)	3
Preglednica A.4.1.5: Rezultati preskusov UTST – sestava 4 (5,8 m.-%)	3
Preglednica A.4.1.6: Rezultati preskusov UTST – sestava 5 (6 m.-%)	4
Preglednica B.4.2.2: Rezultati preskusov TSRST in rezerve natezne trdnosti bitumeniziranih zmesi AC 8 surf ...	1
Preglednica B.4.2.3: Rezultati preskusov UTST – sestava 1 (4 m.-%), ZAG	2
Preglednica B.4.2.4: Rezultati preskusov UTST – sestava 2 (5 m.-%), TU WIEN.....	3
Preglednica B.4.2.5: Rezultati preskusov UTST – sestava 2 (5 m.-%), RAMTECH.....	3
Preglednica B.4.2.6: Rezultati preskusov UTST – sestava 3 (5,4 m.-%), ZAG	4
Preglednica B.4.2.7: Rezultati preskusov UTST – sestava 4 (5,8 m.-%), TU WIEN.....	4
Preglednica B.4.2.8: Rezultati preskusov UTST – sestava 4 (5,8 m.-%), RAMTECH.....	5
Preglednica B.4.2.9: Rezultati preskusov UTST – sestava 5 (6,2 m.-%), ZAG	5
Preglednica D.5.1.1: Rezultati izmerjenih dolžin prizmatičnega preskušanca (ZAG)	2
Preglednica D.5.1.2: Rezultati izmerjenih dolžin prizmatičnega preskušanca (RAMTECH)	3
Preglednica E.5.2.5.3: Vrednosti faktorjev po laboratorijih	2
Preglednica F.5.3.1: Podatki o gostoti presk. in rezultati preskusa UTST za AC 11 surf in AC 8 surf (ZAG)	1

KAZALO SLIK

Slika 1.1.1: Absolutno najnižja temperatura zraka v obdobju med letoma 1951 in 2005 (ARSO, 2012).....	2
Slika 1.1.2: Najnižje temperature v 20-letnem obdobju (Žmavc, 2010).....	2
Slika 1.1.3: Povprečno letno dnevno število (PLDP) priklopnikov v obdobju 1998–2009 po avtocestnih krakih (Henigman, 2010a)	3
Slika 1.1.4: Podatki CVIS (DRSC) na cesti Gorica–Predel (most) z dne 20. 12. 2009	4
Slika 1.1.5: Rezultati rezerve natezne trdnosti na petih testnih avtocestnih odsekih v Sloveniji (Prosen, 2004)	5
Slika 1.1.6: Shematični prikaz značilnih napetosti v bitumeniziranih plasteh voziščne konstrukcije ob istočasni prometni in temperaturni obremenitvi v osi kolesnice (prerez 1-1) in v območju kolesnih sledi (prerez 2-2) (Arand, 2000).....	6
Slika 1.1.7: Poškodbe vozišča pri nizkih temperaturah: (a) Prečne razpoke pri nizkih temperaturah (Dame, 1999), (b) Prečna razpoka pri nizkih temperaturah – Babno Polje (SLO), februar 2012.....	7
Slika 1.1.8: Poškodbe vozišča pri nizkih temperaturah: (a) Vzдолžne razpoke pri nizkih temperaturah (Wistuba, 2012), (b) Vzдолžna razpoka pri nizkih temperaturah v območju kolesnih sledi – Babno Polje (SLO), februar 2012	8
Slika 1.1.9: Analiza napetosti na površini vozišča (Wistuba, 2012).....	8
Slika 1.1.10: Večnivojski model bitumna in bitumenizirane zmesi, ki obsega pet stopenj opazovanja (Jäger, 2004; Lackner in sod., 2005).	9
Slika 1.1.11: Zrnavostna krivulja za AC 11 surf in SMA 11	10
Slika 2.1.1.1: Preskusi za ugotavljanje termo-reoloških značilnosti bitumeniziranih preskušancev (Arand, 2002)	14
Slika 2.1.1.2: Združeni koncept nateznih napetosti z elastičnim območjem in nagibom tangente dS/dT (Arand, 1987, Spiegl in sod., 2005, Spiegl, 2008, Jung in sod., 1994)	15
Slika 2.1.2.1: Naprava za preskus pri nizkih temperaturah: (a) Raziskave Partla (Partl in sod., 1998), (b) Jung in Vinson (ZDA) (Marasteanu, 2007), (c) TU Braunschweig v Nemčiji, TU Wien v Avstriji (Spiegl, 2005) in Ramtech iz Zagreba (HR), (e) ZAG, Ljubljana (SLO)	17
Slika 2.1.2.2: Ocenjevanje temperature ob porušitvi za bitumenizirani beton po Hillsu in Brienu (1966) (Kanerva in sod., 1994)	20
Slika 2.1.2.3: V diagramu temperatura – napetost ocenjujemo rezervo natezne trdnosti iz preskusa UTST in TSRST (EN 12697-46).....	20
Slika 2.1.3.1: TSRST: (a) Natezna napetost za različne hitrosti ohlajanja (Jung in Vinson, 1994), (b) Rezultati nateznih napetosti pri preskusu TSRST za AC 11 surf B70/100 pri različnih hitrostih ohlajanja dT/dt (Büchler, 2010).....	21
Slika 2.1.4.1: UTST – povprečni potek nateznih napetosti glede na različne stopnje hitrosti raztezanja in temperature $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ za AC 11 surf B70/100 (Büchler, 2010)	22
Slika 2.1.5.1: Vpliv površine prereza preskušanca na največjo natezno napetost po Janoo 1989 (Jung in sod., 1994).....	23
Slika 2.1.5.2: Vpliv dimenzije preskušanca na temperaturo ob porušitvi in na natezno napetost ob porušitvi (Jung in sod., 1994)	23

Slika 2.1.5.3: (a) Preskušanci TSRST z različnimi oblikami prereza, (b) Vpliv oblike preskušanca na rezultate TSRST (Marasteanu in sod., 2007)	24
Slika 2.2.1.1: Padec napetosti (relaksacija) bitumenizirane zmesi AC 11 surf v odvisnosti od časa in temperature (Arand, 1983)	26
Slika 2.2.1.2: Mehanizem termičnih razpok (Read in sod., 2003).....	27
Slika 2.2.1.3: Primer odvisnosti napetost – raztezek pri nateznem preskusu pri štirih temperaturah (Karcher in Mollenhauer, 2009)	28
Slika 2.2.1.4: Osnovni prerez A_0 , poškodovana površina zaradi razpok A_R in zmanjšan prerez zaradi oslabitev A_S na preskušancu kvadratnega prereza (Mollenhauer, 2008).....	29
Slika 2.2.1.5: Porušitvena površina dveh preskušancev (0/22) pri preskusu UTST: (a) $T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Mollenhauer, 2008)	29
Slika 2.2.1.6: Shematični prikaz porušitve: (1) skozi kamnito zrno, (2) na stiku med kamnitim zrnem in bitumensko malto – adhezijska porušitev in (3) v sami bitumenski malti – kohezijska porušitev	30
Slika 2.2.2.1: Primerjava rezerve natezne trdnosti za različne bitumenizirane zmesi (Mollenhauer, 2008)	31
Slika 2.2.3.1: Primerjava rezultatov preskusa TSRST (Kumar Das, 2012).....	31
Slika 2.2.3.2: Videz mikrorazpok na podlagi AFM-skeniranja po termičnem utrujanju (Kumar Das, 2012)	32
Slika 2.2.3.3: (a) Korelacija med bitumnom in parametri zmesi pri nizki temperaturi (Des Croix, 2004), (b) Korelacija med točko pretrgališča po Fraassu in temperaturo ob porušitvi pri TSRST (Guericke in Höppel, 2001)	33
Slika 2.2.3.4: (a) Togost S pri BBR in (b) m-vrednost v povezavi s temperaturo ob porušitvi pri preskusu TSRST (Lacomte in sod., 2000).....	34
Slika 2.2.4.1: Temperatura ob porušitvi za AC 0/11 v odvisnosti od deleža polnila in bitumna, drobljenih zrn peska in točke zmehčišča bitumna PK ($r = 0,9014$). Primer: bitumen = 6,0 m.-%, polnilo = 9,8 m.-%, drobljeni pesek = 75 %, točka zmehčišča = $54\text{ }^{\circ}\text{C}$; rezultat: $T_f = -23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Arand, 2002).....	35
Slika 2.2.4.2: (a) Vpliv vsebnosti votlin na temperaturo ob porušitvi bitumenizirane zmesi v odvisnosti od vrste bitumna, (b) Vpliv deleža bitumna na temperaturo ob porušitvi bitumenizirane zmesi v odvisnosti od vrste bitumna, (c) Vpliv deleža bitumen – polnilo na temperaturo ob porušitvi in napetosti ob porušitvi bitumenizirane zmesi v odvisnosti od vrste bitumna (Spiegl, 2008).....	36
Slika 2.2.4.3: Temperatura ob porušitvi v primerjavi s penetracijo pri $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Jung in sod., 1994)	37
Slika 2.2.5.1: Vpliv s polimeri modificiranih veziv in staranja na značilnosti SMA pri nizkih temperaturah (Büchler in sod., 2007)	39
Slika 2.2.6.1: Časovno spreminjanje temperature in porazdelitev togosti v vozišču (Wistuba, 2012).....	40
Slika 2.2.6.2: Rezultati testiranja AB 11 (AC 11 surf): test krčenja za izpeljavo α_T (Spiegl in sod., 2005).....	41
Slika 2.3.2.1.2: Funkcija gostote verjetnosti za normalno porazdelitev (Sl. Wikipedija, 2012).....	46
Slika 2.3.2.2.1: Funkcija gostote verjetnosti za Studentovo porazdelitev t (Sl. Wikipedija, 2012).....	47
Slika 2.3.5.1: Primer v dvorazsežnem prostoru izhodiščnih spremenljivk X_1 in X_2 ter pripadajoči glavni komponenti Y_1 in Y_2 . Dvorazsežni prostor lahko spremenimo v enorazsežnega, ki ga določa Y_1 (Košmelj, 2007b, slika povzeta po Ferligoj, A.).	52
Slika 2.3.6.1: Geometrijski prikaz delovanja metode najmanjših delnih kvadratov (Bjerrum in sod., 2008)	53
Slika 3.1.1.1: Avtomatska oprema za preskušanje točke loma po Fraassu.....	55

Slika 3.1.1.2: Shematični prikaz opreme za preskus BBR (Justin in sod., 2010)	55
Slika 3.1.1.3: Graf podajnosti in togosti v odvisnosti od časa pri preskusu BBR (Grass, 2007)	56
Slika 3.1.2.1: (a) Laboratorijski mešalnik Rego, (b) Valjasti zgoščevalnik proizvajalca Cooper.....	57
Slika 3.1.2.2: (a) Plošča dimenzije $40 \cdot 30 \cdot 8 \text{ cm}^3$ po končanem zgoščevanju v valjčnem zgoščevalniku, (b) Iz plošče izrezani prizmatični preskušanci $4 \cdot 4 \cdot 16 \text{ cm}^3$	58
Slika 3.1.2.3: Priprava preskušanca v laboratoriju ZAG-a: (a) Nanos lepila na preskušane, (b) Pripravljeni preskušanci po lepljenju	59
Slika 3.1.2.4: Priprava preskušanca na TU Wien: (a) Nanos lepila na preskušane, (b) Pripravljeni preskušanci po lepljenju	60
Slika 3.1.2.5: Priprava preskušanca v Ramtechu: (a) Lepilo Loctite, (b) Pripravljeni preskušanci po lepljenju ...	60
Slika 3.1.3.1: Primer aparature za preskušanje natega pri nizkih temperaturah (SIST EN 12697-46)	61
Slika 3.1.3.2: IR-slika pred začetkom preskusa pri $T_0 = 10 \text{ °C}$	61
Slika 3.1.3.1.1: (a) Shema temperaturnega poteka pri preskusu TSRST (Spiegl, 2008), (b) Princip preskusa TSRST	62
Slika 3.1.3.2.1: (a) Shema temperaturnega poteka pri preskusu UTST (Spiegl, 2008), (b) Princip preskusa UTST	64
Slika 3.1.4.1: Oprema za ITS, ki jo uporabljajo na ZAG-u.	65
Slika 3.2.2.1: Deponije frakcij kamnitih zrn v asfaltnem obratu Drnovo pri Krškem	68
Slika 3.2.2.2: Presejne krivulje zmesi kamnitih zrn 0/11 mm	71
Slika 3.2.2.3: Presejne krivulje zmesi kamnitih zrn 0/8 mm	71
Slika 3.2.3.1: Shematični prikaz volumskega deleža votlin, bitumna in zmesi zrn	77
Slika 4.1.1: Rezultati preskusov TSRST in UTST ter rezerve nateznih napetosti (levo) in diagram sila – deformacija pri preskusu UTST (desno) za bitumenizirano zmes AC 11 surf	80
Slika 4.1.2: Skupni diagram napetost/trdnost – temperatura pri preskusih TSRST in UTST za AC 11 surf (ZAG)	82
Slika 4.1.3: Diagram rezerva natezne trdnosti – temperatura za AC 11 surf (ZAG)	82
Slika 4.1.4: Porušna površina preskušanca AC 11 surf B 50/70 pri preskusu UTST	83
Slika 4.2.1: Rezultati preskusov TSRST in UTST ter rezerve nateznih napetosti (levo) in diagram sila – deformacija pri preskusu UTST (desno) za AC 8 surf (ZAG)	85
Slika 4.2.2: Porušna površina preskušancev H1029 (sestava 3; 5,4 m.-%) in H1042 (sestava 1; 4 m.-%) bitumenizirane zmesi AC 8 surf	86
Slika 4.2.3: Prerez porušitve preskušancev H1029 (sestava 3; 5,4 m.-%) in H1042 (sestava 1; 4 m.-%) bitumenizirane zmesi AC 8 surf	87
Slika 4.2.4: Rezultati preskusov TSRST in UTST ter rezerve natezne napetosti (levo) in diagram sila – deformacija pri preskusu UTST (desno) za AC 8 surf (TU Wien)	88
Slika 4.2.5: Porušna površina preskušanca AC 8 surf, sestava 2 (5 m.-%), pri preskusu UTST 5 °C	89
Slika 4.2.6: Porušna površina preskušanca AC 8 surf, sestava 2 (5 m.-%), pri preskusu UTST -10 °C	90
Slika 4.2.7: Porušna površina preskušanca AC 8 surf, sestava 2 (5 m.-%), pri preskusu UTST -25 °C	90
Slika 4.2.8: Porušna površina preskušanca AC 8 surf, sestava 2 (5 m.-%), pri preskusu TSRST	91

Slika 4.2.9: Rezultat preskusov TSRST in UTST ter rezerva natezne napetosti (levo) in diagram sila – deformacija pri preskusu UTST (desno) za AC 8 surf (Ramtech).....	92
Slika 4.2.10: Diagram preskusa TSRST za AC 8 surf.....	93
Slika 4.2.11: Diagram preskusa UTST za AC 8 surf.....	93
Slika 4.2.12: Diagram rezerve natezne trdnosti za AC 8 surf.....	94
Slika 4.3.1.1: Rezultat preskusa TSRST za bitumenizirano zmes AC 11 surf v odvisnosti od deleža bitumna: (a) Največja natezna napetost, (b) Temperatura pri porušitvi	96
Slika 4.3.1.2: Preskus UTST bitumenizirane zmesi AC 11 surf: (a) Natezna trdnost β_t in (b) Raztezek ob porušitvi ε_t v odvisnosti od deleža bitumna	99
Slika 4.3.1.3a: Največja rezerva natezne trdnosti v odvisnosti od deleža bitumna za bitumenizirano zmes AC 11 surf	101
Slika 4.3.1.3b: Temperatura pri največji rezervi natezne trdnosti v odvisnosti od deleža bitumna za bitumenizirano zmes AC 11 surf	101
Slika 4.3.1.4a: Največja rezerva natezne trdnosti v odvisnosti od natezne napetosti ob porušitvi	102
Slika 4.3.1.4b: Temperatura pri največji rezervi trdnosti v odvisnosti od temperature pri porušitvi.....	102
Slika 4.3.1.5: Gostote z votlinami bitumenizirane zmesi ter preskušancev TSRST in UTST v odvisnosti od deleža bitumna za bitumenizirano zmes AC 11 surf	102
Slika 4.3.2.1: Preskus TSRST za bitumenizirano zmes AC 8 surf v odvisnosti od deleža bitumna: (a) Največje natezne napetosti, (b) Temperatura pri porušitvi	104
Slika 4.3.2.2: (a) Natezna trdnost in (b) Raztezek v odvisnosti od deleža bitumna pri bitumenizirani zmesi AC 8 surf (ZAG)	104
Slika 4.3.2.3: (a) Največje rezerve natezne trdnosti in (b) Temperature pri največji rezervi natezne trdnosti v odvisnosti od deleža bitumna	105
Slika 4.3.2.4: Diagram gostote z votlinami bitumenizirane zmesi ter preskušancev TSRST in UTST v odvisnosti od deleža bitumna.....	105
Slika 4.3.3.1: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf v odvisnosti od deleža bitumna: (levo) natezne napetosti ob porušitvi, (desno) temperatura pri porušitvi	106
Slika 4.3.3.2: Diagram funkcije natezna trdnost – delež bitumna pri bitumenizirani zmesi AC 11 surf.....	107
Slika 4.3.3.3: Diagram funkcije raztezek ob porušitvi – delež bitumna pri bitumenizirani zmesi AC 11 surf ...	108
Slika 4.3.3.4a: Diagram funkcije največje rezerve natezne trdnosti in deleža bitumna	108
Slika 4.3.3.4b: Diagram funkcije temperature pri največji rezervi natezne trdnosti in deleža bitumna	108
Slika 4.4.1.4a: Diagram v odvisnosti med natezno trdnostjo in gostoto preskušancev za AC 11 surf	110
Slika 4.4.1.4b: Diagram v odvisnosti med natezno trdnostjo in raztezkov ob porušitvi za AC 11 surf	110
Slika 4.4.1.8a: Diagram funkcije natezne napetosti ob porušitvi in togosti po Marshallu za AC 11 surf	111
Slika 4.4.1.8b: Diagram funkcije temperature ob porušitvi in togosti po Marshallu za AC 11 surf.....	111
Slika 4.4.1.9a: Diagram funkcije največje rezerve natezne trdnosti in togosti po Marshallu za AC 11 surf.....	112
Slika 4.4.1.9b: Diagram funkcije temperature pri največji rezervi in togosti po Marshallu za AC 11 surf.....	112
Slika 4.4.2.6: Diagram primerjave med AC 11 surf in AC 8 surf – graf natezne trdnosti v odvisnosti od raztezka ob porušitvi.....	113

Slika 4.5.1: Preskusa TSRST pri začetni temperaturi $T_0 = 10\text{ °C}$: (a) Natezna napetost $\sigma_{cry}(T)$, (b) Napetost ob porušitvi $\sigma_{cry,f}$ in temperatura ob porušitvi T_f	115
Slika 4.5.2: Preskusa TSRST pri začetni temperaturi $T_0 = 20\text{ °C}$: (a) Natezna napetost $\sigma_{cry}(T)$, (b) Napetost ob porušitvi $\sigma_{cry,f}$ in temperatura ob porušitvi T_f	116
Slika 4.5.3: Rezultati preskusa TSRST pri začetni temperaturi $T_0 = 10$ in 20 °C : (a) Natezna napetost $\sigma_{cry}(T)$, (b) Napetost ob porušitvi $\sigma_{cry,f}$ in temperatura ob porušitvi T_f	116
Slika 4.6.1.1: Primerjava rezultatov preskusov TSRST in UTST ter rezerve natezne trdnosti v laboratorijih Ramtech in TU Wien na preskušancih sestave 2 (5 m.-% bit.).....	118
Slika 4.6.1.2: Primerjava rezultatov preskusov TSRST v laboratorijih Ramtech in TU Wien na preskušancu sestave 4 (5,8 m.-% bit.)	118
Slika 4.6.1.3: Graf funkcije raztezek – temperatura pri preskusu UTST v laboratorijih Ramtech in TU Wien preskušanca sestave 2 (5 m.-% bit.).....	119
Slika 4.6.1.4: Graf funkcije raztezek – temperatura pri preskusu UTST v laboratorijih Ramtech in TU Wien preskušanca sestave 4 (5,8 m.-% bit.).....	119
Slika 4.6.2.1: Primerjava rezultatov preskusov TSRST na ZAG-u in TU Wien na preskušancu sestave 5 (6,2 m. % bit.).....	120
Slika 5.1.1: Krožna žaga z diamantnim rezilom za razrez preskušancev.....	121
Slika 5.1.2: Meritev dolžine prizmatičnega preskušanca.....	121
Slika 5.2.2.1: Histogrami rezultatov preskusov pri nizkih temperaturah za SMA.....	125
Slika 5.2.4.1: Diagram standardiziranih količnikov po spremenljivkah	130
Slika 5.2.5.1a: Diagram lastnih vrednosti in kumulativne variabilnosti	132
Slika 5.2.5.1b: Dvorazsežni prostor spremenljivk	132
Slika 5.2.5.2: Opazovanje (osi F1 in F2) po laboratorijih	133
Slika 5.2.6.1a: Kakovostni model po komponentah	134
Slika 5.2.6.1b: Korelacije s t na oseh t1 in t2	134
Slika 5.2.6.2: Najpomembnejša spremenljivka v projekciji (VIP)	135
Slika 5.3.1a: UTST – funkcija natezne trdnosti in prostorske gostote preskušanca	138
Slika 5.3.1b: UTST – funkcija raztezka ob porušitvi in prostorske gostote preskušanca	138
Slika 5.3.2: 3D-graf funkcije gostote z votlinami preskušanca, natezne trdnosti in raztezka ob porušitvi	138
Slika 5.4.1: Območje porušitve preskušanca pri preskusihih TSRST in UTST.....	140
Slika 6.3.1: Ideja in prototip naprave za določitev striga prizmatičnih preskušancev bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah	151
Slika C.4.4.1.1a: Diagram soodvisnosti med natezno napetostjo ob porušitvi in vsebnostjo votlin v preskušancu za AC 11 surf.....	2
Slika C.4.4.1.1b: Diagram soodvisnosti med temperaturo ob porušitvi in vsebnostjo votlin v preskušancu za AC 11 surf.....	2
Slika C.4.4.1.2a: Diagram soodvisnosti med največjo rezervo natezne trdnosti in vsebnostjo votlin v bitumenizirani zmesi za AC 11 surf.....	2
Slika C.4.4.1.2b: Diagram soodvisnosti med temperaturo pri največji rezervi natezne trdnosti in vsebnostjo votlin v bitumenizirani zmesi za AC 11 surf.....	2

Slika C.4.4.1.3a: Diagram soodvisnosti med natezno napetostjo ob porušitvi in povprečno gostoto z votlinami preskušanca za AC 11 surf.....	3
Slika C.4.4.1.3b: Diagram soodvisnosti med temperaturo ob porušitvi in povprečno gostoto z votlinami preskušanca za AC 11 surf.....	3
Slika C.4.4.1.5a: Diagram funkcije največje rezerve natezne trdnosti in gostote bitumenizirane zmesi za AC 11 surf.....	3
Slika C.4.4.1.5b: Diagram funkcije temperature pri največji rezervi in gostote bitumenizirane zmesi za AC 11 surf.....	3
Slika C.4.4.1.6a: Diagram funkcije natezne napetosti ob porušitvi in VFB za AC 11 surf.....	2
Slika C.4.4.1.6b: Diagram funkcije temperature ob porušitvi in VFB za AC 11 surf.....	2
Slika C.4.4.1.7a: Diagram funkcije največje rezerve natezne trdnosti in VFB za AC 11 surf.....	2
Slika C.4.4.1.7 b: Diagram funkcije temperature pri največji rezervi in VFB za AC 11 surf.....	2
Slika C.4.4.2.1a: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: natezne napetosti ob porušitvi v odvisnosti od vsebnosti votlin v preskušancu.....	3
Slika C.4.4.2.1b: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: temperature ob porušitvi v odvisnosti od vsebnosti votlin v preskušancu.....	3
Slika C.4.4.2.2a: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: največja rezerva natezne trdnosti v odvisnosti od vsebnosti votlin bitumenizirane zmesi.....	3
Slika C.4.4.2.2b: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: temperature pri največji rezervi v odvisnosti od vsebnosti votlin bitumenizirane zmesi.....	3
Slika C.4.4.2.3a: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: natezne napetosti ob porušitvi v odvisnosti od povprečne gostote z votlinami preskušancev.....	2
Slika C.4.4.2.3b: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: temperature ob porušitvi v odvisnosti od povprečne gostote z votlinami preskušancev.....	2
Slika C.4.4.2.4a: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: največja rezerva trdnosti v odvisnosti od gostote bitumeniziranih zmesi za AC 11 surf in AC 8 surf.....	2
Slika C.4.4.2.4b: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: temperature pri največji rezervi v odvisnosti od prostorske gostote bitumeniziranih zmesi za AC 11 surf in AC 8 surf.....	2
Slika C.4.4.2.5a: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: rezultat TSRST in največja rezerva trdnosti v odvisnosti od VFB.....	3
Slika C.4.4.2.5b: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: rezultat TSRST in temperature pri največji rezervi v odvisnosti od VFB.....	3

LIST OF TABLES

Table 2.1.5.1: Dimensions of prismatic and cylindrical specimen (SIST EN 12697-46)	24
Table 2.1.6.1: Fundamental requirements for HMA surface layers (RVS 08.16.06:2012).....	25
Table 2.3.1.1: Limit values of the properties of bituminous mixtures built in the asphalt wearing course (TSC 06.300/06.410:2009).....	43
Table 2.3.1.2: Parameters for the entire population and statistical adequate parameters for samples	44
Table 2.3.3.1: Grubbs critical value for one-sided test (Grubbs, 1969)	48
Table 3.2.1: Target compositions of asphalt mixtures	65
Table 3.2.1.1: Properties of bitumen B50/70	66
Table 3.2.1.2: Properties of bitumen B50/70 extracted from mixture AC 11 surf	67
Table 3.2.1.3: Properties of bitumen B50/70 extracted from mixture AC 8 surf	67
Table 3.2.2.1: Properties of filler Calcit VP of separation Stahovica	68
Table 3.2.2.2: Properties of aggregate mixture Ljubeščica from location Hruškovec	69
Table 3.2.2.3: Sieve analysis of mineral aggregate for 0/11 mm	69
Table 3.2.2.4: Sieve analysis of mineral aggregate 0/8 mm	70
Table 3.2.2.5: Properties of mineral aggregate 0/11 mm	72
Table 3.2.2.6: Properties of mineral aggregate 0/8 mm	72
Table 3.2.3.1: Properties of asphalt mixture AC 11 surf	74
Table 3.2.3.2: Properties of asphalt mixture AC 8 surf	75
Table 4.2.1: Program of TSRST and UTST test of the asphalt mixture AC 8 surf	83
Table 4.3.1.1: Results of TSRST test of the asphalt mixture AC 11 surf (ZAG)	95
Table 4.3.1.2: Results of UTST test of the asphalt mixture AC 11 surf – tensile strength	97
Table 4.3.1.3: Results of UTST test of the asphalt mixture AC 11 surf – failure strain	97
Table 4.3.1.4: Results of tensile strength reserve of the asphalt mixture AC 11 surf	100
Table 4.3.2.1: Results of TSRST test of the asphalt mixture AC 8 surf	103
Table 4.5.1: Results of some basic tests on rectangular specimen and TSRST test.....	115
Table 5.2.1.1: Results of test at low temperatures for SMA	123
Table 5.2.3.1: Basic statistic	126
Table 5.2.3.2: Results of two sample t-distribution (TSRST $\sigma_{cry,f}$)	126
Table 5.2.3.3: Results of two sample t-distribution (TSRST T_f)	127
Table 5.2.4.1: Basic statistic	127
Table 5.2.4.2: Results of analysis of variance.....	129
Table 5.3.5.1: Eigenvalues.....	131
Table 5.2.5.2: Correlations between variables and factors	131
Table 5.2.6.1: Model quality.....	134
Table 5.2.6.2: Correlation matrix of the variables with the t components	134
Table 5.3.2: Standard deviation and range for UTST 20 °C (ZAG)	139
Table 5.3.3: Calculated maximum range of specimens bulk density for UTST 20 °C	139
Table 5.4.1: Cracked area at AC 8 surf – Mixture 2 (5 m.-%)	141

Table 5.4.2: Cracked area at AC 8 surf – Mixture 4 (5.8 m.-%)	141
Table 5.4.3: Cracked area at AC 8 surf – Mixture 5 (6.2 m.-%)	142
Table A.4.1.1: Results of TSRST test and tensile strength reserve of the asphalt mixtures AC 11 surf	1
Table A.4.1.2: Results of UTST test – Mixture 1 (4 m.-%)	2
Table A.4.1.3: Results of UTST test – Mixture 2 (5 m.-%)	2
Table A.4.1.4: Results of UTST test – Mixture 3 (5,4 m.-%)	3
Table A.4.1.5: Results of UTST test – Mixture 4 (5.8 m.-%)	3
Table A.4.1.6: Results of UTST test – Mixture 5 (6 m.-%)	4
Table B.4.2.2: Results of TSRST test and tensile strength reserve of the asphalt mixtures AC 8 surf	1
Table B.4.2.3: Results of UTST test – Mixture 1 (4 m.-%), ZAG	2
Table B.4.2.4: Results of UTST test – Mixture 2 (5 m.-%), TU WIEN	3
Table B.4.2.5: Results of UTST test – Mixture 2 (5 m.-%), RAMTECH	3
Table B.4.2.6: Results of UTST test – Mixture 3 (5.4 m.-%), ZAG	4
Table B.4.2.7: Results of UTST test – Mixture 4 (5.8 m.-%), TU WIEN	4
Table B.4.2.8: Results of UTST test – Mixture 4 (5.8 m.-%), RAMTECH	5
Table B.4.2.9: Results of UTST test – Mixture 5 (6.2 m.-%), ZAG	5
Table D.5.1.1: Results of measurement of the length of prismatic sample (ZAG).....	2
Table D.5.1.2: Results of measurement of the length of prismatic sample (RAMTECH)	3
Table E.5.2.5.3: Factor scores by laboratory	2
Table F.5.3.1: Data of bulk density of samples and results of UTST test for AC 11 surf and AC 8 surf (ZAG)	1

LIST OF FIGURES

Figure 1.1.1: Absolutely the lowest air temperature for the period of 1951 and 2005 (ARSO, 2012)	2
Figure 1.1.2: The lowest temperature in the 20-year period (Žmavc, 2010)	2
Figure 1.1.3: Annual average daily number (AADT) of trailers for the period 1998–2009 by highway sections (Henigman, 2010a)	3
Figure 1.1.4: Data CVIS (DRSC) on the road Gorica–Predel (bridge) of 20. 12. 2009.....	4
Figure 1.1.5: Results of Tensile Strength Reserve of five testing highway sections in Slovenia (Prosen, 2004)	5
Figure 1.1.6: Schematic presentation of stresses characteristic in the asphalt layer at the same time traffic and thermal loading in the inside of load axis (section 1-1) and in the outside of load axis (section 2-2) (Arand, 2000)	6
Figure 1.1.7: Damage to pavements at low temperatures: (a) Transverse cracks at low temperatures (Dame, 1999), (b) Transverse cracks at low temperatures – Babno Polje (SLO), februar 2012	7
Figure 1.1.8: Damage to pavements at low temperatures: (a) Longitudinal cracking at low temperatures in the area the tire trackprint (Wistuba, 2012), (b) Longitudinal cracking at low temperatures in the outside of load axis – Babno Polje (SLO), februar 2012	8
Figure 1.1.9: Stress analysis at pavement surface (Wistuba, 2012).....	8
Figure 1.1.10: Multiscale model for bitumen and asphalt comprising five scales of observation (Jäger, 2004; Lackner et al., 2005).	9
Figure 1.1.11: Grading curve for AC 11 surf and SMA 11	10
Figure 2.1.1.1: Tests for Investigation of Thermo-rheological Behavior of Asphalt Specimens (Arand, 2002)	14
Figure 2.1.1.2: Concept of tensile stress with elastic zone and slope of tangent dS/dT (Arand, 1987, Spiegl et al., 2005, Spiegl, 2008 and Jung et al., 1994)	15
Figure 2.1.2.1: Test device for test at low temperature: (a) Researches of Partl (Partl et al., 1998), (b) Jung in Vinson (ZDA) (Marasteanu, 2007), (c) TU Braunschweig (D), TU Wien (A) (Spiegl, 2005) in Ramtech (CRO), (e) ZAG, Ljubljana (SI)	17
Figure 2.1.2.2: Estimating the fracture temperature of asphalt concrete by Hills and Brien (1966) (Kanerva et al., 1994).....	20
Figure 2.1.2.3: Principle of evaluating the tensile strength reserve from the test graphs of the UTST and the TSRST in the temperature-stress diagram (EN 12697-46)	20
Figure 2.1.3.1: TSRST: (a) Tensile stress for various cooling rates (Jung and Vinson, 1994), (b) Results of tensile stress at TSRST test for mixture AC 11 surf B70/100 for various cooling rates dT/dt (Büchler, 2010)	21
Figure 2.1.4.1: UTST – The average expiration of tensile stress in relation to different levels of strain speed and temperature $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ for AC 11 surf B70/100 (Büchler, 2010).....	22
Figure 2.1.5.1: Effect of specimen size on peak tensile stress after Janoo 1989 (Jung et al., 1994).....	23
Figure 2.1.5.2: Effect of specimen size on fracture temperature and fracture strength (Jung et al., 1994).....	23
Figure 2.1.5.3: (a) TSRST specimens with different shapes, (b) Influence of specimen shape in TSRST results (Marasteanu et al., 2007)	24
Figure 2.2.1.1: Stress drop (relaxation) of asphalt AC 11 surf as a function of time and temperature (Arand, 1983).....	26

Figure 2.2.1.2: Thermal cracking mechanism (Read et al., 2003).....	27
Figure 2.2.1.3: Example for stress – strain diagram of tension tests at four test temperatures (Karcher and Mollenhauer, 2009)	28
Figure 2.2.1.4: Original A_0 and damaged by cracking the surface A_R cross-sectional area A_S a prismatic specimen (Mollenhauer, 2008)	29
Figure 2.2.1.5: Fracture surfaces of two specimens (0/22) at UTST: (a) $T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Mollenhauer, 2008).....	29
Figure 2.2.1.6: Schematic show of failure: (1) through a stone grain, (2) the contact between the grain and bitumen mortar – adhesive failure, and (3) in a bituminous mortar – cohesion failure	30
Figure 2.2.2.1: Comparison of the tensile strength reserve for different asphalts mixtures (Mollenhauer, 2008). 31	
Figure 2.2.3.1: Comparison of TSRST test results (Kumar Das, 2012)	31
Figure 2.2.3.2: Evidence of micro-crack through AFM scanning after thermal fatigue loading (Kumar Das, 2012)	32
Figure 2.2.3.3: (a) Relationship between binder and mixture low temperature parameters (Des Croix, 2004), (b) Relationship between Fraass breaking point and TSRST failure temperature (Guericke and Höppel, 2001)	33
Figure 2.2.3.4: (a) BBR stiffness S and (b) m -value against TSRST failure temperature (Lacomte et al., 2000) . 34	
Figure 2.2.4.1: Fracture temperature of an asphalt concrete 0/11 depending on filler content, binder content, content of crushed stone and softening point ring and ball ($r = 0.9014$). Example: bitumen = 6.0 m.-%, filler = 9.8 m.-%, crushed stone = 75 %, softening point = $54\text{ }^{\circ}\text{C}$, Result: $T_f = -23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Arand, 2002).	35
Figure 2.2.4.2: (a) The effect of voids content at failure temperature of asphalt mix depending on the bitumen type, (b) the impact of the share of bitumen at the failure temperature of the asphalt mixture as a function of the bitumen type, (c) the impact of the share of bitumen-filler on the temperature at fracture and stress at failure of asphalt mixtures as a function of the bitumen type (Spiegl, 2008).....	36
Figure 2.2.4.3: Fracture temperature versus penetration at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Jung et al., 1994)	37
Figure 2.2.5.1: Impact of polymer modified binders and aging on the low temperature properties of stone mastic asphalts (Büchler et al., 2007)	39
Figure 2.2.6.1: Variation of temperature – time and stiffness distribution in the pavement (Wistuba, 2012).....	40
Figure 2.2.6.2: Results from testing of AB 11(AC 11 surf): shrinkage test to derive α_T (Spiegl et al., 2005)	41
Figure 2.3.2.1.2: Probability density function for a normal distribution (Sl. Wikipedia, 2012)	46
Figure 2.3.2.2.1: Probability density function for Student's t distribution (Sl. Wikipedia, 2012)	47
Figure 2.3.5.1: X_1 and X_2 are the original variable; the data are represented by points. Y_1 and Y_2 are the corresponding principal components. Two-dimensional space can be reduced to the one-dimensional space defined by Y_1 (Košmelj, 2007b, Figure by Ferligoj, A.).....	52
Figure 2.3.6.1: A geometric representation of partial least squares (PLS) regression (Bjerrum et al., 2008)	53
Figure 3.1.1.1: Automatic equipment for Fraass breaking point test.....	55
Figure 3.1.1.2: Equipment for Bending Beam Reometer test (Justin et al., 2010)	55
Figure 3.1.1.3: Deflection and stiffness graph of time at BBR test (Grass, 2007)	56
Figure 3.1.2.1: (a) The laboratory mixer Rego, (b) Roller compactor Cooper	57
Figure 3.1.2.2: (a) Plate dimensions $40\cdot30\cdot8\text{ cm}^3$ after the compaction of the roller compactor, (b) Cuts plate of the prismatic samples $4\cdot4\cdot16\text{ cm}^3$	58

Figure 3.1.2.3: Prepared samples on ZAG: (a) Application of glue on a sample, (b) Prepared samples after application of glue	59
Figure 3.1.2.4: Prepared samples on TU Wien: (a) Application of glue on a sample, (b) Prepared samples after application of glue	60
Figure 3.1.2.5: Prepared samples on Ramtech: (a) Glue Loctite, (b) Prepared samples after application of glue	60
Figure 3.1.3.1: Example of test device for tension test at low temperatures (SIST EN 12697-46)	61
Figure 3.1.3.2: IR photo before starting test at $T_0 = 10\text{ °C}$	61
Figure 3.1.3.1.1: (a) The temperature scheme of the TSRST (Spiegl, 2008), (b) Test principle of TSRST	62
Figure 3.1.3.2.1: (a) The temperature scheme of test UTST (Spiegl, 2008), (b) Principle of test UTST	64
Figure 3.1.4.1: Apparatus for ITS at ZAG	65
Figure 3.2.2.1: Landfill with stone aggregate fraction in asphalt plant in Krško Drnovo	68
Figure 3.2.2.2: Grading curve of mineral aggregate 0/11 mm	71
Figure 3.2.2.3: Grading curve of mineral aggregate 0/8 mm	71
Figure 3.2.3.1: Schematic volumetric presentation of voids, bitumen and mineral aggregate	77
Figure 4.1.1: Results of tests TSRST, UTST and tensile strength reserve (left) and diagram force – strain at UTST test (right) for AC 11 surf	80
Figure 4.1.2: Joint diagram stress/strength – temperature of TSRST and UTST tests for AC 11 surf (ZAG)	82
Figure 4.1.3: Diagram tensile strength reserve – temperature for AC 11 surf (ZAG)	82
Figure 4.1.4: Cracked area of the sample asphalt mixture AC 11 surf B 50/70 at UTST	83
Figure 4.2.1: Results of test TSRST, UTST and tensile strength reserve (left) and diagram force – strain at UTST test (right) for AC 8 surf (ZAG)	85
Figure 4.2.2: Cracked area of the sample H1029 (Mixture 3, 5.4 m.-%) in H1042 (Mixture 1, 4 m.-%) of asphalt mixture AC 8 surf	86
Figure 4.2.3: Cross section crack of the sample H1029 (Mixture 3, 5.4 m.-%) in H1042 (Mixture 1, 4 m.-%) of asphalt mixture AC 8 surf	87
Figure 4.2.4: Results of test TSRST, UTST and tensile strength reserve (left) and diagram force – strain at UTST test (right) for AC 8 surf (TU Wien)	88
Figure 4.2.5: Cracked area of the sample asphalt mixture AC 8 surf, Mixture 2 (5 m.-%), at UTST 5 °C	89
Figure 4.2.6: Cracked area of the sample asphalt mixture AC 8 surf, Mixture 2 (5 m.-%), at UTST -10 °C	90
Figure 4.2.7: Cracked area of the sample asphalt mixture AC 8 surf, Mixture 2 (5 m.-%), at UTST -25 °C	90
Figure 4.2.8: Cracked area of the sample asphalt mixture AC 8 surf, Mixture 2 (5 m.-%), at TSRST test	91
Figure 4.2.9: Results of test TSRST, UTST and tensile strength reserve (left) and diagram force – strain at UTST test (right) for AC 8 surf (Ramtech)	92
Figure 4.2.10: Diagram TSRST test for AC 8 surf	93
Figure 4.2.11: Diagram UTST test for AC 8 surf	93
Figure 4.2.12: Diagram tensile strength reserve for AC 8 surf	94
Figure 4.3.1.1: Results of TSRST test at AC 11 surf depending of the content of bitumen: (a) Maximum tensile stress, (b) Failure temperature	96
Figure 4.3.1.2: UTST test of AC 11 surf: (a) Tensile strength β_t depending and (b) Tensile failure strain ε_t depending of the content of bitumen	99

Figure 4.3.1.3a: Maximum tensile strength reserve depending of the content of bitumen for AC 11 surf.....	101
Figure 4.3.1.3b: Temperature at maximum tensile strength reserve depending of the content of bitumen for AC 11 surf.....	101
Figure 4.3.1.4a: Maximum tensile strength reserve depending of tensile stress of failure	102
Figure 4.3.1.4b: Temperature at maximum tensile strength reserve depending of failure temperature.....	102
Figure 4.3.1.5: Bulk density of asphalt mixture and samples TSRST and UTST depending of the content of bitumen for AC 11 surf.....	102
Figure 4.3.2.1: TSRST test at AC 8 surf depending of the content of bitumen: (a) Maximum tensile stress, (b) Failure temperature.....	104
Figure 4.3.2.2: (a) Tensile strength and (b) Strain depending of the content of bitumen for AC 8 surf (ZAG) ..	104
Figure 4.3.2.3: (a) Maximum tensile strength reserve and (b) Temperature at maximum tensile strength reserve depending of the content of bitumen	105
Figure 4.3.2.4: Diagram of bulk density of asphalt mixture and sample TSRST and UTST depending of the content of bitumen.....	105
Figure 4.3.3.1: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf depending of the content of bitumen: (left) tensile stress of failure, (right) failure temperature	106
Figure 4.3.3.2: Diagram function of tensile strength depending – bitumen content at AC 11 surf	107
Figure 4.3.3.3: Diagram function of failure strain depending – bitumen content at AC 11 surf	108
Figure 4.3.3.4a: Diagram depending of maximum tensile strength reserve and of the bitumen content	108
Figure 4.3.3.4b: Diagram depending of temperature at maximum tensile strength reserve and bitumen content	108
Figure 4.4.1.4a: Diagram depending of tensile strength and the bulk density of specimen at AC 11 surf	110
Figure 4.4.1.4b: Diagram depending of tensile strength and failure strain at AC 11 surf	110
Figure 4.4.1.8a: Diagram function of tensile stress and Marshall stiffness at AC 11 surf.....	111
Figure 4.4.1.8b: Diagram function of temperature of failure and Marshall stiffness at AC 11 surf	111
Figure 4.4.1.9a: Diagram function of max. tensile strength reserve and Marshall stiffness at AC 11 surf	112
Figure 4.4.1.9b: Diagram function of temperature at maximum reserve and Marshall stiffness at AC 11 surf ..	112
Figure 4.4.2.6: Diagram of comparison between AC 11 surf and AC 8 surf – graph of tensile strength depending of the failure strain	113
Figure 4.5.1 TSRST test at start temperature $T_0 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$: (a) Tensile stress $\sigma_{\text{cry}}(T)$, (b) Failure stress $\sigma_{\text{cry},f}$ and the failure temperature T_f	115
Figure 4.5.2 TSRST test at start temperature $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$: (a) Tensile stress $\sigma_{\text{cry}}(T)$, (b) Failure stress $\sigma_{\text{cry},f}$ and the failure temperature T_f	116
Figure 4.5.3 Results of TSRST test at start temperature $T_0 = 10$ and $20\text{ }^{\circ}\text{C}$: (a) Tensile stress $\sigma_{\text{cry}}(T)$, (b) Failure stress $\sigma_{\text{cry},f}$ and the failure temperature T_f	116
Figure 4.6.1.1: Comparison between results of TSRST, UTST test and tensile strength reserve between Ramtech and TU Wien on samples of Mixture 2 (5 m.-% bit.).....	118
Figure 4.6.1.2: Comparison between results of TSRST test between Ramtech and TU Wien on samples of Mixture 4 (5.8 m.-% bit.).....	118
Figure 4.6.1.3: Comparison between results of TSRST and UTST test between Ramtech and TU Wien on samples of Mixture 2 (5 m.-% bit.)	119

Figure 4.6.1.4: Comparison between results of TSRST and UTST test between Ramtech and TU Wien on samples of Mixture 4 (5.8 m.-% bit.).....	119
Figure 4.6.2.1: Comparison between results of TSRST test between ZAG and TU Wien on samples of Mixture 5 (6.2 m.-% bit.).....	120
Figure 5.1.1: Circular saw with diamond blade for cutting samples.....	121
Figure 5.1.2: Measurement of the length of prismatic sample.....	121
Figure 5.2.2.1: Histograms of the tests at low temperature for SMA	125
Figure 5.2.4.1: Diagram of standardized coefficients by variables.....	130
Figure 5.2.5.1a: Diagram of eigenvalue and cumulative variability	132
Figure 5.2.5.1b: 2D space of variables	132
Figure 5.2.5.2: Observation (axle F1 and F2) by the laboratory	133
Figure 5.2.6.1a: Model quality by number of components	134
Figure 5.2.6.1b: Correlations with t on axes t1 and t2	134
Figure 5.2.6.2: Variable importance in the projection (VIP)	135
Figure 5.3.1a: UTST – function of the bulk density of sample and tensile strength.....	138
Figure 5.3.1b: UTST – function of the bulk density of sample and strain at failure	138
Figure 5.3.2: 3D chart function of the bulk density of sample, tensile strength and strain at failure	138
Figure 5.4.1: Cracked area of the sample at TSRST and UTST test.....	140
Figure 6.3.1: Idea and prototype of shear device for prismatic asphalt samples at low temperatures	151
Figure C.4.4.1.1a: Diagram depending of tensile stress of failure and voids in sample at AC 11 surf.....	2
Figure C.4.4.1.1b: Diagram depending of failure temperature and voids in sample at AC 11 surf.....	2
Figure C.4.4.1.2a: Diagram depending of maximum tensile strength reserve and voids in asphalt mixture AC 11 surf.....	2
Figure C.4.4.1.2b: Diagram depending of temperature at maximum tensile strength reserve and voids in asphalt mixture AC 11 surf	2
Figure C.4.4.1.3a: Diagram depending of tensile stress of failure and average bulk density of specimen at AC 11 surf.....	3
Figure C.4.4.1.3b: Diagram depending of temperature at failure and average bulk density of specimen at AC 11 surf.....	3
Figure C.4.4.1.5a: Diagram depending of maximum tensile strength reserve and bulk density at AC 11 surf	3
Figure C.4.4.1.5b: Diagram depending of temperature at maximum tensile strength reserve and bulk density at AC 11 surf	3
Figure C.4.4.1.6a: Diagram function of tensile stress and VFB at AC 11 surf	2
Figure C.4.4.1.6b: Diagram function of temperature of failure and VFB at AC 11 surf.....	2
Figure C.4.4.1.7a: Diagram function of max. tensile strength reserve and VFB at AC 11 surf.....	2
Figure C.4.4.1.7b: Diagram function of temperature at maximum reserve and VFB at AC 11 surf.....	2
Figure C.4.4.2.1a: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: tensile stress at failure depending of voids in asphalt sample.....	3
Figure C.4.4.2.1b: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: temperature at failure depending of voids in asphalt sample.....	3

Figure C.4.4.2.2a: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: maximum tensile strength reserve depending of voids in asphalt mixture	3
Figure C.4.4.2.2b: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: temperature at maximum reserve depending of voids in asphalt mixture	3
Figure C.4.4.2.3a: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: tensile stress at failure depending of bulk density of samples	2
Figure C.4.4.2.3b: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: temperature at failure depending of bulk density of samples	2
Figure C.4.4.2.4a: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: max. strength reserve depending of the bulk density of asphalt mixture	2
Figure C.4.4.2.4b: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: temperature at max. strength reserve depending of the bulk density of asphalt mixture.....	2
Figure C.4.4.2.5a: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: results of TSRST and max. strength reserve depending of VFB.....	3
Figure C.4.4.2.5b: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: results of TSRST and temperature at max. reserve depending of VFB	3

SEZNAM PRILOG

Priloga A: Rezultati preskusov za AC 11 surf	A1
Priloga B: Rezultati preskusov za AC 8 surf	B1
Priloga C: Vpliv mehanskih lastnosti bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah	C1
Priloga D: Rezultati statistične analize dolžin preskušancev	D1
Priloga E: Rezultati statistične analize PCA	E1
Priloga F: Rezultati statistične analize razpona gostote preskušancev	F1

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

A2	... zelo težka in težka prometna obremenitev
(A)	... Avstrija
A_0	... osnovna površina prereza prizmatičnega preskušanca
A_S	... površina zmanjšanega prereza prizmatičnega preskušanca
AC	... bitumenski beton (ang. asphalt concrete)
ARSO	... Agencija RS za okolje
AFM	... mikroskop na atomsko silo (ang. atomic force microscope)
α	... alfa – stopnja tveganja
α_T	... temperaturni količnik raztezanja
α_k, α_j	... parameter polinoma
BSA	... oksidativno staranje bitumenizirane zmesi (nem. Braunschweiger Alterung)
BBR	... reometer z nosilcem, obremenjenim na upogib (ang. bending beam rheometer)
BZ	... bitumenizirana zmes
$B_{\min}$	... kategorija najmanjšega deleža bitumna [m.-%]
CVIS	... cestno-vremenski informacijski sistem
CVP	... cestno-vremenska postaja
d	... najmanjše zrno v zmesi
D	... največje zrno v zmesi
(D)	... Nemčija
DARS	... Družba za avtoceste v RS
DRSC	... Direkcija RS za ceste
E	... modul elastičnosti (togost)
F	... sila
G	... Grubbsov test
(HR), (CRO)	... Hrvaška
H_0	... ničelna domneva (hipoteza)
H_a	... alternativna domneva (hipoteza)
k	... toplotna prevodnost
L	... dolžina preskušanca

M	... srednja vrednost
m_b	... masni delež bitumna v zmesi
m_v	... masni delež votlin
m_z	... masa zmesi kamnitih zrn
m_1	... masa suhega preskušanca
m_2	... masa preskušanca, potopljenega v vodi
m_3	... masa zasičenega preskušanca, površinsko suhega
ρ_A	... gostota z votlinami preskušanca bitumenizirane zmesi po SIST EN 12697-6, predhodno nabitega z udarnim zgoščevalnikom po Marshallu (v asfalterški literaturi tudi poznana kot prostorska gostota = količnik mase (zgoščenega) materiala in njegove prostornine, vključno z votlinami in s porami, vključenimi v trdni snovi (Henigman in sod., 2011))
ρ_B	... gostota bitumna
ρ'_A	... največja gostota bitumenizirane zmesi (brez zračnih votlin) po SIST EN 12697-5
ρ_{Ap}	... gostota z votlinami preskušanca velikosti $4 \cdot 4 \cdot 16 \text{ cm}^3$ (vključno z zračnimi votlinami) po SIST EN 12697-6
ρ_w	... gostota vode
ρ_z	... gostota zmesi zrn
N	... velikost populacije
n	... velikost statističnega vzorca
P	... strukturni delež populacije
p	... strukturni delež statističnega vzorca
PA	... drenažna bitumenizirana zmes (ang. porous asphalt)
PCA	... metoda glavnih komponent (ang. principal component analysis method)
PG	... tip cestogradbenega bitumna po SHRP (ang. performance grade)
PK	... prstan – kroglica (ang. ring and ball)
PLDP	... povprečni letni dnevni promet
PLS	... metoda najmanjših delnih kvadratov (ang. partial least squares method)
PWL	... odstotek znotraj omejitev (ang. percent within limits)
R^2	... determinacijski količnik ali multivariatni korelacijski količnik
R^2_x	... vrednost spremenljivke X v smislu SS (vsota kvadratov) pri metodi PLS

SHRP	... Ameriški strateški razvojni program za avtoceste (ang. Strategic Highway Research Program)
SMA	... drobir z bitumenskim mastiksom (ang. stone mastic asphalt)
(SLO), (SI)	... Slovenija
S	... togost bitumna pri preskusu BBR
S1	... sestava 1 s 4 m.-% bitumna
S2	... sestava 2 s 5 m.-% bitumna
S3	... sestava 3 s 5,4 m.-% bitumna
S4	... sestava 4 s 5,8 m.-% bitumna
S5	... sestava 5 s 6 ali 6,2 m.-% bitumna
s^2	... varianca statističnega vzorca
s	... standardni odklon statističnega vzorca
$\bar{S}$	... povprečna širina preskušanca
T	... temperatura
T_f	... temperatura ob poružitvi pri preskusu TSRST
T_i	... temperatura preskusa UTST
T_0	... začetna temperatura preskusa TSRST
ΔT	... sprememba temperature
$T_{\Delta\beta tmax}$	... temperatura pri največji rezervi natezne trdnosti
t_{izra}	... izračunane vrednosti pri t-testu
t_{krit}	... kritične vrednosti pri t-testu
TSC	... Tehnične specifikacije za ceste
TSRST	... preskus termične napetosti ob preprečeni deformaciji preskušanca (ang. thermal stress restrained specimen tests) po standardu SIST EN 12697-46:2012
UTST	... preskus enosne natezne napetosti (ang. uniaxial tension stress test) po standardu SIST EN 12697-46:2012
V	... prostornina
V_B	... vsebnost bitumna v bitumenizirani zmesi
V_s	... prostornina kamnitih zrn
V_Z	... prostornina zmesi zrn v bitumenizirani zmesi
V_V	... vsebnost votlin v bitumenizirani zmesi
V_{Vmax}	... največja dovoljena vsebnost votlin v bitumenizirani zmesi po TSC

06.300/06.410:2009

V_{Ap}	... vsebnost votlin v preskušancu
VMA	... vsebnost votlin v zmesi kamnitih zrn
VFB	... vsebnost votlin v zmesi kamnitih zrn, zapolnjenih z bitumnom
VFB_{min}	... najmanjša dovoljena vsebnost votlin v zmesi kamnitih zrn, zapolnjenih z bitumnom, po TSC 06.300/06.410:2009 (SIST 1038-1)
VIP	... pomembne spremenljivke v projekciji (ang. variable importance in projection)
σ	... standardni odklon populacije
σ^2	... varianca populacije
σ_{cry}	... natezna napetost pri preskusu TSRST (standard SIST EN 12697-46:2012 navaja kot kriogensko natezno napetost)
$\sigma_{cry, f}$	... natezna napetost ob poružitvi pri preskusu TSRST (standard SIST EN 12697-46:2012 navaja kot kriogensko napetost ob poružitvi)
ε	... deformacija (raztezek, skrčec)
ε_f	... deformacija ob poružitvi pri preskusu UTST
β_t	... natezna trdnost ob poružitvi pri preskusu UTST
$\Delta\beta_t$	... rezerva natezne trdnosti (še razpoložljivo povečanje napetosti)
$\Delta\beta_{tmax}$	... največja rezerva natezne trdnosti
$x, \bar{x}$	... srednja vrednost statističnega vzorca
q	... toplotni tok
Q^2	... determinacijski količnik pri prečnem preverjanju po metodi izloči enega (Kononenko, 2005)
Z	... razred zmesi zrn
ZAS	... Združenje asfalterjev Slovenije
ZZ	... zmes kamnitih zrn
-----	... skrajna spodnja ali zgornja meja po TSC 06.300/06.410:2009 (SIST 1038-1) za prometno obremenitev A2

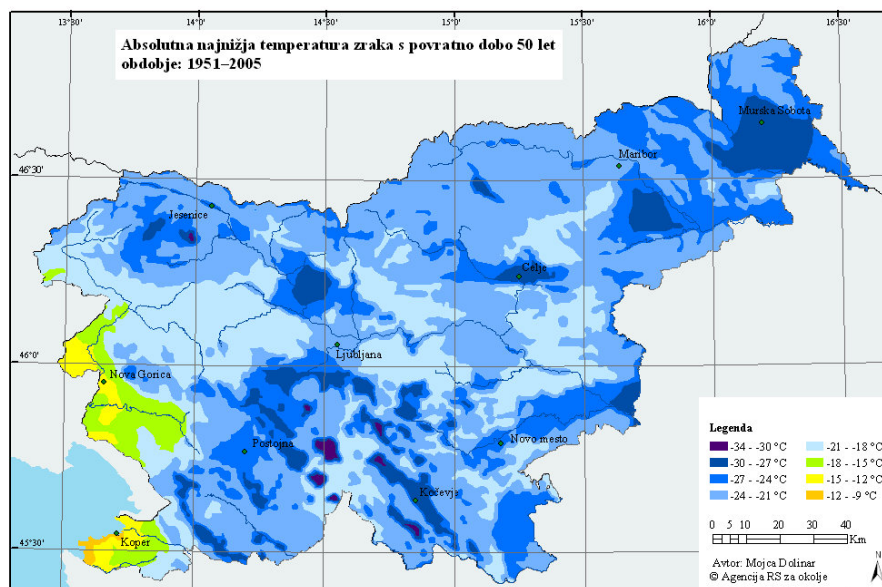
1 UVOD

1.1 Predstavitev problematike

Na slovenskih voziščih opazimo predvsem poškodbe v obliki trajnih deformacij (preoblikovanja) in razpok. Ljubič (2006) navaja, da v Sloveniji odpornost bitumeniziranih zmesi proti trajnim deformacijam pri visokih temperaturah preiskujemo že od leta 1997. Preskusi pri nizkih temperaturah pa so se v Sloveniji začeli kasneje (Ljubič, 2006).

Vzroki za nastanek razpok na bitumeniziranih vozniških površinah so številni in različni (Read in sod., 2003). Žmavc (2010) navaja, da razpoke razvrščamo glede na značilno obliko in mesto nastanka v krovni plasti. Vzroki za nastanek razpok na bitumeniziranih vozniških površinah so škodljive spremembe mehanskih, fizikalnih in kemijskih lastnosti vgrajenih materialov. V naravi se večina gradbenih materialov pri segrevanju razteguje in pri ohlajanju krči, tudi bitumenizirana zmes. Z nižanjem temperature je stanje vedno bolj podobno kot pri elastičnih materialih in v bitumenizirani zmesi natezna napetost narašča, če je bitumenizirana zmes toga vpeta. Ko natezna napetost preseže natezno trdnost materiala, nastane porušitev v obliki razpok (Arand, 2002). Te napetosti se od zgornjega roba bitumenizirane plasti proti spodnjemu nelinearno manjšajo (Žmavc, 2010), zato se razpoka širi od zgoraj navzdol (Read in sod., 2003). Pri nižjih temperaturah ($< -20\text{ }^{\circ}\text{C}$) je zaznavno zmanjšanje natezne trdnosti. Stanje je vedno bolj podobno, kot je pri elastičnih materialih. Bitumensko vezivo se zaradi nizkih temperatur krči in film bitumenskega veziva na kamnitih zrnih tanjša (Žmavc, 2010).

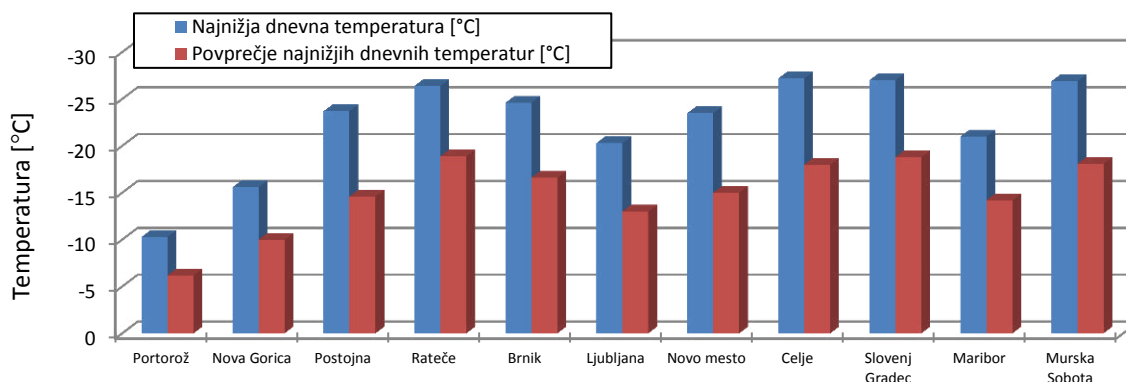
Po podatkih Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) je praktično na celotnem območju Slovenije absolutna najnižja izmerjena temperatura zraka (obdobje od 1951 do 2005) pod $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (slika 1.1.1 – modro obarvano). Izjema je del Primorske in Vipavske, kjer so temperature nekoliko višje. Najnižje temperature in največja verjetnost, da nastanejo razpoke prav zaradi nizkih temperatur, so na Gorenjskem v območju Triglavskega narodnega parka, Kamnika in Velike Planine, na Notranjskem in Dolenjskem v območju Vrhnike, Cerknice, Babnega Polja, Ribnice, Kočevja in Brežic, na Štajerskem v območju Celja, Rogle in Ptuja ter v Prekmurju v območju Murske Sobote pa vse tja do hrvaške in madžarske meje.



Slika 1.1.1: Absolutno najnižja temperatura zraka v obdobju med letoma 1951 in 2005 (ARSO, 2012)

Figure 1.1.1: Absolutely the lowest air temperature for the period of 1951 and 2005 (ARSO, 2012)

Žmavc (2010) v knjigi *Vzdrževanje cest* za posamezne slovenske kraje navaja najnižje dnevne temperature zraka, ki so bile izmerjene v preteklem 20-letnem obdobju (slika 1.1.2). Povprečna najnižja dnevna temperatura znaša $-22,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (mejni vrednosti $-10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-27,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) in povprečje najnižjih dnevni temperatur v tem obdobju je $-14,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (mejni vrednosti $-16,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-18,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Kar sedem od enajstih krajev ima najnižjo dnevno temperaturo pod $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.



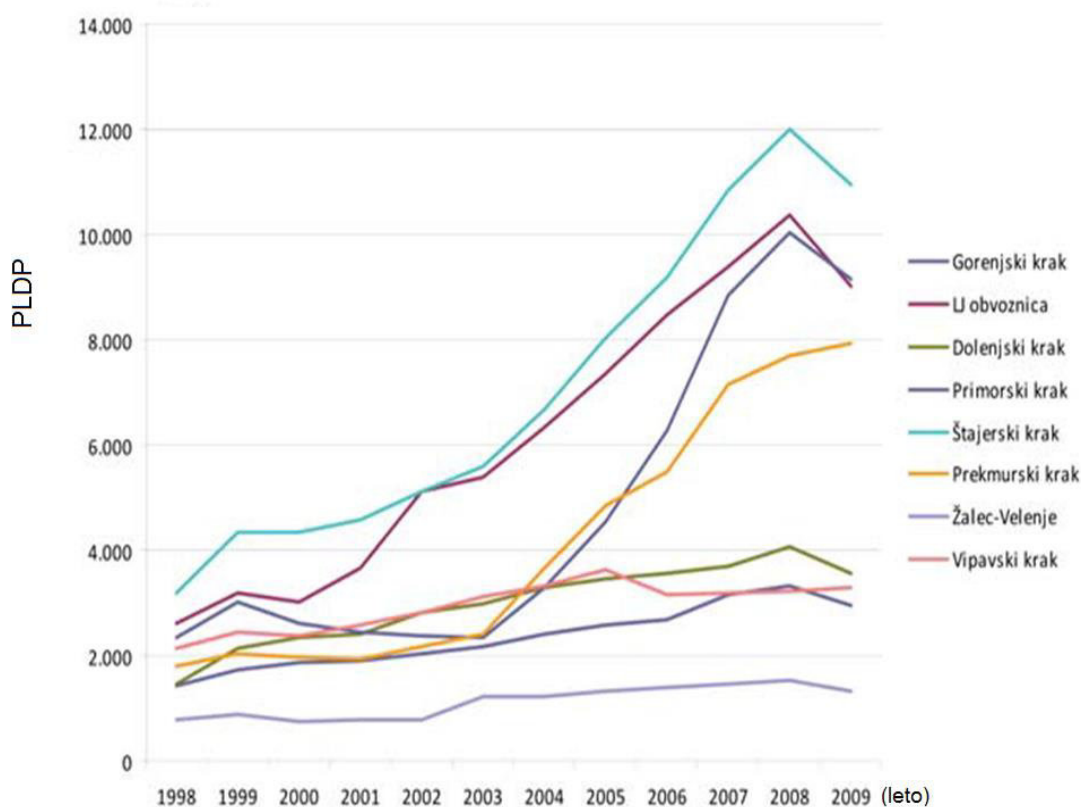
Slika 1.1.2: Najnižje temperature v 20-letnem obdobju (Žmavc, 2010)

Figure 1.1.2: The lowest temperature in the 20-year period (Žmavc, 2010)

Žmavc (2010) navaja, da je glede na mejno vrednost pretrgališča bitumenskega veziva po Fraassu, pogojeno v tehnični regulativi, za tako nizke temperature še primeren samo tip cestogradbenega bitumna B 160/220. Glede na to, da je v Sloveniji za obrabnozaporene

bitumenizirane plasti največkrat uporabljen cestogradbeni bitumen B 50/70 in B 70/100, lahko sklepamo, da natezne napetosti v številnih primerih lahko vplivajo na nastanek razpok na vgrajenih bitumeniziranih zmesih.

Poleg nizkih temperatur imamo v zadnjem obdobju v Sloveniji tudi občuten porast prometnih obremenitev, ki pospešuje nastanek razpok pri nizkih temperaturah. Henigman (2010a) navaja, da se je na slovenskih avtocestah v zadnjih desetih letih na posameznih avtocestnih krakih prometna obremenitev povečala (od načrtovane rasti od 3 do 4 % na leto) za 4- do 5-krat (med 16 in 17 % na leto). Na sliki 1.1.3 je prikazano povprečno letno dnevno število priklopnikov v obdobju od leta 1998 do 2009 po avtocestnih krakih.

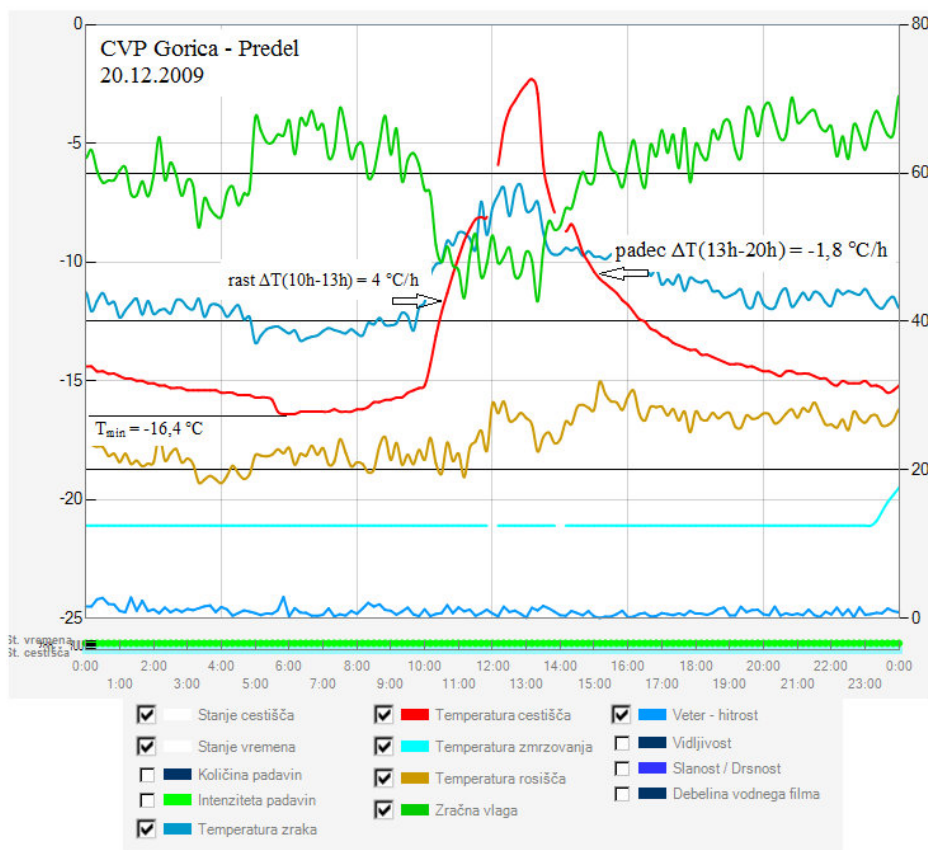


Slika 1.1.3: Povprečno letno dnevno število (PLDP) priklopnikov v obdobju 1998–2009 po avtocestnih krakih
(Henigman, 2010a)

Figure 1.1.3: Annual average daily number (AADT) of trailers for the period 1998–2009 by highway sections
(Henigman, 2010a)

Od leta 2008 dalje je v Sloveniji vzpostavljen Cestno-vremenski informacijski sistem CVIS, ki ga uporabljajo v Direkciji RS za ceste (DRSC) ter Družbi za avtoceste v RS (DARS) in omogoča enoten pregled nad stanjem vozišča na lokacijah cestno-vremenskih postaj (CVP). CVP imajo vgrajene merilnike za temperaturo zraka in vozišča (od 2 do 5 cm globoko v

obrabni plasti), vlažnost zraka, količino padavin, vidljivost, sončno sevanje in veter. Podatki se prek komunikacijske opreme zapisujejo v skupno bazo podatkov (Šajin, Slak, 2010). Od DRSC smo pridobili podatke o do sedaj izmerjeni najnižji temperaturi vozišča v Sloveniji. 20. 12. 2009 je bila na mostu na državni cesti Gorica–Predel izmerjena najnižja temperatura vozišča $-16,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, kar je prikazano na sliki 1.1.4. Tudi na začetku februarja 2012 je na tej lokaciji temperatura vozišča padla pod $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na sliki 1.1.4 vidimo, da je v sedmih urah temperatura upadla z $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ob 13^h) na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ob 20^h), torej je bila povprečna stopnja padanja temperature $1,8\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. Po pridobljenih podatkih DARS-a so bile v zimskem obdobju leta 2011 in 2012 najnižje izmerjene temperature v vozišču na avtocestnih CVP na lokacijah Divača $-13,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, Ivanje selo $-14,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, Podmežakla II $-14,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, Kresnica $-10,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Dobovo $-16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

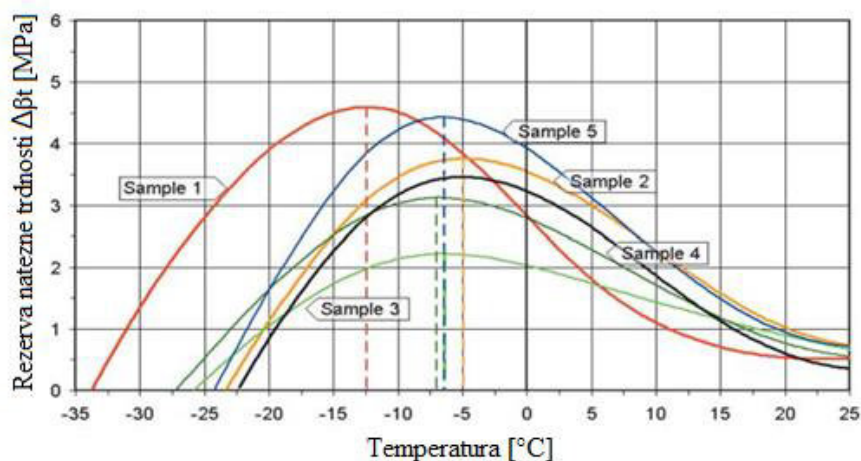


Slika 1.1.4: Podatki CVIS (DRSC) na cesti Gorica–Predel (most) z dne 20. 12. 2009

Figure 1.1.4: Data CVIS (DRSC) on the road Gorica–Predel (bridge) of 20. 12. 2009

Na avtocestnem odseku AC Razdrto–Postojna se je v letu 2003 prvič ugotovila občutna razpokanost vozne površine. Na podlagi teh ugotovitev se je pripravila razvojno-raziskovalna naloga (RRN) z naslovom Vpliv nizkih temperatur na trajnost asfaltnih zmesi (Prosen, 2004). Raziskava je zajela avtocestne odseke, stare pet let. Naloga je bila razdeljena na dva dela. Prvi

del RRN je vseboval nabor vseh razpoložljivih podatkov, ki se nanašajo na kakovost vgrajenih bitumeniziranih zmesi na podlagi standardnih preskusov s poudarkom na bitumenskem vezivu. Drugi del raziskovalne naloge je obsegal laboratorijsko preskušanje obnašanja bitumeniziranih plasti pri nizkih temperaturah. Ker v Sloveniji takrat še nismo imeli opreme za preskušanje odpornosti bitumeniziranih plasti pri nizkih temperaturah, so se preskusi izvedli na mednarodno uveljavljeni tehnični univerzi v Braunschweigu v Nemčiji. Analize so pokazale, da je v vseh primerih primerljiva sestava voziščne konstrukcije in podobna zrnastostna sestava zmesi kamnitih zrn. V obravnavanih bitumeniziranih zmesih pa so bili uporabljeni materiali različnega izvora. Rezultati analiz lastnosti in deleža uporabljenega bitumna v bitumeniziranih zmesih so v posameznih primerih pokazali pomembne razlike. Na odseku z največ poškodbami je bilo ugotovljeno, da ima vgrajena bitumenizirana zmes v primerjavi s preostalimi testnimi poškodovanimi odseki najmanjši delež bitumna z manjšo odpornostjo po Fraassu, manjšo duktilnost in manjšo največjo rezervo natezne trdnosti. V zaključku RRN avtor ugotavlja, da je odločilni razlog za nastanek razpok na enem od obravnavanih odsekov premajhen *delež bitumenskega veziva* (Prosen, 2004). Na sliki 1.1.5 so prikazani rezultati rezerve natezne trdnosti iz omenjene RRN, kjer ima preskušanec Sample 3 bitumenizirane zmesi SMA 8 najmanjšo rezervo natezne trdnosti.

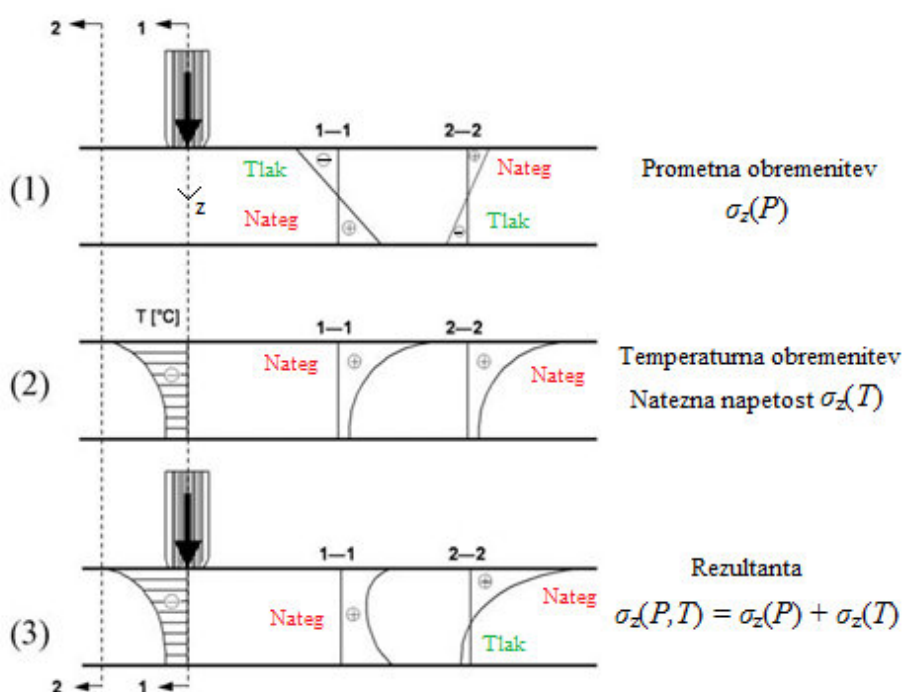


Slika 1.1.5: Rezultati rezerve natezne trdnosti na petih testnih avtocestnih odsekih v Sloveniji (Prosen, 2004)

Figure 1.1.5: Results of Tensile Strength Reserve of five testing highway sections in Slovenia (Prosen, 2004)

V Evropi je bil med prvimi raziskovalci W. Arand (TU Braunschweig), ki je že v 80. letih prejšnjega stoletja predstavil mehanizem nastanka razpok pri nizkih temperaturah in ga simuliral v laboratoriju. Napetosti, ki nastanejo v vozišču, so odvisne od prometne obremenitve in togosti materiala, ta pa je odvisna od temperature (Wistuba, 2013). Na sliki 1.1.6 so shematično prikazane posamezne napetosti v bitumeniziranih plasteh voziščne

konstrukcije zaradi delovanja upogibno-nateznih oz. mehanskih napetosti ((P – prometne obremenitve), $\sigma_z(P)$) in temperaturnih napetosti ((T – temperaturna obremenitev), $\sigma_z(T)$) ter rezultanta napetosti ob istočasni prometni in temperaturni obremenitvi ($\sigma_z(P,T) = \sigma_z(P) + \sigma_z(T)$) v osi kolesnice (prerez 1-1) in v območju kolesnih sledi (prerez 2-2). V prerezu 2-2 vidimo, da se zaradi delovanja prometne obremenitve na zgornjem robu (površini) bitumenizirane plasti ustvarja manjša natezna napetost. Zaradi delovanja nizkih temperatur na bitumenizirano zmes se termično inducirajo natezne napetosti, ki se nelinearno manjšajo po prerezu od zgornjega proti spodnjemu robu bitumenizirane plasti. Iz rezultante obeh obremenitev vidimo, da so največje natezne napetosti na zgornjem robu bitumenizirane plasti, ki povzročajo vzdolžne razpoke na vozišču.



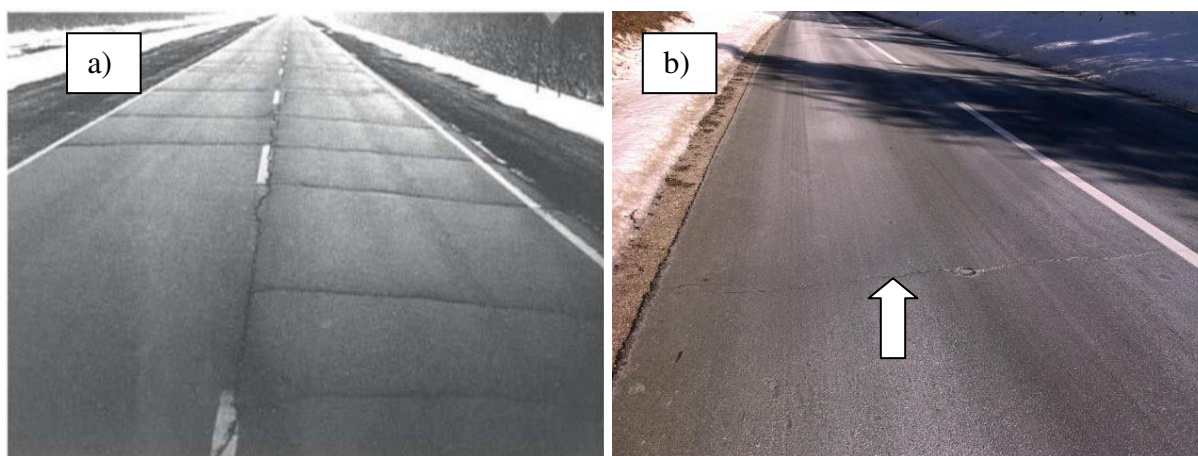
Slika 1.1.6: Shematični prikaz značilnih napetosti v bitumeniziranih plasteh voziščne konstrukcije ob istočasni prometni in temperaturni obremenitvi v osi kolesnice (prerez 1-1) in v območju kolesnih sledi (prerez 2-2) (Arand, 2000)

Figure 1.1.6: Schematic presentation of stresses characteristic in the asphalt layer at the same time traffic and thermal loading in the inside of load axis (section 1-1) and in the outside of load axis (section 2-2) (Arand, 2000)

Spiegl (2008) navaja, da ko je ob ohlajevanju razpoložljiva natezna trdnost v bitumenizirani plasti presežena, nastanejo prečne razpoke na določenem razmiku (slika 1.1.7a). Take razpoke so vidne tudi na državni cesti v kraju Babno Polje, ki je po podatkih Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO) najbolj mrzel kraj v Sloveniji (slika 1.1.7b). Spiegl (2008) tudi

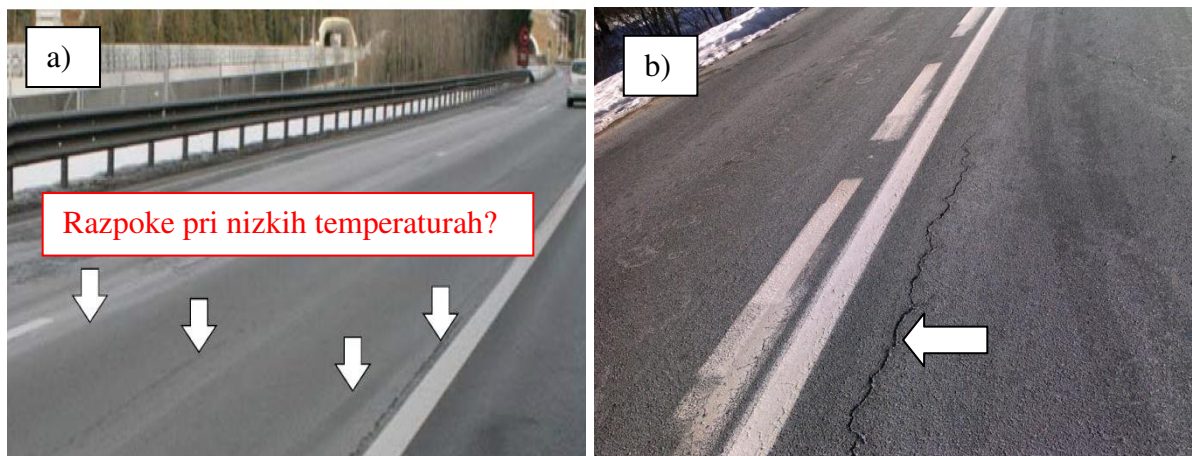
omenja, da če poleg nateznih napetosti, ki jih povzroči nizka temperatura, nastanejo v bitumenizirani plasti še napetosti, ki jih povzroči prometna obremenitev, lahko v območju kolesnih sledi (30–90 cm od osi kolesnice) nastanejo na zgornjem robu bitumenizirane plasti natezne napetosti, ki povzročijo vzdolžne razpoke. Tudi tovrstne razpoke so vidne na državni cesti v Babnem Polju (slika 1.1.8b). Wistuba (2002) navaja, da so v Avstriji nastale nizkotemperaturne razpoke v podnebnih območjih s temperaturo zraka pod -34°C in z največjo stopnjo ohlajanja $7,5^{\circ}\text{C/h}$.

Na delavnici ZAS-a o projektiranju voziščnih konstrukcij je Wistuba (2012) omenil, da so nove raziskave na TU Braunschweig v Nemčiji pokazale, da so natezne napetosti pri nizkih temperaturah premajhne, da bi povzročale vzdolžne razpoke, ki se širijo od zgoraj navzdol (slika 1.1.8a), ampak da nastanejo te zaradi strižnih napetosti pri višjih temperaturah. Le pri uporabi zelo trdih bitumnov in tankih bitumeniziranih plasti je vzdolžne razpoke mogoče analitično razložiti kot razpoke utrujanja, ki nastanejo pri nizkih temperaturah (slika 1.1.9).



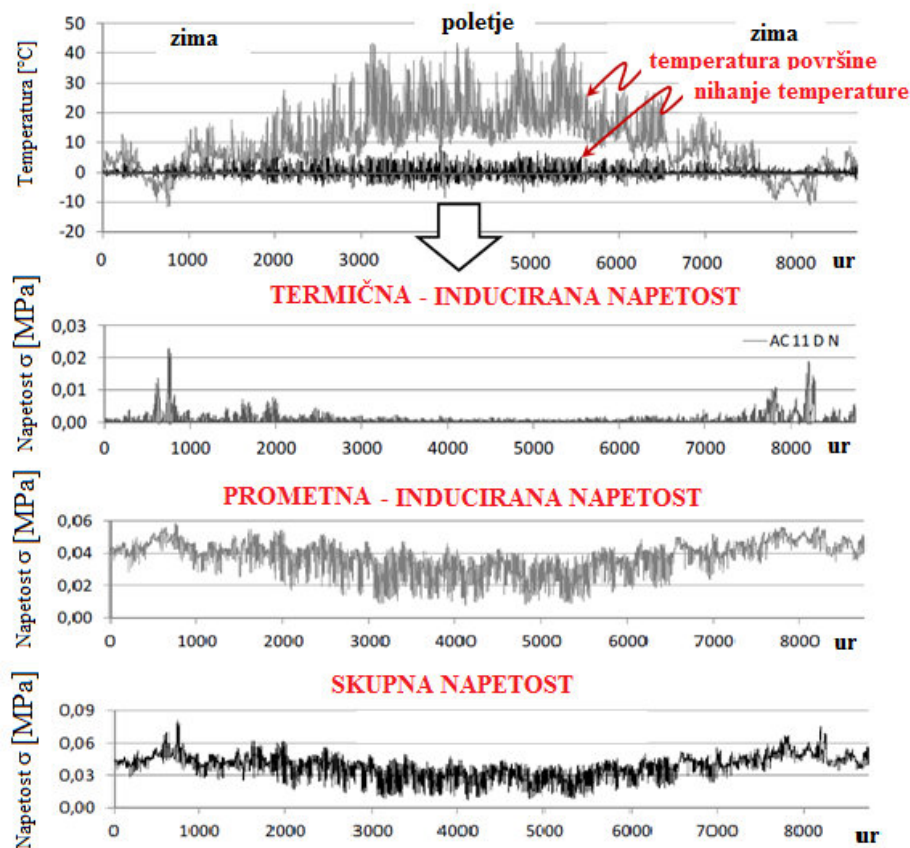
Slika 1.1.7: Poškodbe vozišča pri nizkih temperaturah: (a) Prečne razpoke pri nizkih temperaturah (Dame, 1999),
(b) Prečna razpoka pri nizkih temperaturah – Babno Polje (SLO), februar 2012

Figure 1.1.7: Damage to pavements at low temperatures: (a) Transverse cracks at low temperatures (Dame, 1999), (b) Transverse cracks at low temperatures – Babno Polje (SLO), februar 2012



Slika 1.1.8: Poškodbe vozišča pri nizkih temperaturah: (a) Vzдолžne razpoke pri nizkih temperaturah (Wistuba, 2012), (b) Vzдолžna razpoka pri nizkih temperaturah v območju kolesnih sledi – Babno Polje (SLO), februar 2012

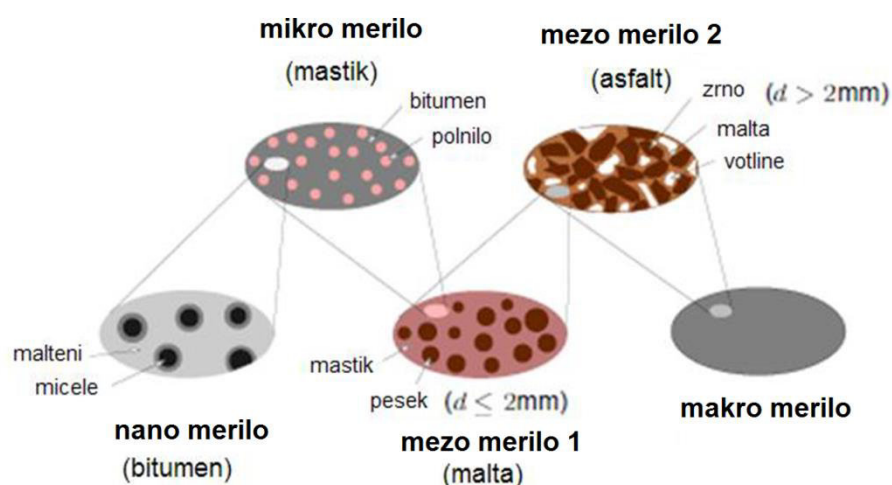
Figure 1.1.8: Damage to pavements at low temperatures: (a) Longitudinal cracking at low temperatures in the area the tire trackprint (Wistuba, 2012), (b) Longitudinal cracking at low temperatures in the outside of load axis – Babno Polje (SLO), februar 2012



Slika 1.1.9: Analiza napetosti na površini vozišča (Wistuba, 2012)

Figure 1.1.9: Stress analysis at pavement surface (Wistuba, 2012)

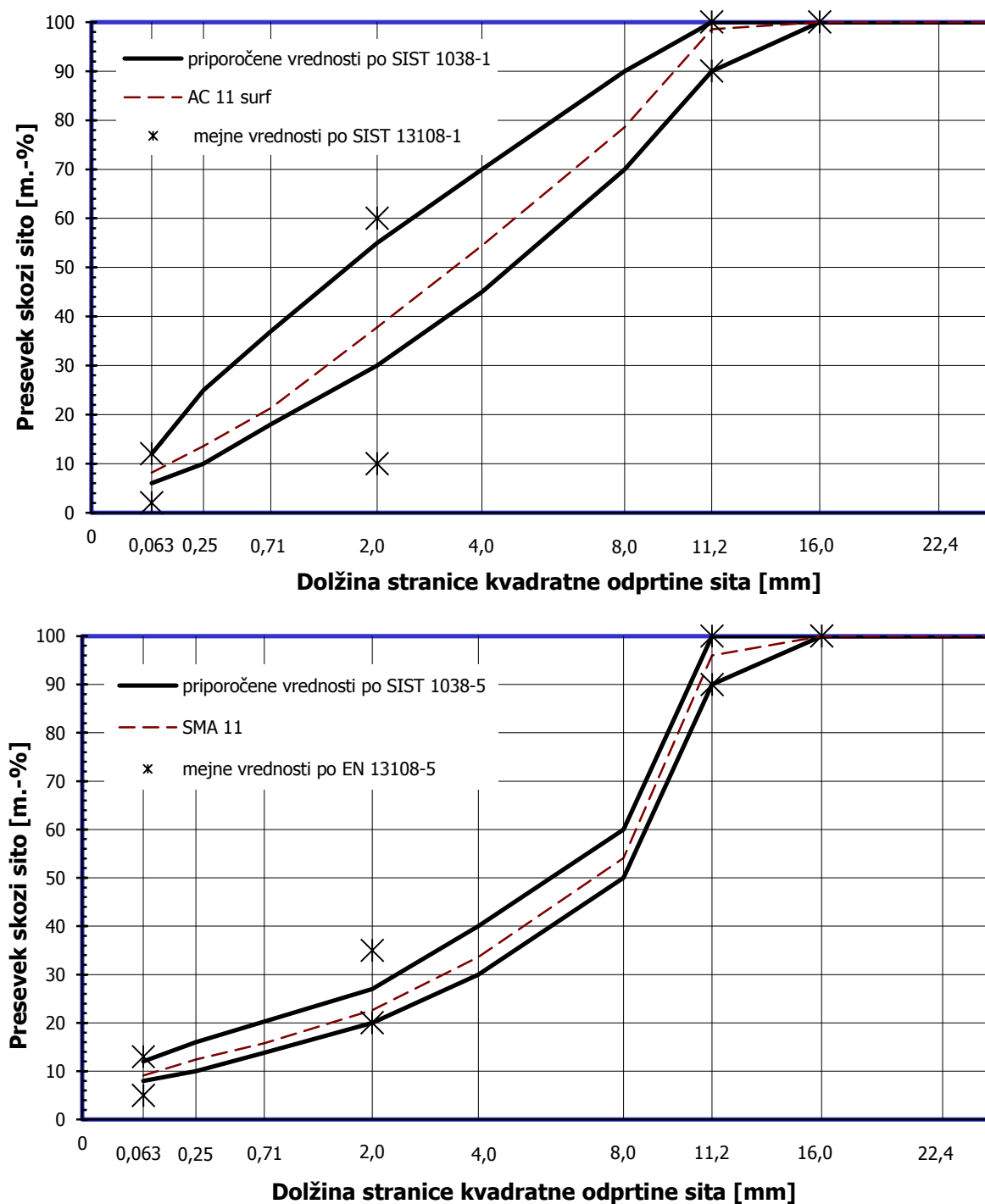
Pri nizkih temperaturah ima vgrajena bitumenizirana zmes zaradi oviranega lezenja (ang. creep) sposobnost relaksacije (zmanjšanja napetosti), kar lahko prepreči nastanek razpok zaradi termičnih skrčkov v mrzlem zimskem obdobju. Viskoznost bitumenizirane zmesi in zmožnost lezenja sta povezani predvsem z reološkim obnašanjem uporabljenega veziva. Nizkotemperaturne razpoke v bitumenizirani zmesi so povezane z bitumnom, zmesjo zrn in medsebojno interakcijo. Če želimo razumeti obnašanje posameznih sestavin v bitumenizirani zmesi, je treba obravnavati večnivojski model bitumenizirane zmesi, ki je predstavljen na sliki 1.1.10 (Spiegl in sod., 2005). Najnižje merilo materiala (bitumen) z dolžino nekaj μm sestavljajo velike molekule asfaltenov, ki so razporejene v maltenski matriki (Read in sod., 2003, Jäger, 2004). Naslednje višje merilo je mastik. Sestavljen je iz polnila (zmesi zrn premera, manjšega od $125\ \mu\text{m}$) in bitumna. Pesek (zmesi zrn s premerom pod $2\ \text{mm}$) z mastiksom se obravnava kot mezo merilo 1 (malta). Zmes zrn, večjih od $2\ \text{mm}$, in zračne votline so na nivoju bitumenizirane zmesi – asfalta (Spiegl in sod., 2005).



Slika 1.1.10: Večnivojski model bitumna in bitumenizirane zmesi, ki obsega pet stopenj opazovanja (Jäger, 2004; Lackner in sod., 2005).

Figure 1.1.10: Multiscale model for bitumen and asphalt comprising five scales of observation (Jäger, 2004; Lackner et al., 2005).

V doktorski disertaciji obravnavamo bitumenizirano zmes bitumenski beton (ang. asphalt concrete – AC) in drobir z bitumenskim mastiksom (ang. stone mastic asphalt – SMA). Bitumenizirani zmesi AC in SMA se razlikujeta predvsem po zrnastni sestavi. Prva ima enakomerno in druga diskontinuirno sestavo. Na sliki 1.1.11 je prikazan tipični graf sestave zmesi kamnitih zrn z mejnimi krivuljami za bitumenizirano zmes AC 11 surf in SMA 11, ki jih proizvajajo v asfaltnem obratu Drnovo (CGP, d. d.).



Slika 1.1.11: Zrnastostna krivulja za AC 11 surf in SMA 11

Figure 1.1.11: Grading curve for AC 11 surf and SMA 11

Slovenske tehnične smernice za ceste TSC 06.300/06.410:2009 navajajo, da moramo po zaključku posameznih del ali faz del v sklopu vgraditve bitumenizirane plasti opraviti statistično analizo rezultatov notranje in zunanje kontrole

- proizvedene bitumenizirane zmesi in
- vgrajene bitumenizirane zmesi.

Statistična analiza in primerjava le-te sta osnova za oceno skladnosti kakovosti in za morebitne reklamacije ter ukrepe. Končno oceno skladnosti rezultatov kontrolnih preskusov z zahtevami mora pripraviti izvajalec zunanje kontrole in jo predložiti nadzorniku (TSC 06.300/06.410).

Prve statistične obdelave rezultatov preskusov proizvedenih bitumeniziranih zmesi in vgrajenih bitumeniziranih plasti v Sloveniji segajo v leto 1986 z objavo poročila z naslovom Raziskave staranja bitumna, ki ga je pripravil Mitja Žorga (cit. po Tušar, M., in Žorga, M., 2000). Leta 1995 je bila izvedena medlaboratorijska analiza, ki jo je organiziralo Društvo asfalterjev, zdajšnji ZAS. V ZAS-u je bil leta 2000 izdan priročnik z naslovom Asfalt 4: Statistika v asfalterstvu (cit. po Tušar, M., in Žorga, M., 2000). V Sloveniji doslej še ni bila izvedena tako podrobna statistična analiza rezultatov preskusov bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah.

1.2 Opredelitev izhodišč in ciljev dela

V predlogu teme doktorske disertacije z dispozicijo je bilo v teoretičnem delu predstavljeno, da bo v doktorski disertaciji opisan teoretični model nastanka razpok pri nizkih temperaturah, ki sloni na visko-elastičnem obnašanju materialov po Burgerjevem modelu, ki mu je dodano staranje (ang. aging) – sprememba strukture veziva (asfaltenov, smol in olj) v bitumenizirani zmesi AC 11 surf B50/70. Prav tako je bilo predstavljeno, da bo z računalniškim programom ABAQUS analiziran teoretični model po metodi končnih elementov in rezultati nateznih napetosti primerjani z dejanskimi vrednostmi, dobljenimi v laboratoriju. Predstavljeno je bilo tudi, da bi raziskovali vpliv bitumenske malte (bitumen in polnilo) in sestave zmesi kamnitih zrn na značilnosti bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah. Za slednje bi bitumenizirano zmes pripravili tako, da bi bil delež bitumna enak, spreminjali bi le sestavo zmesi zrn v odvisnosti od Talbotovega eksponenta n . V oceni teme doktorske disertacije je bilo zapisano, da bo v teoretičnem delu predstavljen statistični model nastanka razpok pri nizkih temperaturah, ki sloni na univariatnem in multivariatnem modeliranju empiričnih rezultatov, in nekaterim modelom bo dodano staranje materiala, ki je posledica spremembe strukture veziva (asfaltenov, smol in olj) v bitumenizirani zmesi. Obravnavana bo zmes tipa AC 11 surf B50/70. Zaradi omejenih finančnih sredstev, materialov in opreme žal tega nismo mogli uresničiti, je pa v disertacijo vključena statistična obdelava empiričnih rezultatov preskusov pri nizkih temperaturah, izvedenih na bitumeniziranih zmesih SMA, ki so se

izvedli v štirih priznanih evropskih cestogradbenih laboratorijih. Ravno v času izvajanja preskusov je prešel predstandard oSIST prEN 12697-46:2009: Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi – 46. del: Odpornost asfaltne plasti proti razpokam pri nizkih temperaturah z enoosnimi nateznimi preskusi v standard SIST EN 12697-46:2012 z enakim naslovom, vendar se v ničemer ne razlikujeta.

Cilj doktorske disertacije je odgovoriti na nekaj bistvenih vprašanj:

- Ali delež bitumna v sestavi bitumenizirane zmesi vpliva na rezultate preskusov pri nizkih temperaturah za bitumenizirano zmes AC 8 surf in AC 11 surf in primerjava med njimi?
- Ali se lahko na podlagi rezultatov preskusov pri nizkih temperaturah določi minimalni potrebni delež bitumna?
- Kako vplivajo mehanske lastnosti vgrajenih bitumeniziranih plasti AC 8 surf in AC 11 surf na rezultate preskusov pri nizkih temperaturah in primerjava med njimi?
- Ali različna začetna temperatura T_0 morebiti vpliva na končni rezultat natezne napetosti ob porušitvi $\sigma_{cry,f}$ in temperature ob porušitvi T_f pri preskusu TSRST po standardu SIST EN 12697-46?
- Ali med različnimi laboratoriji po Evropi, ki izvajajo preskuse pri nizkih temperaturah po standardu EN 12697-46, obstajajo pomembne razlike?
- Z uporabo relevantnih statističnih metod želimo ugotoviti, ali obstajajo medsebojne povezave med rezultati raznih preskusov pri nizkih temperaturah in ali obstajajo razlike med laboratoriji.
- Z multivariatnim statističnim modeliranjem empiričnih rezultatov preskusov pri nizkih temperaturah, ki so bili izvedeni v laboratorijih v Sloveniji, Hrvaški, Avstriji in Nemčiji, želimo razviti statistični model največje rezerve natezne trdnosti in temperature pri največji rezervi za bitumenizirano zmes drobirja z bitumenskim mastiksom (SMA).

Pridobljena spoznanja se bodo lahko uporabila pri nadaljnjem načrtovanju in vzdrževanju bitumeniziranih zmesi za obrabnozaporne plasti vozišč. Z medlaboratorijskimi analizami pa želimo prispevati k morebitnim izboljšavam standarda EN 12697-46.

1.3 Zasnova dela

Namen dela je razumljivo in pregledno predstaviti sicer obsežno interdisciplinarno področje. Tvorijo ga šest glavnih sklopov: uvod, pregled literature, eksperimentalni del, predstavitev rezultatov preskusov in analize, statistične analize z modelom in zaključki. V uvodnem poglavju na kratko predstavljamo problematiko, podajamo opis trenutnega stanja ter definiramo izhodišča in cilje, ki jih želimo doseči v doktorski disertaciji. Sledi podroben pregled domače in tuje literature s poudarkom na trenutnih ugotovitvah obnašanja bitumeniziranih zmesi in različnih vplivov na rezultate pri nizkih temperaturah. V nadaljevanju so predstavljeni trenutno uveljavljeni preskusi pri nizkih temperaturah in različni postopki statističnega vrednotenja rezultatov. V tretjem in četrtem poglavju doktorske disertacije so opisani lastni eksperimentalni preskusi, predstavljeni dobljeni rezultati in podane analize bitumeniziranih zmesi. Vključeni so laboratorijski preskusi lastnosti bitumnov, mehanskih lastnosti bitumeniziranih zmesi in preskusi bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah (TSRST in UTST). Doktorsko disertacijo zaključujemo z analizo rezultatov preskusov in ugotavljamo vpliv nizkih temperatur na delež bitumna in na mehanske lastnosti bitumeniziranih zmesi. Predstavljamo rezultate vpliva različne začetne temperature pri preskusu TSRST in analizo rezultatov preskusov pri nizkih temperaturah. Predstavljamo tudi statistično obdelavo rezultatov preskusov pri nizkih temperaturah, izvedenih na bitumeniziranih zmesih SMA, ki so bili opravljeni v laboratorijih ZAG (SLO), Ramtech (HR), TU Wien (A) in TU Braunschweig (D). Na koncu podajamo ključne rezultate in ugotovitve izvedenih preskusov in analiz ter priporočila in napotke za nadaljnje znanstvenoraziskovalno delo.

2 PREGLED LITERATURE

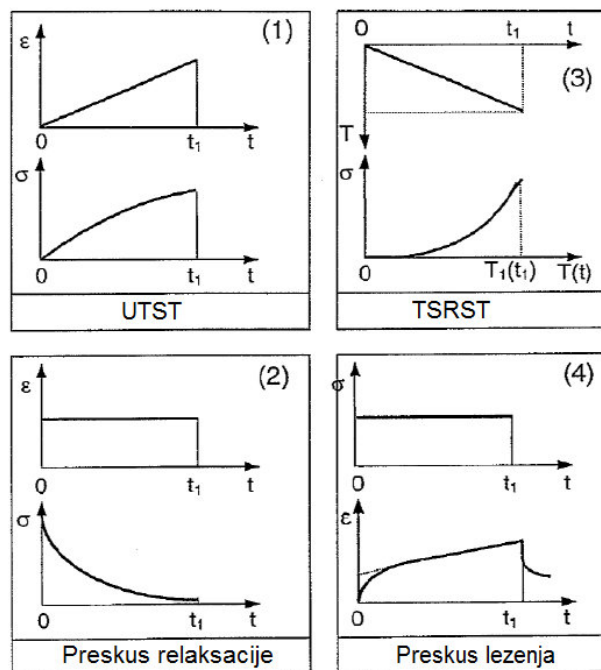
2.1 Preskusi bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah

2.1.1 Statični preskusi

Fenomen obnašanja bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah je prvi v Evropi predstavil W. Arand (TU Braunschweig). Arand (1983, 1996, 2000) je definiral štiri tipe preskusov, ki opisujejo odpornost proti nastanku razpok pri nizkih temperaturah (slika 2.1.1.1), in sicer:

- preskus enosne natezne napetosti (UTST);
- preskus termične napetosti ob preprečeni deformaciji preskušanca (TSRST);
- preskus relaksacije;
- preskus lezenja (ang. retardation test).

Podrobneje sta preskusa UTST in TSRST opisana v poglavju 3.1.3.

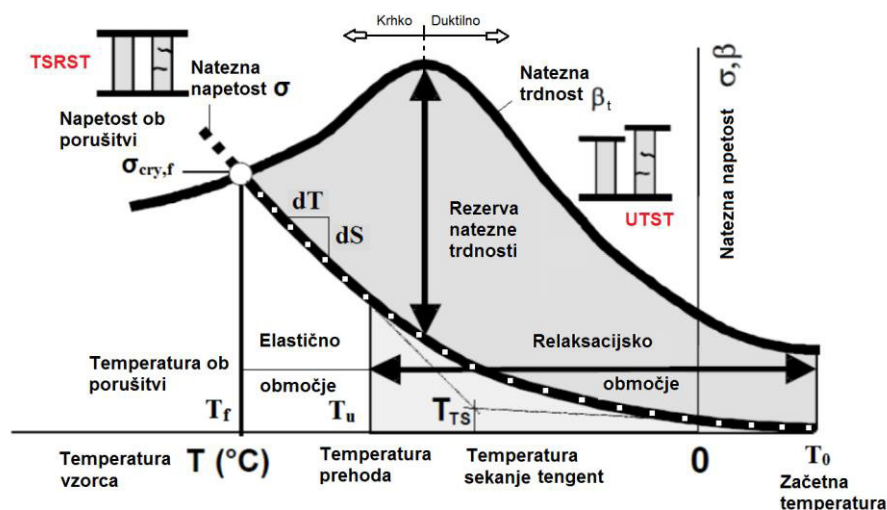


Slika 2.1.1.1: Preskusi za ugotavljanje termo-reoloških značilnosti bitumeniziranih preskušancev (Arand, 2002)

Figure 2.1.1.1: Tests for Investigation of Thermo-rheological Behavior of Asphalt Specimens (Arand, 2002)

Jung in Vinson (1994) z univerze v Oregonu (ZDA) ugotavljata, da je preskus TSRST odličen indikator razpok pri nizkih temperaturah. Z enosnim nateznim preskusom UTST pri nizkih temperaturah pa lahko simuliramo odpornost bitumeniziranih zmesi proti natezni obremenitvi zaradi obtežb, ki jih povzroči prometna obremenitev v območju kolesnih sledi. Na sliki

2.1.1.2 je shematično predstavljen Arandov (1987), Spieglov (2008) in Jungov (Jung in sod., 1994) združeni koncept nateznih napetosti z elastičnim območjem in tangento dS/dT . Iz slike je razviden potek temperatura – napetosti v zgodnji fazi, kjer imamo opravka z relaksacijo (relaksacijsko območje). Z nižanjem temperature preide krivulja v povsem linearni del (elastično območje), vse do temperature ob porušitvi T_f . V linearnem delu krivulje lahko določimo njen nagib, če napravimo odvod krivulje dS/dT . Čim nižji je nagib tangente (gledano absolutno), manj odporen je material proti nizkim temperaturam. T_{TS} je temperatura, kjer se sekata tangenti, ki predstavljata relaksacijski in elastični del krivulje. T_u je temperatura prehoda oz. začetka elastičnega obnašanja bitumenizirane zmesi. T_0 je začetna temperatura preskusa TSRST.



Slika 2.1.1.2: Združeni koncept nateznih napetosti z elastičnim območjem in nagibom tangente dS/dT

(Arand, 1987, Spiegl in sod., 2005, Spiegl, 2008, Jung in sod., 1994)

Figure 2.1.1.2: Concept of tensile stress with elastic zone and slope of tangent dS/dT (Arand, 1987, Spiegl et al., 2005, Spiegl, 2008 and Jung et al., 1994)

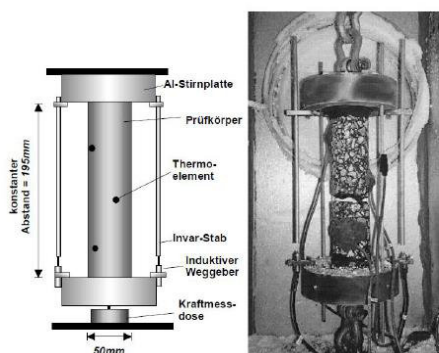
V skladu s standardom SIST EN 12697-46 se predvsem zaradi utrujanja za napoved obnašanja bitumeniziranih vozišč pri nizkih temperaturah uporabljajo tudi dinamični preskusi, vendar jih v doktorski disertaciji ne obravnavamo.

2.1.2 Oprema za preskušanje in njeno delovanje

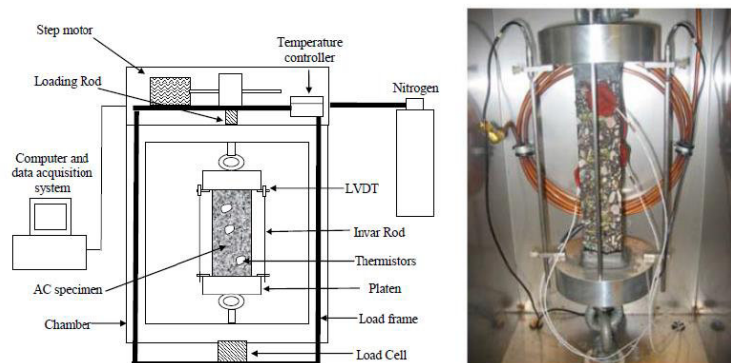
Različni cestogradbeni raziskovalni inštituti uporabljajo različno opremo. Čeprav mora biti oprema standardizirana, obstajajo razlike, ki lahko vplivajo na rezultate preskusov pri nizkih temperaturah. V Ameriki je Partl (1998) preskuse TSRST pri nizkih temperaturah izvajal na

opremi, ki je prikazana na sliki 2.1.2.1a. Jung in Vinson (1994) sta v raziskavah SHRP A-400 Low-Temperature Cracking: Test selection uporabljala za preskuse opremo, ki je prikazana na sliki 2.1.2.1b. V Evropi se v skladu s standardom SIST EN 12697-46 lahko uporabljata dva primera naprav (sliki 2.1.2.1c in 2.1.2.1d). Napravo, kot jo prikazuje slika 2.1.2.1d, uporabljata oba največja in mednarodno uveljavljena inštituta v Evropi, TU Braunschweig in TU Wien. Tudi v Ramtechu v Zagrebu uporabljajo povsem enako testno opremo, kot jo imajo na TU Wien. Na ZAG-u pa uporabljajo opremo, ki je v skladu z omenjenim standardom, vendar je sestavljena iz elementov različnih proizvajalcev (slika 2.1.2.1e). Žal do sedaj ni bilo opravljene nobene primerjalne študije, ali obstajajo kakšne razlike med ameriško in evropsko laboratorijsko opremo za izvajanje preskusov TSRST in UTST. Kljub temu vidimo, da obstajajo razlike med napravami, in sicer: v načinu vpetja (kardansko ali togo), uporabljeni so različni materiali za določene predele naprave, v odčitku temperature preskušanca (v slepem preskušancu ali izven njega), v odčitku pomikov (znotraj ali zunaj komore).

a)



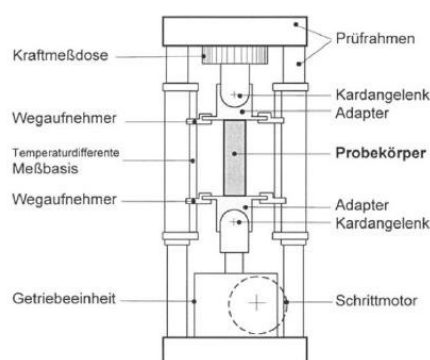
b)



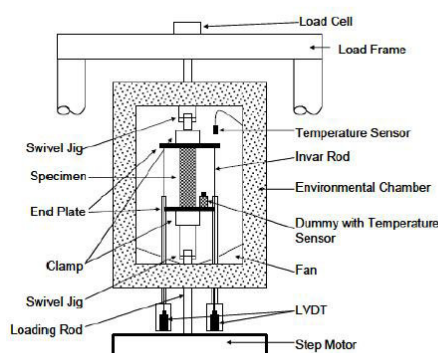
(se nadaljuje ...)

(... nadaljevanje)

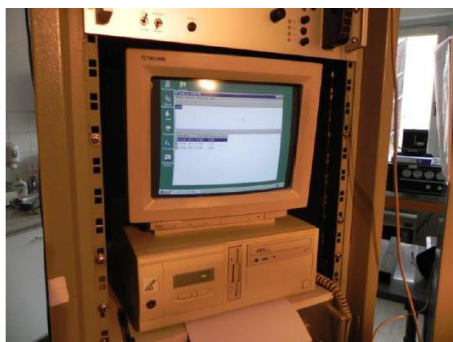
c)



d)



e)



Slika 2.1.2.1: Naprava za preskus pri nizkih temperaturah: (a) Raziskave Partla (Partl in sod., 1998), (b) Jung in Vinson (ZDA) (Marasteanu, 2007), (c) TU Braunschweig v Nemčiji, TU Wien v Avstriji (Spiegl, 2005) in Ramtech iz Zagreba (HR), (e) ZAG, Ljubljana (SLO)

Figure 2.1.2.1: Test device for test at low temperature: (a) Researches of Partl (Partl et al., 1998), (b) Jung in Vinson (ZDA) (Marasteanu, 2007), (c) TU Braunschweig (D), TU Wien (A) (Spiegl, 2005) in Ramtech (CRO), (e) ZAG, Ljubljana (SI)

V Ameriki izvajajo ohlajevalni preskus TSRST v skladu z AASHTO TP-10-93 (1993). Hills in Brien (1966) sta predstavila enačbo za termično inducirano napetost, ki upošteva elastično teorijo in ima naslednjo obliko (Kanerva in sod., 1994):

$$\sigma_{cry}(\dot{T}) = \alpha_T \cdot \sum_{T_0}^{T_f} E(t, \dot{T}) \cdot \Delta T, \quad (2.1.2.1)$$

kjer je:

$\sigma_{cry}(\dot{T})$... termična napetost pri nizki temperaturi [MPa],

α_T ... količnik temperaturnega raztezanja [mm/m °C⁻¹],

T_0, T_f ... začetna temperatura in temperatura ob porušitvi [°C],

$E(t, \dot{T})$... modul elastičnosti bitumenizirane zmesi v odvisnosti od temperature in časa [MPa],

ΔT ... prirastek temperature za $E(t, \dot{T})$ v [°C].

Tudi Arand (1996) je predstavil svojo enačbo natezne napetosti pri nizkih temperaturah, ki nastane pri preskusu TSRST bitumenizirane zmesi v odvisnosti od temperature in časa:

$$\sigma_{cry}(t, \dot{T}) = \sigma_0 \cdot e^{-\frac{E}{\lambda}t} - \alpha_T \cdot \lambda \cdot \dot{T} \left(1 - e^{-\frac{E}{\lambda}t}\right), \quad (2.1.2.2)$$

kjer je:

$\sigma_{cry}(t, \dot{T})$... termična (natezna) napetost pri nizki temperaturi [MPa],

σ_0 ... začetna natezna napetost [MPa],

E ... modul elastičnosti bitumenizirane zmesi [MPa],

λ ... viskoznost bitumenizirane zmesi [MPa·s],

α_T ... količnik temperaturnega raztezanja [°C⁻¹],

T ... temperatura [°C],

$\dot{T}$... hitrost ohlajanja [°C/h].

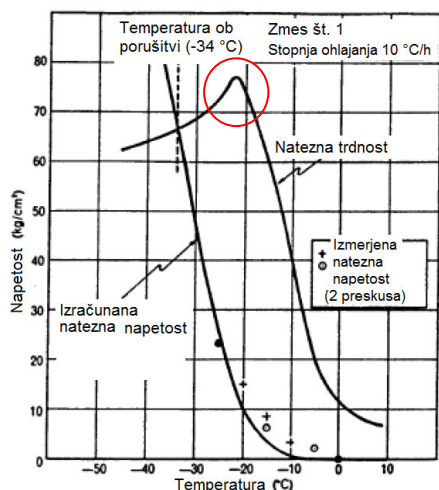
V Sloveniji se na Zavodu za gradbeništvo (ZAG) od leta 2008 izvajata dva standardizirana postopka statičnega preskusa po standardu SIST EN 12697-46: preskus termične napetosti ob preprečeni deformaciji preskušanca (TSRST) in preskus enoosne natezne napetosti (UTST), ki simulirata nastanek razpok pri nizkih temperaturah. Vendar v Sloveniji že od leta 2004 preiskujemo lastnosti bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah. Preiskave so se izvajale v tem obdobju na tujih ustanovah, v Avstriji na Inštitutu za cestogradnjo in vzdrževanje cest ISTU (Christian Doppler Labor) pri TU Wien in v Nemčiji na Inštitutu za cestogradnjo (ISBS) pri TU Braunschweig.

Potek in postopek preskusov TSRST in UTST po standardu SIST EN 12697-46 sta podrobneje opisana v poglavju 3. Bitumenizirani preskušanelec vpnemo v obremenilni okvir, ki je znotraj temperaturne komore. Pri preskusu TSRST se ves čas ohranja dolžina preskušanca in ohlaja z $dT = -10\text{ °C/h}$. Ko se preskušanelec poruši, se določi natezna napetost ob porušitvi $\sigma_{cry,t}(T)$ in temperatura ob porušitvi T_f . Pri preskusu UTST pa se pri določeni temperaturi preskušanelec razteguje s konstantno hitrostjo. Ob nastanku porušitve se določi natezna trdnost $\beta_t(T)$.

Na sliki 2.1.2.2 je prikazana natezna trdnost in izračunana natezna napetost, ki sta jo predstavila Hills in Brien (1966), v odvisnosti od nizke temperature. Slika 2.1.2.3 prikazuje mejno temperaturo za nastanek razpok ter opredeljuje potek nateznih trdnosti bitumenizirane zmesi $\beta_t(T)$ in nateznih napetosti $\sigma_{cry}(T)$, ki v njej nastajajo. Z nižanjem temperature natezna trdnost bitumenizirane zmesi praviloma nekaj časa narašča, nato pa se zmanjšuje. Natezne napetosti $\sigma_{cry}(T)$ v bitumenizirani zmesi pa ves čas nižanja temperature naraščajo. Razlika med natezno trdnostjo vgrajene bitumenizirane zmesi $\beta_t(T)$ in natezno napetostjo $\sigma_{cry}(T)$ predstavlja dopustne napetosti, ki jih pri določeni temperaturi lahko ustvarijo prometne obremenitve, ne da bi čezmerno škodljivo vplivale na vgrajeno bitumenizirano zmes. Razliki pravimo rezerva natezne trdnosti $\Delta\beta_t(T)$ in se izračuna po naslednji enačbi:

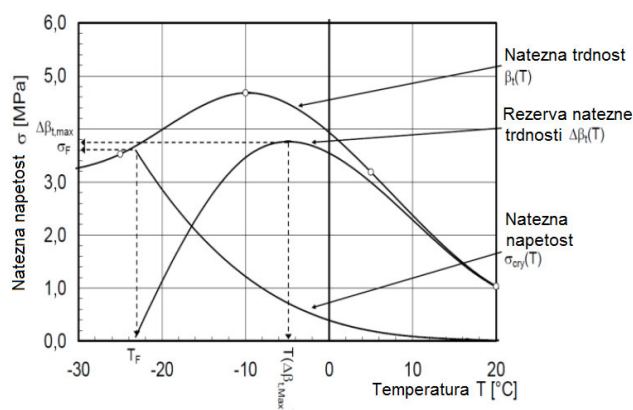
$$\Delta\beta_t(T) = \beta_t(T) - \sigma_{cry}(T) \quad (2.1.2.3)$$

(Read in sod., 2003, Spiegl, 2008, SIST EN 12697-46:2012). Pri določeni temperaturi, ko natezna napetost $\sigma_{cry}(T)$ postane enaka natezni trdnosti bitumenizirane zmesi $\beta_t(T)$, je nevarnost za nastanek razpoke (Žmavc, 2010). Opazimo, da se krivulji preskusa UTST po SHRP A-400 (slika 2.1.2.2) in po SIST EN 12697-46 (slika 2.1.2.3) v nekaterih predelih razlikujeta, predvsem slednja je bistveno položnejša in bolj zaobljena.



Slika 2.1.2.2: Ocenjevanje temperature ob porušitvi za bitumenizirani beton po Hillsu in Brienu (1966) (Kanerva in sod., 1994)

Figure 2.1.2.2: Estimating the fracture temperature of asphalt concrete by Hills and Brien (1966) (Kanerva et al., 1994)



Slika 2.1.2.3: V diagramu temperatura – napetost ocenjujemo rezervo natezne trdnosti iz preskusa UTST in TSRST (EN 12697-46).

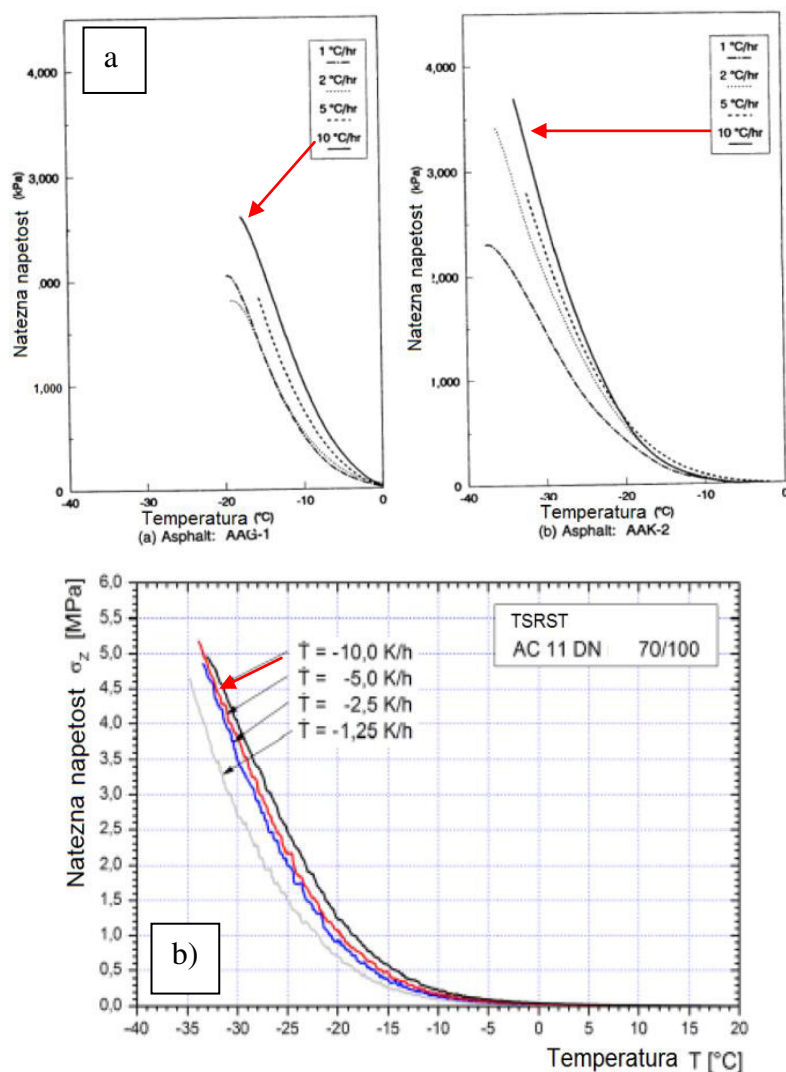
Figure 2.1.2.3: Principle of evaluating the tensile strength reserve from the test graphs of the UTST and the TSRST in the temperature-stress diagram (EN 12697-46)

2.1.3 Hitrost ohlajanja pri preskusu TSRST

Jung in sodelavci (1994) ugotavljajo, da vplivajo na temperaturo ob porušitvi T_f razlike v bitumeniziranih zmesih, ki so pogojene z vrsto zmesi zrn, velikostjo preskušanca, s hitrostjo ohlajanja (slika 2.1.3.1a) in stopnjo staranja. Pri počasnejšem ohlajanju ima relaksacija toliko večji pomen, kar pomeni, da nižja hitrost ohlajanja pomeni manjšo termično inducirano napetost in obratno. Pri tej raziskavi SHRP so uporabili dve bitumenizirani zmesi AC. Glede na lastnosti bitumenizirane zmesi se pričakuje odpornost proti nizkim temperaturam v naslednjem zaporedju: AAK-2 (B160/220) > AAG1 (B50/70). Predstavljeni so parametri, ki lahko vplivajo na rezultate raziskave:

- preskusni preskušanci so velikosti $5 \cdot 5 \cdot 25$ cm,
- vsebnost votlin v bitumenizirani zmesi 4,0 V.-% (AAG-1) in 8,0 V.-% (AAK-2),
- hitrost ohlajanja 1, 2, 5 in 10 °C/h,
- tip zmesi zrn (okrogla ali drobljena zrna),
- staranje (štiridnevno staranje v pečici pri temperaturi 110 °C ali 135 °C),
- začetna temperatura preskusa $T_0 = 5$ °C.

Rezultati so pokazali, da se natezna napetost povečuje, če raste hitrost ohlajanja. Podobno je ugotavljal tudi Büchler (2010) za bitumenizirano zmes AC 11 surf B70/100. Na sliki 2.1.3.1b so prikazani rezultati omenjene študije preskusov TSRST (v tem primeru je natezna napetost $\sigma_z = \sigma_{\text{cry}}$) za štiri različne hitrosti ohlajanja $dT/dt = -10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ (K/h), $-5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ in $-1,25\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. Vidimo, da najbolj odstopa krivulja TSRST pri hitrosti ohlajanja $-1,25\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, kjer se v spodnjem temperaturnem območju krivulja odmakne od preostalih za $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

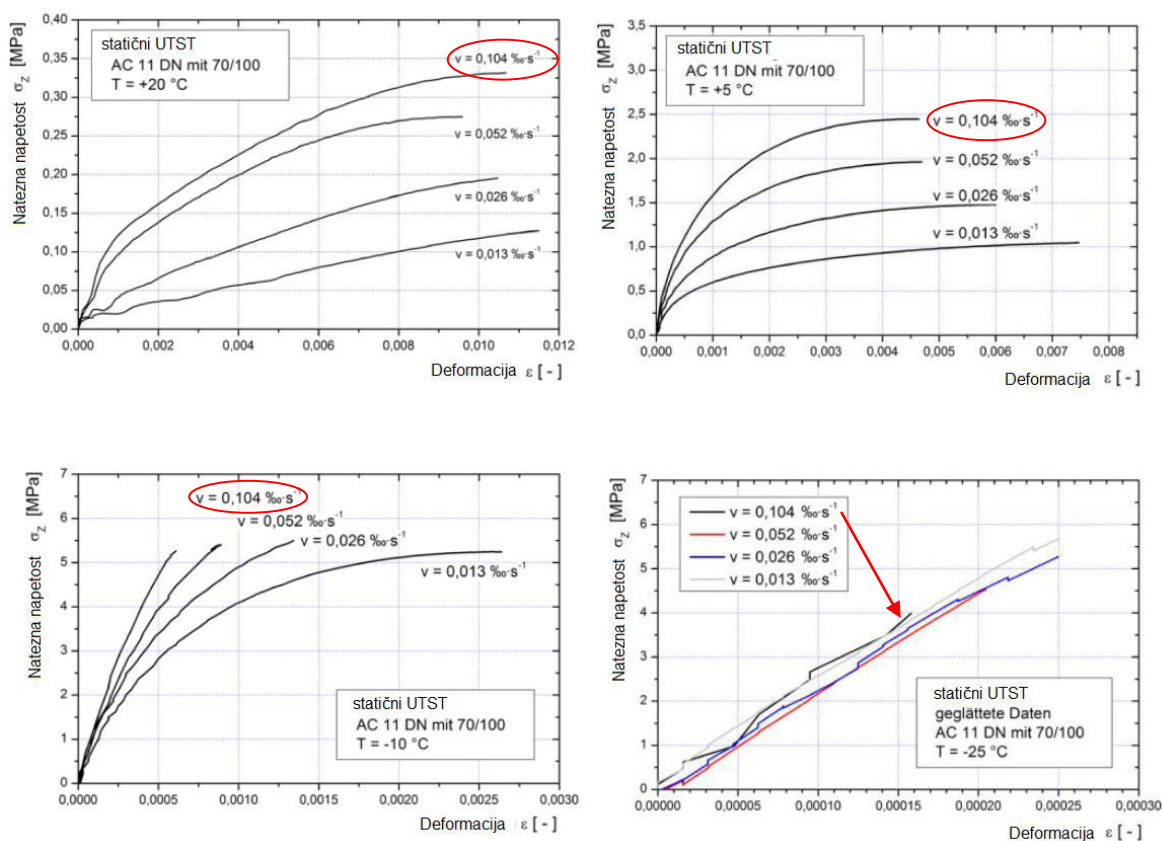


Slika 2.1.3.1: TSRST: (a) Natezna napetost za različne hitrosti ohlajanja (Jung in Vinson, 1994), (b) Rezultati nateznih napetosti pri preskusu TSRST za AC 11 surf B70/100 pri različnih hitrostih ohlajanja dT/dt (Büchler, 2010)

Figure 2.1.3.1: TSRST: (a) Tensile stress for various cooling rates (Jung and Vinson, 1994), (b) Results of tensile stress at TSRST test for mixture AC 11 surf B70/100 for various cooling rates dT/dt (Büchler, 2010)

2.1.4 Hitrost raztezka pri preskusu UTST

Büchler (2010) je v svoji doktorski disertaciji raziskal vpliv hitrosti deformiranja $\dot{\epsilon}$ na natezno trdnost (v tem primeru je natezna trdnost $\beta_t = \sigma_z$) v odvisnosti od temperature $T = 20\text{ °C}$, 5 °C , -10 °C in -25 °C (slika 2.1.4.1). Standard EN 12697-46 pravi, da je pri preskusu UTST zahtevana konstantna hitrost deformiranja preskušanca ($L = 160\text{ mm}$) $d\epsilon = 1\text{ mm/min} \approx 0,01666\text{ mm/s} \approx (0,625 \pm 0,025)\text{ \%/min} \approx 0,10417\text{ \%/s}$. Pri $T = 20$ in 5 °C so pri različnih hitrostih deformiranja razlike med diagrami napetost – deformacija. Z znižanjem temperature preskušanja pod -10 °C so natezne trdnosti neodvisne od hitrosti deformiranja preskušanca. Pomembne razlike pa so v deformaciji, ki pripada natezni trdnosti materiala, saj je ta tem večja, čim nižja je hitrost deformiranja. Razlike so posledica lezenja materiala. Prispevek lezenja h končni deformaciji je tem večji, čim počasnejše je deformiranje preskušanca.

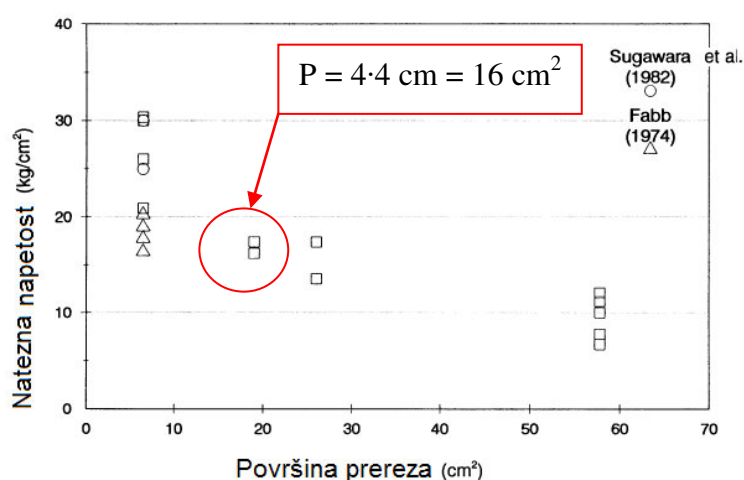


Slika 2.1.4.1: UTST – povprečni potek nateznih napetosti glede na različne stopnje hitrosti raztezanja in temperature $T = 20\text{ °C}$, 5 °C , -10 °C in -25 °C za AC 11 surf B70/100 (Büchler, 2010)

Figure 2.1.4.1: UTST – The average expiration of tensile stress in relation to different levels of strain speed and temperature $T = 20\text{ °C}$, 5 °C , -10 °C and -25 °C for AC 11 surf B70/100 (Büchler, 2010)

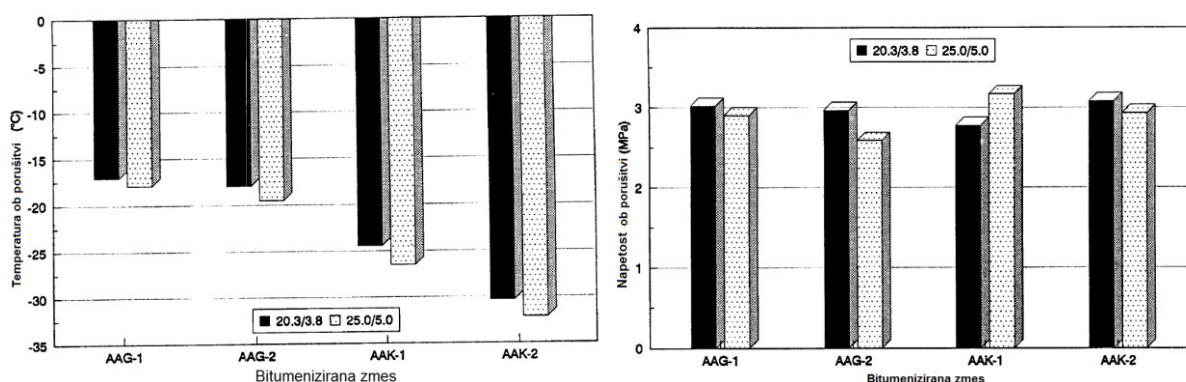
2.1.5 Oblika preskušancev

Jung in sod. (1994) v študiji SHRP-A-400 ugotavljajo, da ima dimenzija preskušanca (površina prečnega prereza) vpliv na natezno napetost ob porušitvi pri preskusu TSRST. S povečevanjem prečnega prereza preskušanca največja napetost ob porušitvi upada (slika 2.1.5.1). Študija tudi primerja dva preskušanca različnih velikosti ($3,8 \cdot 3,8 \cdot 20,3$ cm in $5 \cdot 5 \cdot 25$ cm) pri štirih različnih bitumeniziranih zmesih (AAG-1, AAG-2, AAK-1, AAK-2). Pokazalo se je, da dimenzije preskušancev vplivajo na temperaturo ob porušitvi in zelo malo na natezno napetost ob porušitvi (slika 2.1.5.2).



Slika 2.1.5.1: Vpliv površine prereza preskušanca na največjo natezno napetost po Janoo 1989 (Jung in sod., 1994)

Figure 2.1.5.1: Effect of specimen size on peak tensile stress after Janoo 1989 (Jung et al., 1994)



Slika 2.1.5.2: Vpliv dimenzije preskušanca na temperaturo ob porušitvi in na natezno napetost ob porušitvi (Jung in sod., 1994)

Figure 2.1.5.2: Effect of specimen size on fracture temperature and fracture strength (Jung et al., 1994)

V skladu s standardom SIST EN 12697-46 se lahko uporabijo pri preskusih TSRST in UTST prizmatični ali valjasti preskušanci v odvisnosti od maksimalnega zrna v zmesi zrn D [mm]

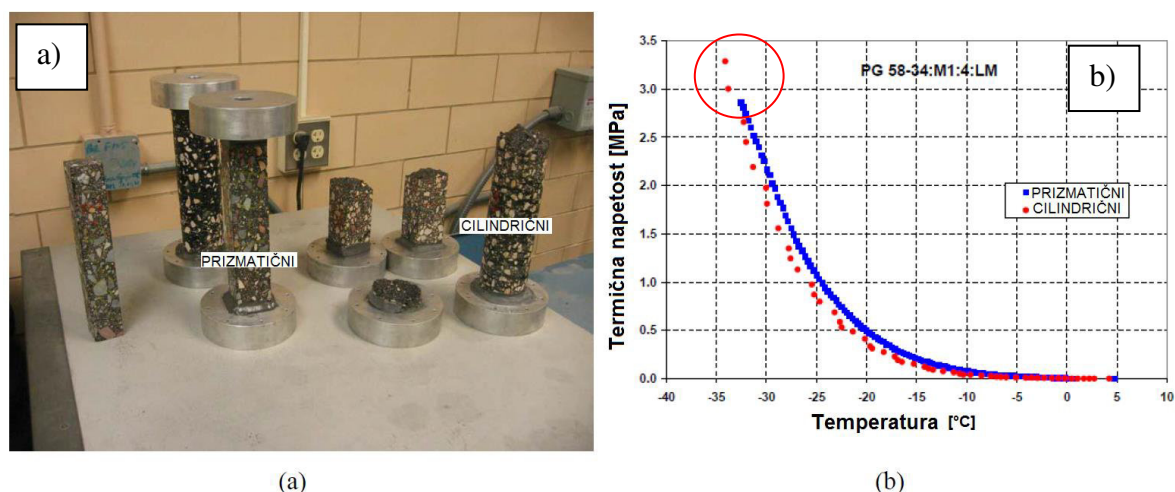
(preglednica 2.1.5.1). Kot vidimo iz preglednice, je predpisana le najmanjša dolžina preskušanca, navzgor ni omejitev. Prav tako v trenutno veljavnem standardu ni predpisana toleranca odstopanja dolžine. Ugotavljamo, da bi bilo treba *natančneje določiti dolžino preskušanca*, saj iz ugotovitev Junga in sodelavcev (1994) vidimo, da obstajajo nekatere razlike. V poglavju 5.1 doktorske disertacije obravnavamo to problematiko in predlagamo *tolerančno odstopanje dolžine preskušanca*.

Preglednica 2.1.5.1: Dimenzije prizmatičnih in cilindričnih preskušancev (SIST EN 12697-46)

Table 2.1.5.1: Dimensions of prismatic and cylindrical specimen (SIST EN 12697-46)

Oblika preskušanca	Dimenzije	Največje zrno v zmesi [mm]		
		$D \leq 11,2$	$11,2 < D < 22,4$	$D \geq 22,4$
Prizmatični preskušavec s kvadratnim prerezom	Širina in višina [mm]	40 ± 2	50 ± 2	60 ± 2
Cilindrični preskušavec	Premjer [mm]	50 ± 2	50 ± 2	60 ± 2
Vsi preskušanci	Najmanjša dolžina preskušanca [mm]	160	160	160

Marasteanu in sodelavci (2007) opisujejo, da je pri valjastih preskušancih opaziti nekoliko nižjo temperaturo ob porušitvi in večjo natezno napetost ob porušitvi kot pri prizmatičnih preskušancih (slika 2.1.5.3). Dimenzije prizmatičnega preskušanca so: širina in višina 50 ± 5 mm, dolžina 250 ± 5 mm. Dimenzije cilindričnega preskušanca niso znane, vendar predvidevamo, da so v območju dimenzij prizmatičnega preskušanca.



Slika 2.1.5.3: (a) Preskušanci TSRST z različnimi oblikami prereza, (b) Vpliv oblike preskušanca na rezultate TSRST (Marasteanu in sod., 2007)

Figure 2.1.5.3: (a) TSRST specimens with different shapes, (b) Influence of specimen shape in TSRST results (Marasteanu et al., 2007)

2.1.6 Natančnost preskusa in zahtevane mejne vrednosti

V skladu s standardom SIST EN 12697-46 in na podlagi izkušenj v nemških laboratorijih so naslednje mejne vrednosti rezultatov:

- rezultate natezne trdnosti pri preskusu UTST na treh preskušancih in pri enem operaterju se obravnava kot sumljive, če je razlika med njimi pri -25 °C 0,7 MPa, pri -10 °C je 0,7 MPa, pri 5 °C je 0,3 MPa in pri 20 °C je 0,1 MPa;
- rezultate temperature ob porušitvi pri preskusu TSRST na treh preskušancih in pri enem operaterju se obravnava kot sumljive, če je razlika med njimi več kot 2 °C ;
- rezultate natezne napetosti ob porušitvi pri preskusu TSRST na treh preskušancih in pri enem operaterju se obravnava kot sumljive, če je razlika med njimi več kot 0,5 MPa.

V standardu je zapisano, da je natančnost preskusa odvisna od vsebnosti votlin v preskušancu bitumenizirane zmesi.

V sosednji Avstriji že imajo v nacionalnih tehničnih predpisih RVS 08.16.06:2012 opredeljene mejne vrednosti za preskuse bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah. V preglednici 2.1.6.1 je prikazana zahtevana mejna temperatura pri porušitvi (T_c) pri preskusu TSRST v odvisnosti od zahtevane odpornosti proti nastanku razpok (R).

Preglednica 2.1.6.1: Temeljne zahteve za obrabne bitumenizirane plasti (RVS 08.16.06:2012)

Table 2.1.6.1: Fundamental requirements for HMA surface layers (RVS 08.16.06:2012)

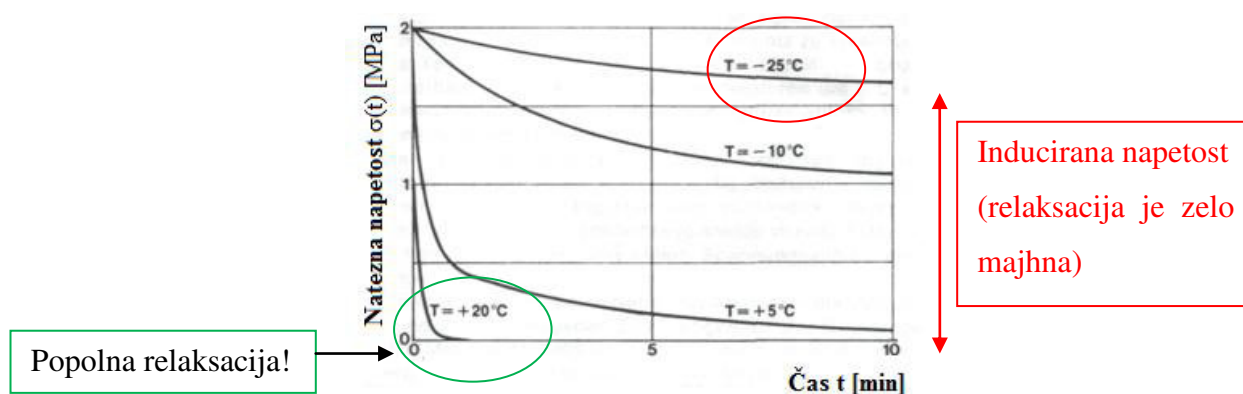
Zahteva/odpornost	R1	R2	R3	R4	R5
Trajnostne deformacije (ciklični triaksialni tlačni preskus po EN 12697-25)	$f_{cmax0,2}$		$f_{cmax0,4}$		
Nizkotemperaturne razpoke (EN 12697-46)	T_{c-30}	T_{c-25}	T_{c-30}	T_{c-25}	T_{c-20}

2.2 Obnašanje bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah

2.2.1 Napetosti in deformacije

Tako kot večina drugih gradbenih materialov se tudi bitumenizirane zmesi, vgrajene v krovne plasti voziščnih konstrukcij, z nižanjem temperature krčijo (Arand, 1983, 1987, 2002). Film

bitumenskega veziva na kamnitih zrnih se tanjša, ustrezno pa je manjša natezna trdnost bitumenizirane zmesi (Žmavc, 2010). Pri ohlajevanju bitumenizirane zmesi nastajajo inducirane termične (natezne in tlačne) napetosti (Read in sod., 2003). V domači literaturi Žmavc (2010) navaja, da se lahko natezne napetosti, ki pri ohlajevanju do določene temperature nastanejo v bitumenizirani zmesi, vgrajeni v bitumenizirano plast, z notranjimi premiki v strukturi bitumenizirane zmesi zmanjšajo, ne da bi zato nastale na zunaj vidne spremembe oblike. Čim bolj se temperatura bitumenizirane zmesi niža, tem bolj se sposobnost relaksacije zmanjšuje: viskoznost bitumenskega veziva narašča, s tem pa elastičnost in togost vgrajene bitumenizirane zmesi; premiki kamnitih zrn v skeletu so vse bolj ovirani (Žmavc, 2010). Arand (1983) ter Read in sodelavci (2003) omenjajo, da je to relaksacija, ki je posledica od temperature odvisnega visko-elastičnega stanja bitumenizirane zmesi. Na sliki 2.2.1.1 Arand (1983) prikazuje za bitumenski beton AC 11 relaksacijo (padeč napetosti) v odvisnosti od časa in temperature. Pri temperaturi 20 °C inducirane napetosti padejo na vrednost nič v zelo kratkem času, relaksacija je popolna. Če si ogledamo krivuljo pri temperaturi -25 °C, vidimo, da še po 10 minutah trajanja relaksacije v bitumenizirani zmesi napetost ostaja večja kot 1,5 MPa. Bitumenizirana zmes se obnaša kot elastično telo. To zakasnelo, časovno odvisno zmanjšanje napetosti je tehnična prednost bitumeniziranih zmesi, ki omogoča gradnjo vozišč brez reg.

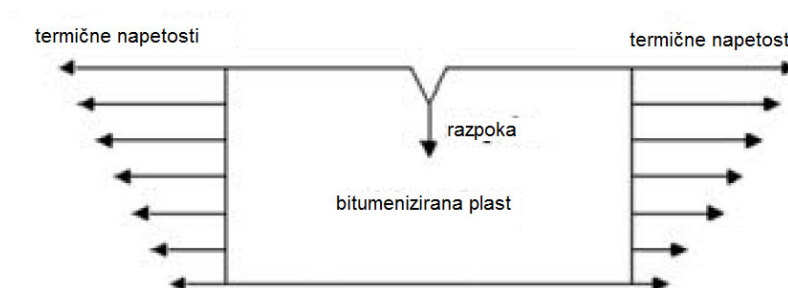


Slika 2.2.1.1: Padeč napetosti (relaksacija) bitumenizirane zmesi AC 11 surf v odvisnosti od časa in temperature
(Arand, 1983)

Figure 2.2.1.1: Stress drop (relaxation) of asphalt AC 11 surf as a function of time and temperature (Arand, 1983)

Read in sodelavci (2003) navajajo, da je pri nastanku razpok pri nizkih temperaturah pomembna predvsem reologija bitumenizirane zmesi. Bitumenizirana plast je izpostavljena natezni napetosti, ki poteka po celotni debelini in je odvisna od temperaturnih sprememb in

lastnosti relaksacije (reoloških parametrov), modula elastičnosti – togosti in količnika raztezanja bitumenizirane zmesi. Tako omenjene natezne napetosti lahko povzročijo razpoke, ki se širijo po prerezu od zgoraj navzdol (slika 2.2.1.2).

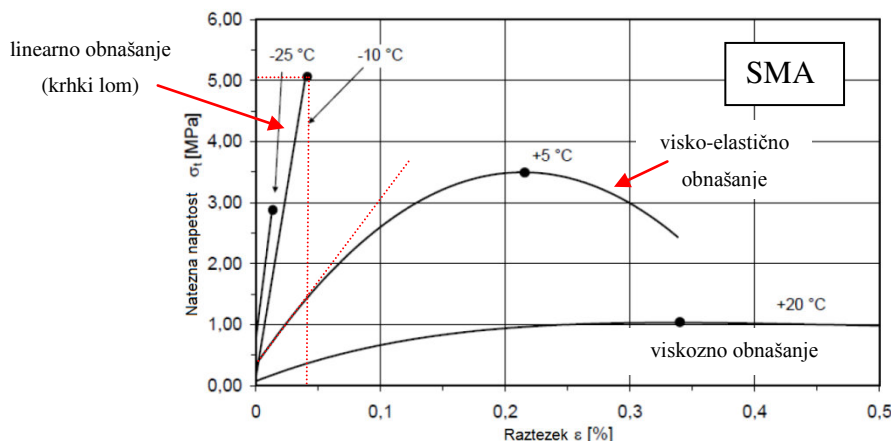


Slika 2.2.1.2: Mehanizem termičnih razpok (Read in sod., 2003)

Figure 2.2.1.2: Thermal cracking mechanism (Read et al., 2003)

Žmavc (2010) navaja, da razpoke pri nizkih temperaturah nastanejo v prečni smeri vgrajene bitumenizirane zmesi zaradi nastale znatno večje termično inducirane natezne napetosti v vzdolžni smeri, kot v (sorazmerno kratki) prečni smeri vozišča, saj je v vzdolžni smeri vgrajena bitumenizirana zmes praktično popolnoma vpeta. Ker je velikost nateznih napetosti pretežno odvisna od viskoznosti uporabljenega tipa bitumenskega veziva, narašča nevarnost predčasnega nastanka razpok (poškodbe zaradi utrujanja) premo sorazmerno z naraščajočo trdoto bitumenskega veziva (Read in sod., 2003).

Na sliki 2.2.1.3 je prikazan tipični graf funkcije napetost – raztezek za bitumenizirano zmes drobir z bitumenskim mastiksom (SMA). Pri nizki temperaturi okoli $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ napetost narašča praktično linearno vse do porušitve (krhki lom). Lahko govorimo o elastičnem obnašanju materiala. Prav tako iz slike vidimo, da se je pri temperaturi $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ preskušane porušil prej kot pri temperaturi $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pri temperaturi $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ vidimo, da krivulja poteka nelinearno, le na začetku je linearna. V tem primeru govorimo o visko-elastičnem obnašanju materiala, ki ima sposobnost lezenja. Pri višjih temperaturah ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) napetost narašča počasi in bitumenizirana zmes izkazuje viskozno obnašanje. Preskušane bitumenizirane zmesi se ne porušijo spontano in lahko doseže visoko deformacijo (Karcher in Mollenhauer, 2009).



Slika 2.2.1.3: Primer odvisnosti napetost – raztezek pri nateznem preskusu pri štirih temperaturah (Karcher in Mollenhauer, 2009)

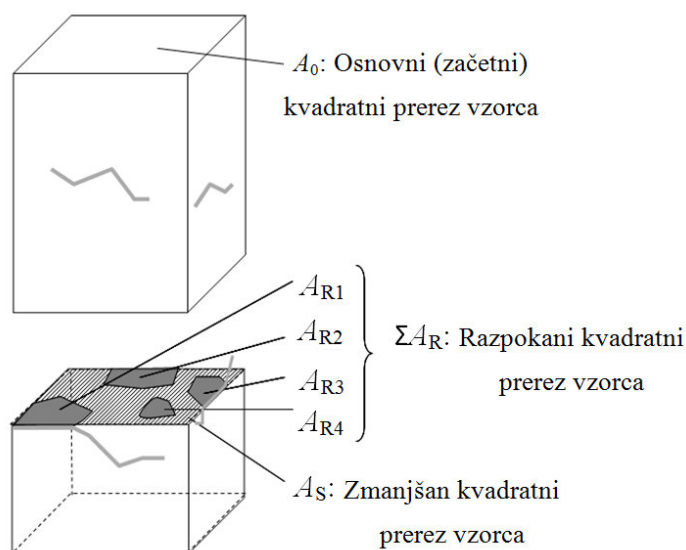
Figure 2.2.1.3: Example for stress – strain diagram of tension tests at four test temperatures (Karcher and Mollenhauer, 2009)

Pri preskusu enosne natezne napetosti (UTST) nastalo napetost σ_0 zaradi delovanja sile F na kvadratno površino prereza A_0 prizmatičnega preskušanca lahko izračunamo po naslednji enačbi:

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} \Leftrightarrow F = \sigma_0 \cdot A_0. \quad (2.2.1.1)$$

Krhki prelomi bitumeniziranih plasti, nastali pri zelo nizkih temperaturah, se razlikujejo od prelomov pri višjih temperaturah v tem, da prelomna površina ne ostane omejena na bitumensko malto, ampak lahko poteka tudi skozi posamezna kamnita zrna. Zaradi delovanja nizke temperature se v bitumeniziranem preskušancu pojavijo oslabitve (razpoke) s površino A_R . Osnovna površina A_0 se tako zmanjša na površino A_S (slika 2.2.1.4). Tako za prenos enake sile ostane zmanjšan prerez, zato je dejanska napetost (označimo s σ_s) večja od teoretične σ_0 . Enačba za izvrednotenje napetosti zaradi zmanjšane površine sodelujoče površine je naslednja (Mollenhauer, 2008):

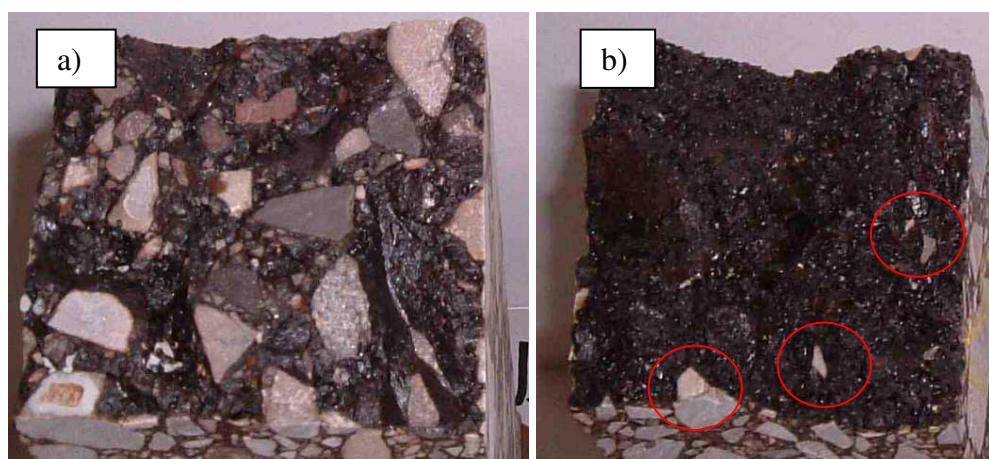
$$\sigma_0 \leq \sigma_s = \frac{F}{A_S}; A_S \leq A_0. \quad (2.2.1.2)$$



Slika 2.2.1.4: Osnovni prerez A_0 , poškodovana površina zaradi razpok A_R in zmanjšan prerez zaradi oslabitev A_S na preskušancu kvadratnega prereza (Mollenhauer, 2008)

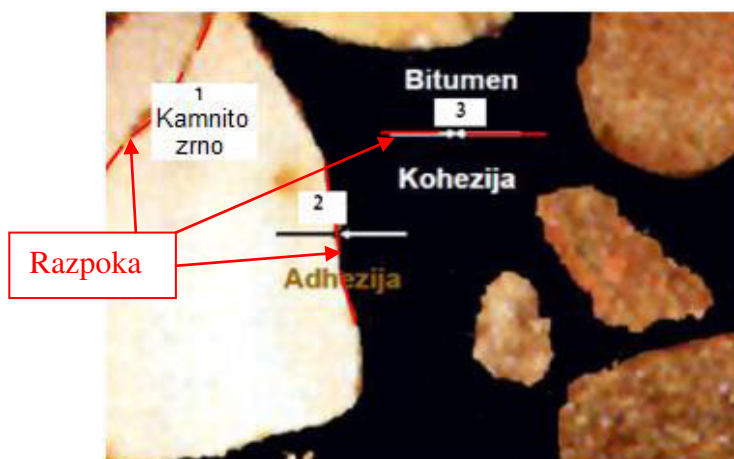
Figure 2.2.1.4: Original A_0 and damaged by cracking the surface A_R cross-sectional area A_S a prismatic specimen (Mollenhauer, 2008)

Mollenhauer (2008) ugotavlja, da pri nižjih temperaturah poteka razpoka tudi skozi kamnito zrno (slika 2.2.1.5a), pri višjih temperaturah pa predvsem skozi bitumensko malto (slika 2.1.1.5b). Na sliki 2.2.1.6 so prikazane mogoče porušitve (potek razpoke): (1) skozi kamnito zrno, (2) na stiku med kamnitim zrnem in bitumensko malto – adhezijska porušitev in (3) v sami bitumenski malti – kohezijska porušitev.



Slika 2.2.1.5: Porušitvena površina dveh preskušancev (0/22) pri preskusu UTST: (a) $T = -15\text{ °C}$, (b) $T = 10\text{ °C}$ (Mollenhauer, 2008)

Figure 2.2.1.5: Fracture surfaces of two specimens (0/22) at UTST: (a) $T = -15\text{ °C}$, (b) $T = 10\text{ °C}$ (Mollenhauer, 2008)

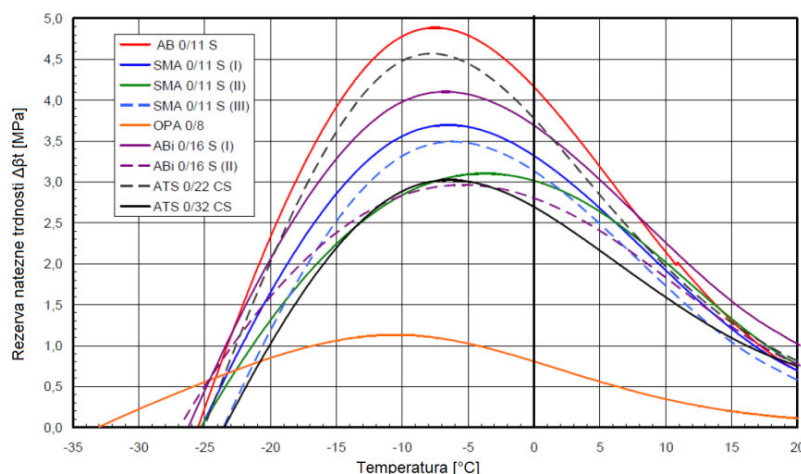


Slika 2.2.1.6: Shematični prikaz porušitve: (1) skozi kamnito zrno, (2) na stiku med kamnitim zrnem in bitumensko malto – adhezijska porušitev in (3) v sami bitumenski malti – kohezijska porušitev

Figure 2.2.1.6: Schematic show of failure: (1) through a stone grain, (2) the contact between the grain and bitumen mortar – adhesive failure, and (3) in a bituminous mortar – cohesion failure

2.2.2 Vrste bitumeniziranih zmesi

Iz doktorske disertacije Mollenhauerja (2008) so na sliki 2.2.2.1 prikazane krivulje rezerve natezne trdnosti za različne bitumenizirane zmesi z uporabljenim podobno trdim bitumnom in različnimi deleži bitumna in votlin v sestavi. Največjo rezervo natezne trdnosti ima AB 0/11 S (AC 11 surf) s cestogradbenim bitumnom B 50/70 in 6 m.-% deležem bitumna v sestavi, predvsem zaradi svoje enakomerne in goste sestave. Najnižjo rezervo natezne trdnosti ima drenažna (porozna) bitumenizirana zmes OPA 0/8 PmB 40/100-65 (PA 8 s polimernim bitumnom penetracije 40/100 (izražena v 0,1 mm) in temperaturo zmehčišča 65 °C) s 6,2 m.-% deležem bitumna, predvsem zaradi svoje neenakomerne sestave (velika vsebnost votlin). Z drugimi zmesmi ima primerljivo temperaturo pri največji rezervi natezne trdnosti, predvsem zaradi lastnosti uporabljenega polimernega bitumna, in možnost porazdelitve napetosti med posameznimi zrn, tudi če nanjo deluje obremenitev. Iz te slike vidimo, da vrsta bitumenizirane zmesi (v odvisnosti od vsebnosti votlin) bistveno vpliva na velikost rezerve natezne trdnosti in zelo malo na temperaturo pri največji rezervi, predvsem zaradi podobnih lastnosti bitumna.

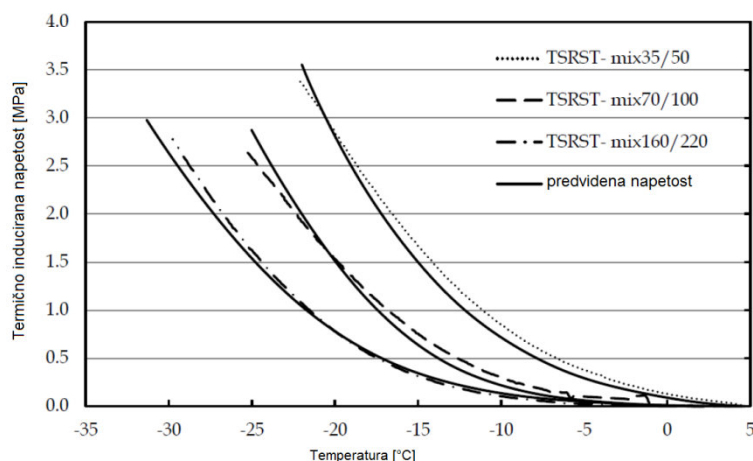


Slika 2.2.2.1: Primerjava rezerve natezne trdnosti za različne bitumenizirane zmesi (Mollenhauer, 2008)

Figure 2.2.2.1: Comparison of the tensile strength reserve for different asphalt mixtures (Mollenhauer, 2008)

2.2.3 Lastnosti bitumna

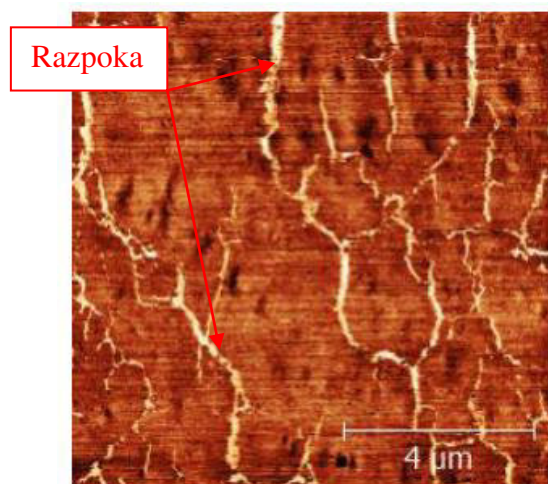
Trdota bitumna bistveno vpliva na potek obnašanja bitumeniziranih zmesi pri preskusu TSRST. Na sliki 2.1.3.1 vidimo, da se bitumenizirana zmes z mehkejšim bitumnom (160/220) poruši pri nižji temperaturi zaradi večje relaksacije.



Slika 2.2.3.1: Primerjava rezultatov preskusa TSRST (Kumar Das, 2012)

Figure 2.2.3.1: Comparison of TSRST test results (Kumar Das, 2012)

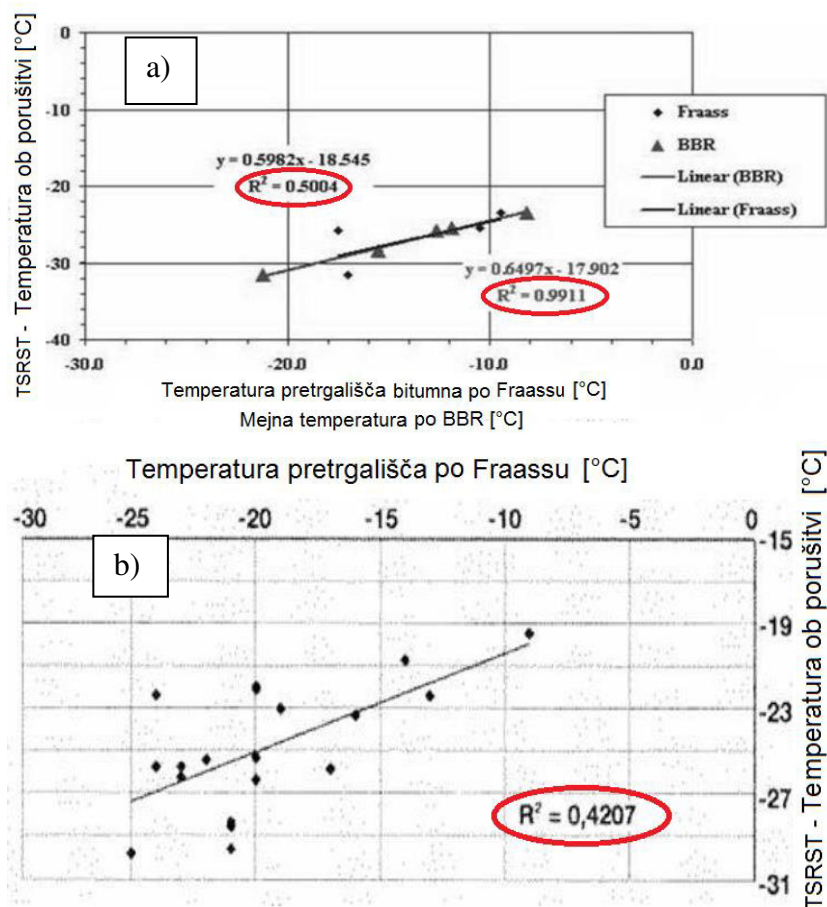
Na sliki 2.2.3.2 je prikazano, kako lahko s termičnim utrujanjem (zmrzovanje in tajanje) nastanejo mikrorazpoke na površini tankega filma bitumna. Cikel zmrzovanja poteka pri temperaturi $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (traja 24 ur) in tajanje pri $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (traja 24 ur). Omenjeni cikel se ponovi 15-krat. Po vsakem ciklu se preskušanelec še dodatno natežno obremenjuje. Vpogled v mikrostrukturo je mogoč z mikroskopom AFM (ang. atomic force microscope).



Slika 2.2.3.2: Videz mikrorazpok na podlagi AFM-skeniranja po termičnem utrujanju (Kumar Das, 2012)

Figure 2.2.3.2: Evidence of micro-crack through AFM scanning after thermal fatigue loading (Kumar Das, 2012)

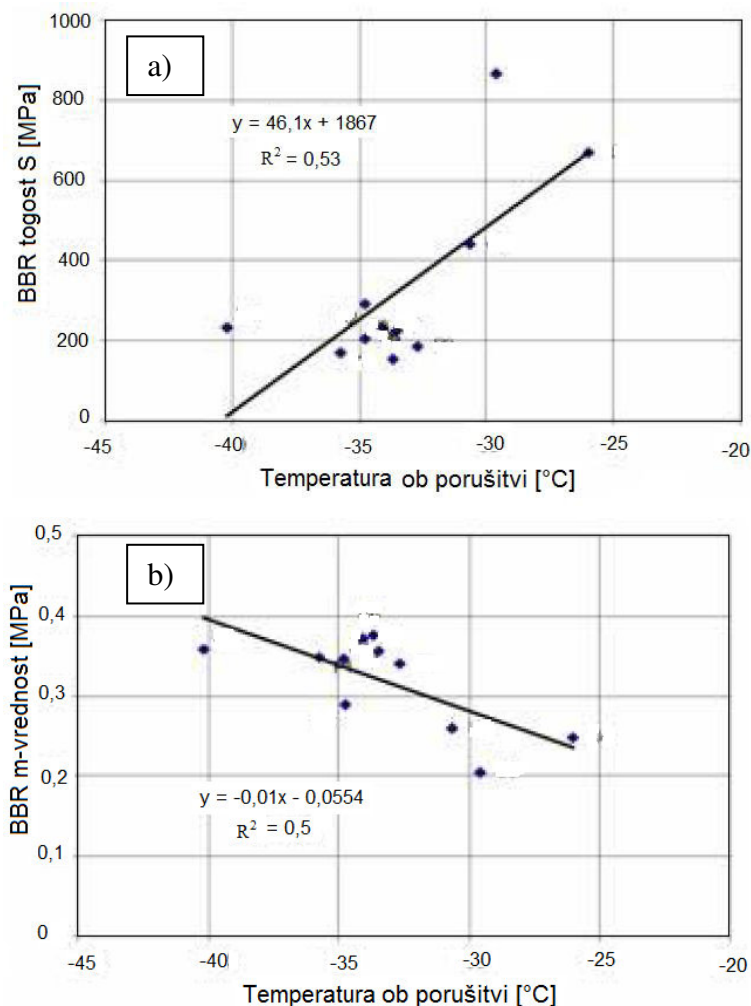
V sklopu evropskega projekta BitVal so se izvedle različne raziskave bitumna v zvezi z obnašanjem bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah. Po podatkih Des Croixa (2004) je korelacija med temperaturo ob porušitvi pri preskusu TSRST T_f in mejno temperaturo pri preskusu upogibne togosti bitumnov pri nizkih temperaturah BBR (ang. bending beam rheometer), po SIST EN 14771, zelo dobra, pri čemer je korelacijski količnik na osnovi petih točk $R^2 = 0,99$ (slika 2.2.3.3a). Mejna temperatura po BBR je temperatura, ko doseže togost $S = 300$ MPa in vrednost m (m -vrednost) $= 0,3$ (za lažje razumevanje glej poglavje 3.1.1). Hkrati je na sliki 2.2.3.3a prikazana primerjava med temperaturo ob porušitvi pri TSRST T_f in temperaturo pretrgališča po Fraassu (preskus se izvaja v skladu s standardom SIST EN 12593), v povezavi z značilnostmi bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah. V tem primeru je korelacijski količnik R^2 za točko pretrgališča po Fraassu znašal le 0,50. Guericke in Höppel (2001) podajata korelacijo med temperaturo pretrgališča po Fraassu in temperaturo ob porušitvi pri TSRST, kot je prikazano na sliki 2.2.3.3b. Korelacija med temperaturo pretrgališča po Fraassu in značilnostmi bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah se je izkazala kot slaba ($R^2 = 0,42$), zato ni priporočljivo uporabljati temperature pretrgališča po Fraassu za napovedovanje značilnosti bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah.



Slika 2.2.3.3: (a) Korelacija med bitumnom in parametri zmesi pri nizki temperaturi (Des Croix, 2004), (b) Korelacija med točko pretrgališča po Fraassu in temperaturo ob porušitvi pri TSRST (Guericke in Höppel, 2001)

Figure 2.2.3.3: (a) Relationship between binder and mixture low temperature parameters (Des Croix, 2004), (b) Relationship between Fraass breaking point and TSRST failure temperature (Guericke and Höppel, 2001)

Na sliki 2.2.3.4 (Lacomte in sod., 2000) je prikazana korelacija med togostjo S in vrednostjo m pri preskusu BBR v povezavi s temperaturo ob porušitvi pri preskusu TSRST. Korelacija ni najboljša, saj je v obeh primerih okoli $R^2 = 0,50$. Togost S in vrednost m pri preskusu BBR ne odražata tako dobre napovedi obnašanja pri nizkih temperaturah kot pri mejni temperaturi bitumna po BBR (glej tudi predhodno sliko 2.2.3.3a).

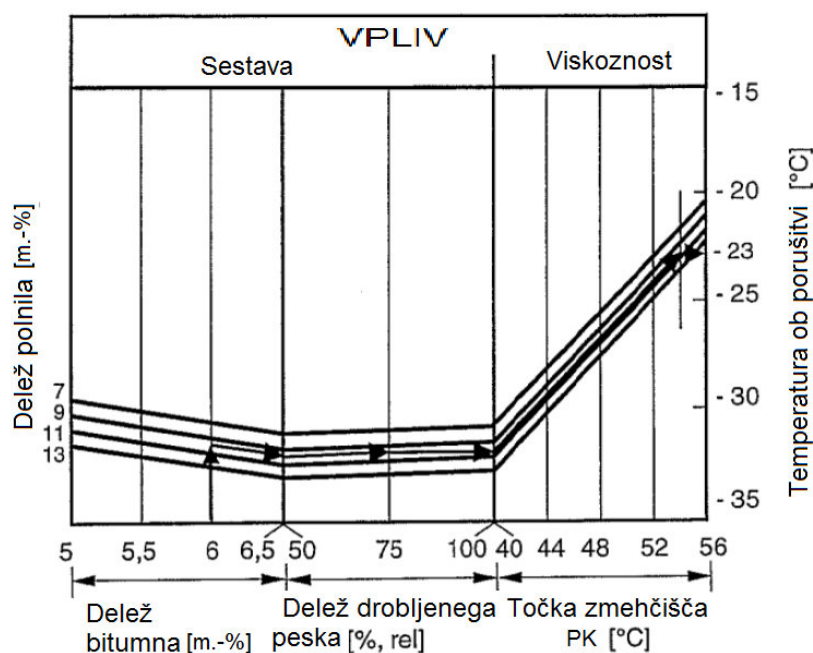


Slika 2.2.3.4: (a) Togost S pri BBR in (b) m -vrednost v povezavi s temperaturo ob porušitvi pri preskusu TSRST (Lacomte in sod., 2000)

Figure 2.2.3.4: (a) BBR stiffness S and (b) m -value against TSRST failure temperature (Lacomte et al., 2000)

2.2.4 Mehanske lastnosti bitumeniziranih zmesi

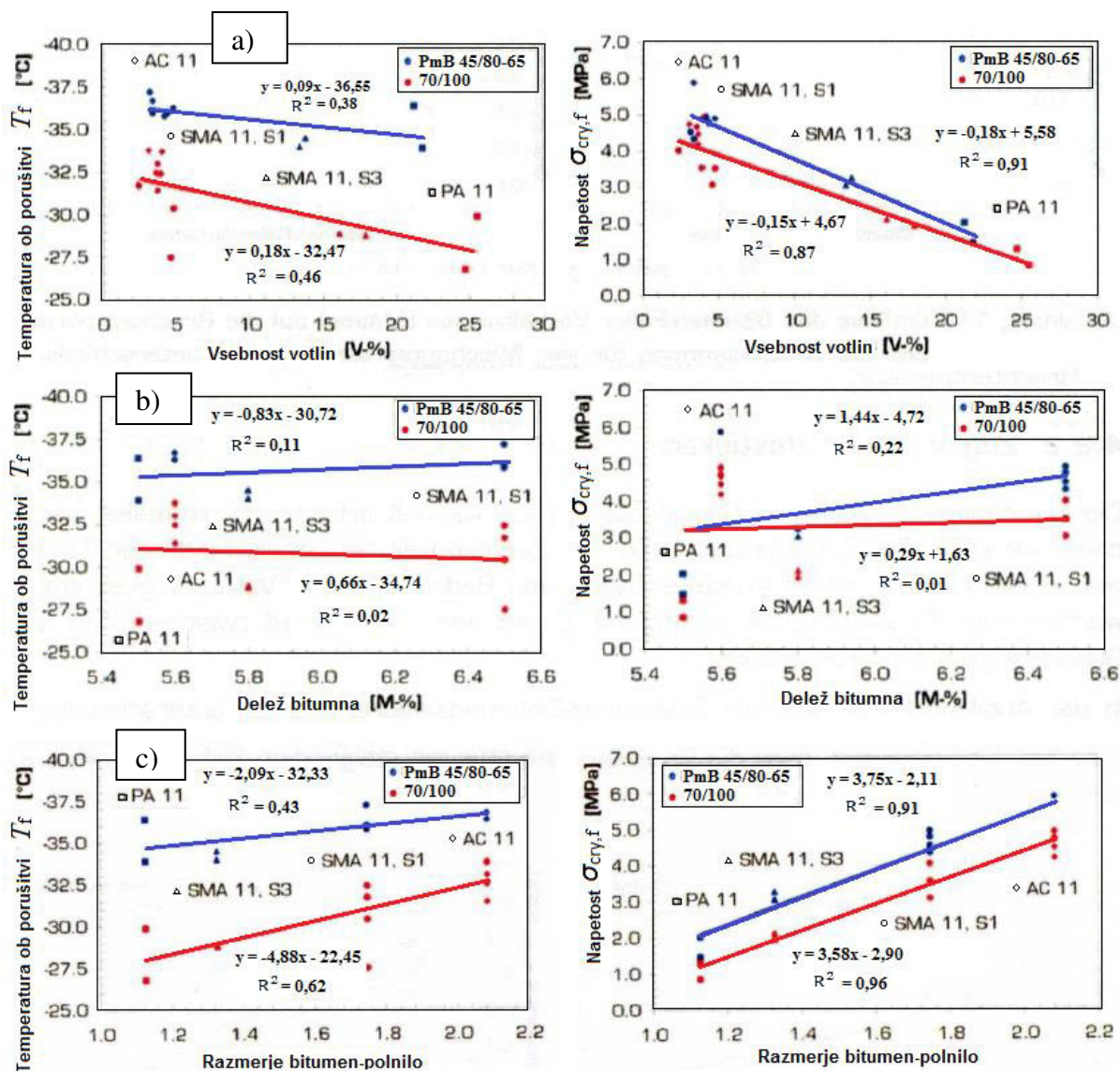
Arand (1987, 2002) v svojih publikacijah navaja, da je najpomembnejša funkcija za vrednotenje zgoščene bitumenizirane zmesi temperatura ob porušitvi T_f pri preskusu TSRST. Na to pa najbolj vpliva sama struktura zmesi. Slika 2.2.4.1 prikazuje vpliv deležev polnila (zrna premera pod 0,125 mm), bitumna in drobljenega peska (zrna premera pod 2 mm) na temperaturo ob porušitvi za bitumenizirano zmes AC 0/11 (AC 11 surf). Omenjeni parametri imajo relativno majhen vpliv v primerjavi z viskoznostjo bitumna, ocenjeno prek zmehčišča po standardnem preskusu prstan in kroglica v °C (Eulitz, 1987, in Arand, 2002).



Slika 2.2.4.1: Temperatura ob porušitvi za AC 0/11 v odvisnosti od deleža polnila in bitumna, drobljenih zrn peska in točke zmečičišča bitumna PK ($r = 0,9014$). Primer: bitumen = 6,0 m.-%, polnilo = 9,8 m.-%, drobljeni pesek = 75 %, točka zmečičišča = 54 °C; rezultat: $T_f = -23$ °C (Arand, 2002).

Figure 2.2.4.1: Fracture temperature of an asphalt concrete 0/11 depending on filler content, binder content, content of crushed stone and softening point ring and ball ($r = 0.9014$). Example: bitumen = 6.0 m.-%, filler = 9.8 m.-%, crushed stone = 75 %, softening point = 54 °C, Result: $T_f = -23$ °C (Arand, 2002).

Read in sodelavci (2003) pravijo, da lahko bistveno zmanjšamo tveganje za nastanek razpok pri nizkih temperaturah, če dobro poznamo lastnosti bitumna (predvsem viskoznost). Tveganje za nastanek razpok raste, če uporabljamo trši bitumen. Spremembe v sestavi in vrsti zmesi kamnitih zrn imajo zelo majhen vpliv na nastanek razpok. Povečevanje deleža bitumna v sestavi bitumenizirane zmesi rahlo zmanjšuje možnost nastanka termičnih razpok. Leutner in sodelavci (2000) so analizirali vpliv zgoščenosti preskušancev bitumeniziranih zmesi AC 11 surf, AC 16 surf, SMA 11 in PA 11 pri nizkih temperaturah. Analiza je pokazala, da je naraščanje natezne trdnosti in rezerve natezne trdnosti proporcionalno naraščanju zgoščenosti materiala. Po drugi strani pa stopnja zgoščenosti ne vpliva na temperaturo pri največji rezervi natezne trdnosti materiala. Spiegl (2008) je analiziral bitumenizirane zmesi AC 11 surf, SMA 11 S1 (največja prometna obremenitev), SMA 11 S3 (srednja prometna obremenitev) in PA 11, pri čemer je uporabil dve vrsti bitumna: polimerni PmB 45/80-65 in cestogradbeni B 70/100 (slika 2.2.4.2).



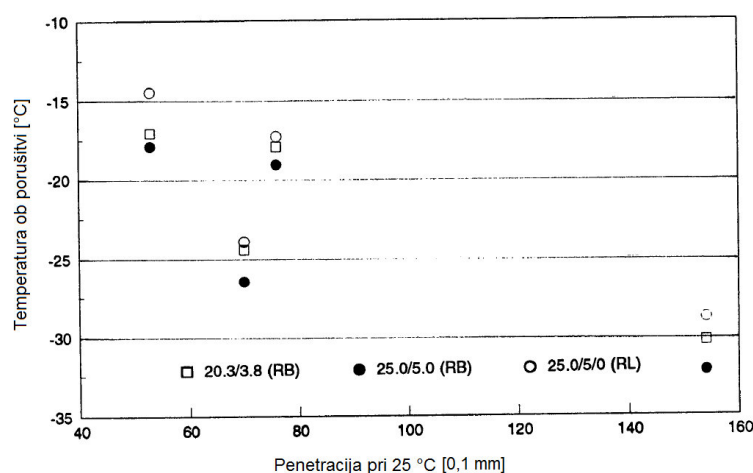
Slika 2.2.4.2: (a) Vpliv vsebnosti votlin na temperaturo ob porušitvi bitumenizirane zmesi v odvisnosti od vrste bitumna, (b) Vpliv deleža bitumna na temperaturo ob porušitvi bitumenizirane zmesi v odvisnosti od vrste bitumna, (c) Vpliv deleža bitumen – polnilo na temperaturo ob porušitvi in napetosti ob porušitvi bitumenizirane zmesi v odvisnosti od vrste bitumna (Spiegl, 2008)

Figure 2.2.4.2: (a) The effect of voids content at failure temperature of asphalt mix depending on the bitumen type, (b) the impact of the share of bitumen at the failure temperature of the asphalt mixture as a function of the bitumen type, (c) the impact of the share of bitumen-filler on the temperature at fracture and stress at failure of asphalt mixtures as a function of the bitumen type (Spiegl, 2008)

Natezne napetosti so bile največje pri AC 11 surf in najmanjše pri PA 11. Podobno je ugotovil Mollenhauer (2008). Nekoliko višje vrednosti kriogenih napetosti imajo zmesi s polimernim bitumnom. Za temperaturo ob porušitvi velja, da izkazuje najnižje vrednosti AC 11 surf in najvišje PA 11 (slika 2.2.4.2).

Spiegl (2008) je analiziral vpliv vsebnosti votlin in bitumna in ugotovil, da večja ko je vsebnost votlin, višja je temperatura in nižja napetost ob porušitvi (slika 2.2.4.2a). Polimerno vezivo PmB v bitumenizirani zmesi je omogočilo nižjo temperaturo in večjo napetost ob porušitvi. *Povečevanje deleža bitumna bistveno ne vpliva na temperaturo in napetost ob porušitvi*. Razlika je v vrsti uporabljenega bitumna, pri čemer kaže boljšo odpornost proti nizkim temperaturam polimerni bitumen PmB. Razmerje bitumen : polnilo = 2 : 1 izkazuje najnižjo temperaturo in največjo natezno napetost ob porušitvi in obratno pri razmerju 1 : 1, pri čemer bitumenizirana zmes s polimeri modificiranega bitumna kaže boljšo odpornost pri nizkih temperaturah (slika 2.2.4.2c). Na bitumenizirani zmesi SMA je Spiegl (2008) ugotovil, da je največja rezerva natezne trdnosti in najnižja temperatura pri najvišji rezervi pri uporabi s polimeri modificiranega bitumna.

Jung in sodelavci (1994) pravijo, da na napetost ob porušitvi bolj vpliva vsebnost votlin kot vrsta zmesi kamnitih zrn. Zmesi zrn z grobo teksturo površine in kubično obliko so odpornejše proti nastanku razpok pri nizkih temperaturah. Najpomembnejše pa so lastnosti bitumna. Rezultati preskusa penetracije bitumna pri 25 °C v kombinaciji z viskoznostjo pri 60 °C omogočajo napoved temperature ob porušitvi T_f bitumenizirane zmesi po TSRST. Na sliki 2.2.4.3 je prikazano razmerje med temperaturo ob porušitvi in penetracijo pri 25 °C. Od tod vidimo, da večja penetracija (mehkejši bitumen) pomeni nižjo temperaturo ob porušitvi, vendar razmerje ni linearno. V tej raziskavi so bili uporabljeni preskušanci dveh različnih velikosti, in sicer: 3,8 cm · 3,8 cm · 20,3 cm (20.3/3.8) in 5,0 cm · 5,0 cm · 25,0 cm (25.0/5.0) z zmesjo kamnitih zrn drobljenega granita (RB) in roženca (RL).

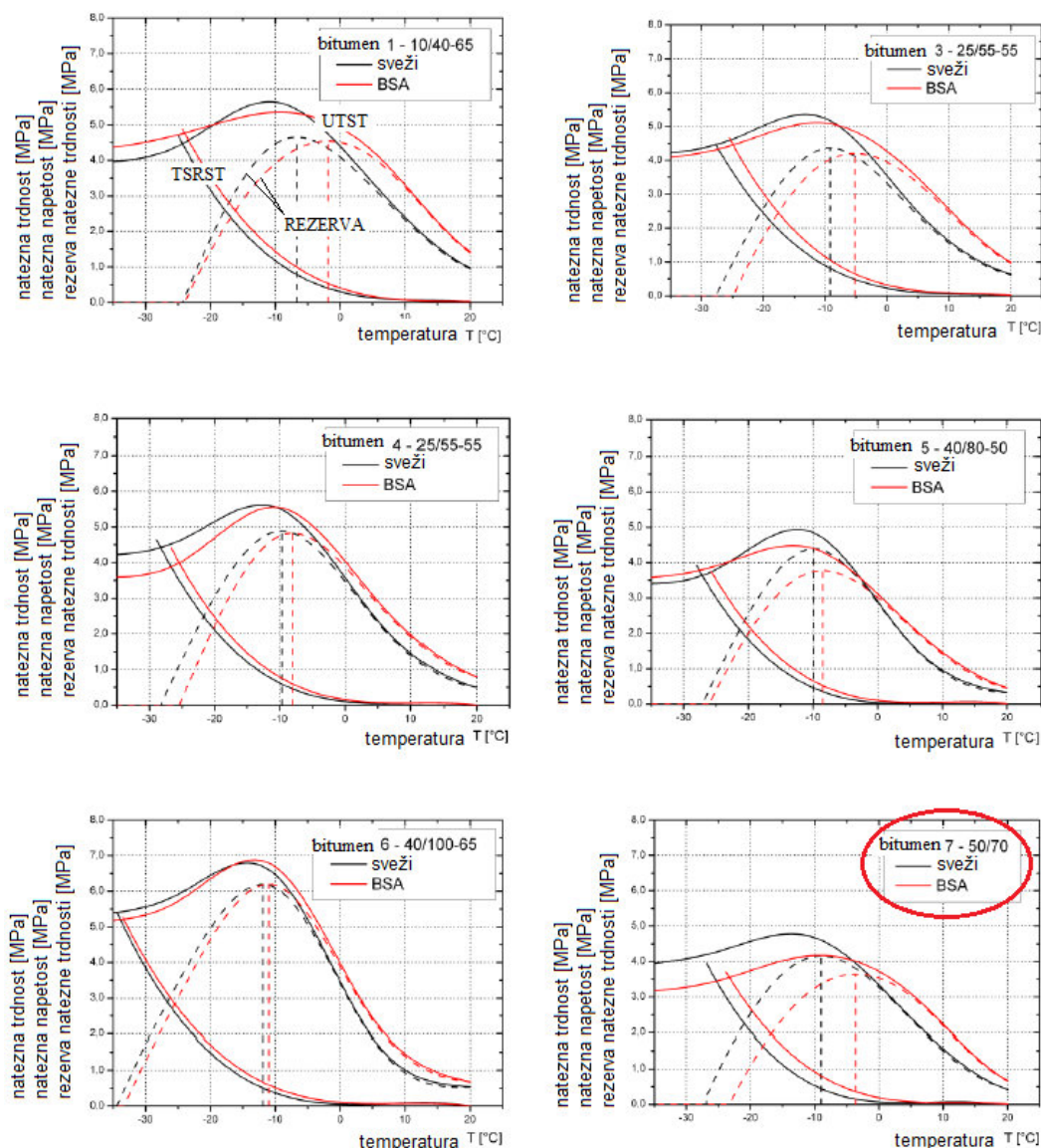


Slika 2.2.4.3: Temperatura ob porušitvi v primerjavi s penetracijo pri 25 °C (Jung in sod., 1994)

Figure 2.2.4.3: Fracture temperature versus penetration at 25 °C (Jung et al., 1994)

2.2.5 Staranje

Büchler in sodelavci (2007), ki so preskušali zmesi drobirja z bitumenskim mastiksom (SMA), so ugotovili, da natezna trdnost bitumenizirane zmesi med staranjem narašča pri visokih in pada pri nizkih temperaturah. Opazovali so tudi obnašanje viskoznosti bitumna in ugotovili, da je pri manjši viskoznosti nižja tudi temperatura pri največji rezervi natezne trdnosti materiala. V raziskavi so uporabili sedem različnih tipov bitumna z različnimi modifikacijami, pri čemer se nista spreminjala sestava zmesi zrn in delež bitumna, da bi ugotovili pomen staranja bitumenizirane zmesi pri nizkih temperaturah. Bitumenizirane plošče so predhodno starali tako, da so jih položili na mrežo in jih izpostavili temperaturi 80 °C in zraku (oksidacijsko staranje) za štiri dni (po nestandardni metodi BAS). Na sliki 2.2.5.1 so prikazane natezne trdnosti, natezne napetosti in rezerve natezne trdnosti za bitumenizirane zmesi z različnimi tipi bitumna. Če podrobneje pogledamo cestogradbeni bitumen 50/70, vidimo, da je zaradi staranja največja rezerva natezne trdnosti manjša za okoli 0,5 MPa in temperatura pri največji rezervi višja za okoli 5 °C. Natezna napetost ob poružitvi je pri starani bitumenizirani zmesi nekoliko manjša (okoli 0,3 MPa) in temperatura ob poružitvi višja za okoli 3 °C. Staranje cestogradbenega bitumna 50/70 močno vpliva na odpornost bitumenizirane zmesi pri nizkih temperaturah.



Slika 2.2.5.1: Vpliv s polimeri modificiranih veziv in staranja na značilnosti SMA pri nizkih temperaturah
(Büchler in sod., 2007)

Figure 2.2.5.1: Impact of polymer modified binders and aging on the low temperature properties of stone mastic
asphalts (Büchler et al., 2007)

2.2.6 Vpliv temperaturnega raztezanja

Boutin in sodelavci (2000) opisujejo, da temperatura z globino plasti linearno narašča, vendar je stopnja prodiranja temperature odvisna tudi od debeline bitumenizirane plasti: debelejša ko je bitumenizirana plast, počasneje se ohlaja. Wistuba (2012) je v svoji predstavitvi prikazal nov matematični model urnega prehoda temperature skozi voziščno konstrukcijo (po Fourierevem zakonu prevajanja toplote) glede na podatke iz večletnega opazovanja, kjer temperatura z globino nelinearno pada (slika 2.2.6.1, levo). Prav tako se s temperaturo in

časom spreminja modul elastičnosti E v vozišču glede na vrsto bitumenizirane plasti (slika 2.2.6.1, desno). Toplotni tok skozi bitumenizirano plast se izračuna po naslednji enačbi:

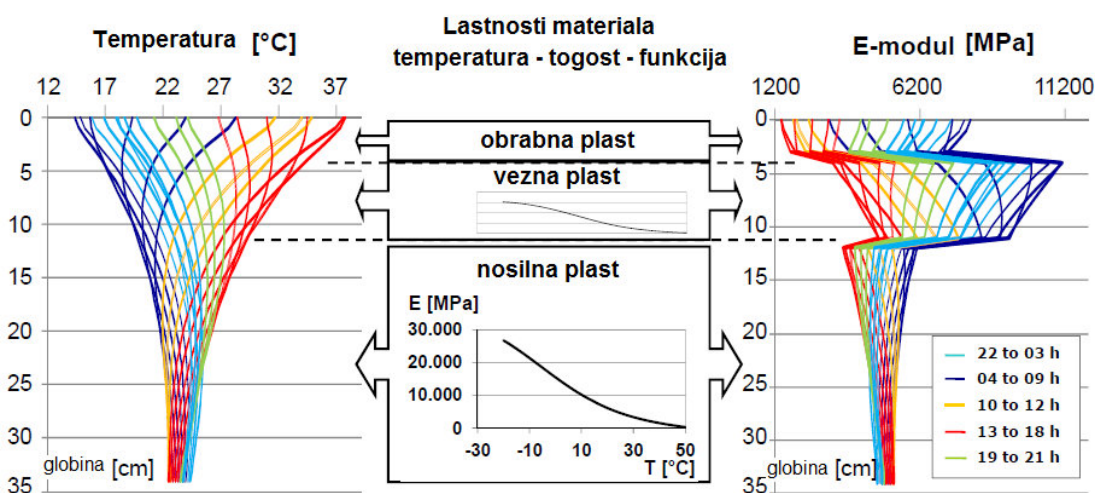
$$q = -k \cdot \text{grad } T, \quad (2.2.6.1)$$

kjer je:

q ... toplotni tok [Wm^{-2}],

k ... toplotna prevodnost [$\text{Wm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$],

$\text{grad } T$... gradient temperature [$^\circ\text{Cm}^{-1}$].



Slika 2.2.6.1: Časovno spreminjanje temperature in porazdelitev togosti v vozišču (Wistuba, 2012)

Figure 2.2.6.1: Variation of temperature – time and stiffness distribution in the pavement (Wistuba, 2012)

Količnik (koeficient) termičnega raztezanja bitumna je večji kot pri zmesi kamnitih zrn v bitumenizirani zmesi. Izračunamo ga lahko po naslednji enačbi (Read in sod., 2003):

$$\alpha_T = \frac{\alpha_B V_B + \alpha_Z V_Z}{V_B + V_Z}, \quad (2.2.6.2)$$

kjer je:

α_T ... količnik temperaturnega raztezanja bitumenizirane zmesi [$^\circ\text{C}^{-1}$],

α_B ... količnik temperaturnega raztezanja bitumna [$^\circ\text{C}^{-1}$],

α_Z ... količnik temperaturnega raztezanja zmesi kamnitih zrn [$^\circ\text{C}^{-1}$],

V_B ... vsebnost bitumna v bitumenizirani zmesi [V.-%],

V_Z ... prostornina zmesi kamnitih zrn v bitumenizirani zmesi [V.-%].

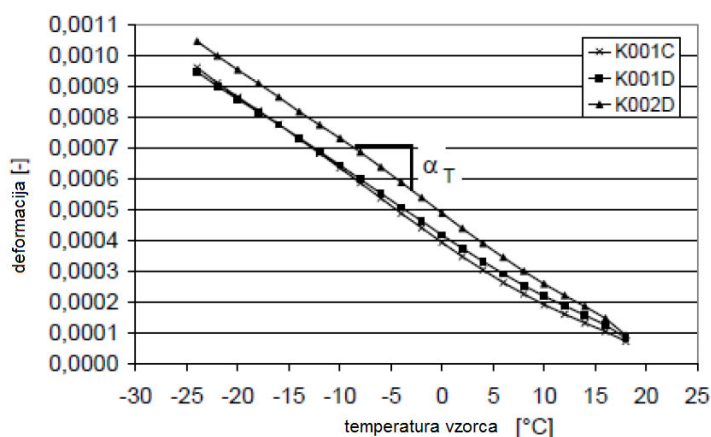
Količnik temperaturnega raztezanja bitumna α_B je približno $6 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Običajno se giblje linearni količnik temperaturnega raztezanja bitumenizirane zmesi α_T med 2 in $3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (Read in sod., 2003).

Če ima telo eno dimenzijo veliko večjo od drugih dveh, lahko povečanje dolžine teh dveh zanemarimo in govorimo o dolžinskem raztezanju. Sprememba dolžine telesa Δx pri dolžinskem temperaturnem raztezanju znaša:

$$\Delta x = \alpha_T \cdot x \cdot \Delta T, \quad (2.2.6.3)$$

pri tem je α_T količnik temperaturnega dolžinskega raztezka, x začetna dolžina telesa in ΔT sprememba temperature.

Slika 2.2.6.2 prikazuje rezultat testa deformiranja materiala AC 11 (AC 11 surf) s temperaturo. Količniki α_T za tri različne preskušance iste sestave bitumenizirane zmesi so več ali manj konstantni skozi celoten preskus. Povprečna vrednost količnika linearnega temperaturnega raztezka v tem primeru je $\alpha_T = 2,2 \cdot 10^{-5} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ (Spiegl in sod., 2005).



Slika 2.2.6.2: Rezultati testiranja AB 11 (AC 11 surf): test krčenja za izpeljavo α_T (Spiegl in sod., 2005)

Figure 2.2.6.2: Results from testing of AB 11(AC 11 surf): shrinkage test to derive α_T (Spiegl et al., 2005)

Ameriški raziskovalni program Strategic Highway Research Program (SHRP) vključuje modele razvrščanja bitumenskih veziv na podlagi raziskav stopnje učinka (ang. performance grade – PG) v povezavi s podnebnimi razmerami, ki veljajo za določeno območje v ZDA. Mohseni (1998) navaja, da je v sklopu SHRP in kanadskega C-SHRP pripravljen model določanja temperature vozišča. Omenjena modela slonita na dolgoletnih podnebnih raziskavah v ZDA in Kanadi na področju ugotavljanja temperature vozišča v odvisnosti od temperature zraka. Po modelu SHRP se najnižje temperature vozišča izračunajo po naslednji enačbi:

$$T(d) = T(\text{air}) + 0,051 \cdot d - 0,000063 \cdot d^2, \quad (2.2.6.4)$$

kjer je:

$T(d)$... temperatura vozišča v globini d [°C],

$T(\text{air})$... temperatura zraka [$^{\circ}\text{C}$],

d ... globina [mm].

V programu SHRP je pripravljen tudi model najnižje temperature (LTPP), ki temelji na rezultatih statistične analize podatkov za najnižje sezonske temperature bitumeniziranega vozišča – SAPT (ang. seasonal asphalt concrete pavement temperature). Temperatura vozišča $T(\text{pav})$ po modelu LTPP se izračuna po naslednji enačbi in velja samo za določeno območje (Mohseni, 1998):

$$T(\text{pav}) = -1,56 + 0,72 \cdot T(\text{air}) - 0,004 \cdot \text{Lat}^2 + 6,26 \cdot \log_{10}(H + 25), \quad (2.2.6.5)$$

kjer je:

$T(\text{pav})$... najnižja temperatura bitumeniziranega vozišča v globini H [$^{\circ}\text{C}$],

$T(\text{air})$... temperatura zraka [$^{\circ}\text{C}$],

Lat ... zemljepisna širina [$^{\circ}$],

H ... globina pod površjem [mm].

2.3 Statistično vrednotenje

2.3.1 Splošno

Statistika je znanost in veda, ki preučuje pojave, ki se kažejo v velikem številu v določenem času in prostoru (Košmelj, 2007a). V asfalterstvu je statistika orodje za ugotavljanje odstopanj kakovosti tako pri terenskih kot tudi pri laboratorijskih preskusih bitumeniziranih zmesi. V asfaltnem laboratoriju se testira kakovost samo manjše količine proizvedene bitumenizirane zmesi. V Ameriki uporabljajo za ugotavljanje kakovosti bitumeniziranih zmesi statistične metode – odstotek znotraj omejitev (ang. percent within limits – PWL). Lastniki cestnih podjetij si želijo kakovostne, homogene in zanesljive materiale. Statistično gledano, lastniki želijo:

- da se statistični vzorec ujema s pričakovanji,
- da ima najnižjo variabilnost in
- da ima najvišjo stopnjo zaupanja.

V Sloveniji je v tehničnih smernicah za ceste TSC 06.300/06.41:2009 opredeljeno, da mora izvajalec istočasno predložiti nadzorniku vse podatke in poročilo notranje kontrole o skladnosti izvedenih del z zahtevami v teh tehničnih pogojih. Vse ugotovljene pomanjkljivosti po teh zahtevah mora izvajalec popraviti, preden nadaljuje delo, drugače se mu obračunajo odbitki za neustrezno kakovost opravljenih del. Odbitek je treba določiti bodisi glede na neustrezno povprečno vrednost za opravljeno delo ali glede na neustrezne posamične ugotovljene vrednosti. Merodajna je večja vrednost odbitka. Naročnik lahko zaradi:

- premajhnega deleža bitumenskega veziva v bitumenizirani zmesi, določenega za sestavo bitumenizirane zmesi,
- neustrezne vsebnosti votlin v vgrajeni bitumenizirani zmesi,
- premajhne debeline vgrajene bitumenizirane plasti,
- preslabe zlepljenosti vgrajenih bitumeniziranih plasti in
- neustrezne ravnosti planuma zgrajene bitumenizirane plasti

uveljavlja finančne odbitke FO. Skrajne mejne vrednosti, tj. še dopustna odstopanja p od mejnih vrednosti, so navedene v preglednici 2.3.1.1. Kar je nad največjo absolutno vrednostjo p, ni ustrezno.

Preglednica 2.3.1.1: Odstopanja od mejne vrednosti lastnosti bitumeniziranih zmesi, vgrajenih v asfaltne krovne plasti (TSC 06.300/06.410:2009)

Table 2.3.1.1: Limit values of the properties of bituminous mixtures built in the asphalt wearing course (TSC 06.300/06.410:2009)

Značilne lastnosti bitumenizirane zmesi	Odstopanje p od meje vrednosti
Delež bitumenskega veziva (m_b)	Do -0,3 m.-%
Vsebnost votlin v vgrajeni bitumenizirani zmesi (V_v)	Lahko odstopa do največ 2 V.-% od zahtevane zgornje ali spodnje vrednosti.
Debelina vgrajene bitumenizirane plasti	Nosilne plasti: od -3 % do -15 % Obrabne plasti: od -3 % do -25 %
Zlepljenost vgrajene bitumenizirane plasti	do -25 %
Ravnost planuma vgrajene bitumenizirane plasti: 4 m dolga letev ali IRI	+4 mm ¹⁾ /+6 mm ²⁾ +0,6

Legenda:

¹⁾ nad mejno vrednostjo za obrabne plasti

²⁾ nad mejno vrednostjo za nosilne plasti

V skladu s TSC 06.300/06.41:2009 se finančne odbitke FO iz vrednoti po naslednji enačbi:

$$FO = p^2 \cdot C \cdot PD \cdot f, \quad (2.3.1.1)$$

kjer je:

FO ... finančni odbitek [€],

p ... odstopanje od mejne vrednosti,

C ... cena za enoto količine opravljenega dela [€/m²],

PD ... obseg pomanjkljivo opravljenega dela,

f ... utežnostni količnik.

Celotna populacija so vsi statistični vzorci. Del populacije pa se imenuje statistični vzorec. Ker se izbira v populaciji neusmerjeno, je največkrat izbran naključni vzorec. Za celotno populacijo in posamezne vzorce se uporabljajo različne oznake parametrov (preglednica 2.3.1.2).

Preglednica 2.3.1.2: Parametri za celotno populacijo in ustrezni statistični parametri za posamezne statistične vzorce

Table 2.3.1.2: Parameters for the entire population and statistical adequate parameters for statistical samples

Parameter	Populacija	Statistični vzorec
Velikost	N	n
Aritmetična sredina (srednja vrednost)	M	$\bar{X}$
Varianca (disperzija)	σ^2	s^2
Standardni odklon	σ	s

Če imamo podatke iz vzorca, in ne iz celotne populacije, izračunamo varianco vzorca po enačbi

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (2.3.1.2)$$

Vrednost vsakega parametra pomeni točkovno oceno parametra. Pri taki vrednosti niso poznane napake pri izračunu. Za ocenitev napake se uporablja intervalna ocena parametra. Intervalna ocena se imenuje interval zaupanja in ima podano zgornjo in spodnjo mejo zaupanja. Poznamo tudi enostranski interval zaupanja. Intervalna ocena je določena iz točkovne ocene, standardne napake in izbrane vrednosti stopnje zaupanja. Verjetnost $1 - \alpha$

imenujemo zaupanje. Najpogosteje se uporabljajo 90-, 95- in 99-odstotna stopnja zaupanja (Tušar in sod., 2000).

2.3.2 Intervali zaupanja

V asfalterški industriji so praviloma privzete ameriške zahteve, da je izbrana 95-odstotna stopnja zaupanja ($1 - \alpha$). Na podlagi tega določimo interval zaupanja za izbrani parameter. Če se predpostavi, da so rezultati preskusov normalno (ali Studentovo) razporejeni, se izračuna območje 95-odstotnega deleža rezultatov. V tem poglavju povzemamo iz literature Tušar in sod. (2000), Košmelj (2007a) in Turk (2012).

2.3.2.1 Normalna porazdelitev

Najpogosteje uporabljana in morda najpomembnejša izmed vseh verjetnosti v statistiki je normalna porazdelitev. O njej je prvi razpravljal francoski matematik de Moivre leta 1733, teorijo pa je dalje razvil Laplace leta 1812. Danes se po dveh znanstvenikih imenuje de Moivre-Laplaceov izrek. Laplace je teorijo normalne porazdelitve uporabljal za preučevanje napak pri poskusih. Za nadaljnji razvoj je bila pomembna metoda najmanjših kvadratov, ki jo je uvedel Legendre leta 1805. Gauss si je nauk o normalni porazdelitvi lastil že od leta 1794 in ga utemeljil leta 1809 z razpravo o normalni porazdelitvi napak.

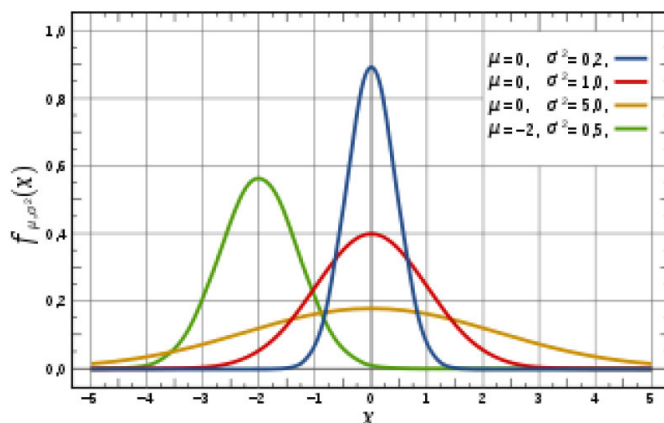
Normalno porazdelitev dobimo, če seštejemo neskončno mnogo enako porazdeljenih neodvisnih slučajnih spremenljivk. V grafični predstavitvi je gostota verjetnosti $f(x)$ normalne porazdelitve v obliki zvona. Normalna porazdelitev ima dva parametra, μ in σ . V naravi imajo spremenljivke populacije najpogosteje normalno porazdelitev. Gostota verjetnosti $f(x)$ za normalno porazdeljeno slučajno spremenljivko X je določena z enačbo:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \quad -\infty < x < \infty. \quad (2.3.2.1.1)$$

Pri vrednostih $\mu = 0$ in $\sigma = 1$ se normalna porazdelitev slučajne spremenljivke X : $N(0,1)$ imenuje standardizirana normalna porazdelitev, ki je podana z enačbo:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}, \quad -\infty < x < \infty. \quad (2.3.2.1.2)$$

Na sliki 2.3.2.1.2 so prikazane funkcije gostote verjetnosti za različne normalne porazdelitve.



Slika 2.3.2.1.2: Funkcija gostote verjetnosti za normalno porazdelitev (Sl. Wikipedija, 2012)

Figure 2.3.2.1.2: Probability density function for a normal distribution (Sl. Wikipedia, 2012)

2.3.2.2 Studentova porazdelitev t

Studentova porazdelitev t (ali Študentova porazdelitev t) je zvezna verjetnostna porazdelitev. Utemelžil jo je William Sealy Gosset (1876–1937) leta 1908 in jo objavil pod psevdonimom Student (Študent). Pozneje je ameriški statistik in ekonomski teoretik Harold Hotelling (1895–1973) razvil porazdelitev t. Oblika in lastnosti Studentove porazdelitve t so zelo podobne standardizirani normalni porazdelitvi. Pri porazdelitvi t je s črko n označeno število enot v vzorcu. Vrednost $(n - 1)$ pomeni število prostostnih stopenj.

Za statistiko t velja enačba

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}}, \quad (2.3.2.2.1)$$

ki je ob predpostavki, da je slučajna spremenljivka X porazdeljena normalno, porazdeljena po Studentovi porazdelitvi t z $n - 1$ prostostnimi stopnjami. S porazdelitvijo t lahko naredimo enovzorčni ali dvovzorčni test. V doktorski disertaciji se osredotočamo na dvovzorčnega, kjer s porazdelitvijo t preskušamo enakost sredin populacije, ki temeljijo na vsakem vzorcu. Za testiranje dvovzorčne porazdelitve t pri dveh različno velikih vzorcih, pri čemer se spremenljivka X pri obeh vzorcih normalno porazdeljuje z enakima variancama: $N(\mu_{x1}, \sigma)$ in $N(\mu_{x2}, \sigma)$, velja enačba

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}) - (\mu_{x1} - \mu_{x2})}{s_x^{*2}} \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}}, \quad (2.3.2.2.2)$$

kjer je s_x^{*2} ocena populacije variance, porazdeljena po porazdelitvi t s prostostnih stopenj $\nu = n_1 + n_2 - 2$, in ima obliko

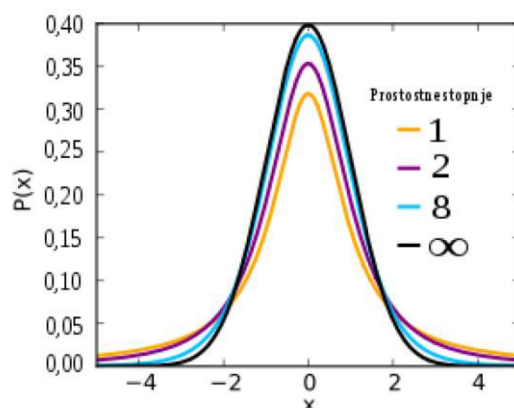
$$s_x^{*2} = \frac{(n_1 - 1) \cdot s_{x1}^{*2} + (n_2 - 1) \cdot s_{x2}^{*2}}{n_1 + n_2 - 2}. \quad (2.3.2.2.3)$$

Pri čemer analiziramo domnevo, ki jo zapišemo:

- H_0 : razlika med sredinama je enaka 0 (ničelna domneva),
- H_a : razlika med sredinama je različna od 0 (alternativna domneva).

Če je $|t_{izra}| > t_{krit}$, potem ničelno domnevo H_0 zavrnemo in sprejmemo H_a . Če je verjetnost p večja od stopnje zaupanja α , potem domneve H_0 ne moremo zavrniti.

Slika 2.3.2.2.1 prikazuje gostoto verjetnosti $f(x)$ (v tem primeru $P(x)$) Studentove porazdelitve t glede na različne prostostne stopnje.



Slika 2.3.2.2.1: Funkcija gostote verjetnosti za Studentovo porazdelitev t (Sl. Wikipedija, 2012)

Figure 2.3.2.2.1: Probability density function for Student's t distribution (Sl. Wikipedia, 2012)

2.3.3 Grubbsov test

Grubbsov test (imenovan po Franku E. Grubbsu, 1969) je statistični test za odkrivanje osamelcev (ang. outlier), ki odstopajo od normalno porazdeljene populacije toliko, da jih je treba za nadaljnjo statistično obravnavo izločiti. Posamezna ekstremna vrednost vpliva tako na srednjo vrednost kot tudi na standardni odklon vzorca (Ulčar, 2006). Grubbsov test je uporaben le za normalno porazdeljene populacije. To pomeni, da je treba najprej preveriti, ali gre za normalno porazdelitev podatkov. S tem testom določimo ekstremno vrednost, ki ne

sodi v niz podatkov. S testom določamo le eno ekstremno vrednost naenkrat. Grubbsov test primerja razdaljo med ekstremno vrednostjo in povprečno vrednostjo s standardnim odmikom celotnega niza podatkov (Ulčar, 2006). Če s testom določimo ekstremno vrednost, jo izločimo iz niza podatkov. Test ponavljamo, dokler ne odkrijemo več nobene ekstremne vrednosti. Test se sme uporabljati le, če imamo več kot šest vrednosti v obravnavanem nizu podatkov.

Osnova za Grubbsov test je ničelna hipoteza:

- H_0 : ni ekstremne vrednosti v nizu podatkov,
- H_a : obstaja vsaj ena ekstremna vrednost v nizu podatkov.

$$G = \frac{\max |X_i - \bar{X}|}{s}, \quad (2.3.3.1)$$

kjer se $\bar{X}$ označuje za srednjo vrednost. To je dvostranska različica Grubbsovega testa.

Enostranski test za iskanje minimalne ekstremne vrednosti:

$$G = \frac{\bar{X} - X_{\min}}{s}, \quad (2.3.3.2)$$

z $X_{\min}$ je označena najmanjša vrednost.

Enostranski test za iskanje maksimalne ekstremne vrednosti:

$$G = \frac{X_{\max} - \bar{X}}{s}, \quad (2.3.3.3)$$

z $X_{\max}$ je označena največja vrednost.

Na koncu preverimo, ali je izračunana ekstremna vrednost zunaj meja kritičnih vrednosti. Grubbsove kritične vrednosti za enostranski test so prikazane v preglednici 2.3.3.1, pri čemer je n število podatkov (npr. meritev).

Preglednica 2.3.3.1: Grubbsove kritične vrednosti za enostranski test (Grubbs, 1969)

Table 2.3.3.1: Grubbs critical value for one-sided test (Grubbs, 1969)

n	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	n	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	n	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$
3	1,1531	1,1546	15	2,409	2,7049	80	3,1319	3,5208
4	1,4625	1,4925	16	2,4433	2,747	90	3,1733	3,5632
5	1,6714	1,7489	17	2,4748	2,7854	100	3,2095	3,6002
6	1,8221	1,9442	18	2,504	2,8208	120	3,2706	3,6619
7	1,9381	2,0973	19	2,5312	2,8535	140	3,3208	3,7121
8	2,0317	2,2208	20	2,5566	2,8838	160	3,3633	3,7542

(se nadaljuje ...)

(... nadaljevanje)

9	2,1096	2,3231	25	2,6629	3,0086	180	3,4001	3,7904
10	2,1761	2,4097	30	2,7451	3,1029	200	3,4324	3,822
11	2,2339	2,4843	40	2,8675	3,2395	300	3,5525	3,9385
12	2,285	2,5494	50	2,957	3,3366	400	3,6339	4,0166
13	2,3305	2,607	60	3,0269	3,4111	500	3,6952	4,0749
14	2,3717	2,6585	70	3,0839	3,471	600	3,7442	4,1214

2.3.4 Analiza variance (ANOVA)

V tem poglavju povzemamo iz literature Turk (2012) in Drobne (2009). Metode analize variance je prvi uporabil statistik in genetik Ronald Fischer, zato so ponekod znane kot »Fisherjeva ANOVA« ali »Fisherjeva analiza variance«. Z ANOVO ugotavljamo, kako ena ali več neodvisnih spremenljivk vpliva na slučajno spremenljivko X. ANOVA uporablja enako konceptno zasnovo kot linearna regresija (XLSTAT, 2013). Neodvisni spremenljivki pogosto rečemo tudi faktor. Vzorec opazovanj je urejen tako, da so vrednosti neodvisnih spremenljivk razvrščene v razrede ali pa neodvisna spremenljivka (faktor) predstavlja opisni znak. ANOVA predpostavlja za varianco ostankov (ang. residuals): normalno razdelitev, neodvisnost in homogenost. V doktorski disertaciji se bomo osredotočili na enojno (enosmerno) analizo variance.

Vrednosti neodvisne spremenljivke X lahko razvrstimo v a razredov in vzorec je pripravljen tako, da je v vsakem razredu enako število elementov n. Vzorec vsebuje a · n elementov. Osnovni model enojne ANOVE (analiza variance enega faktorja) se zapiše z enačbo:

$$X_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij}, \quad i = 1, 2 \dots a, \quad j = 1, 2 \dots n, \quad (2.3.4.1)$$

kjer je:

X_{ij} ... vrednost slučajne spremenljivke X,

μ ... pričakovana vrednost,

α_i ... vpliv posameznih razredov faktorja,

ε_{ij} ... napaka oz. odstopanje od modela.

Predpostavlja se, da napaka ε_{ij} sledi normalni porazdelitvi z vrednostjo nič in standardno deviacijo σ . Pri analizi variance ugotavljamo, ali faktor ne vpliva na spremenljivko X, kar pomeni, da so vsi $\alpha_i = 0$. Pri enojni ANOVI ničelno in alternativno domnevo zapišemo:

- $H_0: \alpha_i = 0$, za vse $i = 1, 2 \dots a$ (faktor ne vpliva),
- $H_a: \alpha_i \neq 0$, za vsaj en $i = 1, 2 \dots a$ (faktor vpliva).

Na podlagi ničelne domneve določimo statistiko F. Izračuna se povprečje za posamezne razrede in skupno povprečje:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (2.3.4.2)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n \cdot a} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (2.3.4.3)$$

Enačba za vsote kvadratov razlik (SS):

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X})^2 = SS_A + SS_E \quad (2.3.4.4)$$

Pri tem je SS_T celotna vsota kvadratov, SS_A vsota kvadratov zaradi vpliva faktorja in SS_E vsota kvadratov nepojasnjenih odstopanj.

Za prostostne stopnje (DF) velja:

$$n_{pSA} = a - 1, \quad (2.3.4.5)$$

$$n_{pSE} = a(n - 1), \quad (2.3.4.6)$$

$$n_{pST} = a \cdot n - 1 = n_{pSA} + n_{pSE} \quad (2.3.4.7)$$

Povprečje kvadratov izračunamo:

$$MS_A = \frac{SS_A}{n_{pSA}}, \quad (2.3.4.8)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{n_{pSE}}. \quad (2.3.4.9)$$

Na koncu se izračuna statistiko F po enačbi:

$$F = \frac{MS_A}{MS_E}. \quad (2.3.4.10)$$

Če je statistika $|F| > F_{\text{krit}}$, ničelno domnevo zavrnilo in sprejmemo domnevo, da je vpliv faktorja na spremenljivko X statistično značilen.

2.3.5 Metoda glavnih komponent (PCA)

Metodo glavnih komponent oz. osi (angl. principal component analysis – PCA) je osnoval Karl Pearson (1901) in nadaljeval Hotelling (1933). V nadaljevanju povzemamo iz literature Ferligoj (2013).

Osnovna zamisel metode je opisati razpršenost n enot v m razsežnem prostoru (določen z m merjenimi spremenljivkami) z množico nekoreliranih spremenljivk – komponent, ki so linearne kombinacije originalnih merjenih spremenljivk. Nove spremenljivke so urejene od najpomembnejše do najmanj pomembne, kjer pomembnost pomeni, da prva glavna komponenta pojasnjuje kar največ razpršenosti osnovnih podatkov. Običajni cilj te analize je poiskati nekaj prvih komponent, ki pojasnjujejo večji del razpršenosti analiziranih podatkov. Analiza glavnih komponent omogoča povzeti podatke s čim manjšo izgubo informacij tako, da zmanjša razsežnost podatkov. Metoda glavnih komponent je statistična metoda, ki analizira medsebojno soodvisnost spremenljivk, da bi se zmanjšalo število spremenljivk. Pri tem nabor spremenljivk preslikamo v množico novih spremenljivk, ki jih imenujemo glavne komponente. Glavnih komponent je toliko, kolikor je osnovnih spremenljivk, in so med seboj neodvisne. Zaporedne glavne komponente so urejene po padajoči velikosti variance. Uspešnejša ko bo redukcija, bolj bodo izhodiščne spremenljivke med seboj povezane (Košmelj, 2007b). Linearno kombinacijo Y_j j -te komponente opazovanih spremenljivk X lahko v matrični obliki zapišemo z enačbo:

$$Y_j = X \cdot a_j, \quad (2.3.5.1)$$

pri čemer je pogoj, da je varianca te linearne kombinacije največja

$$a'_j a_j = \sum_{i=1}^m a_{1i}^2 = 1 \quad (2.3.5.2)$$

in

$$a'_j a_i = 0, \quad i < j, \quad (2.3.5.3)$$

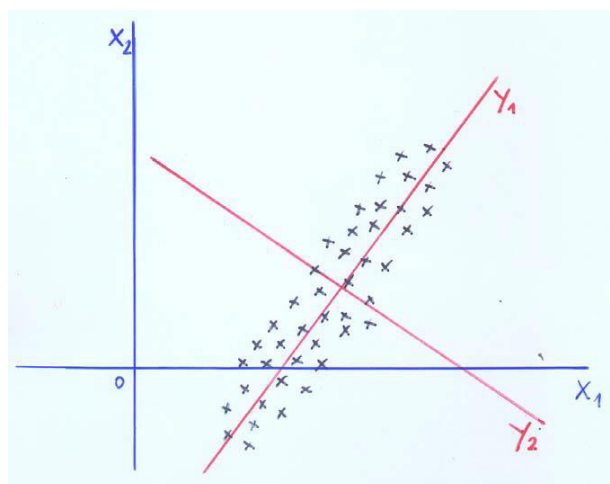
kjer je:

X ... matrika podatkov,

a_j ... matrika vektorjev uteži.

Pri tem je pogoj, da je varianca te linearne kombinacije največja.

Na sliki 2.3.5.1 je prikazan primer v dvorazsežnem prostoru izhodiščnih spremenljivk X_1 in X_2 ter pripadajoči glavni komponenti Y_1 in Y_2 . Ker je povezanost med X_1 in X_2 velika, lahko Y_1 uspešno nadomesti obe izhodiščni spremenljivki X_1 in X_2 . Dvorazsežni prostor spremenimo v enorazsežnega, pri tem je izguba informacije minimalna.



Slika 2.3.5.1: Primer v dvorazsežnem prostoru izhodiščnih spremenljivk X_1 in X_2 ter pripadajoči glavni komponenti Y_1 in Y_2 . Dvorazsežni prostor lahko spremenimo v enorazsežnega, ki ga določa Y_1 (Košmelj, 2007b, slika povzeta po Ferligoj, A.).

Figure 2.3.5.1: X_1 and X_2 are the original variable; the data are represented by points. Y_1 and Y_2 are the corresponding principal components. Two-dimensional space can be reduced to the one-dimensional space defined by Y_1 (Košmelj, 2007b, Figure by Ferligoj, A.).

2.3.6 Metoda delnih najmanjših kvadratov (PLS)

Metoda najmanjših delnih kvadratov (ang. partial least squares method – PLS) je multivariatna statistična metoda, ki posplošuje in združuje lastnosti PCA in večkratne

regresije. Priporočljivo jo je uporabiti v primerih, ko je vhodnih spremenljivk (ang. explanatory variables) X_i veliko in so povezane z izhodnimi spremenljivkami Y_j . Naloga PLS je najti najboljšo mogočo korelacijo med matrikama X in Y (slika 2.3.6.1). Spremenljivki se transformirata (projicirata) v latentni prostor (strukturo) v tem ponavljajočem se procesu (Tušar, Novič, 2009; Wold in sod., 2001). Metoda je hitra, učinkovita in optimalna za merilo, ki temelji na kovarianci (Košmelj, 2007). Nekateri programi razlikujejo PLS1 in PLS2. PLS1 je ustrezna, če je samo ena izhodna (odvisna) spremenljivka, in PLS2, ko je več izhodnih spremenljivk.

Osnovna enačba linearnega modela regresije PLS je (XLSTAT, 2013):

$$Y = X \cdot B + E, \quad (2.3.6.1)$$

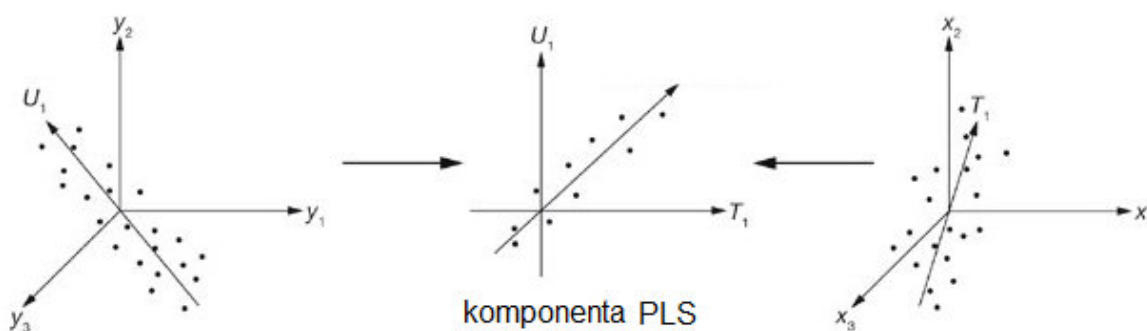
kjer je:

Y ... matrika $n \cdot p$ izhodnih (odvisnih) spremenljivk,

X ... matrika $m \cdot n$ vhodnih spremenljivk,

B ... matrika regresijskih količnikov matrik Y in X , s h komponentami, ki jih generira algoritem regresije PLS,

E ... matrika ostankov.



Slika 2.3.6.1: Geometrijski prikaz delovanja metode najmanjših delnih kvadratov (Bjerrum in sod., 2008)

Figure 2.3.6.1: A geometric representation of partial least squares (PLS) regression (Bjerrum et al., 2008)

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Laboratorijski preskusi

3.1.1 Preskušanje bitumna

Preskušanje bitumna je bilo izvedeno v Laboratoriju za asfalte, bitumne in bitumenske proizvode na Zavodu za gradbeništvo (ZAG) in v Laboratoriju za asfalte na Gradbenem inštitutu ZRMK. V sklopu raziskav sta bila izvedena standardna preskusa bitumna, in sicer:

- penetracija pri 25 °C (SIST EN 1426),
- zmečkščice po PK (SIST EN 1427) in izvrednoten
- indeks penetracije (SIST EN 12591, tč. B4).

Pri nizkih temperaturah sta bila izvedena dva preskusa bitumna:

- pretrgališča po Fraassu (SIST EN 12593) in
- preskus z reometrom z nosilcem, obremenjenim na upogib – BBR (SIST EN 14771).

Preskus penetracije pri 25 °C je bil izveden v skladu s standardom SIST EN 1426 in s penetrometrom Normalab analis P734. Globina penetracije je najstarejša preiskava bitumna in je merilo trdote bitumna. Postopek preskusa je star več kot sto let. Penetracija je izražena v 1/10 mm ter pove, do katere globine v določeno količino bitumna prodre igla točno določenih dimenzij z maso 100 g in v času 5 s.

Pri preskusu določitve zmečkščice je bil uporabljen aparat Normalab analis NBA440 po standardu SIST EN 1427 – analiza, izvedena v vodi. Temperatura zmečkščice bitumna po postopku prstana in kroglice (PK) je temperatura, pri kateri plast bitumna v prstanu pod bremenom jeklene kroglice doseže določeno stopnjo deformacije. Zmečkščice je temperatura začetka tečenja bitumna in je izhodišče za oceno obnašanja bitumna pri visokih temperaturah.

Temperatura pretrgališča po Fraassu je tista temperatura, pri kateri plast bitumna določene debeline počne oz. nastanejo razpoke na njej, ko se pod točno določenimi pogoji hladi (1 °C/min) in upogiba. Preskus pretrgališča po Fraassu odraža začetek krhkega območja

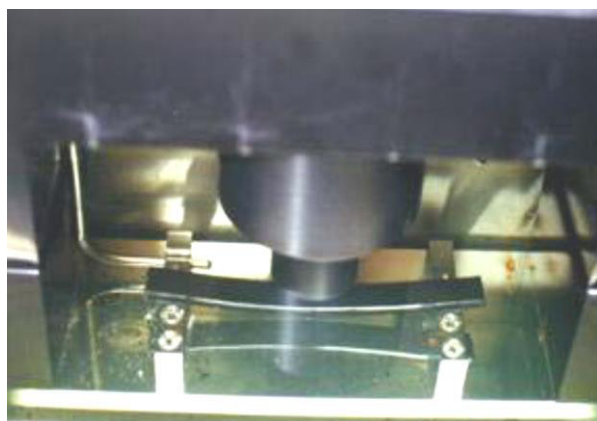
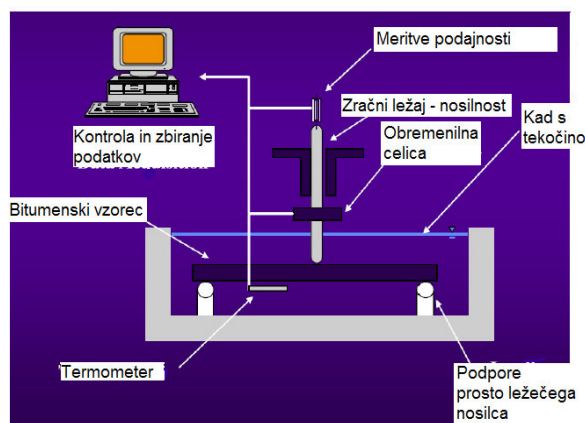
bitumna pri nizkih temperaturah. Opravljen je bil v skladu s standardom SIST EN 12593 z avtomatskim aparatom proizvajalca Herzog Lauda (slika 3.1.1.1).



Slika 3.1.1.1: Avtomatska oprema za preskušanje točke loma po Fraassu

Figure 3.1.1.1: Automatic equipment for Fraass breaking point test

Grass (2007) omenja, da je bitumen pri nizkih temperaturah zelo trd, zato je SHRP razvil BBR, ki omogoča ugotavljanje togosti bitumna pri nizkih temperaturah. Preskus BBR se uporablja za merjenje lezenja bitumna pri konstantni obtežbi in temperaturi. Temperatura BBR je neposredno povezana z najnižjo temperaturo uporabnosti vozišča, ko se bitumen obnaša bolj ali manj kot elastična trdna snov, in ne kot viskozna tekočina. Osnovni deli opreme za preskus BBR so ogrodje z obtežbo, kopel z nadzorovano temperaturo v kadi in računalniška kontrolna enota za spremljanje in zbiranje podatkov (slika 3.1.1.2).



Slika 3.1.1.2: Shematični prikaz opreme za preskus BBR (Justin in sod., 2010)

Figure 3.1.1.2: Equipment for Bending Beam Reometer test (Justin et al., 2010)

Sila prek plastične osi pritisne na sredino prosto ležečega nosilca iz bitumna. Za izračun togosti lezenja in merjenje pomika na sredini nosilca se uporablja enačba kot za prosto ležeči nosilec, s predpostavko, da je točkovna sila P na sredini nosilca z razdaljo med podporama L .

Pomik, sila, čas in temperatura, ki jih naprava spremlja, prek kontrolne enote podajo rezultat togost lezenja $S(t)$. Poleg tega se določi vrednost m , ki je rezultat naklona tangente na grafu $\log S(t)$ v odvisnosti od $\log t$ (pri 60 sekundah). Vrednost m je merilo za odpornost veziva proti razpokam; višja ko je vrednost m , manjša je občutljivost za razpoke (Justin, 2010). Togosti $S_m(t)$ se izračuna po enačbi:

$$S_m(t) = \frac{\sigma}{\varepsilon_{axial}} = \frac{\frac{3PL}{2bh^2}}{\frac{6\delta(t)h}{L^2}} = \frac{PL^3}{4bh^3\delta(t)}, \quad (3.1.1.1)$$

kjer je:

$S_m(t)$... togost v času t [MPa],

P ... izmerjena sila [N],

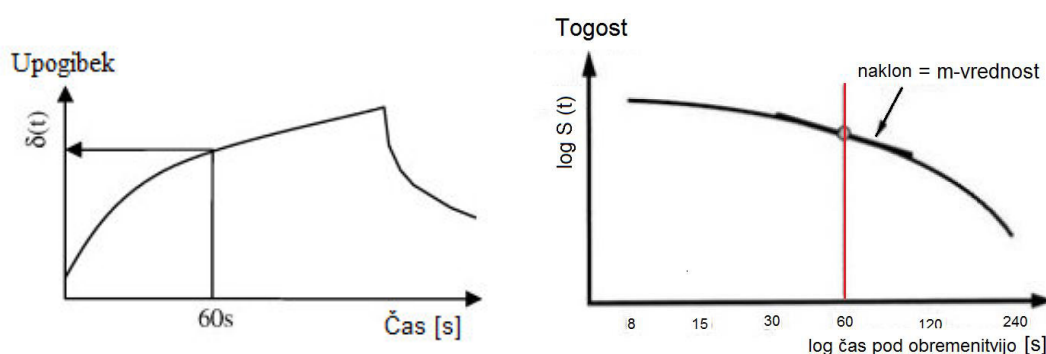
L ... razdalja med podporama [mm],

b ... širina preskušanca bitumna [mm],

h ... debelina preskušanca bitumna [mm],

$\delta(t)$... pomik na sredini razpona v času t [mm].

Graf upogibka in togosti v odvisnosti od časa t pri preskusu BBR je prikazan na sliki 3.1.1.3.



Slika 3.1.1.3: Graf podajnosti in togosti v odvisnosti od časa pri preskusu BBR (Grass, 2007)

Figure 3.1.1.3: Deflection and stiffness graph of time at BBR test (Grass, 2007)

Po standardu SIST EN 14771 se izračuna togost s prilagoditvijo polinoma druge stopnje soodvisnosti med logaritmom izmerjenih vrednosti togosti in logaritmom časa pod obremenitvijo po naslednji enačbi:

$$\log S_c(t) = A + B \cdot \log(t) + C \cdot [\log(t)]^2, \quad (3.1.1.2)$$

kjer je:

$S_c(t)$... upogibna togost pri času t [MPa],

A , B in C ... regresijski količniki,

t ... čas pod obremenitvijo [s].

Togost se izračuna pri času obremenjevanja 8 s, 15 s, 30 s, 60 s, 120 s in 240 s po enačbi 3.1.1.2. Vrednost m se pri isti časovni obremenitvi izvednoti po enačbi:

$$m(t) = \left| \frac{d \log[S(t)]}{d \log(t)} \right| = |B + 2 \cdot C \cdot \log(t)|. \quad (3.1.1.3)$$

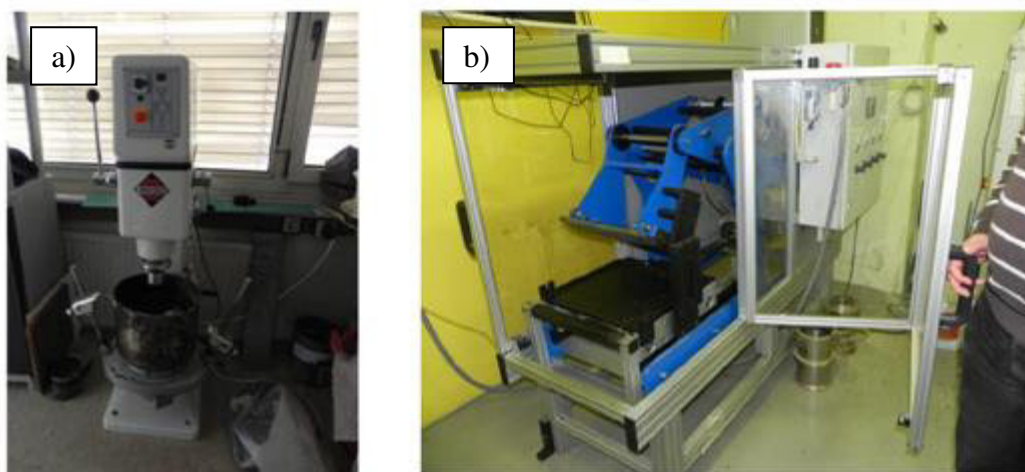
V Sloveniji še nimamo predpisanih meja pri standardnem preskusu BBR za togosti S_{60} in vrednost m_{60} (pri obremenitvi 60 s). V Avstriji in Ameriki sta v SUPERPAVE specifikacijah PG določeni naslednji mejni vrednosti:

- $S_{60} < 300$ MPa,
- vrednost $m_{60} > 0,3$.

3.1.2 Priprava bitumeniziranih zmesi in preskušancev

Bitumenizirane zmesi in preskušanci za preskušanje so bili pripravljeni v Laboratoriju za asfalte, bitumne in bitumenske proizvode na Zavodu za gradbeništvo (ZAG). Osnovna oprema za pripravo bitumenizirane zmesi in preskušancev je:

- sejalni stolp s siti,
- laboratorijski mešalnik (slika 3.1.2.1a) in
- valjasti zgoščevalnik (slika 3.1.2.1b); postopek se izvaja po standardu SIST EN 12697-33.



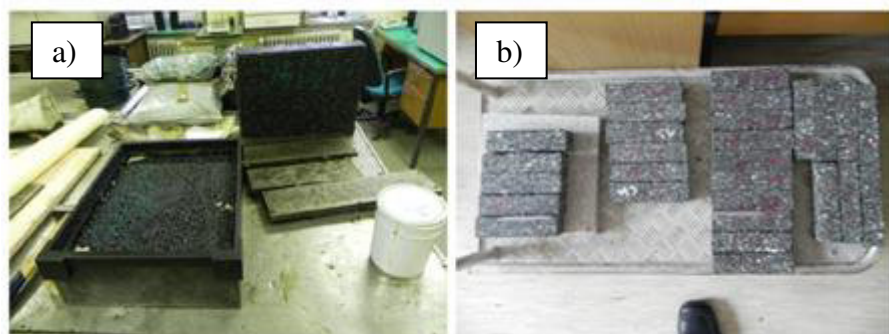
Slika 3.1.2.1: (a) Laboratorijski mešalnik Rego, (b) Valjasti zgoščevalnik proizvajalca Cooper

Figure 3.1.2.1: (a) The laboratory mixer Rego, (b) Roller compactor Cooper

Najprej se je vsako frakcijo zmesi kamnitih zrn presejalo in v točno določenih deležih dodalo v laboratorijski mešalnik. Zatem se je dodal še določen delež bitumna. Temperaturno območje mešanja je od 25 °C do 250 °C. Maksimalni čas mešanja je od 2 do 3 minute.

Valjčni zgoščevalnik je izdelal angleški proizvajalec Cooper. Največja obremenitev valjčnega zgoščevalnika za zgoščanje bitumeniziranih zmesi je 30 kN na 305 mm širine valja. Sestavljata ga kalup, velik 40 · 30 · 8 cm, za zgoščanje bitumenizirane zmesi z nastavkom za polnjenje in premični segmentni element, ki ima obliko odseka valjastega telesa. Bitumenizirano zmes se napolni v pravokotni kalup za zgoščanje, ob določenem naraščanju obremenitve in ob določeni temperaturi se najprej z reguliranim pomikom izvede predzgostitev. Temperatura zgoščanja je odvisna od vrste bitumenizirane zmesi (npr. za bitumen B 50/70 znaša $T = 150\text{ °C}$, za bitumen PmB, modificiran s polimeri, pa $T = 165\text{ °C}$). Nato se izvede glavno zgoščanje z regulirano silo. Med zgoščanjem se kalup za zgoščanje, ki je nameščen na saneh, pomika naprej in nazaj. Segmentni zgoščevalni element izvaja zgoščanje v štirih stopnjah po osem prehodov. Na sliki 3.1.2.2a je prikazana plošča iz bitumenizirane zmesi v kalupu po koncu zgoščevanja v valjčnem zgoščevalniku.

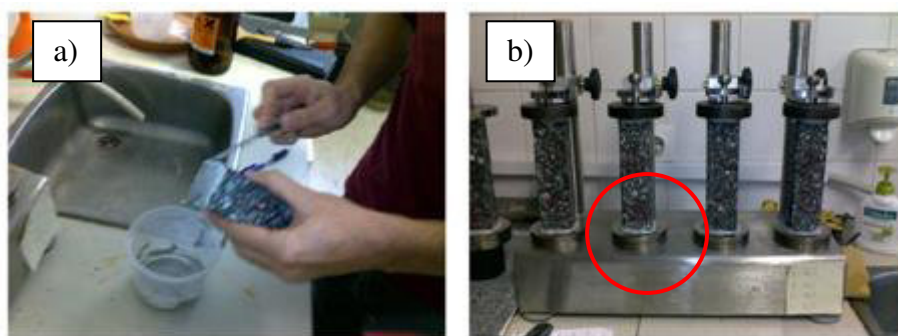
Iz bitumeniziranih plošč, pripravljenih z valjastim zgoščevalnikom, se izrežejo prizme dimenzij $(40 \pm 2) \cdot (40 \pm 2) \cdot (160 \pm 2)\text{ mm}^3$ (slika 3.1.2.2b), ki so posušene na zraku do konstantne mase. Iz vsake plošče je izrezanih 12 prizem, na katerih se določi gostota z votlinami preskušanca $\rho_{Ap}\text{ [kg/m}^3\text{]}$ po standardnem postopku SIST EN 12697-6 (Bitumenizirane zmesi – Preskusne metode za vzorčenje bitumenizirane zmesi – 6. del: Ugotavljanje gostote bitumenskih preskušancev), postopek B: SSD.



Slika 3.1.2.2: (a) Plošča dimenzije $40 \cdot 30 \cdot 8\text{ cm}^3$ po končanem zgoščevanju v valjčnem zgoščevalniku, (b) Iz plošče izrezani prizmatični preskušanci $4 \cdot 4 \cdot 16\text{ cm}^3$

Figure 3.1.2.2: (a) Plate dimensions $40 \cdot 30 \cdot 8\text{ cm}^3$ after the compaction of the roller compactor, (b) Cuts plate of the prismatic samples $4 \cdot 4 \cdot 16\text{ cm}^3$

Preskusi TSRST in UTST so bili izvedeni v treh različnih laboratorijih, ZAG Ljubljana, ISTU (TU Wien) in Ramtech Zagreb. Pri lepljenju preskušancev na kovinski podstavek (vmesnik) omenjeni laboratoriji uporabljajo svoje lepilo, način in debelino nanosa lepila na preskušanec in kovinski podstavek. V standardu ni podrobno predpisano, *kakšno lepilo* naj se uporabi in koliko naj se ga nanese na *preskušanec*. Zagotovljeno pa mora biti, da med preskusom ne pride do porušitve v samem lepilu oz. na ploskvi med kovinskim podstavkom in lepilom. Slika 3.1.2.3a prikazuje nanos lepila na preskušanec v laboratoriju na ZAG-u. Lepilo se nanese le na skrajni osnovni ploskvi preskušanca in nato se centrično vpne med kovinskima podstavkoma (slika 3.1.2.3b). Pri tem je bilo uporabljeno lepilo iz dveh komponent: epoksid 573.8 A in poliamin B proizvajalca Kleiberit. Za boljšo kompaktnost se doda manjšo količino keroka.



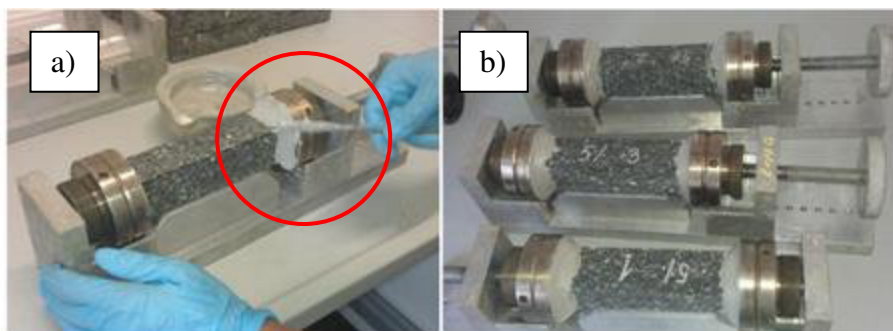
Slika 3.1.2.3: Priprava preskušanca v laboratoriju ZAG-a: (a) Nanos lepila na preskušanec, (b) Pripravljeni preskušanci po lepljenju

Figure 3.1.2.3: Prepared samples on ZAG: (a) Application of glue on a sample, (b) Prepared samples after application of glue

Tudi na TU Wien uporabljajo dvokomponentno lepilo iz komponent 573.8 A in B proizvajalca Kleiberit, vanj pa dodajo še kameno moko za boljšo kompaktnost. Razmerje za pripravo lepila (za tri prizmatične preskušance):

- komponenta A = 120 g,
- komponenta B = 40 g,
- kamena moka (polnilo) = 80 g.

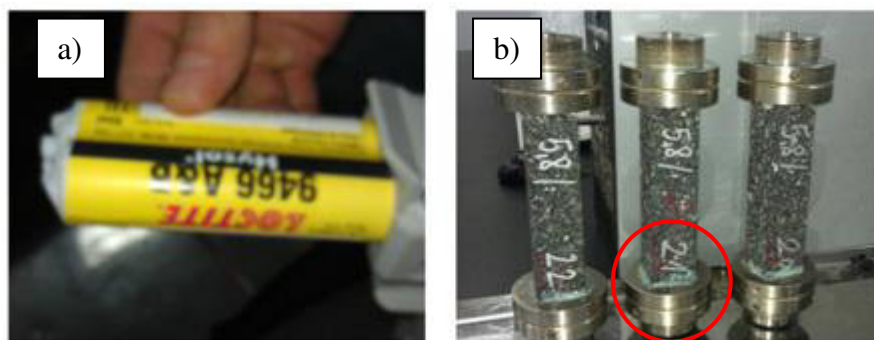
Na sliki 3.1.2.4 je prikazan postopek priprave in nanos lepila, ki je uveljavljen na TU Wien. Lepilo je naneseno na osnovno ploskev med preskušancem in podstavkom in tudi vzdolž preskušanca, pod kotom 45°.



Slika 3.1.2.4: Priprava preskušanca na TU Wien: (a) Nanos lepila na preskušanec, (b) Pripravljeni preskušanec po lepljenju

Figure 3.1.2.4: Prepared samples on TU Wien: (a) Application of glue on a sample, (b) Prepared samples after application of glue

V laboratoriju Ramtech v Zagrebu pa uporabljajo lepilo proizvajalca Loctite 9466, ki je prav tako sestavljeno iz komponent A in B (slika 3.1.2.5a). Na sliki 3.1.2.5b je razvidno, da se lepilo nanese le na osnovno ploskev.



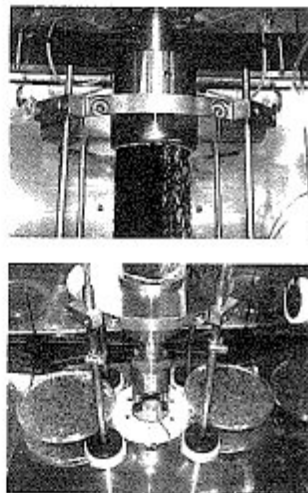
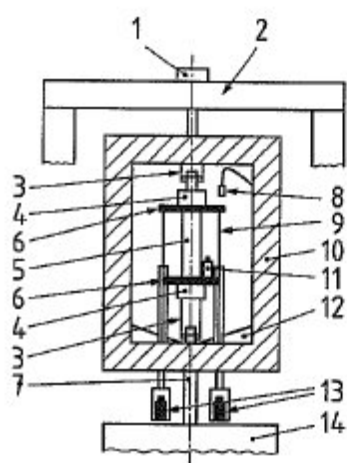
Slika 3.1.2.5: Priprava preskušanca v Ramtechu: (a) Lepilo Loctite, (b) Pripravljeni preskušanci po lepljenju

Figure 3.1.2.5: Prepared samples on Ramtech: (a) Glue Loctite, (b) Prepared samples after application of glue

3.1.3 Statični preskusi bitumeniziranih zmes pri nizkih temperaturah

Na Zavodu za gradbeništvo (ZAG) se opravlja preskušanje pri nizkih temperaturah na stiskalno-trgalem stroju proizvajalca Frank (glej poglavje 2.2.2) v skladu s standardom SIST EN 12697-46. Sistem za merjenje sile ima merilno območje ± 50 kN in spada v točnostni razred 1 po standardu ISO 7500-1. Deformiranje preskušancev merimo s senzorji LVDT z natančnostjo meritve $\pm 0,5$ μm . Temperaturna komora ima temperaturno območje od -40 $^{\circ}\text{C}$ do 100 $^{\circ}\text{C}$, z natančnostjo nastavitve $0,1$ $^{\circ}\text{C}$ in s stabilnostjo temperature $< \pm 0,1$ $^{\circ}\text{C}$. Omogoča padanje temperature s hitrostjo $10 \pm 0,5$ $^{\circ}\text{C/h}$. V skladu s standardom SIST EN 12697-46 sta mogoča dva primera opreme za preskuse TSRST in UTST. Na sliki 3.1.3.1 so shematično

prikazani sestavni deli opreme za preskušanje bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah (po EN 12697-46, primer 2). Omenjeno opremo uporabljajo v laboratorijih TU Wien in Ramtech.



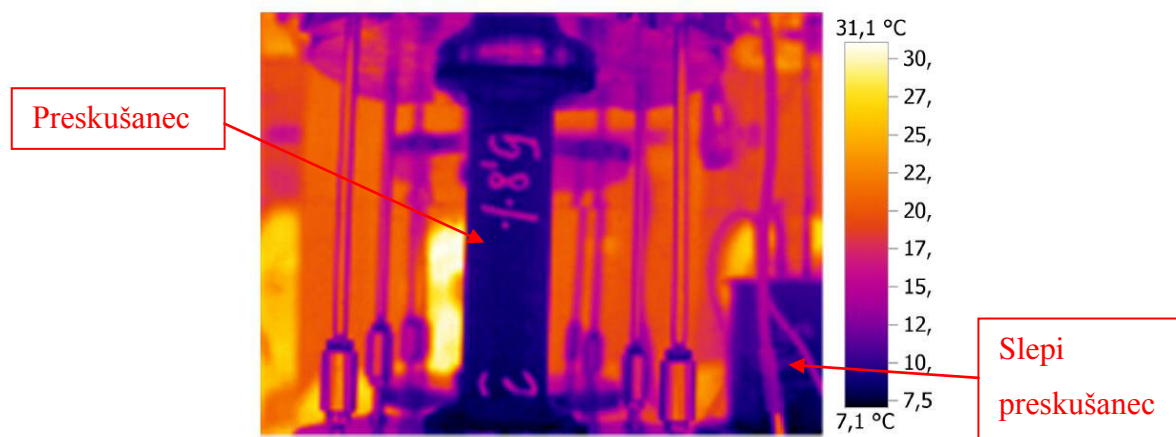
Legenda:

- | | | |
|------------------------|---|--|
| 1 – obremenilna celica | 6 – zaključna plošča | 11 – slepi preskušavec s temperaturnim senzorjem |
| 2 – obremenilni okvir | 7 – obremenilna palica | 12 – ventilator |
| 3 – vrtljiva glava | 8 – temperaturni senzor za merjenje tem. v komori | 13 – senzorji LVDT |
| 4 – vijačna objemka | 9 – invar palica, ki je povezana s senzorji LVDT | 14 – pogonski motor |
| 5 – preskušavec | 10 – temperaturna komora | |

Slika 3.1.3.1: Primer aparature za preskušanje natega pri nizkih temperaturah (SIST EN 12697-46)

Figure 3.1.3.1: Example of test device for tension test at low temperatures (SIST EN 12697-46)

Slika 3.1.3.2 prikazuje posnetek z infrardečo (IR) kamero v temperaturni komori vsaj eno uro predhodno temperiranega preskušanca pri temperaturi $T_0 = 10\text{ °C}$. Iz slike vidimo, da ima slepi preskušavec »dummy« (enaka sestava bitumenizirane zmesi kot preskušavec, ki se preskuša), v katerega je v sredino vstavljen temperaturni senzor za zaznavanje temperature v preskušancu (na sliki spodaj desno), temperaturo kot vstavljeni preskušavec za preskus.



Slika 3.1.3.2: IR-slika pred začetkom preskusa pri $T_0 = 10\text{ °C}$

Figure 3.1.3.2: IR photo before starting test at $T_0 = 10\text{ °C}$

3.1.3.1 Preskus termične napetosti ob preprečeni deformaciji preskušanca (TSRST)

Pri preskusu termične napetosti ob preprečeni deformaciji preskušanca potrebujemo najmanj 3 preskušance, ki jih toga vpnemo in ohlajamo pri nespremenjeni dolžini. V laboratorijih na ZAG-u in v Ramtechu se na začetku temperira preskušane eno do dve uri v komori na temperaturi $T = 20 \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Na TU Wien se temperira preskušane eno uro na temperaturi $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$. V tem času nanj ne sme delovati nobena dodatna sila. V skladu s standardom SIST EN 12697-46, točka 8.2.1 (Note 1), je priporočljiva začetna temperatura $T_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, vendar na TU Wien že vrsto let preskus izvajajo pri $T_0 = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Na sliki 3.1.3.1.1 je shematično prikazan potek preskusa TSRST na TU Wien.

Ohlajanje poteka s hitrostjo $dT = 10 \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C/h}$. Rezultat preskusa je termična napetost pri nizki temperaturi v odvisnosti od temperature $\sigma_{cry}(T)$ [MPa], napetost ob poružitvi $\sigma_{cry,f}(T)$ [MPa] in temperatura ob poružitvi T_f [$^{\circ}\text{C}$]. Za predstavitev termične napetosti pri nizki temperaturi se rezultati modelirajo s kubičnim modelom:

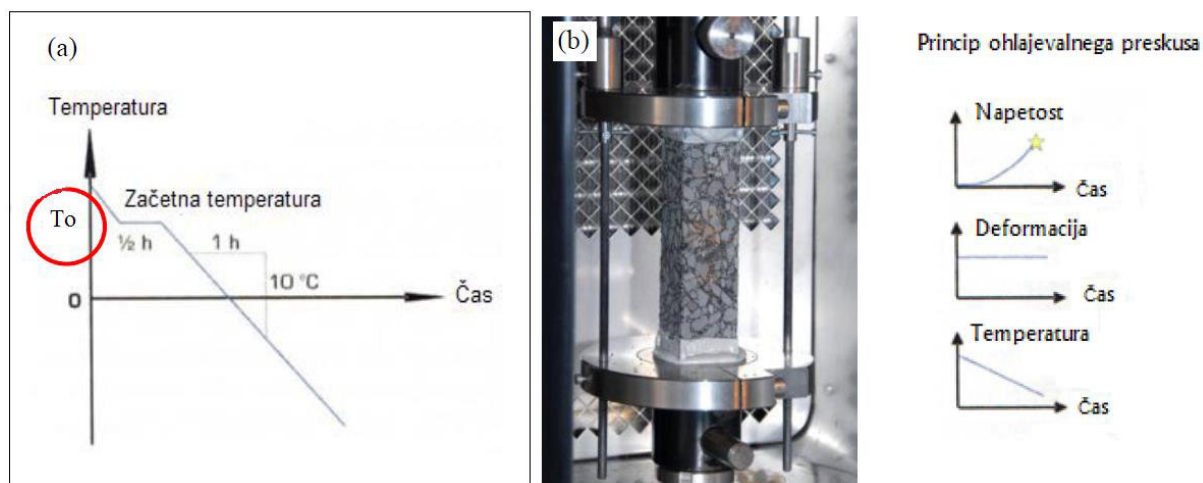
$$\sigma_{cry}(T) = \sum_{k=0}^n \alpha_k T^{(n-k)}; \quad n = 3, \quad (3.1.3.1.1)$$

kjer so:

$\sigma_{cry}(T)$... termična napetost v odvisnosti od temperature [MPa],

α_k ... parametri polinoma krivulje TSRST,

T ... temperatura [$^{\circ}\text{C}$].



Slika 3.1.3.1.1: (a) Shema temperaturnega poteka pri preskusu TSRST (Spiegl, 2008), (b) Princip preskusa TSRST

Figure 3.1.3.1.1: (a) The temperature scheme of the TSRST (Spiegl, 2008), (b) Test principle of TSRST

3.1.3.2 Preskus enoosne natezne napetosti (UTST)

Za preskusu enoosne natezne napetosti potrebujemo najmanj 3 preskušance pri vsaki testni temperaturi, ki jih enakomerno raztegujemo pri konstantni temperaturi. Preskušanje poteka pri temperaturah $T_i = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na začetku temperiramo preskušanece najmanj 1 do 2 uri v komori na temperaturi $T = T_i \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. V tem času na preskušanece ne sme delovati nobena dodatna sila. Raztezanje poteka s hitrostjo $d\varepsilon = (0,625 \pm 0,025)\text{ } \%/ \text{min}$. Rezultata sta natezna trdnost β_t [MPa] in raztezek pri porušitvi ε_f [%].

Relativni raztezek pri porušitvi ε_f je razmerje med spremembo dolžine in začetno dolžino preskušanca in se izračuna po enačbi:

$$\varepsilon_f = \frac{\Delta L}{L} \cdot 100\text{ } \%, \quad (3.1.3.2.1)$$

kjer je:

ΔL ... raztezek preskušanca ob porušitvi [mm],

L ... dolžina preskušanca [mm].

V standardu SIST EN 12697-46 ni jasno zapisane enačbe raztezka pri porušitvi. Ugotavljamo, da bi bilo za nedvoumnost rezultata raztezka pri porušitvi ε_f v omenjeni standard treba zapisati zgornjo enačbo (3.1.3.2.1). Sedaj namreč nekateri laboratoriji uporabljajo dejansko dolžino preskušanca L , drugi pa predpisano najmanjšo dolžino, tj. 160 mm. Razlika je zaradi te nedoslednosti lahko očitno velika.

Slika 3.1.3.2.1 predstavlja potek preskusa UTST. Za predstavitev poteka natezne trdnosti v odvisnosti od temperature $\beta_t(T)$ se rezultati modelirajo s kubičnim modelom:

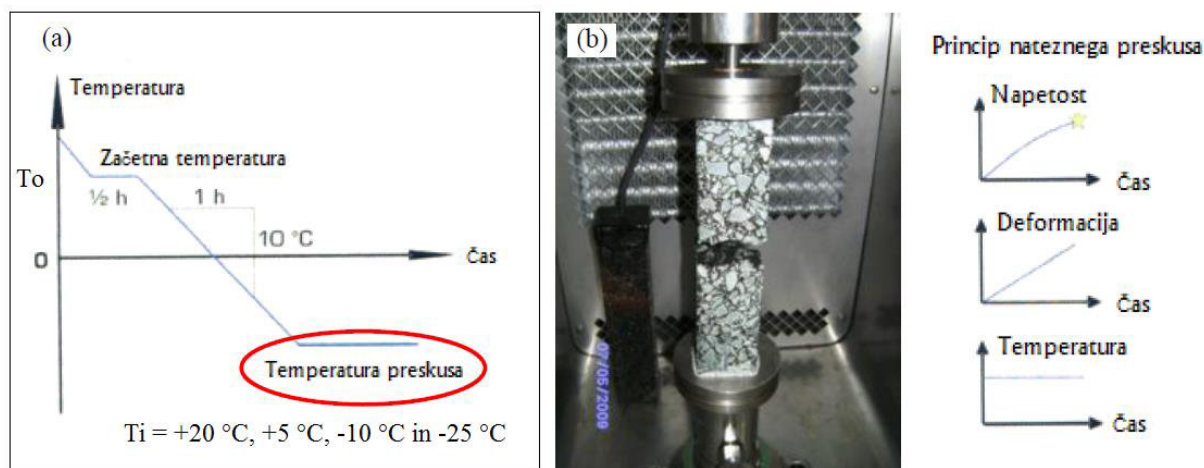
$$\beta_t(T) = \sum_{j=0}^n \alpha_j T^{(n-j)}; \quad n = 3, \quad (3.1.3.2.2)$$

kjer so:

$\beta_t(T)$... natezna trdnost v odvisnosti od temperature T [MPa],

α_j ... parametri polinoma krivulje UTST,

T ... temperatura [$^{\circ}\text{C}$].



Slika 3.1.3.2.1: (a) Shema temperaturnega poteka pri preskusu UTST (Spiegl, 2008), (b) Princip preskusa UTST
Figure 3.1.3.2.1: (a) The temperature scheme of test UTST (Spiegl, 2008), (b) Principle of test UTST

3.1.4 Posredna natezna trdnost (ITS)

Preskus posredne (indirektne ali razcepne) natezne trdnosti se izvaja po standardu SIST EN 12697-23 (Ugotavljanje posredne natezne trdnosti bitumenskih preskušancev). Postopek opisuje določanje posredne natezne trdnosti valjastih preskušancev. Preskušanci so lahko pripravljene v laboratoriju ali so izvrtani iz vozišča in imajo premer 100 mm, 150 mm ali 160 mm. Preskušance je treba predhodno skladiščiti vsaj 4 ure pri izbrani temperaturi okolice 5°C . Cilindrični preskušanec se vpne v napravo (slika 3.1.4.1) ter obremeni s konstantno hitrostjo stiskanja 50 mm/min do porušitve. Vertikalna sila povzroči natezno napetost. Za izračun deformacije so potrebne predpostavke:

- preskušanec obravnavamo v ravninskem napetostnem stanju,
- material se obnaša linearno elastično,
- material je izotropen,
- material je homogen,
- znan je Poissonov količnik ν ,
- poznana je točkovna sila P (Read, 2003).

Končni rezultat ITS je povprečna vrednost trdnosti najmanj treh preskušancev. Ob porušitvi se zabeleži še tip porušitve, ki je lahko kot čista natezna porušitev, deformacija ali kombinacija obeh.



Slika 3.1.4.1: Oprema za ITS, ki jo uporabljajo na ZAG-u.

Figure 3.1.4.1: Apparatus for ITS at ZAG

3.2 Material

Za raziskovalno delo je uporabljen material, ki je bil skladiščen v asfaltni bazi Drnovo pri Krškem (CGP, d. d., Novo mesto). Za pripravo bitumenizirane zmesi so uporabljeni kamena moka – polnilo (Stahovica – SLO), frakcije zmesi kamnitih zrn 0/2 mm, 2/4 mm, 4/8 mm in 8/11 mm (Ljubeščica – HR) ter bitumen B50/70 (madžarski MOL).

V laboratoriju se je pripravilo za dve osnovni bitumenizirani zmesi AC 11 surf B50/70 in AC 8 surf B50/70 po pet sestav z različnim deležem bitumna. Osnova za pripravo posameznih sestav (predhodna sestava) je pridobljena v asfaltnem obratu Drnovo. Za bitumenizirano zmes AC 11 surf B50/70 se je pripravilo pet ciljnih sestav z deležem veziva: 4,0 m.-%, 5,0 m.-%, 5,4 m.-%, 5,8 m.-% in 6,0 m.-%, in za AC 8 surf B50/70 tudi pet ciljnih sestav z deležem veziva 4,0 m.-%, 5,0 m.-%, 5,4 m.-%, 5,8 m.-% in 6,2 m.-% (preglednica 3.2.1).

Preglednica 3.2.1: Ciljne sestave bitumeniziranih zmesi

Table 3.2.1: Target compositions of asphalt mixtures

Vrsta bit. zmesi	Sestava 1	Sestava 2	Sestava 3	Sestava 4	Sestava 5
	Predviden delež bitumna v sestavi [m.-%]				
AC 11 surf	4,0	5,0	5,4	5,8	6,0
AC 8 surf	4,0	5,0	5,4	5,8	6,2

3.2.1 Bitumen

V raziskovalni nalogi je uporabljen cestogradbeni bitumen B50/70 proizvajalca MOL iz Madžarske. Preskušane je bil ves čas ustrezno skladiščen. Na njem so bili izvedeni preskusi v skladu z zahtevami standarda SIST EN 12591 za cestogradbena bitumenska veziva. Priprava preskušancev in preskusi bitumna so bili izvedeni v laboratoriju na ZAG-u. V preglednici 3.2.1.1 so prikazane lastnosti vhodnega cestogradbenega bitumna B50/70, ki je uporabljen v bitumeniziranih zmesih AC 11 surf in AC 8 surf. Iz rezultatov (v preglednici 3.2.1.1) vidimo, da so lastnosti vhodnega bitumna skladne z zahtevami standarda SIST EN 12591.

Preglednica 3.2.1.1: Lastnosti vhodnega cestogradbenega bitumna B50/70

Table 3.2.1.1: Properties of bitumen B50/70

Lastnosti	Enota	Postopek za preskus	Ugotovljena vrednost		Zahteve po SIST EN 12591:2009
			Laboratorijska oznaka preskušanca		
			AC 11 surf H53/10B	AC 8 surf H2/12B	
Penetracija pri 25 °C	mm/10	SIST EN 1426	56	58	od 50 do 70
Zmehčišče po PK	°C	SIST EN 1427	52	50	od 46 do 54
Indeks penetracije	-	SIST EN 12591, tč. B4	−0,4	−0,4	od −1,5 do 0,7
Pretrgališče po Fraassu	°C	SIST EN 12593	−15	−8	≤ −8
Gostota z votlinami (analiza izvedena v vodi)	kg/m ³	SIST EN ISO 3838	1,0142	n. d.	-
Mejna temperatura BBR	°C	SIST EN 14771	n. d.	−15,6 ¹	-
				−17,6 ²	-

Opomba: ¹temperatura, izmerjena pri togosti $S_{60} = 300$ MPa, ²temperatura izmerjena pri vrednosti $m_{60} = 0,3$.

V preglednici 3.2.1.2 so predstavljeni rezultati preskusov lastnosti ekstrahirane bitumna B50/70 iz bitumenizirane zmesi AC 11 surf in v preglednici 3.2.1.3 rezultati preskusov lastnosti ekstrahirane bitumna B50/70 iz bitumenizirane zmesi AC 8 surf. Ekstrakcija bitumna je izvedena v skladu s standardom SIST EN 12697-1 z avtomatsko ekstrakcijsko napravo INFRATEST.

Vsebnost bitumna v bitumenizirani zmesi se določi po naslednji enačbi:

$$V_B = m_B \cdot \frac{\rho_A}{\rho_B}, \quad (3.2.1.1)$$

kjer je:

V_B ... vsebnost bitumna v bitumenizirani zmesi [V.-%],

m_B ... masni delež bitumna v preskušancu [m.-%],

ρ_A ... gostota z votlinami bitumenizirane zmesi [kg/m^3],

ρ_B ... gostota bitumna [kg/m^3].

Preglednica 3.2.1.2: Lastnosti cestogradbenega bitumna B50/70, ekstrahiranega iz zmesi AC 11 surf

Table 3.2.1.2: Properties of bitumen B50/70 extracted from mixture AC 11 surf

Lastnosti	Enota	Postopek za preskus	Ugotovljena vrednost					Zahteve po SIST EN 12591
			Laboratorijska oznaka preskušanca					
			H1006	H3893	H3894	H3898	H1115	
Delež bitumna	m.-%	SIST EN 12697-1	3,9	4,9	5,3	5,6	6,0	$B_{\min,4,4}^1$ $B_{\min,3,0}^2$
Penetracija pri 25 °C	mm/10	SIST EN 1426	n. p.	39	n. p.	n. p.	n. p.	od 50 do 70
Zmehčišče po PK	°C	SIST EN 1427		56,6				od 46 do 54
Indeks penetracije	-	SIST EN 12591, tč. B4		−0,25				od −1,5 do 0,7
Pretrgališče po Fraassu	°C	SIST EN 12593		−13				≤ −8

Opomba: ¹velja v skladu z zahtevami po SIST EN 13108-20 (začetni preskus), ²velja v skladu z zahtevami po SIST EN 13108-1 (tj. po TSC 06.300/06.410).

Preglednica 3.2.1.3: Lastnosti cestogradbenega bitumna B50/70, ekstrahiranega iz zmesi AC 8 surf

Table 3.2.1.3: Properties of bitumen B50/70 extracted from mixture AC 8 surf

Lastnosti	Enota	Postopek za preskus	Ugotovljena vrednost					Zahteve po SIST EN 12591
			Laboratorijska oznaka preskušanca					
			H1042	LA54-12a	H1029	LA55-12a	H1057	
Delež bitumna	m.-%	SIST EN 12697-1	4,0	4,9	5,4	5,8	6,2	$B_{min}4,4^1$ $B_{min}3,0^2$
Penetracija pri 25 °C	mm/10	SIST EN 1426	n. p.	n. p.	37	n. p.	n. p.	od 50 do 70
Zmehčišče po PK	°C	SIST EN 1427			55,6			od 46 do 54
Indeks penetracije	-	SIST EN 12591, tč. B4			-0,57			od -1,5 do 0,7
Pretrgališče po Fraassu	°C	SIST EN 12593			-7			≤ -8

Opomba: ¹velja v skladu z zahtevami po SIST EN 13108-20 (začetni preskus), ²velja v skladu z zahtevami po SIST EN 13108-1 (tj. po TSC 06.300/06.410).

3.2.2 Zmes kamnitih zrn

Posamezne frakcije zmesi kamnitih zrn so bile ponovno presejane v skladu s standardom SIST EN 933-1. Za polnilo je bila uporabljena zmes zrn apnenca ($\leq 0,125$ mm) iz kamnoloma

Stahovica in za frakcije 0/2, 2/4, 4/8 in 8/11 mm zmes zrn drobljenega diabaza iz kamnoloma Ljubešćica na Hrvaškem. Na sliki 3.2.2.1 so prikazane deponije frakcije 0/2, 2/4, 4/8 in 8/11 mm Ljubešćica v asfaltnem obratu Drnovo pri Krškem.



Slika 3.2.2.1: Deponije frakcij kamnitih zrn v asfaltnem obratu Drnovo pri Krškem

Figure 3.2.2.1: Landfill with stone aggregate fraction in asphalt plant in Krško Drnovo

Lastnosti kamene moke, pridobljene z mletjem (polnilo), z nazivom Calcit VP, iz separacije Stahovica podjetja Calcit (SLO), so prikazane v preglednici 3.2.2.1. Polnilo ima izjavo CE št. 1404-CPD-814 podjetja Calcit, d. o. o., Stahovica, v skladu s standardom SIST EN 13043. V preglednici 3.2.2.2 so predstavljene lastnosti posameznih frakcij 0/2, 2/4, 4/8 in 8/11 mm drobljene zmesi kamnitih zrn za bitumenizirane zmesi iz nahajališča Ljubešćica, Hruškovec na Hrvaškem. Material ima izjavo CE št. 1404-CPD-988 po standardu SIST EN 13043 podjetja Kaming, d. d., Ljubešćica (HR).

Preglednica 3.2.2.1: Lastnosti drobljene kamene moke Calcit VP iz separacije Stahovica

Table 3.2.2.1: Properties of filler Calcit VP of separation Stahovica

Sito z odprtino [mm]	Postopek	Vsota presejka [V.-%]
2,0	SIST EN 933-1	100
0,125		98
0,063		89
Druge lastnosti	Postopek	Vrednosti
Delež vlage v polnilu	SIST EN 1097-7	0,09 %
Zmehčišče polnila »delta prstan-kroglica«	SIST EN 13179-1	$\Delta_{R\&B}8/25$
Votline v suho zgoščenem polnilu	SIST EN 1097-4	$V_{28/38}$

Preglednica 3.2.2.2: Lastnosti posameznih frakcij drobljenih kamnitih zrn Ljubešćica iz nahajališča Hruškovce

Table 3.2.2.2: Properties of aggregate mixture Ljubešćica from location Hruškovce

Lastnosti	Postopek	Velikost frakcije			
		0/2 mm	2/4 mm	4/8 mm	8/11 mm
Zrnavost	SIST EN 933-1	GF ₈₅	GC _{90/15}	GC _{90/15}	GC _{90/15}
Oblika grobih zrn	SIST EN 933-4	n. d.	n. d.	SI ₁₅	SI ₁₅
Delež finih delcev	SIST EN 933-1	f ₁₀	f ₁	f ₁	f ₁
Gostota zrn [Mg/m ³]	SIST EN 1097-7	2,77	2,87	2,88	2,87
Vpijanje vode v groba zrna	SIST EN 1097-6	WA ₂₄₂	WA ₂₄₂	WA ₂₄₁	WA ₂₄₂
Petrografska analiza	JUS.B.B8.0048	diabaz	diabaz	diabaz	diabaz
Kakovost finih delcev	SIST EN 933-9	MB _{F10}	n. d.	n. d.	n. d.

Presejki že pripravljene sestave zmesi kamnitih zrn 0/11 mm so prikazani v preglednici 3.2.2.3. Rezultati presejkov so skladni z zahtevami standardov SIST EN 13108-1 in SIST 1038-1. Iz statistične obdelave podatkov je razvidno, da so rezultati znotraj dovoljenih odstopanj od srednje vrednosti $x \pm 3 \cdot s$. Grubbsov enostranski test pa je pokazal, da je na situ odprtine 2 mm preskušanca H3898-10 osamelec minimalne vrednosti ($G_{\min} = 1,716 > 1,6714$; $\alpha = 0,05$); kljub temu preskušanelec ni izločen iz nadaljnjih analiz, ker ni bilo mogoče ponavljati preskusa.

Preglednica 3.2.2.3: Sejalna analiza zmesi kamnitih zrn 0/11 mm

Table 3.2.2.3: Sieve analysis of mineral aggregate for 0/11 mm

Oznaka sestave	Oznaka preskušanca	Sito kvadratne odprtine [mm]							
		0,063	0,25	0,71	2,0	4,0	8,0	11,2	16,0
		Vsota presejkov [m.-%]							
Sestava 1	H1006-12	9,3	13,8	21,3	37,6	54,9	78,5	97,0	100
Sestava 2	H3893-10	9,1	13,2	20,5	37,5	54,7	79,4	98,9	100
Sestava 3	H3894-10	9,0	13,8	20,9	37,6	54,5	79,4	96,7	100
Sestava 4	H3898-10	8,6	13,0	20,5	36,8	53,5	78,3	98,0	100
Sestava 5	H1115-11	9,0	13,6	21,1	37,8	55,4	78,6	97,0	100
ZAHTEVE									
Sp. mejna vrednost po SIST EN 13108-1		2	-	-	10	-	-	90	100
Zg. mejna vrednost po SIST EN 13108-1		12	-	-	60	-	-	100	100
Sp. priporočena vrednost po SIST 1038-1		6	10	-	30	45	70	90	100
Zg. priporočena vrednost po SIST 1038-1		12	25	-	55	70	90	100	100
STATISTIKA									
Število meritev – n		5	5	5	5	5	5	5	5
Povprečna vrednost – x		9,0	13,5	20,9	37,5	54,6	78,8	97,5	100,0
Standardna deviacija – s		0,3	0,4	0,4	0,4	0,7	0,5	0,9	0,0
Največja vrednost – x _{max}		9,3	13,8	21,3	37,8	55,4	79,4	98,9	100,0
Najmanjša vrednost – x _{min}		8,6	13,0	20,5	36,8	53,5	78,3	96,7	100,0
Razpon – R		0,7	0,8	0,8	1,0	1,9	1,1	2,2	0,0

(se nadaljuje ...)

(... nadaljevanje)

$x + 3 \cdot s$	9,8	14,6	21,9	38,6	56,7	80,4	100,3	100,0
$x - 3 \cdot s$	8,2	12,4	19,8	36,3	52,5	77,3	94,8	100,0
$G_{\min} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$	1,569	1,321	1,006	1,716	1,571	1,034	0,896	-
$G_{\max} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$	1,177	0,881	1,230	0,884	1,143	1,072	1,508	-

V preglednici 3.2.2.4 so prikazani presejki že pripravljene sestave zmesi kamnitih zrn 0/8 mm. Rezultati presejkov so znotraj zahtev. Iz statistične obdelave podatkov je razvidno, da so rezultati znotraj dovoljenih odstopanj.

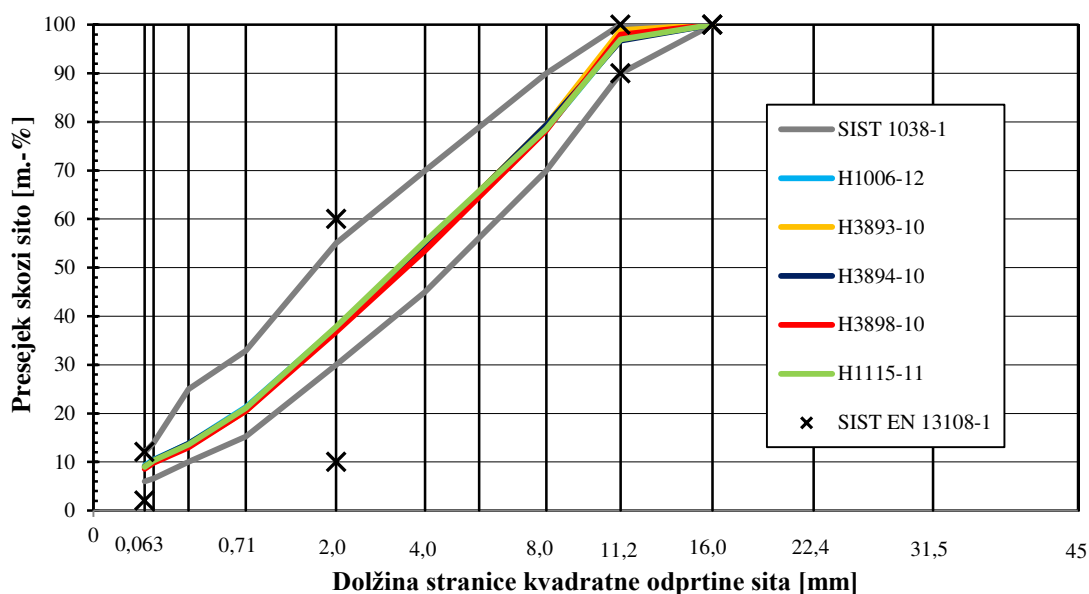
Preglednica 3.2.2.4: Sejalna analiza zmesi kamnitih zrn 0/8 mm

Table 3.2.2.4: Sieve analysis of mineral aggregate 0/8 mm

Oznaka sestave	Oznaka preskušanca	Sito kvadratne odprtine [mm]						
		0,063	0,25	0,71	2,0	4,0	8,0	11,2
		Vsota presejkov [m.-%]						
Sestava 1	H1042-12	9,1	16,3	26,1	47,0	65,7	98,4	100,0
Sestava 2	A49-12	9,0	16,1	25,9	47,3	67,3	98,5	100,0
Sestava 3	H1029-12	8,6	15,7	25,8	48,0	68,7	98,8	100,0
Sestava 4	A 51-12	9,1	15,9	26,0	47,7	66,9	98,7	100,0
Sestava 5	H1057-12	8,7	16,5	26,0	48,5	67,2	97,9	100,0
ZAHTEVE								
Sp. mejna vrednost po SIST 1038-1		2,0	-	-	10,0	-	90,0	100,0
Zg. mejna vrednost po SIST 1038-1		13,0	-	-	72,0	-	100,0	100,0
Sp. priporočena vrednost po SIST 1038-1		6,0	11,0	18,6	40,0	60,0	90,0	100,0
Zg. priporočena vrednost po SIST 1038-1		13,0	27,0	37,8	68,0	85,0	100,0	100,0
STATISTIKA								
Število meritev – n		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Povprečna vrednost – x		8,9	16,1	26,0	47,7	67,2	98,5	100,0
Standardna deviacija – s		0,2	0,3	0,1	0,6	1,1	0,4	0,0
Največja vrednost – $x_{\max}$		9,1	16,5	26,1	48,5	68,7	98,8	100,0
Najmanjša vrednost – $x_{\min}$		8,6	15,7	25,8	47,0	65,7	97,9	100,0
Razpon – R		0,5	0,8	0,3	1,5	3,0	0,9	0,0
$x + 3 \cdot s$		9,6	17,0	26,3	49,5	70,4	99,5	100,0
$x - 3 \cdot s$		8,2	15,2	25,6	45,9	63,9	97,4	100,0
$G_{\min} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,279	1,265	1,403	1,192	1,363	1,597	-
$G_{\max} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		0,853	1,265	1,228	1,362	1,437	0,969	-

Slika 3.2.2.2 predstavlja presejne krivulje zrnivosti 0/11 mm za posamezno sestavo (H1006, H3893, H3894, H3898, H1115). Iz slike je razvidno, da se presejne krivulje med seboj prekrivajo, kar dokazuje, da se sestava zmesi kamnitih zrn praktično ni spreminjala. Tudi delež polnila (zrna pod 0,125 mm) se ne spreminja. Pri spreminjanju deleža bitumna se ob

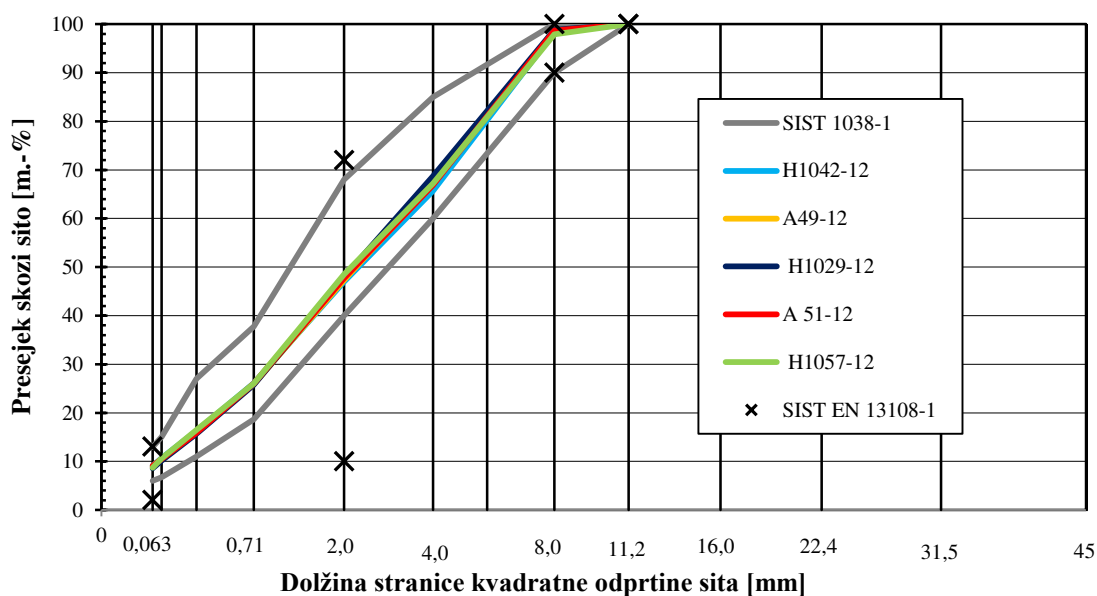
nespremenjeni presejni krivulji spreminja vsebnost votlin. Največja gostota zmesi kamnitih zrn (2814 kg/m^3) se je prevzela iz začetnega preskusa št. CGP 06-2009.



Slika 3.2.2.2: Presejne krivulje zmesi kamnitih zrn 0/11 mm

Figure 3.2.2.2: Grading curve of mineral aggregate 0/11 mm

Na sliki 3.2.2.3 so prikazane presejne krivulje zrnivosti 0/8 mm za posamezno sestavo. Presejne krivulje se med seboj prekrivajo podobno kot pri 0/11 mm.



Slika 3.2.2.3: Presejne krivulje zmesi kamnitih zrn 0/8 mm

Figure 3.2.2.3: Grading curve of mineral aggregate 0/8 mm

V preglednicah 3.2.2.5 in 3.2.2.6 so prikazani podatki o masnih deležih zmesi zrn m_z [m.-%] in prostornini zmesi zrn v bitumeniziranih zmesih V_z [V.-%] ter največjih gostotah zmesi zrn

ρ_z [kg/m³] za zrnastostni sestavi 0/11 mm in 0/8 mm. Rezultati so znotraj dovoljenih odstopanj.

Preglednica 3.2.2.5: Podatki o lastnostih zmesi kamnitih zrn 0/11 mm

Table 3.2.2.5: Properties of mineral aggregate 0/11 mm

Oznaka sestave	Oznaka preskušanca	Masni delež zmesi kam. zrn	Prostornina zmesi kam. zrn v bit. zmesi	Največja gostota zmesi kam. zrn
		m_z	V_z	ρ_z
		[m.-%]	[V.-%]	[kg/m ³]
Sestava 1	H1006-12	96,1	82,8	2790
Sestava 2	H3893-10	95,1	83,0	2798
Sestava 3	H3894-10	94,7	83,3	2798
Sestava 4	H3898-10	94,4	83,8	2780
Sestava 5	H1115-11	94,0	83,6	2794
STATISTIKA				
Število meritev – n		5	5	5
Povprečna vrednost – x		94,9	83,3	2792,0
Standardna deviacija – s		0,8	0,4	7,5
Največja vrednost – $x_{\max}$		96,1	83,8	2798,0
Najmanjša vrednost – $x_{\min}$		94,0	82,8	2780,0
Razpon – R		2,1	1,0	18,0
$x + 3 \cdot s$		97,3	84,5	2814,4
$x - 3 \cdot s$		92,5	82,1	2769,6
$G_{\min} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,072	1,182	1,604
$G_{\max} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,546	1,215	0,802

Preglednica 3.2.2.6: Podatki o lastnostih zmesi kamnitih zrn 0/8 mm

Table 3.2.2.6: Properties of mineral aggregate 0/8 mm

Oznaka sestave	Oznaka preskušanca	Masni delež zmesi kam. zrn	Prostornina zmesi kam. zrn v bit. zmesi	Največja gostota zmesi kam. zrn
		m_z	V_z	ρ_z
		[m.-%]	[V.-%]	[kg/m ³]
Sestava 1	H1042-12	96,0	82,1	2818
Sestava 2	A49-12	95,1	81,6	2820
Sestava 3	H1029-12	94,6	82,4	2822
Sestava 4	A51-12	94,2	81,6	2820
Sestava 5	H1057-12	93,8	82,6	2820
STATISTIKA				
Število meritev – n		5	5	5
Povprečna vrednost – x		94,7	82,1	2820,0
Standardna deviacija – s		0,9	0,5	1,4
Največja vrednost – $x_{\max}$		96,0	82,6	2822,0

(se nadaljuje ...)

(... nadaljevanje)

Najmanjša vrednost – $x_{\min}$	93,8	81,6	2818,0
Razpon – R	2,2	1,0	4,0
$x + 3 \cdot s$	97,3	83,4	2824,2
$x - 3 \cdot s$	92,2	80,7	2815,8
$G_{\min}$ ($< 1,6714$; $\alpha = 0,05$)	1,102	1,064	1,414
$G_{\max}$ ($< 1,6714$; $\alpha = 0,05$)	1,477	1,185	1,414

Masni delež zmesi zrn se izračuna po enačbi:

$$m_z = 100\% - m_B - m_v, \quad (3.2.2.1)$$

kjer je:

m_z ... masni delež zmesi zrn [m.-%],

m_B ... masni delež bitumna [m.-%],

$m_v \cong 0$ (predpostavka) ... masni delež votlin [m.-%].

Masa votlin je zanemarljiva, zato v enačbi (3.2.2.1) predpostavljamo, da je 0. Delež bitumna m_B je pridobljen z ekstrakcijo iz bitumenizirane zmesi po standardu SIST EN 12697-1:2006, 1. del: Topni delež veziva. Prostornina zmesi zrn v bitumenizirani zmesi V_z [V.-%] se izračuna po naslednji enačbi:

$$V_z = \frac{m_z \cdot \rho_A}{\rho_z}, \quad (3.2.2.2)$$

kjer je:

ρ_A ... gostota z votlinami bitumenizirane zmesi [kg/m³],

ρ_z ... gostota zmesi zrn [kg/m³].

Gostota z votlinami bitumenizirane zmesi ρ_A se določi po standardnem postopku SIST EN 12697-6 (Ugotavljanje gostote bitumenskih preskušancev – površinsko zasičen postopek). Po standardu SIST EN 1097-6 (Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov – 6. del: Določanje prostorske mase zrn in vpijanja vode) pa se določi gostota zmesi zrn ρ_z .

3.2.3 Bitumenizirana zmes

Na podlagi predhodne sestave so pripravljene sestave bitumeniziranih zmesi v odvisnosti od deleža bitumna, pri čemer se sestave zmesi kamnitih zrn niso spreminjale (glej poglavje 3.2.2). V sestavah bitumeniziranih zmesi (BZ) se je spreminjala le vsebnost votlin. Od podjetja CGP, d. d., Novo mesto smo pridobili rezultate lastnosti bitumeniziranih zmesi, ki so

bile vgrajene v državne ceste v letih 2008 in 2009. Na podlagi teh podatkov je izveden statistični izračun, ki je določil spodnjo in zgornjo mejno vrednost deleža bitumna v sestavi bitumenizirane zmesi AC 11 surf v odvisnosti od zahtevanih mejnih vsebnosti votlin po SIST 1038-1 (najmanjša 3,0 V.-% in največja 6,5 V.-%). Izračun je pokazal, da je spodnji mejni delež bitumna v sestavi 4,0 m.-% in zgornji mejni delež bitumna 6,0 m.-%. V preglednicah 3.2.3.1 in 3.2.3.2 so rezultati lastnosti bitumeniziranih zmesi AC 11 in AC 8. V skladu s SIST EN 12697-34 (Preskus po Marshallu) so bili določeni stabilnost, tečenje in količnik togosti, ki je razmerje med stabilnostjo in tečenjem.

Preglednica 3.2.3.1: Lastnosti bitumeniziranih zmesi AC 11 surf

Table 3.2.3.1: Properties of asphalt mixture AC 11 surf

Oznaka sestave	Oznaka preskušanca	Gostota BZ	Največja gostota BZ	Vsebnost votlin v BZ	Vsebnost votlin v ZZ	Zapolnjenost z bitumnom	Stabilnost	Tečenje	Togost
		ρ_A	ρ'_A	V_V	VMA	VFB	S	-	T
		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[V.-%]	[V.-%]	[%]	[kN]	[mm]	[kN/mm]
Sestava 1	H1006-12	2404	2613	8,0	17,2	53,5	11,0	4,1	2,7
Sestava 2	H3893-10	2441	2569	5,0	16,8	70,3	10,9	4,7	2,3
Sestava 3	H3894-10	2461	2559	3,8	16,7	77,1	11,1	5,3	2,1
Sestava 4	H3898-10	2467	2533	2,6	16,2	83,9	12,3	4,5	2,7
Sestava 5	H1115-11	2484	2530	1,8	16,5	88,9	10,7	6,0	1,8
ZAHTEVE									
po SIST 1038-1		-	-	3-6,5	-	65-80	-	-	-
STATISTIKA									
Število meritev – n		5	5	5	5	5	5	5	5
Povprečna vrednost – x		2451,4	2560,8	4,2	16,7	74,7	11,2	4,9	2,3
Standardna deviacija – s		30,6	33,6	2,4	0,4	13,8	0,6	0,7	0,4
Največja vrednost – $x_{\max}$		2484,0	2613,0	8,0	17,2	88,9	12,3	6,0	2,7
Najmanjša vrednost – $x_{\min}$		2404,0	2530,0	1,8	16,2	53,5	10,7	4,1	1,8
Razpon – R		80,0	83,0	6,2	1,0	35,4	1,6	1,9	1,0
$x + 3 \cdot s$		2543,3	2661,6	11,5	17,8	116,1	13,1	7,1	3,5
$x - 3 \cdot s$		2359,5	2460,0	-3,0	15,6	33,4	9,3	2,7	1,1
$G_{\min} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,547	0,917	1,006	1,239	1,540	0,791	1,104	1,347
$G_{\max} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,064	1,553	1,550	1,480	1,027	1,739	1,454	1,026

Iz preglednic 3.2.3.1 in 3.2.3.2 vidimo odstopanja pri vsebnosti votlin v bitumenizirani zmesi V_V in pri stopnji zapolnjenosti votlin v zmesi kamnitih zrn z bitumnom VFB po standardu SIST 1038-1 na preskušancih z najmanjšim in največjim deležem bitumna, kar je logično, glede na različno vsebnost bitumna. Rezultati so znotraj dovoljenih odstopanj.

Preglednica 3.2.3.2: Lastnosti bitumeniziranih zmesi AC 8 surf

Table 3.2.3.2: Properties of asphalt mixture AC 8 surf

Oznaka sestave	Oznaka preskušanca	Gostota BZ	Največja gostota BZ	Vsebnost votlin v BZ	Vsebnost votlin v ZZ	Zapolnjenost z bitumnom	Posredna natezna trdnost	
		ρ_A	ρ'_A	V_V	VMA	VFB	ITS	
		[kg/m ³]	[kg/m ³]	[V.-%]	[V.-%]	[%]	[kN]	[kPa]
Sestava 1	H1042-12	2411,0	2632,0	8,4	17,9	53,0	12,1	1245,0
Sestava 2	A49-12	2420,0	2591,0	6,5	18,2	56,7	n. p.	n. p.
Sestava 3	H1029-12	2457,0	2576,2	4,6	17,6	73,8	12,6	1186,0
Sestava 4	A51-12	2442	2558,164	3,0	18,4	76,1	n. p.	n. p.
Sestava 5	H1057-12	2483	2541,888	2,3	17,4	86,7	10,3	1036,0
ZAHTEVE								
po SIST 1038-1		-	-	3-6,5	-	65-80	-	-
STATISTIKA								
Število meritev – n		5	5	5	5	5	3	3
Povprečna vrednost – x		2442,6	2579,9	5,0	17,9	69,3	11,7	1155,7
Standardna deviacija – s		28,9	34,5	2,5	0,4	14,1	1,2	107,8
Največja vrednost – $x_{\max}$		2483,0	2632,0	8,4	18,4	86,7	12,6	1245,0
Najmanjša vrednost – $x_{\min}$		2411,0	2541,9	2,3	17,4	53,0	10,3	1036,0
Razpon – R		72,0	90,1	6,1	1,0	33,7	2,2	209,0
$x + 3 \cdot s$		2529,4	2683,4	12,5	19,2	111,5	15,2	1478,9
$x - 3 \cdot s$		2355,8	2476,3	-2,6	16,7	27,0	8,1	832,4
$G_{\min} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,092	1,100	1,059	1,189	1,155	-	-
$G_{\max} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,396	1,510	1,369	1,235	1,237	-	-

Gostota z votlinami bitumeniziranega preskušanca ρ_A se izračuna v skladu s standardom SIST EN 12697-6 (Ugotavljanje gostote bitumenskih preskušancev – površinsko zasičen postopek). Predhodno se preskušanec ustrezno pripravi z Marshallovim zgoščevalnikom. Gostota ρ_A se določi s tehtanjem preskušanca na zraku (m_1) in nato pod vodo – zasičen (m_2); na koncu se preskušanec obriše s krpo, da je na površini suh, in ponovno stehta na zraku (m_3), ρ_A [kg/m³] pa se izvednoti po enačbi:

$$\rho_A = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w, \quad (3.2.3.1)$$

kjer je:

m_1 ... masa suhega preskušanca [g],

m_2 ... masa preskušanca, potopljenega v vodi [g],

m_3 ... masa zasičenega preskušanca, površinsko suhega [g],

ρ_w ... gostota vode pri testni temperaturi (pri 25 °C) [Mg/m³].

Največja gostota bitumenizirane zmesi ρ'_A se določi po standardnem postopku SIST EN 12697-5 (Ugotavljanje največje gostote – prostorski postopek). Prostornina bitumenizirane zmesi se določi z izpodrivanjem tekočine v piknometru. Enačba za izračun največje gostote bitumenizirane zmesi ρ'_A [Mg/m³] je:

$$\rho'_A = \frac{m_2 - m_1}{10^6 \cdot V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w}, \quad (3.2.3.2)$$

kjer je:

m_1 ... masa piknometra s pulpo [g],

m_2 ... masa piknometra s pulpo, napolnjenega z bitumenizirano zmesjo [g],

m_3 ... masa piknometra s pulpo, napolnjenega z bitumenizirano zmesjo in z destilirano vodo [g],

V_p ... prostornina piknometra do označbe [m³],

ρ_w ... gostota vode pri testni temperaturi (25 ± 0,2 °C) [Mg/m³].

Votline v zgoščeni bitumenizirani zmesi so majhni zračni prostori v zmesi kamnitih zrn, obvitih z vezivom. Vsebnost votlin V_V [V.-%] določimo po standardu SIST EN 12697-8 (Ugotavljanje značilnosti votlin v bitumenskih preskušancih), izračuna se po naslednji enačbi:

$$V_V = \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho'_A}\right) \cdot 100, \quad (3.2.3.3)$$

kjer je:

ρ_A ... gostota z votlinami bitumenizirane zmesi [kg/m³],

ρ'_A ... največja gostota bitumenizirane zmesi [kg/m³].

Vsebnost votlin v zmesi kamnitih zrn VMA se določi po standardnem postopku SIST EN 12697-8 (Ugotavljanje značilnosti votlin v bitumenskih preskušancih) in je definirana kot medzrnski prostor med zmesjo zrn v zgoščeni zmesi, ki vsebuje zračne votline V_v in vsebnost bitumna V_B , izraženega v odstotku prostornine (slika 3.2.3.1). VMA [V.-%] se izračuna po naslednji enačbi:

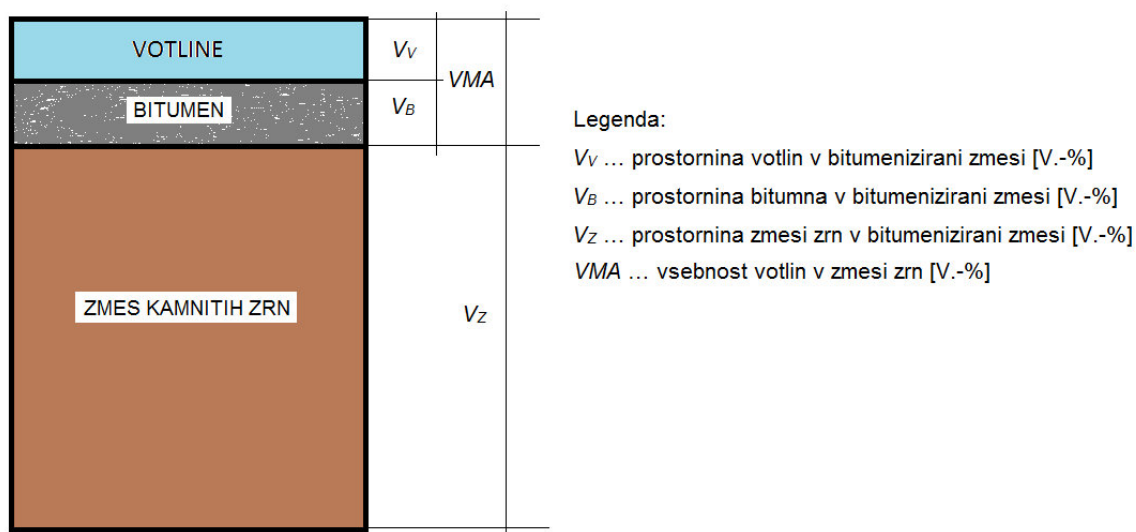
$$VMA = V_V + m_B \cdot \frac{\rho_A}{\rho_B}, \quad (3.2.3.4)$$

kjer je:

V_V ... prostornina votlin v bitumenizirani zmesi [V.-%],

m_B ... masni delež bitumna v preskušancu [m.-%],

ρ_B ... gostota bitumna [kg/m³].



Slika 3.2.3.1: Shematični prikaz volumskega deleža votlin, bitumna in zmesi zrn

Figure 3.2.3.1: Schematic volumetric presentation of voids, bitumen and mineral aggregate

Vsebnost votlin zmesi kamnitih zrn, zapolnjenih z bitumnom, (VFB) se določi po standardnem postopku SIST EN 12697-8. VFB [V.-%] se izračuna po enačbi:

$$VFB = \left(\left(\frac{m_B \cdot \rho_A}{\rho_B} \right) / VMA \right) \cdot 100 \%, \quad (3.2.3.5)$$

kjer je:

m_B ... masni delež bitumna v preskušancu [m.-%],

ρ_A ... gostota z votlinami bitumenizirane zmesi [kg/m^3],

ρ_B ... gostota bitumna [kg/m^3],

VMA ... vsebnost votlin v zmesi kamnitih zrn v 0,1 [V.-%].

4 REZULTATI IN ANALIZE PRESKUSOV

V eksperimentalnem delu doktorske disertacije smo izvedli statične preskuse pri nizkih temperaturah TSRST in UTST na bitumeniziranih zmesih:

- AC 11 surf (B50/70) in
- AC 8 surf (B50/70).

Za ti dve osnovni bitumenizirani zmesi smo po navodilih pripravili pet različnih sestav v odvisnosti od deleža bitumna (glej poglavje 3.2.3). V nadaljevanju so predstavljeni rezultati statičnih preskusov omenjenih bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah, ki so bili izvedeni v treh različnih laboratorijih:

- ZAG Ljubljana (SLO),
- ISTU na TU Wien (A),
- Ramtech Zagreb (HR).

4.1 Rezultati preskusov bitumenizirane zmesi AC 11 surf pri nizkih temperaturah

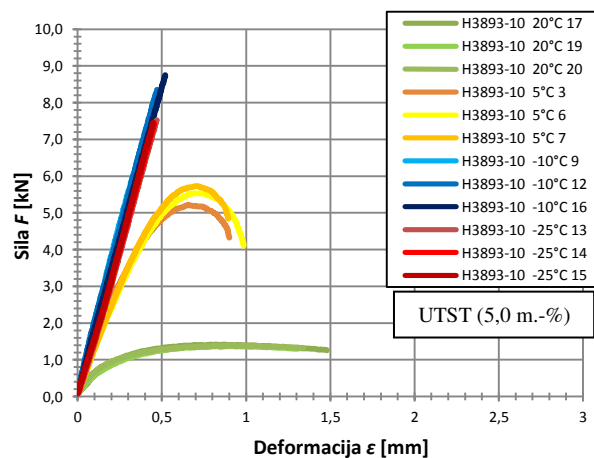
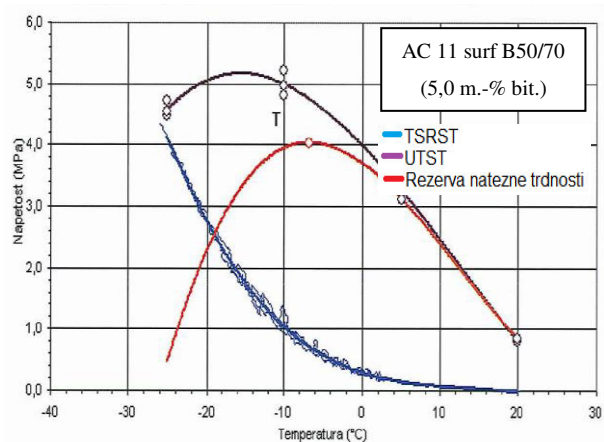
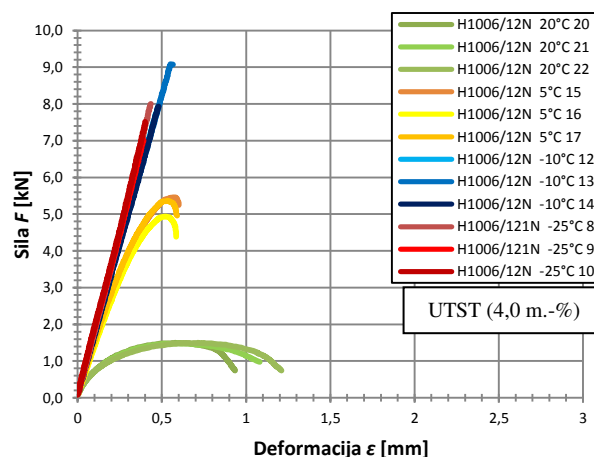
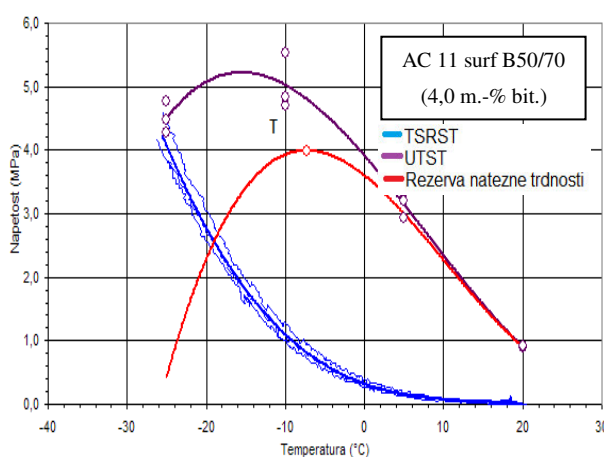
Za bitumenizirano zmes AC 11 surf so bili vsi preskusi pri nizkih temperaturah izvedeni v laboratoriju ZAG Ljubljana. Ker je podatkov veliko, so v prilogi A zbrani vsi rezultati preskusov pri nizkih temperaturah za AC 11 surf.

V preglednici A.4.1.1 (priloga A) so predstavljeni rezultati preskusa TSRST (temperatura ob porušitvi, napetost ob porušitvi) ter največja rezerva natezne trdnosti in temperatura pri največji rezervi bitumenizirane zmesi AC 11 surf B50/70. V preglednicah A.4.1.2 – 6 (priloga A) so predstavljeni rezultati preskusa UTST za sestave bitumeniziranih zmesi od 1 do 5.

Na sliki 4.1.1 so grafično prikazani rezultati preskusov TSRST in UTST ter rezerve natezne trdnosti $\Delta\beta_t$ v odvisnosti od temperature. Modre regresijske krivulje predstavljajo rezultate preskusa TSRST, črne regresijske krivulje predstavljajo rezultate preskusa UTST in rdeče razliko med regresijskimi krivuljami oz. rezervo nateznih trdnosti. Iz slik preskusa TSRST (modre krivulje) se vidi, da pri manjšem deležu bitumna (4 m.-%) krivulje najbolj nihajo in obratno, da so krivulje preskusa TSRST bolj zvezne in umirjene pri večjem deležu bitumna (6 m.-%). Nemirni del krivulje z izrazitimi skoki je izrazitejši v elastičnem območju krivulje

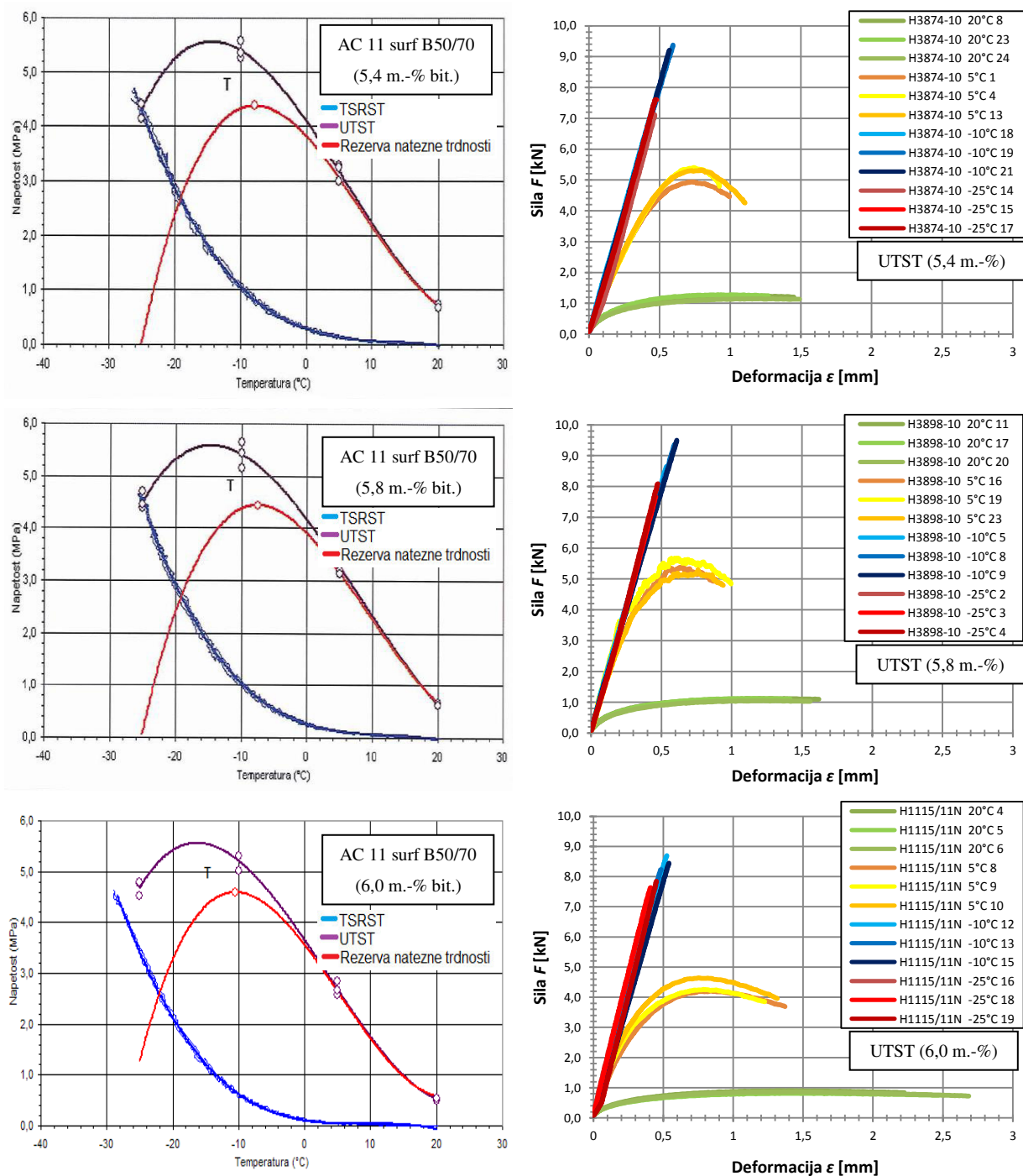
oz. po zaključeni relaksaciji in traja vse do temperature porušitve T_f . Ugotavljamo, da je nihanje *krivulje pri nižji temperaturi posledica oblikovanja razpok v strukturi in s tem povezanega prerazporejanja obremenitev na še nepoškodovan del materiala v preskušancu* (glej poglavje 2.1.1, slika 2.1.1.4).

Iz diagramov deformacija – sila pri preskusih UTST -10 in -25 °C vidimo, da so krivulje povsem linearne (elastično obnašanje materiala) in potekajo praktično po isti liniji. Pri tej temperaturi iz krivulj vidimo, da je na koncu nastal krhki lom. V vseh primerih pri preskusu UTST -10 °C so sile večje kot pri UTST -25 °C. Pri temperaturi 5 °C vidimo, da krivulja v začetku poteka linearno in potem nelinearno (visko-elastično obnašanje). Pri višjih temperaturah ugotavljamo, da se z večanjem deleža bitumna (viskozne komponente) v sestavi bitumenizirane zmesi AC 11 surf bistveno povečuje deformacija in nekoliko zmanjšuje največja sila.



(se nadaljuje ...)

(... nadaljevanje)



Slika 4.1.1: Rezultati preskusov TSRST in UTST ter rezerve nateznih napetosti (levo) in diagram sila – deformacija pri preskusu UTST (desno) za bitumenizirano zmes AC 11 surf

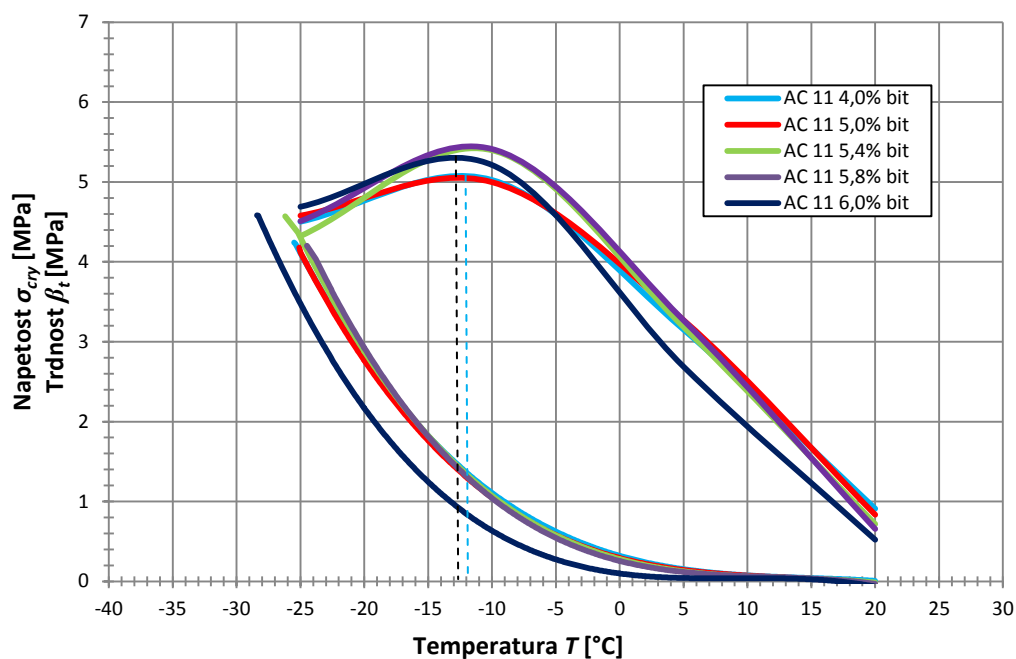
Figure 4.1.1: Results of tests TSRST, UTST and tensile strength reserve (left) and diagram force – strain at UTST test (right) for AC 11 surf

Vse krivulje preskusov TSRST in UTST za bitumenizirano zmes AC 11 surf so prikazane na sliki 4.1.2. Krivulje TSRST AC 11 surf potekajo praktično po isti liniji, od nje odstopa le krivulja za AC 11 surf 6,0 m.-% bit. Ta dlje poteka v relaksacijskem območju, v elastičnem območju pa vzporedno sledi preostalim linijam. Ugotavljamo, da je *sestava z večjim deležem*

bitumna bolj odporna proti nastanku *termičnih* razpok pri nizkih temperaturah. Pri krivuljah UTST *ugotavljamo, da delež bitumna predvsem vpliva na velikost največje natezne trdnosti in manj na njeno pripadajočo temperaturo.*

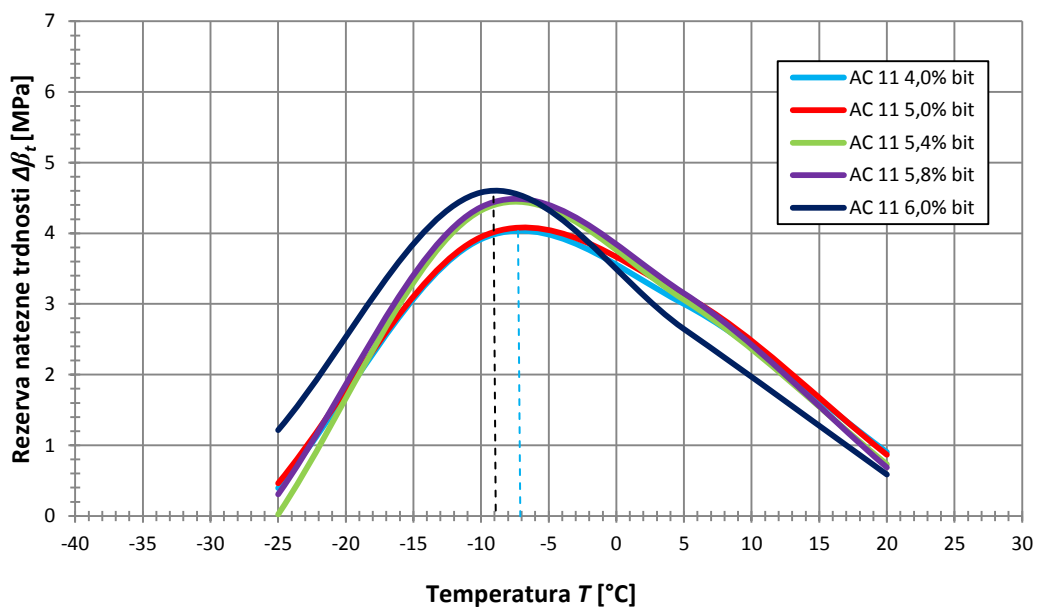
Iz diagrama rezerva natezne trdnosti $\Delta\beta_t$ – temperatura (slika 4.1.3) opazimo, da imata podobno linijo AC 11 surf 4,0 m.-% bit. in 5,0 m.-% bit. ter AC 11 surf 5,4 m.-% bit. in 5,8 m.-% bitumna. Krivulja AC 11 surf 6,0 m.-% bit. tudi v tem primeru odstopa in izkazuje največjo rezervo natezne trdnosti in najnižjo pripadajočo temperaturo. *Ugotavljamo, da delež bitumna vpliva na velikost največje rezerve natezne trdnosti in njeno pripadajočo temperaturo.*

Mollenhauer (2008) navaja, da pri nižjih temperaturah poteka razpoka (porušitev) tudi skozi kamnito zrno v preskušancu bitumenizirane zmesi, pri višjih temperaturah pa predvsem skozi bitumensko malto (glej poglavje 2.1.1, slika 2.1.1.5). Na sliki 4.1.4 je vidna porušena površina preskušanca bitumenizirane zmesi AC 11 surf B 50/70 pri preskusu UTST. *Ugotavljamo, da porušitev ne poteka zgolj v bitumenski malti (kohezijska porušitev), ampak tudi skozi kakšno kamnito zrno ali na stiku med zrnom in malto (adhezijska porušitev), tudi pri višjih temperaturah.* Če natančno pogledamo, to opazimo tudi na sliki 2.1.1.5, pri temperaturi 10 °C. Porušitev skozi zrno pri višjih temperaturah si razlagamo kot posledico predhodno nastale notranje poškodbe (manjše razpoke) zrna – ali med drobljenjem zrn in/ali med zgoščevanjem bitumenizirane zmesi.



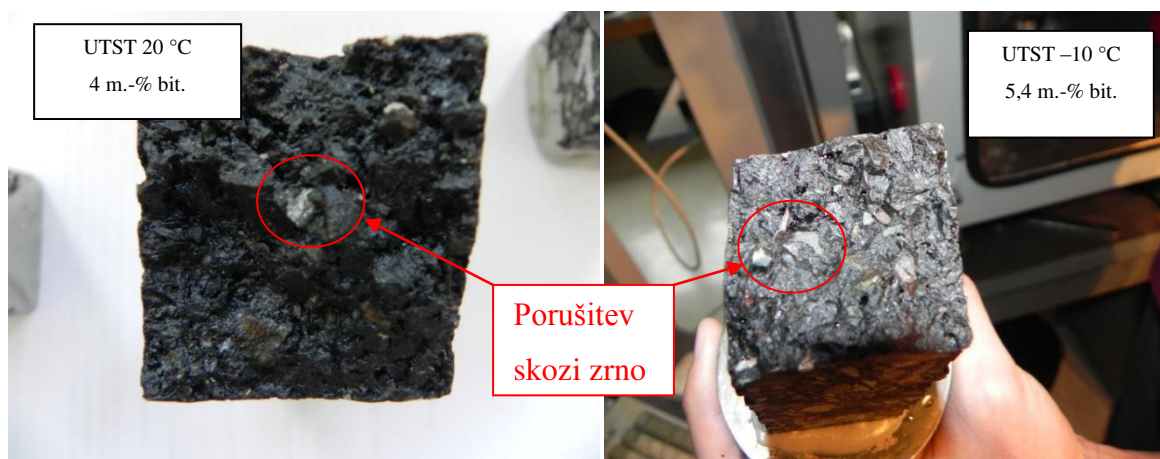
Slika 4.1.2: Skupni diagram napetost/trdnost – temperatura pri preskusih TSRST in UTST za AC 11 surf (ZAG)

Figure 4.1.2: Joint diagram stress/strength – temperature of TSRST and UTST tests for AC 11 surf (ZAG)



Slika 4.1.3: Diagram rezerva natezne trdnosti – temperatura za AC 11 surf (ZAG)

Figure 4.1.3: Diagram tensile strength reserve – temperature for AC 11 surf (ZAG)



Slika 4.1.4: Porušna površina preskušanca AC 11 surf B 50/70 pri preskusu UTST

Figure 4.1.4: Cracked area of the sample asphalt mixture AC 11 surf B 50/70 at UTST

4.2 Rezultati preskusa bitumenizirane zmesi AC 8 surf pri nizkih temperaturah

V nasprotju z bitumenizirano zmesjo AC 11 surf so bili za AC 8 surf B50/70 preskusi pri nizkih temperaturah izvedeni v treh laboratorijih:

- ZAG Ljubljana (SLO),
- ISTU na TU Wien (A),
- Ramtech Zagreb (HR).

V preglednici 4.2.1 je prikazan program preskusov pri nizkih temperaturah, ki so bili izvedeni v različnih laboratorijih v odvisnosti od sestave bitumenizirane zmesi. V preglednicah B.4.2.3 do 9 (priloga B) so prikazani rezultati preskusov UTST glede na sestavo od 1 do 5.

Preglednica 4.2.1: Program preskusov TSRST in UTST bitumenizirane zmesi AC 8 surf

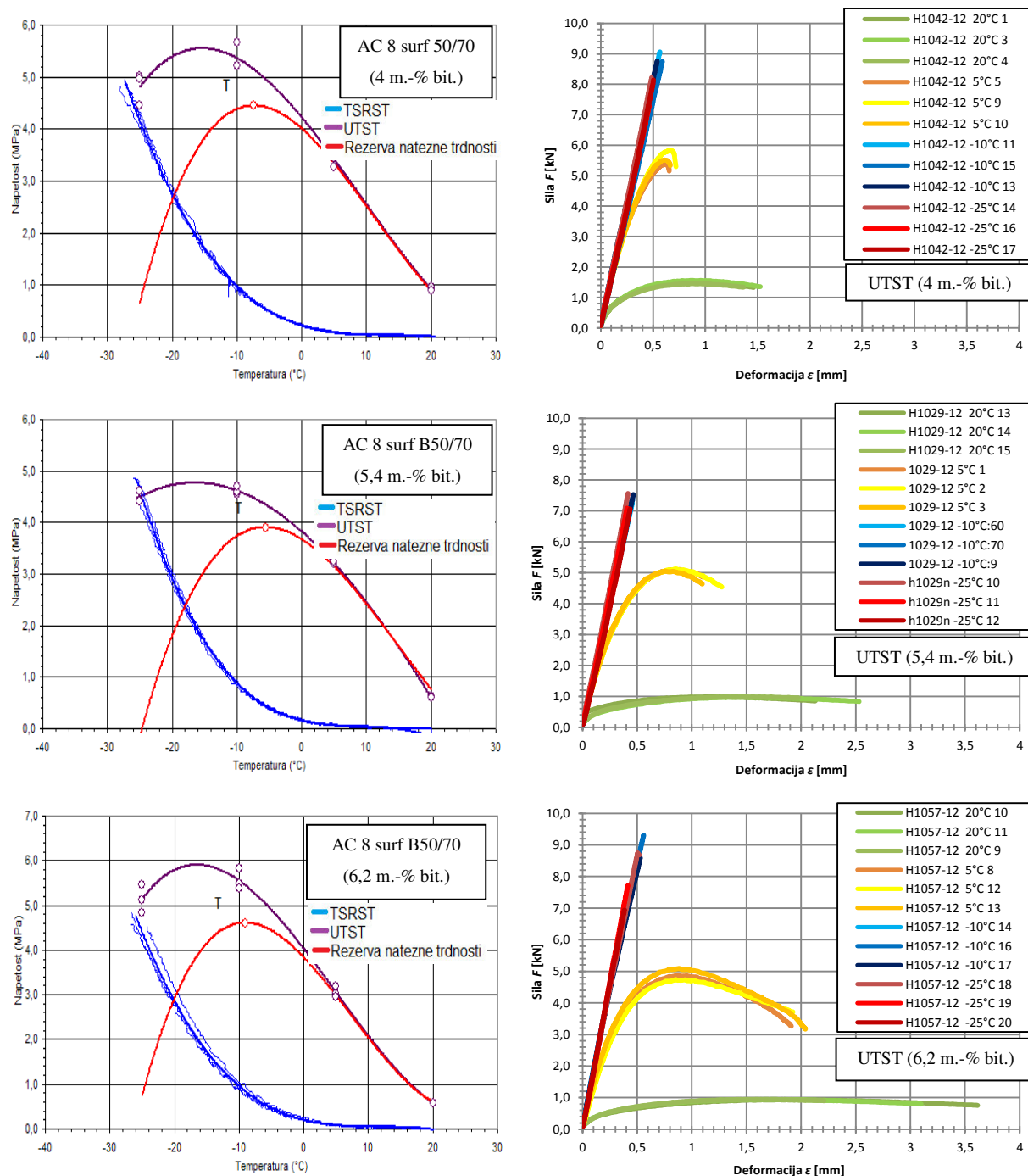
Table 4.2.1: Program of TSRST and UTST test of the asphalt mixture AC 8 surf

Laboratorij	Sestava bitumenizirane zmesi				
	Sestava 1 (4 m.-%)	Sestava 2 (5 m.-%)	Sestava 3 (5,4 m.-%)	Sestava 4 (5,8 m.-%)	Sestava 5 (6,2 m.-%)
ZAG Ljubljana (SLO)	x		x		x
ISTU – TU Wien (A)		x		x	x (TSRST)
Ramtech Zagreb (HR)		x		x	

Na sliki 4.2.1 so grafično prikazani rezultati preskusov TSRST in UTST ter rezerve natezne trdnosti $\Delta\beta_t$ v odvisnosti od temperature, ki so bili izvedeni v laboratoriju na ZAG-u. Modre regresijske krivulje predstavljajo rezultate preskusov TSRST, črne regresijske krivulje

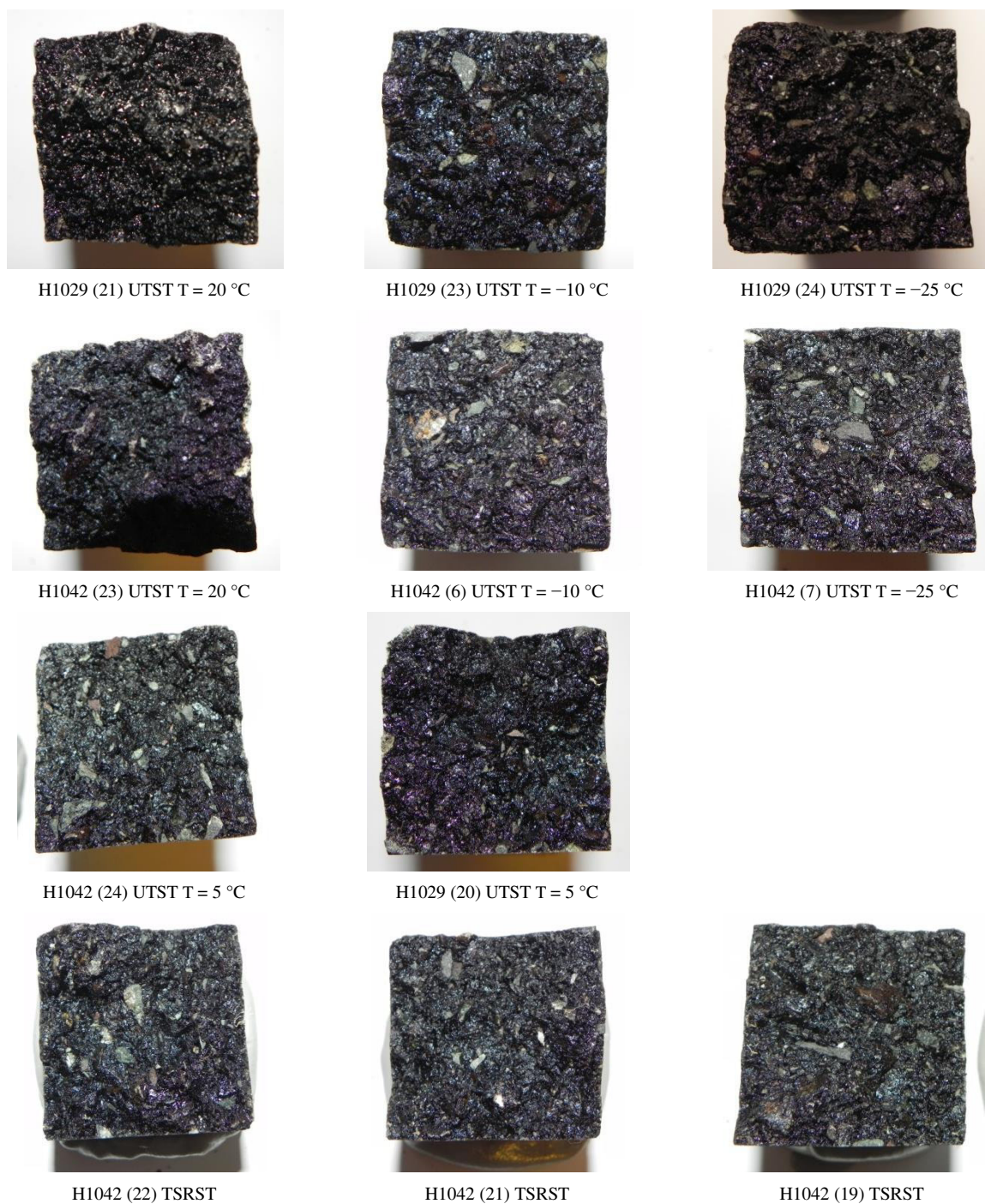
predstavljajo rezultate UTST in rdeče krivulje razliko med regresijskimi krivuljami oz. rezerve nateznih trdnosti. Pri preskusu TSRST (modre krivulje) smo ugotovili, da *pri manjšem deležu bitumna (4 m.-%)* krivulje najbolj nihajo in obratno, da so krivulje TSRST bolj zvezne in umirjene *pri večjem deležu bitumna (6 m.-%)*. Iz diagramov sila – deformacija pri nižjih temperaturah (UTST -10 in -25 °C) vidimo, da so krivulje v celoti linearne, kar kaže na povsem elastično obnašanje materiala, pri čemer so vrednosti sil pri UTST večje pri -10 °C. Pri višjih temperaturah so krivulje nelinearne, kar kaže na visko-elastično obnašanje materiala in pri UTST 20 °C je to obnašanje najbolj izrazito. Iz diagramov sila – deformacija 5 °C in 20 °C za različne sestave ugotavljamo, da se z večanjem deleža bitumna povečuje deformacija ob porušitvi in zmanjšuje natezna trdnost. Pri preskusu UTST 5 °C najbolj izstopata sestavi s 4 in 6 m.-% bitumna. Sestava s 4 m.-% bitumna ima najmanjšo deformacijo ob pretrgu oz. porušitvi, sestava z večjim deležem bitumna pa najmanjšo natezno trdnost in največjo deformacijo ob pretrgu, kar je posledica vpliva večjega deleža viskozne komponente v sestavi. Krivulje UTST pri nižjih temperaturah preskusa potekajo linearno in po istih linijah. UTST -10 °C ima v nasprotju z UTST -25 °C večjo deformacijo in zato večjo natezno trdnost, ker obstaja pri tej temperaturi še vedno omejena zmožnost lezenja. Iz diagramov sila – deformacija pri nižjih temperaturah vidimo, da je nastala porušitev v obliki krhkega loma.

Porušna ploskev preskušancev bitumenizirane zmesi AC 8 surf B50/70 za sestavo 1 (4 m.-% bitumna) = H1042 in sestavo 3 (5,4 m.-% bitumna) = H1029 je prikazana na sliki 4.2.2. Iz slik vidimo, da je porušitev pri preskusu UTST ($T = 20$ °C) potekala večinoma skozi bitumensko malto. Če podrobneje pogledamo porušno površino pri preskušancih H1029 (21) in H1042 (23), opazimo, da je površina prvega preskušanca enakomerno temna, torej je porušitev potekala le skozi bitumensko malto (kohezijska porušitev). Pri preskušancu, ki ima manjši delež bitumna, je površina na nekaterih mestih opazno svetlejša. Ugotavljamo, da je na teh mestih porušitev potekala med kamnitim zrnom in bitumensko malto (adhezijska porušitev). Pri nižjih temperaturah ($T < 0$ °C) pa vidimo, da poteka porušitev skozi bitumensko malto in skozi kamnita zrna. Pri višjih temperaturah, $T = 20$ in 5 °C, pri stranskem pogledu preskušancev vidimo, da porušitev poteka poševno in bolj razgibano kot pri nižjih temperaturah, kjer so porušitve vodoravne – krhki lom (slika 4.2.3). Na preskušancih TSRST sta površina in prerez podobna kot pri preskušancih UTST pri temperaturi preskusa -25 °C. Torej pri nizkih temperaturah ugotavljamo, da porušitve potekajo vodoravno (krhki lom), skozi bitumensko malto in kamnita zrna.



Slika 4.2.1: Rezultati preskusov TSRST in UTST ter rezerve nateznih napetosti (levo) in diagram sila – deformacija pri preskusu UTST (desno) za AC 8 surf (ZAG)

Figure 4.2.1: Results of test TSRST, UTST and tensile strength reserve (left) and diagram force – strain at UTST test (right) for AC 8 surf (ZAG)



Slika 4.2.2: Porušna površina preskušancev H1029 (sestava 3; 5,4 m.-%) in H1042 (sestava 1; 4 m.-%)
bitumenizirane zmesi AC 8 surf

Figure 4.2.2: Cracked area of the samples H1029 (Mixture 3, 5.4 m.-%) and H1042 (Mixture 1, 4 m.-%) of
asphalt mixture AC 8 surf

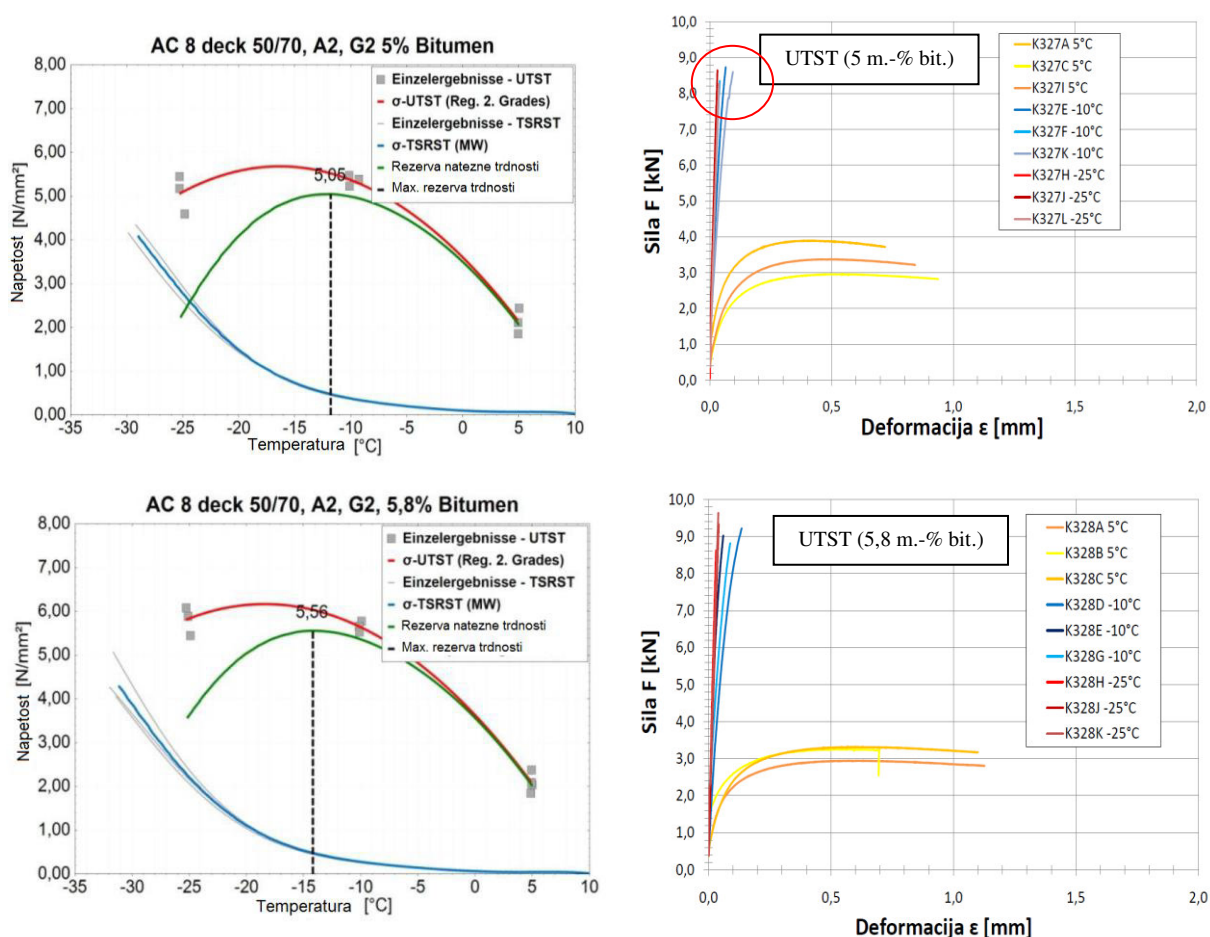


Slika 4.2.3: Prerez porušitve preskušancev H1029 (sestava 3; 5,4 m.-%) in H1042 (sestava 1; 4 m.-%) of bitumenizirane zmesi AC 8 surf

Figure 4.2.3: Cross section crack of the sample H1029 (Mixture 3, 5.4 m.-%) and H1042 (Mixture 1, 4 m.-%) of asphalt mixture AC 8 surf

Naslednji rezultati TSRST in UTST ter rezerva nateznih trdnosti v odvisnosti od temperature za bitumenizirane zmesi AC 8 surf (z deležem bitumna 5,0 in 5,8 m.-%) so grafično prikazani

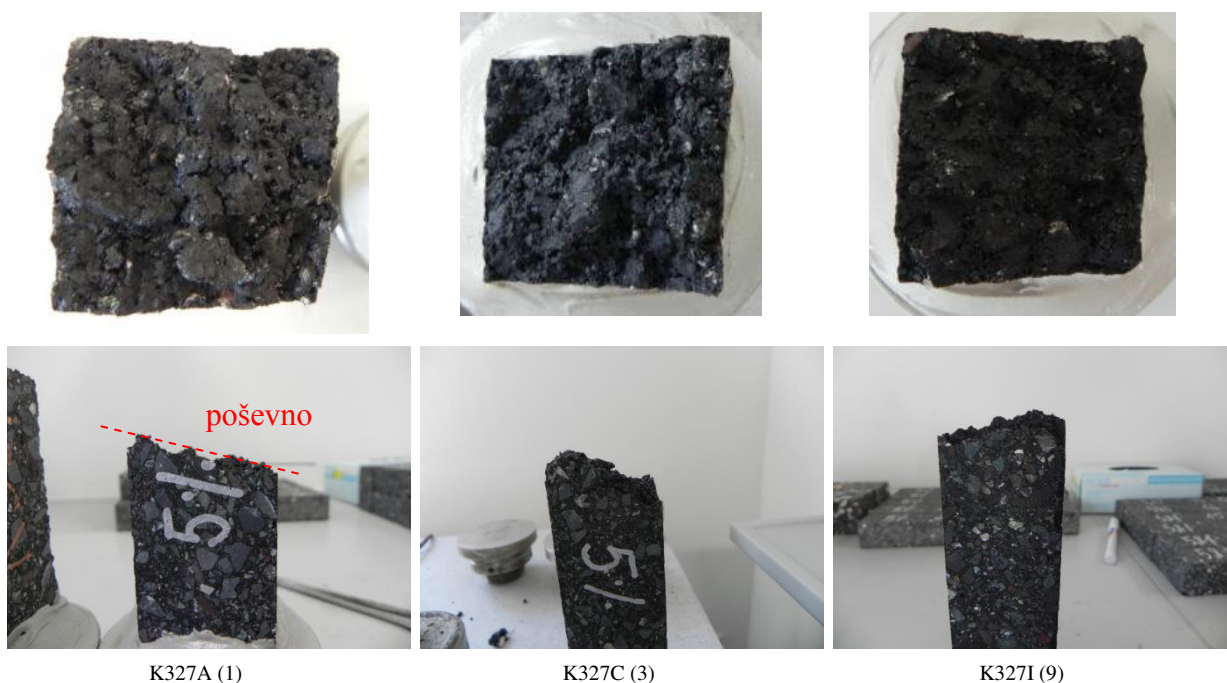
na sliki 4.2.4. Preskusi so bili izvedeni v laboratoriju ISTU na TU Wien. Pričakovano so pri sestavi 2 (5 m.-% bitumna) rezultati rezerve natezne trdnosti manjši in pripadajoča temperatura višja kot pri sestavi 4 (5,8 m.-% bitumna). Iz teh rezultatov ugotavljamo, da ima večji delež bitumna v bitumenizirani zmesi AC 8 surf vpliv na večjo odpornost proti nastanku razpok zaradi nizkih temperatur. Iz diagramov sila – deformacija opazimo, da krivulje potekajo linearno (elastično obnašanje) vse do porušitve (krhki lom) pri nižjih temperaturah in nelinearno (visko-elastično obnašanje) pri višjih temperaturah. Pri temperaturi preskusa -10 in -25 °C so *porušne* sile podobne, česar pri drugih laboratorijih nismo ugotovili. Pri višjih temperaturah vidimo, da je manjša deformacija pri pretrgu pri sestavi z manjšim deležem bitumna.



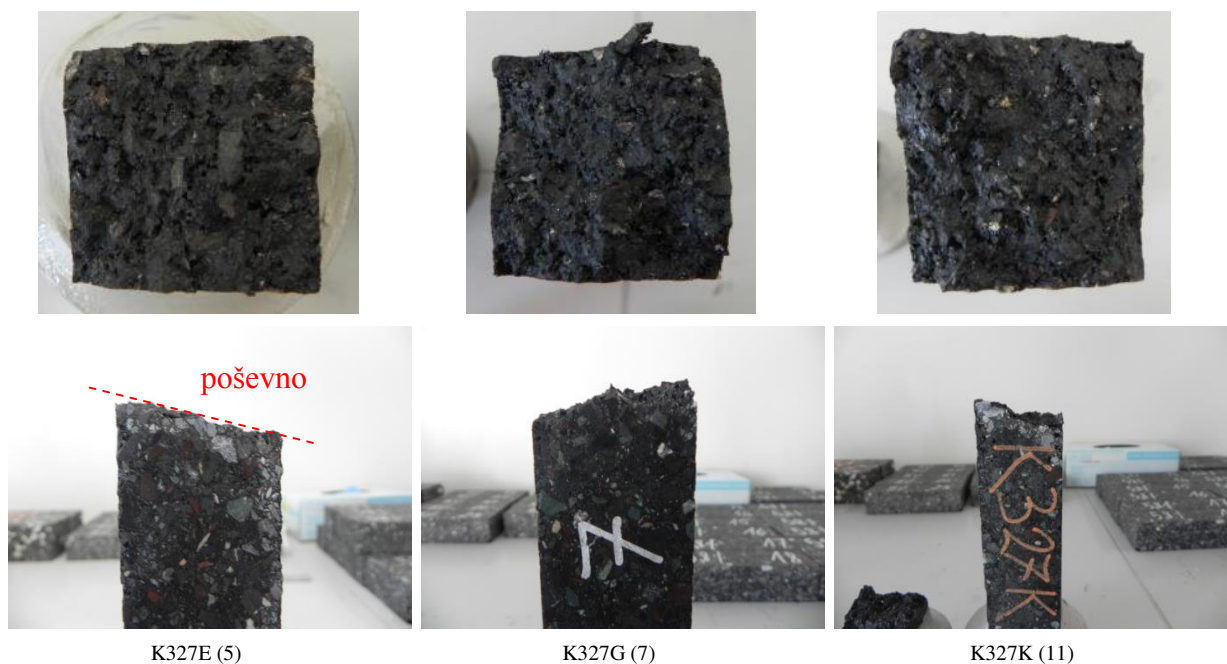
Slika 4.2.4: Rezultati preskusov TSRST in UTST ter rezerve natezne napetosti (levo) in diagram sila – deformacija pri preskusu UTST (desno) za AC 8 surf (TU Wien)

Figure 4.2.4: Results of test TSRST, UTST and tensile strength reserve (left) and diagram force – strain at UTST test (right) for AC 8 surf (TU Wien)

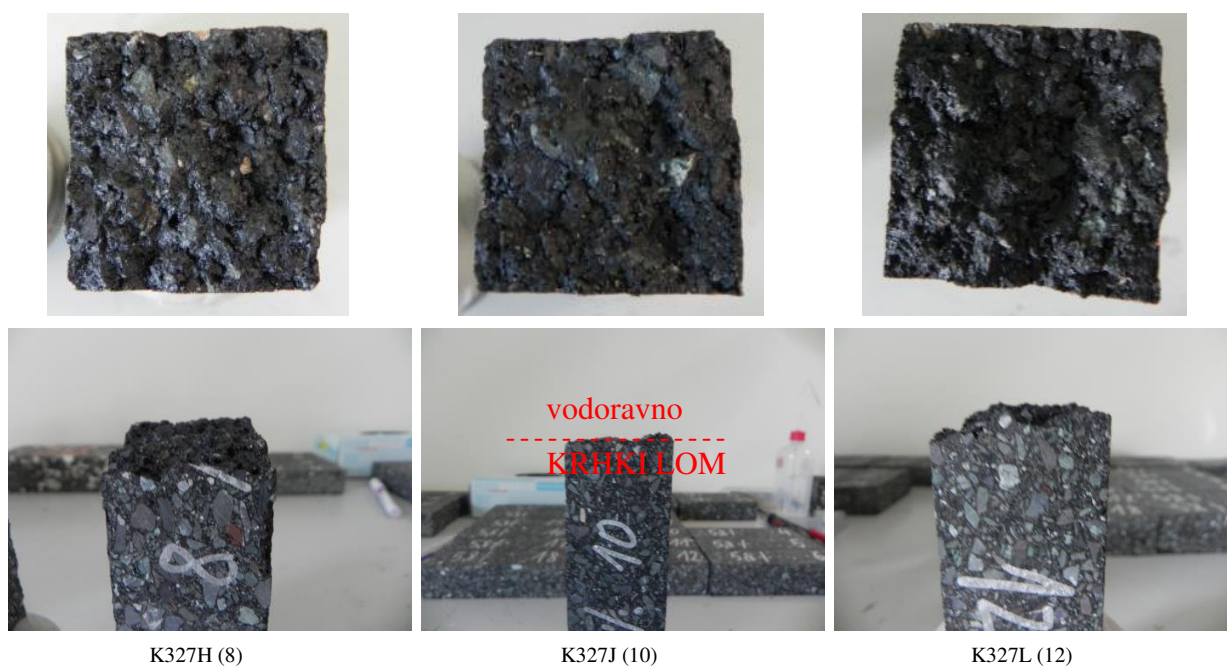
Slike od 4.2.5 do 4.2.8 prikazujejo porušno površino preskušancev za sestavo 2 (5 m.-% bitumna) pri preskusu UTST pri temperaturah preskusa 5 °C, -10 °C in -25 °C ter preskusu TSRST. Na navedenih slikah opazimo, da je porušna površina pri preskusu UTST pri nižji temperaturi preskusa (-25 °C) bolj ali manj vodoravna (krhki lom). To je opaziti tudi na preskušancih pri preskusu TSRST. Pri višjih temperaturah preskusa UTST (5 °C) opazimo, da je površina bolj razgibana in poševna (žilavi lom). Ugotavljamo, da je razlog za to *zmožnost lezenja in visko-elastično obnašanje bitumenizirane malte. Pri nižjih temperaturah, pod -10 °C, visko-elastično obnašanje materiala prehaja v elastično obnašanje, zato je porušna površina manj razvejana.*



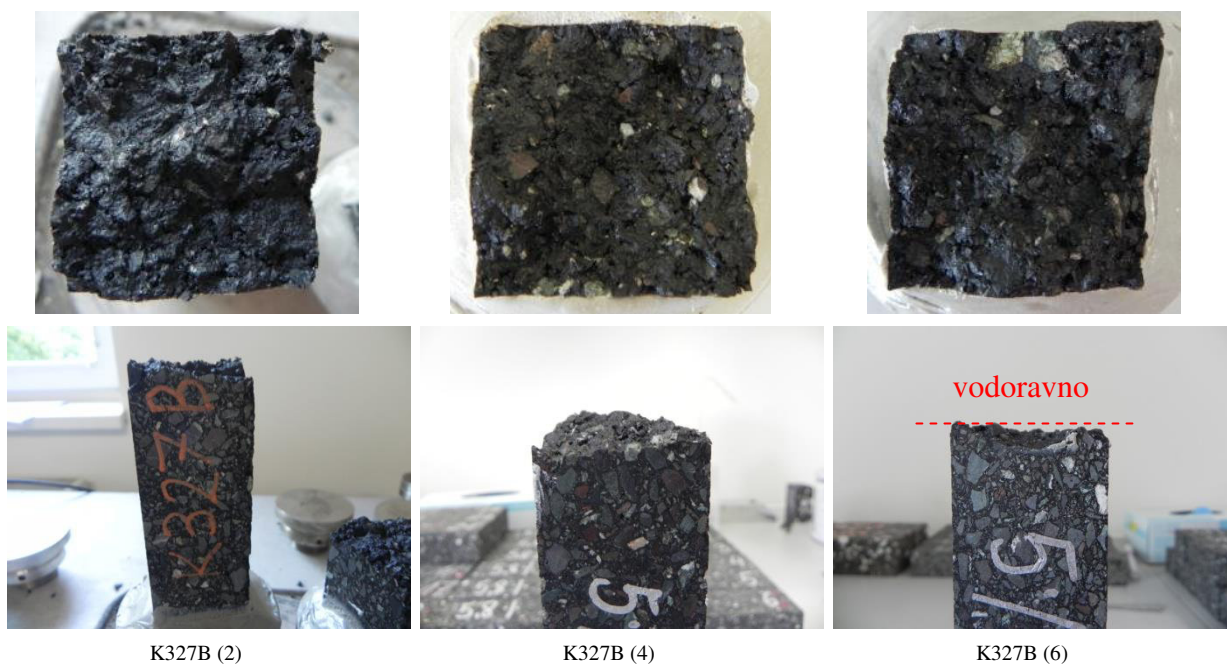
Slika 4.2.5: Porušna površina preskušanca AC 8 surf, sestava 2 (5 m.-%), pri preskusu UTST 5 °C
Figure 4.2.5: Cracked area of the sample asphalt mixture AC 8 surf, Mixture 2 (5 m.-%), at UTST 5 °C



Slika 4.2.6: Porušna površina preskušanca AC 8 surf, sestava 2 (5 m.-%), pri preskusu UTST -10°C
Figure 4.2.6: Cracked area of the sample asphalt mixture AC 8 surf, Mixture 2 (5 m.-%), at UTST -10°C



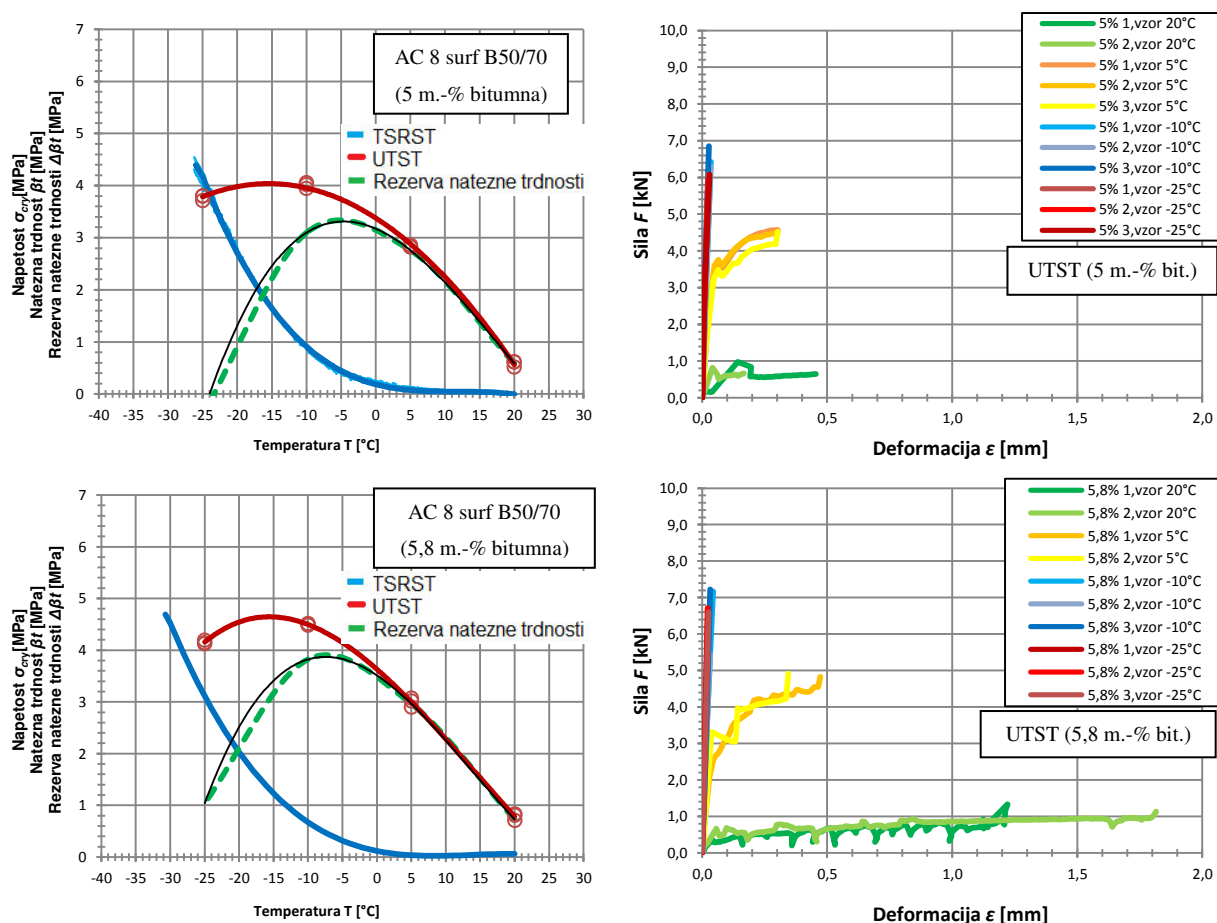
Slika 4.2.7: Porušna površina preskušanca AC 8 surf, sestava 2 (5 m.-%), pri preskusu UTST -25°C
Figure 4.2.7: Cracked area of the sample asphalt mixture AC 8 surf, Mixture 2 (5 m.-%), at UTST -25°C



Slika 4.2.8: Porušna površina preskušanca AC 8 surf, sestava 2 (5 m.-%), pri preskusu TSRST

Figure 4.2.8: Cracked area of the sample asphalt mixture AC 8 surf, Mixture 2 (5 m.-%), at TSRST test

Na sliki 4.2.9 so grafično prikazani rezultati preskusov TSRST in UTST ter rezerve nateznih napetosti za AC 8 surf, ki so bili izvedeni v Ramtechu. Na sliki 4.2.9 je prikazan diagram sila – deformacija preskusa UTST za sestavo 2 (5 m.-% bit.) in sestavo 4 (5,8 m.-% bit.). Na diagramu je vidno, da je pri temperaturi preskusa UTST $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ krivulja z manjšim deležem bitumna v sestavi (5 m.-%) bistveno krajša (manjša deformacija), kot je to vidno pri sestavi z večjim deležem bitumna (5,8 m.-%). Pri temperaturi $T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ima krivulja pri sestavi z manjšim deležem bitumna daljši elastični in krajši visko-elastični del kot pri sestavi s 5,8 m.-% bitumna. Pri temperaturah $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ je pri obeh sestavah celotna krivulja linearna (elastično obnašanje). Krivulji potekata po podobni liniji, razlikujeta se le po dolžini. Pri sestavi s 5,8 m.-% bitumna je pri obeh temperaturah krivulja daljša, ker je v sestavi večji delež viskozne komponente.

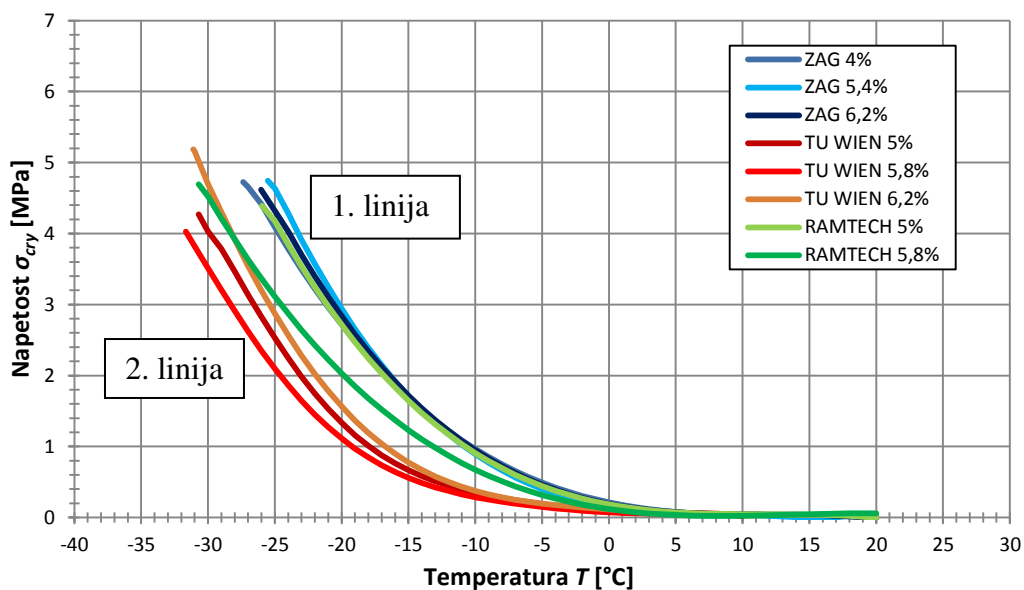


Slika 4.2.9: Rezultat preskusov TSRST in UTST ter rezerva natezne napetosti (levo) in diagram sila – deformacija pri preskusu UTST (desno) za AC 8 surf (Ramtech)

Figure 4.2.9: Results of test TSRST, UTST and tensile strength reserve (left) and diagram force – strain at UTST test (right) for AC 8 surf (Ramtech)

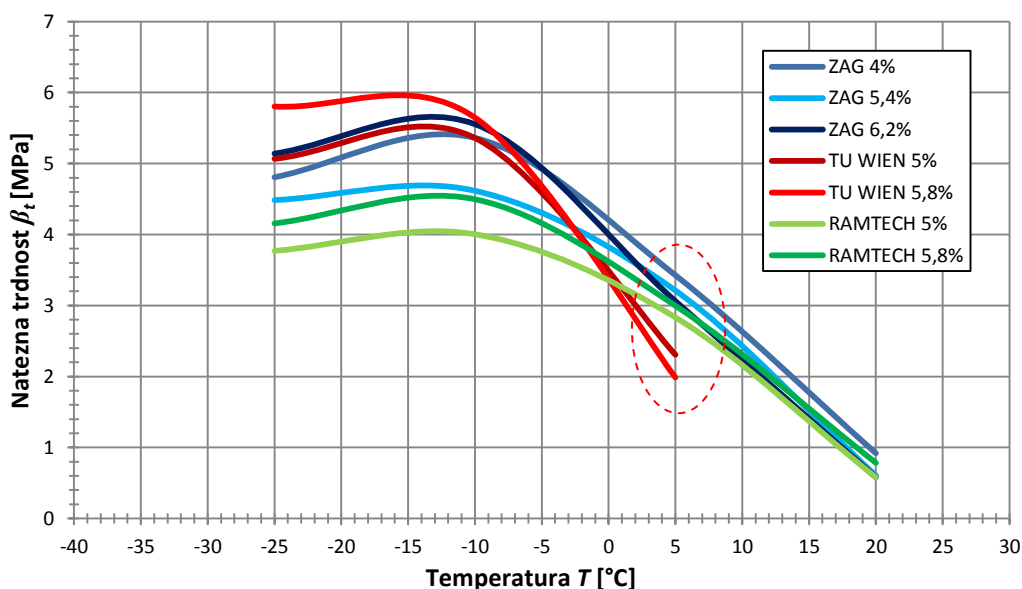
Na sliki 4.2.10 je prikazan skupni diagram preskusa TSRST, ki se je izvajal na ZAG-u, TU Wien in v Ramtechu. Na sliki vidimo dve glavni liniji poteka krivulj. V prvi liniji potekajo krivulje ZAG (4 m.-%, 5,4 m.-%, 6,2 m.-%) in Ramtech (5 m.-%). Nekoliko v levo odstopa od prve linije krivulja Ramtech (5,8 m.-%). V drugi liniji so krivulje TU Wien, ki potekajo v bolj razširjenem območju. Nekoliko izstopa le krivulja TU Wien 6,2 m.-%. Slednja ima v elastičnem območju strmejši nagib in večjo natezno napetost pri porušitvi kot preostali dve. Temperatura pri porušitvi je v vseh treh primerih pod -30°C , česar krivulje iz prve linije ne dosežajo; imajo le nekoliko večjo natezno napetost od TU Wien (5 m.-% in 5,8 m.-%). V diagramu UTST na sliki 4.2.11 ponovno opazimo, da ima najvišji krivulji TU Wien in najnižji Ramtech. Pri temperaturi 5°C ima TU Wien najmanjšo vrednost natezne trdnosti. Na sliki 4.2.12 so predstavljene krivulje rezerve natezne trdnosti. Krivulje TU Wien ležijo v grafu višje in so strmejše kot krivulje ZAG in Ramtech. Krivulja TU Wien s sestavo 4 (5,8 m.-% bitumna) izkazuje največjo rezervo natezne trdnosti in najnižjo pripadajočo temperaturo

največji rezervi. Najmanjšo rezervo natezne trdnosti in najvišjo temperaturo ima krivulja Ramtech sestave 2 (5 m.-% bitumna). Iz slike vidimo, da so si krivulje ZAG zelo blizu. Krivulja ZAG sestave 1, z najmanj bitumna v sestavi (4 m.-% bitumna), je daljša od krivulje ZAG sestave 3 (5,4 m.-% bitumna) in krivulje ZAG sestave 5, z največ bitumna v sestavi (6,2 m.-% bitumna).



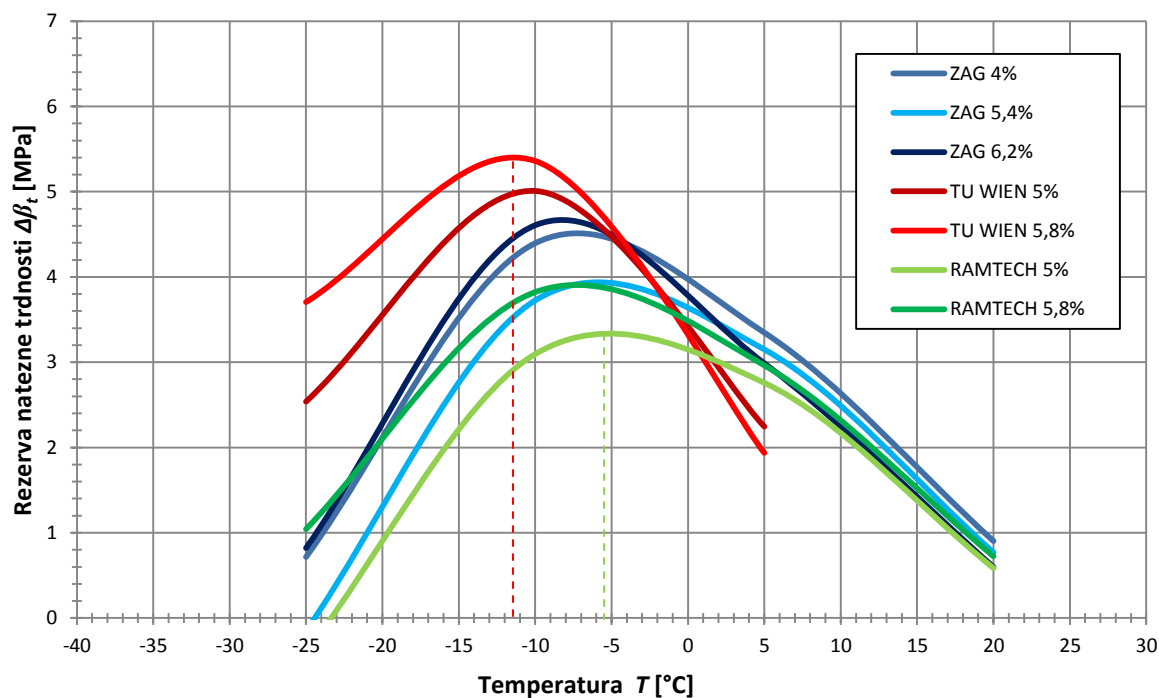
Slika 4.2.10: Diagram preskusa TSRST za AC 8 surf

Figure 4.2.10: Diagram TSRST test for AC 8 surf



Slika 4.2.11: Diagram preskusa UTST za AC 8 surf

Figure 4.2.11: Diagram UTST test for AC 8 surf



Slika 4.2.12: Diagram rezerve natezne trdnosti za AC 8 surf

Figure 4.2.12: Diagram tensile strength reserve for AC 8 surf

4.3 Vpliv deleža bitumna pri nizkih temperaturah

4.3.1 Bitumenizirana zmes AC 11 surf

V preglednici 4.3.1.1 so predstavljeni rezultati temperature ob porušitvi T_f in natezne napetosti ob porušitvi $\sigma_{cry,f}$ pri ohlajevalnem preskusu TSRST za bitumenizirano zmes AC 11 surf, ki je bil izveden na ZAG-u.

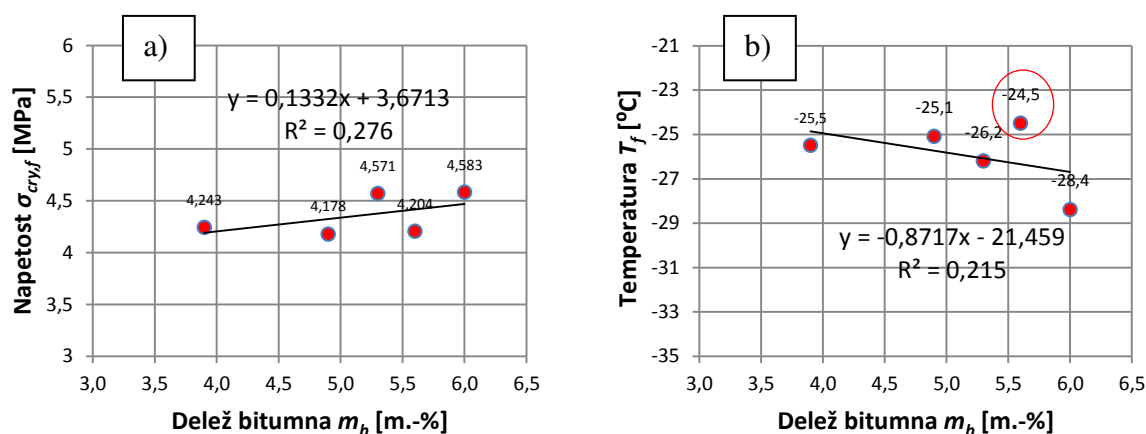
Preglednica 4.3.1.1: Rezultati preskusa TSRST bitumenizirane zmesi AC 11 surf (ZAG)

Table 4.3.1.1: Results of TSRST test of the asphalt mixture AC 11 surf (ZAG)

Oznaka sestave	Lab. oznaka	Delež bitumna v BZ po ekstrakciji	Vsebnost votlin v preskušancu	Povprečna gostota z votlinami preskušanca	Temp. ob porušitvi	Napetost ob porušitvi
		m_b	V_{Ap}	ρ_{Ap}	T_f	$\sigma_{cry,f}$
		[m.-%]	[V.-%]	[kg/m ³]	[°C]	[MPa]
Sestava 1 (4 m.-%)	H1006-12	3,9	6,9	2433,3	-25,5	4,2
Sestava 2 (5 m.-%)	H3893-10	4,9	4,8	2446,0	-25,1	4,2
Sestava 3 (5,4 m.-%)	H3894-10	5,3	3,7	2463,3	-26,2	4,6
Sestava 4 (5,8 m.-%)	H3898-10	5,6	2,3	2474,7	-24,5	4,2
Sestava 5 (6,0 m.-%)	H1115-11	6,0	0,4	2518,7	-28,4	4,6
STATISTIKA						
Število meritev – n		5	5	5	5	5
Povprečna vrednost – x		5,1	3,6	2467,2	-26,0	4,4
Standardna deviacija – s		0,8	2,4	32,8	1,5	0,2
Maksimalna vrednost – x_{max}		6,0	6,9	2518,7	-24,5	4,6
Minimalna vrednost – x_{min}		3,9	0,4	2433,3	-28,4	4,2
Razpon – R		2,1	6,4	85,3	4,0	0,4
$x + 3 \cdot s$		7,5	10,9	2565,7	-21,4	5,0
$x - 3 \cdot s$		2,7	-3,7	2368,7	-30,5	3,7
$G_{min} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,546	1,305	1,031	1,623	0,876
$G_{max} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,072	1,331	1,567	0,973	1,117

Če pogledamo rezultate v preglednici 4.3.1.1 za sestave 1, 3 in 5, vidimo, da ima sestava 5 s 6,0 m.-% bitumna nižjo temperaturo ob porušitvi T_f in enako napetost ob porušitvi $\sigma_{cry,f}$ kot sestava 3 s 5,3 m.-% bitumna in sestava 1 s 4,0 m.-% bitumna. Torej je priporočljivo imeti za boljšo odpornost proti razpokam pri nizkih temperaturah v sestavi večji delež bitumna. Če pa pogledamo vrednosti rezultatov, opazimo, da je večja razlika med rezultati pri temperaturi ob porušitvi T_f kot pri napetosti ob porušitvi $\sigma_{cry,f}$. Arand (1987, 2002) sicer navaja, da je najpomembnejša funkcija za vrednotenje zgoščene bitumenizirane zmesi temperatura ob porušitvi T_f in da delež bitumna [m.-%] relativno malo vpliva na temperaturo ob porušitvi. Ugotavljamo, da se material pri tako nizki temperaturi (okoli -25 °C) obnaša kot elastično telo in togost bitumna je bistveno večja oz. bitumen postaja vse bolj podoben preostalemu materialu v bitumenizirani zmesi. Ta fenomen je mogoče opaziti pri preskusu UTST pri

temperaturi -25°C pri rezultatih raztezka *ob porušitvi* ε_f , ki se *ne glede na delež bitumna* v sestavi bitumenizirane zmesi *praktično ne spreminja* (Hribar, 2012). V preglednici 4.3.1.1 tudi ni opaziti posebnih statističnih odstopanj. Rezultati preskusa TSRST za bitumenizirano zmes AC 11 surf v odvisnosti od deleža bitumna so prikazani na sliki 4.3.1.1. Iz slike vidimo, da je v obeh primerih korelacija slaba ($R^2 = 0,28$ in $R^2 = 0,22$). Pri napetosti ob porušitvi je opazen trend zmerne naraščanja s povečevanjem deleža bitumna (slika 4.3.1.1a), pri temperaturi ob porušitvi pa je nekoliko izrazitejši trend padanja temperature z večanjem deleža bitumna v sestavi bitumenizirane zmesi (slika 4.3.1.1b).



Slika 4.3.1.1: Rezultat preskusa TSRST za bitumenizirano zmes AC 11 surf v odvisnosti od deleža bitumna: (a) Največja natezna napetost, (b) Temperatura pri porušitvi

Figure 4.3.1.1: Results of TSRST test at AC 11 surf depending of the content of bitumen: (a) Maximum tensile stress, (b) Failure temperature

Če vstavimo v Arandov diagram (glej poglavje 2.1.4, slika 2.1.4.1) naše podatke, in sicer: delež polnila 10 m.-%, zmehčišče bitumna 52°C in 100-odstotno drobljena zrna frakcije pod 2 mm (peska), odčitamo, da je temperatura ob porušitvi $T_f = -24^{\circ}\text{C}$, ne glede na delež bitumna v sestavi (delež polnila je pri vseh sestavah več ali manj enak – ohranjamo enako zrnastostno sestavo). Ugotavljamo, da Arandov diagram ni najprimernejši za napovedovanje *temperature ob porušitvi za našo bitumenizirano zmes, še posebej pri večjem deležu bitumenskega veziva*. Rezultati natezne trdnosti in raztezka ob porušitvi preskusa UTST bitumenizirane zmesi AC 11 surf so prikazani v preglednicah 4.3.1.2 in 4.3.1.3.

Preglednica 4.3.1.2: Rezultati preskusa UTST bitumenizirane zmesi AC 11 surf – natezna trdnost

Table 4.3.1.2: Results of UTST test of the asphalt mixture AC 11 surf – tensile strength

Oznaka sestave	Lab. oznaka	Delež bitumna v BZ po ekstrakciji	Povprečna gostota z votlinami preskušanca	Natezna trdnost β_t [MPa]			
		m_b	ρ_{Ap}	Temperatura pri preskusu UTST [°C]			
		[m.-%]	[kg/m ³]	20	5	–10	–25
Sestava 1 (4 m.-%)	H1006-12	3,9	2438	0,910	3,152	5,025	4,503
Sestava 2 (5 m.-%)	H3893-10	4,9	2452	0,834	3,269	4,999	4,579
Sestava 3 (5,4 m.-%)	H3894-10	5,3	2463	0,717	3,184	5,397	4,323
Sestava 4 (5,8 m.-%)	H3898-10	5,6	2476	0,656	3,198	5,413	4,510
Sestava 5 (6,0 m.-%)	H1115-11	6,0	2518	0,521	2,687	5,213	4,690
STATISTIKA							
Število meritev – n		5	5	5	5	5	5
Povprečna vrednost – $\bar{x}$		5,1	2469,4	0,728	3,098	5,209	4,521
Standardna deviacija – s		0,8	30,5	0,152	0,234	0,197	0,134
Maksimalna vrednost – $x_{\max}$		6,0	2517,6	0,910	3,269	5,413	4,690
Minimalna vrednost – $x_{\min}$		3,9	2437,8	0,521	2,687	4,999	4,323
Razpon – R		2,1	79,8	0,389	0,583	0,414	0,367
$\bar{x} + 3 \cdot s$		7,5	2560,8	1,184	3,800	5,800	4,922
$\bar{x} - 3 \cdot s$		2,7	2377,9	0,272	2,396	4,618	4,120
$G_{\min}$ (< 1,6714; $\alpha = 0,05$)		1,546	1,034	1,358	1,759	1,069	1,478
$G_{\max}$ (< 1,6714; $\alpha = 0,05$)		1,072	1,583	1,199	0,732	1,033	1,265

Preglednica 4.3.1.3: Rezultati preskusa UTST bitumenizirane zmesi AC 11 surf – raztezek ob porušitvi

Table 4.3.1.3: Results of UTST test of the asphalt mixture AC 11 surf – failure strain

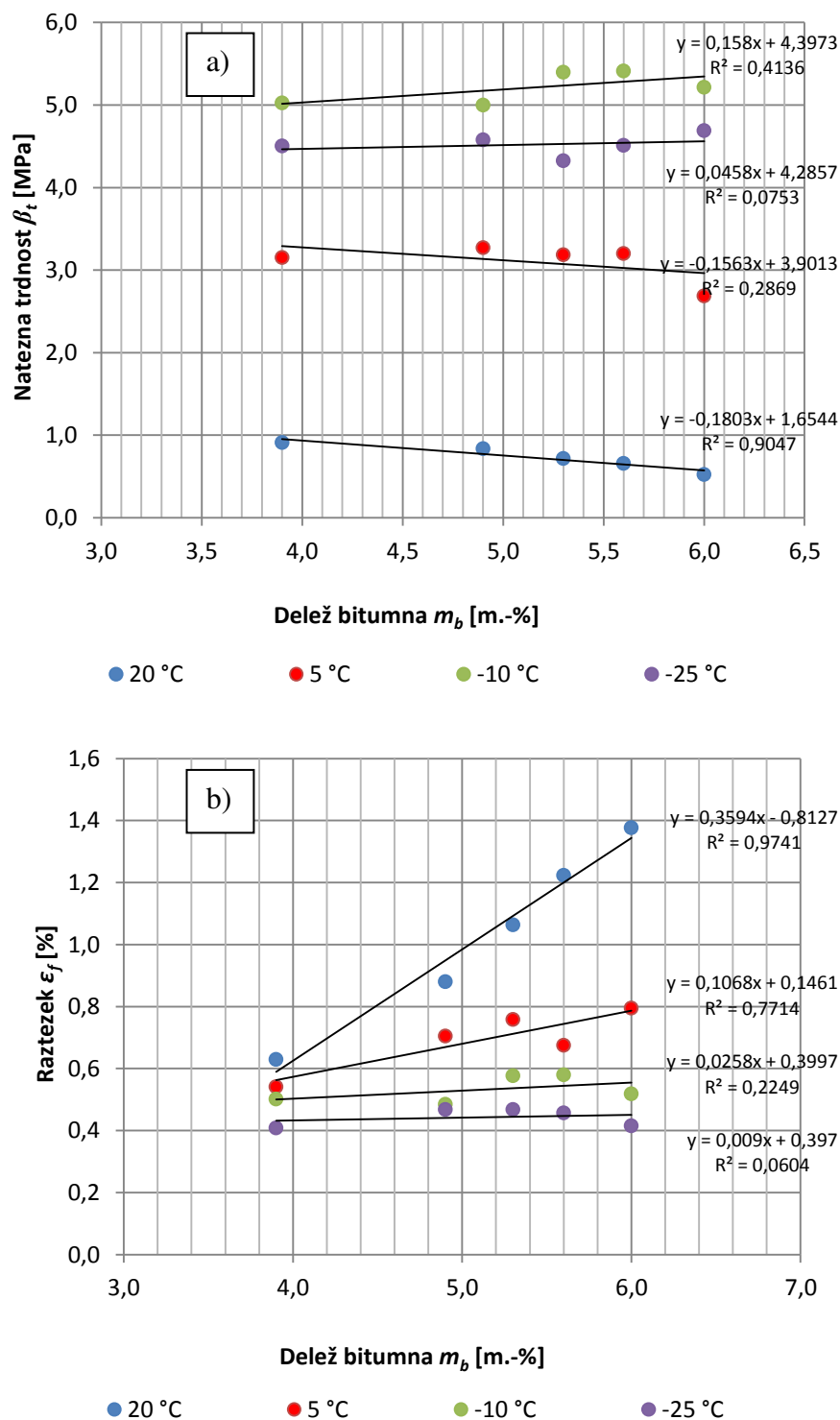
Oznaka sestave	Lab. oznaka	Delež bitumna v BZ po ekstrakciji	Povprečna gostota z votlinami preskušanca	Raztezek ob porušitvi ε_t [%]			
		m_b	ρ_{Ap}	Temperatura pri preskusu UTST [°C]			
		[m.-%]	[kg/m ³]	20	5	–10	–25
Sestava 1 (4 m.-%)	H1006-12	3,9	2438	0,630	0,542	0,502	0,408
Sestava 2 (5 m.-%)	H3893-10	4,9	2452	0,880	0,705	0,485	0,468
Sestava 3 (5,4 m.-%)	H3894-10	5,3	2463	1,063	0,758	0,577	0,468

(se nadaljuje ...)

(... nadaljevanje)

Sestava 4 (5,8 m.-%)	H3898-10	5,6	2476	1,223	0,675	0,580	0,457
Sestava 5 (6,0 m.-%)	H1115-11	6,0	2518	1,377	0,795	0,518	0,415
STATISTIKA							
Število meritev – n		5	5	5	5	5	5
Povprečna vrednost – $\bar{x}$		5,1	2469,4	1,035	0,695	0,532	0,443
Standardna deviacija – s		0,8	30,5	0,292	0,097	0,044	0,029
Maksimalna vrednost – $x_{\max}$		6,0	2517,6	1,377	0,795	0,580	0,468
Minimalna vrednost – $x_{\min}$		3,9	2437,8	0,630	0,542	0,485	0,408
Razpon – R		2,1	79,8	0,747	0,253	0,095	0,060
$\bar{x} + 3 \cdot s$		7,5	2560,8	1,911	0,987	0,663	0,532
$\bar{x} - 3 \cdot s$		2,7	2377,9	0,159	0,403	0,401	0,355
$G_{\min} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,546	1,034	1,386	1,573	1,085	1,191
$G_{\max} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,072	1,583	1,171	1,026	1,093	0,851

Z Grubbsovim testom je zaznan pri temperaturi preskusa UTST 5 °C ekstrem minimalne vrednosti pri rezultatu natezne trdnosti (preglednica 4.3.1.2), kar pomeni, da v tem naboru rezultatov obstajajo ekstremne vrednosti, ki odstopajo od normalno porazdeljene populacije. V preglednici 4.3.1.3 ni zaznani posebnih statističnih odstopanj. Iz rezultatov preskusa UTST je razvidno, da ima temperatura, pri kateri je bil preskus izveden, vpliv na rezultate natezne trdnosti v odvisnosti od *deleža* bitumna (slika 4.3.1.2). Slika 4.3.1.2a kaže, da obstaja dobra korelacija med β_t/m_b pri temperaturi 20 °C ($R^2 = 0,994$) in pri temperaturi 5 °C ($R^2 = 0,8681$), pri temperaturah –10 °C in –25 °C pa je slabša. Pri temperaturi preskusa UTST 20 °C se z *večanjem deleža bitumna* nekoliko *znižuje natezna trdnost* β_t (slika 4.3.2) in zelo *povečuje raztezek pri porušitvi* ε_f (slika 4.3.1.2b), kar je posledica vpliva viskozne komponente (viskozni del je *izrazitejši od elastičnega*) v bitumenizirani zmesi pri tej temperaturi. Pri temperaturi 5 °C natezna trdnost z večanjem deleža bitumna pada, vendar manj kot pri temperaturi 20 °C. Raztezek ε_t pri temperaturi 5 °C je manjši kot pri temperaturi 20 °C, vendar gre še vedno za visko-elastično obnašanje. Pri temperaturah preskusa UTST –10 °C in –25 °C se natezna trdnost in raztezek pri porušitvi v odvisnosti od deleža bitumna zelo malo spreminjata, kar je verjetno posledica povsem elastičnega obnašanja bitumenizirane zmesi.



Slika 4.3.1.2: Preskus UTST bitumenizirane zmesi AC 11 surf: (a) Natezna trdnost β_t in (b) Raztezek ob porušitvi ε_t v odvisnosti od deleža bitumna

Figure 4.3.1.2: UTST test of AC 11 surf: (a) Tensile strength β_t depending and (b) Tensile failure strain ε_t depending of the content of bitumen

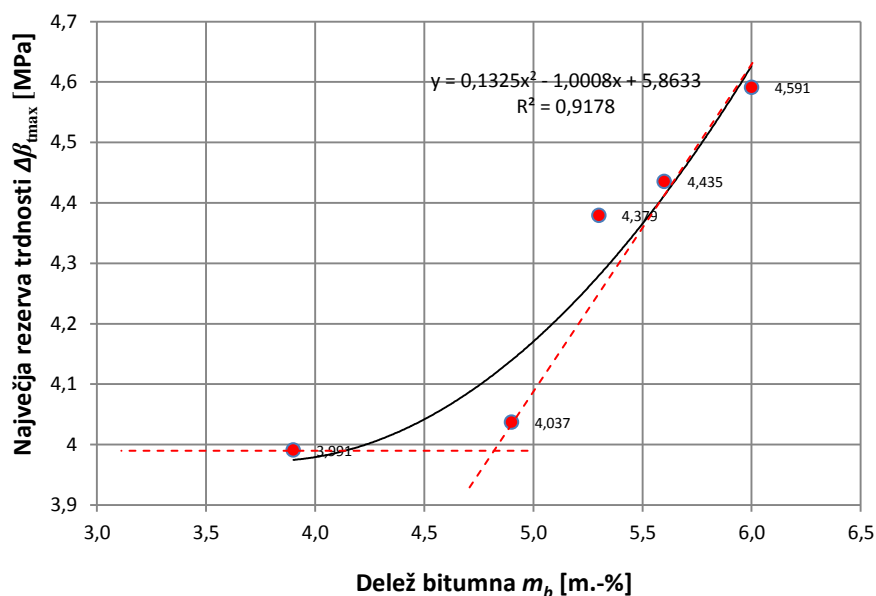
Preglednica 4.3.1.4: Rezultati rezerve natezne trdnosti bitumenizirane zmesi AC 11 surf

Table 4.3.1.4: Results of tensile strength reserve of the asphalt mixture AC 11 surf

Oznaka sestave	Lab. oznaka	Delež bitumna v BZ po ekstrakciji	Povprečna gostota z votlinami preskušanca	Zapolnjenost votlin v zmesi zrn z bitumnom	Največja rezerva natezne trdnosti	Temp. pri največji rezervi nat. trdnosti
		m_b	ρ_{Ap}	VFB	$\Delta\beta_{tmax}$	$T_{\Delta\beta_{tmax}}$
		[m.-%]	[kg/m ³]	[%]	[MPa]	[°C]
Sestava 1 (4 m.-%)	H1006-12	3,9	2438	53,5	3,991	-7,3
Sestava 2 (5 m.-%)	H3893-10	4,9	2452	70,3	4,037	-6,8
Sestava 3 (5,4 m.-%)	H3894-10	5,3	2463	77,1	4,379	-7,8
Sestava 4 (5,8 m.-%)	H3898-10	5,6	2476	83,9	4,435	-7,6
Sestava 5 (6,0 m.-%)	H1115-11	6,0	2518	88,9	4,591	-10,5
STATISTIKA						
Število meritev – n		5	5	5	5	5
Povprečna vrednost – x		5,1	2469,4	74,7	4,287	-8,000
Standardna deviacija – s		0,8	30,5	13,8	0,261	1,447
Maksimalna vrednost – x_{max}		6,0	2517,6	88,9	4,591	-6,800
Minimalna vrednost – x_{min}		3,9	2437,8	53,5	3,991	-10,500
Razpon – R		2,1	79,8	35,4	0,600	3,700
$x + 3 \cdot s$		7,5	2560,8	116,1	5,070	-3,658
$x - 3 \cdot s$		2,7	2377,9	33,4	3,503	-12,342
$G_{min} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,546	1,034	1,540	1,132	1,727
$G_{max} (< 1,6714; \alpha = 0,05)$		1,072	1,583	1,027	1,165	0,829

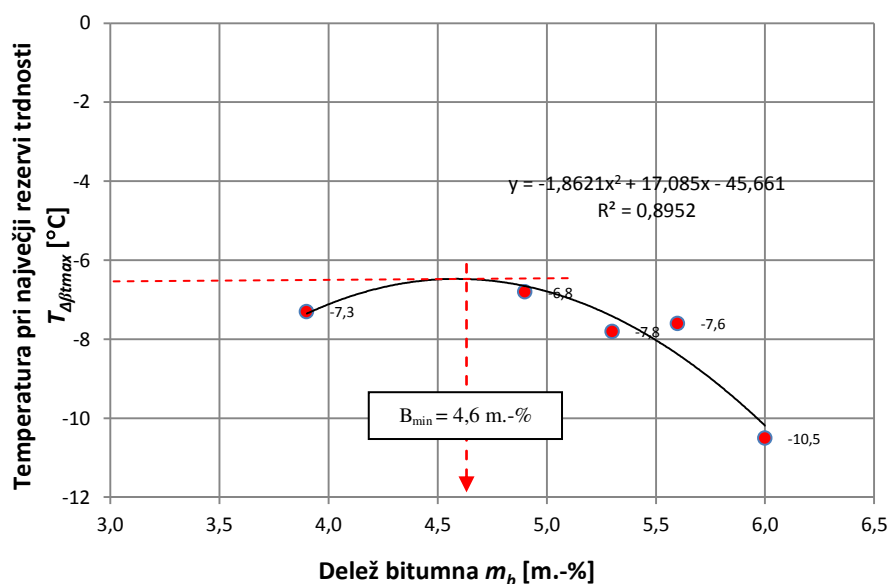
Rezultati največje rezerve natezne trdnosti $\Delta\beta_{tmax}$ in temperature pri največji rezervi natezne trdnosti $T_{\Delta\beta_{tmax}}$ v odvisnosti od deleža bitumna kažejo dobro korelacijo in nelinearno odvisnost (sliki 4.3.1.3a in 4.3.1.3b). V primerjavi z zgoraj navedenimi korelacijami izhaja, da vpliv deleža bitumna pri nizkih temperaturah najbolje opisuje največja rezerva natezne trdnosti in temperatura pri njej. Slika 4.3.1.3a prikazuje, da se s povečevanjem deleža bitumna s 4,9 m.-% na 6,0 m.-% največja rezerva natezne trdnosti $\Delta\beta_{tmax}$ bistveno poveča in temperatura pri največji rezervi natezne trdnosti $T_{\Delta\beta_{tmax}}$ zniža z -6,8 °C na -10,5 °C (slika 4.3.1.3b). Pri deležih bitumna 4 in 5 m.-% opazimo, da se obe vrednosti zelo malo spreminjata. Od tod sklepamo, da ima delež bitumna v tej raziskavi pomembno vlogo, kajti s povečevanjem deleža bitumna nad 5 m.-% bistveno izboljšamo lastnosti bitumenizirane zmesi AC 11 surf pri nizkih

temperaturah, vendar je ta odvisnost nelinearna. Iz slik 4.3.1.3a in 4.3.1.3b smo ugotovili, da je najmanjši delež bitumna $B_{\min}$ za obravnavano bitumenizirano zmes AC 11 surf v območju 4,6 m.-% in je bistveno večji od trenutno najmanjšega zahtevanega deleža veziva po TSC 06.300/06.410, tč. 5.2.2, opredeljenega po standardu SIST EN 13108-1, tj. kategorijo $B_{\min 3,0}$.



Slika 4.3.1.3a: Največja rezerva natezne trdnosti v odvisnosti od deleža bitumna za bitumenizirano zmes AC 11 surf

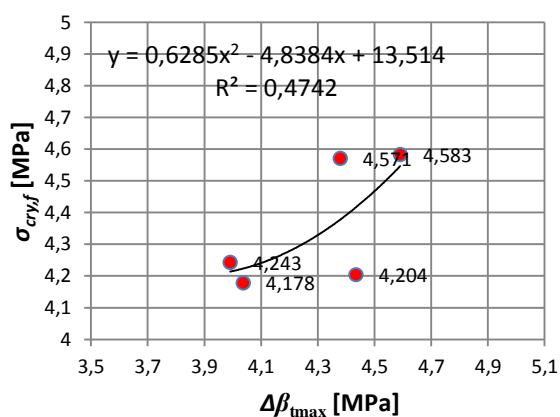
Figure 4.3.1.3a: Maximum tensile strength reserve depending of the content of bitumen for AC 11 surf



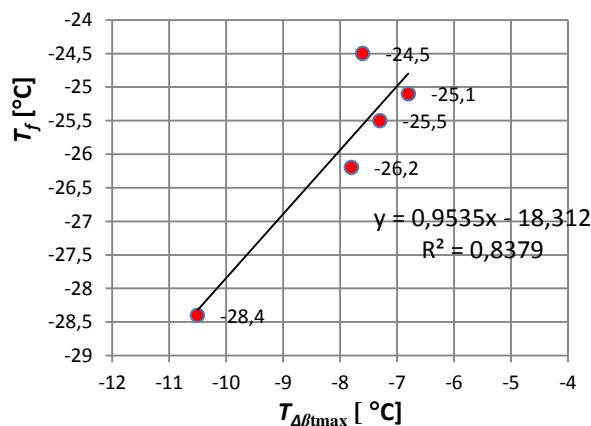
Slika 4.3.1.3b: Temperatura pri največji rezervi natezne trdnosti v odvisnosti od deleža bitumna za bitumenizirano zmes AC 11 surf

Figure 4.3.1.3b: Temperature at maximum tensile strength reserve depending of the content of bitumen for AC 11 surf

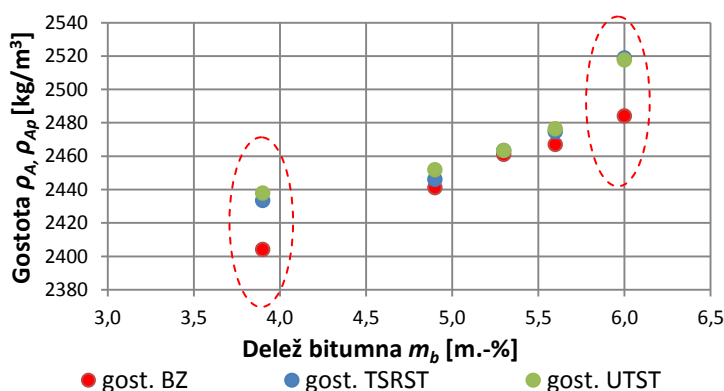
Slika 4.3.1.4a za bitumenizirano zmes AC 11 surf prikazuje slabo korelacijo med največjo rezervo natezne trdnosti $\Delta\beta_{\text{tmax}}$ in natezno napetostjo ob porušitvi $\sigma_{\text{cry},f}$ ($R^2 = 0,47$). Dobro korelacijo ($R^2 = 0,85$) pa kaže odvisnost med temperaturo pri največji rezervi natezne trdnosti $T_{\Delta\beta_{\text{tmax}}}$ in temperaturo pri porušitvi T_f (slika 4.3.1.4b). Gostota z votlinami bitumenizirane zmesi AC 11 surf in povprečna gostota z votlinami preskušancev (povprečje treh) za TSRST in UTST sta prikazani na sliki 4.3.1.5. Vidimo, da vrednosti gostote z votlinami preskušancev TSRST in UTST praktično sovpadajo pri vseh sestavah. Gostota z votlinami bitumenizirane zmesi odstopa pri sestavi 1 (4 m.-% bitumna) in sestavi 5 (6 m.-% bitumna) v primerjavi s preostalima. Razlika je za okoli 40 kg/m^3 , zato so v nadaljevanju pri prikazu gostote z votlinami z rezultati pri nizkih temperaturah uporabljene gostote z votlinami preskušancev TSRST in UTST.



Slika 4.3.1.4a: Največja rezerva natezne trdnosti v odvisnosti od natezne napetosti ob porušitvi
Figure 4.3.1.4a: Maximum tensile strength reserve depending of tensile stress of failure



Slika 4.3.1.4b: Temperatura pri največji rezervi trdnosti v odvisnosti od temperature pri porušitvi
Figure 4.3.1.4b: Temperature at maximum tensile strength reserve depending of failure temperature



Slika 4.3.1.5: Gostote z votlinami bitumenizirane zmesi ter preskušancev TSRST in UTST v odvisnosti od deleža bitumna za bitumenizirano zmes AC 11 surf

Figure 4.3.1.5: Bulk density of asphalt mixture and samples TSRST and UTST depending of the content of bitumen for AC 11 surf

4.3.2 Bitumenizirana zmes AC 8 surf

V preglednici 4.3.2.1 so predstavljeni rezultati temperature ob porušitvi T_f in napetosti ob porušitvi $\sigma_{cry,f}$ pri preskusih TSRST za bitumenizirano zmes AC 8 surf, ki so bili izvedeni v laboratorijih na ZAG-u (H1024, H1029, H1057), TU Wien (K327, K328, K348) in v Ramtechu (074, 075). Iz rezultatov z ZAG-a je razvidno, da so natezne napetosti ob porušitvi med seboj zelo podobne, kar za temperaturo ob porušitvi ne velja. Posredna natezna trdnost z deležem bitumna pada.

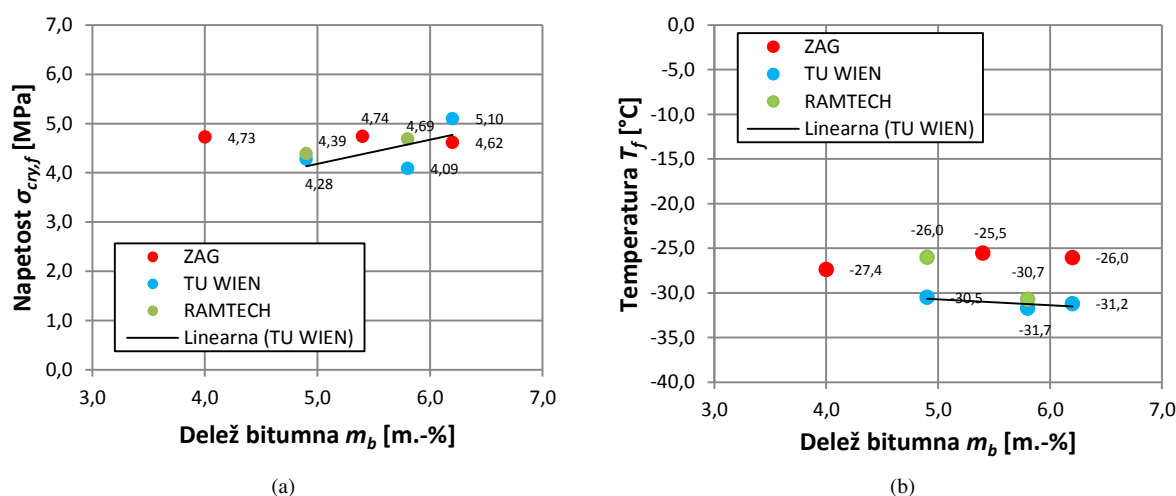
Preglednica 4.3.2.1: Rezultati preskusa TSRST bitumenizirane zmesi AC 8 surf

Table 4.3.2.1: Results of TSRST test of the asphalt mixture AC 8 surf

Oznaka sestave	Lab. oznaka	Delež bitumna v BZ po ekstrakciji	Vsebnost votlin v preskušancu	Povprečna gostota z votlinami preskušanca	Temp. ob porušitvi	Napetost ob porušitvi	Posredna natezna trdnost
		m_b	V_{Ap}	ρ_{Ap}	T_f	$\sigma_{cry,f}$	ITS
		[m.-%]	[V.-%]	[kg/m ³]	[°C]	[MPa]	[kPa]
Sestava 1 (4 m.-%)	H1042-13	4,0	8,4	2411	-27,4	4,73	1245
Sestava 3 (5,4 m.-%)	H1029-13	5,4	4,6	2457	-25,5	4,74	1186
Sestava 5 (6,2 m.-%)	H1057-13	6,2	2,3	2483	-26,0	4,62	1036
Sestava 2 (5,0 m.-%)	K327	4,9	6,5	2455	-30,5	4,28	n. p.
Sestava 4 (5,8 m.-%)	K328	5,8	3,0	2469	-31,7	4,09	n. p.
Sestava 5 (6,2 m.-%)	K348	6,2	2,3	2505	-31,2	5,10	n. p.
Sestava 2 (5,0 m.-%)	074	4,9	6,5	2449	-26,0	4,39	n. p.
Sestava 4 (5,8 m.-%)	075	5,8	3,0	2475	-30,7	4,69	n. p.
STATISTIKA							
Število meritev – n		8	8	8	8	8	-
Povprečna vrednost – x		5,4	4,6	2468,8	-28,6	4,6	-
Standardna deviacija – s		0,8	2,3	25,5	2,6	0,3	-
Maksimalna vrednost – x_{max}		6,2	8,4	2505,0	-25,5	5,1	-
Minimalna vrednost – x_{min}		4,0	2,3	2434,0	-31,7	4,1	-
Razpon – R		2,2	6,1	71,0	6,2	1,0	-
$x + 3 \cdot s$		7,7	11,5	2545,4	-20,7	5,5	-
$x - 3 \cdot s$		3,1	-2,4	2392,3	-36,5	3,6	-
$G_{min} (< 2,0317; \alpha = 0,05)$		1,838	0,986	1,365	1,165	1,550	-
$G_{max} (< 2,0317; \alpha = 0,05)$		1,050	1,654	1,418	1,174	1,649	-

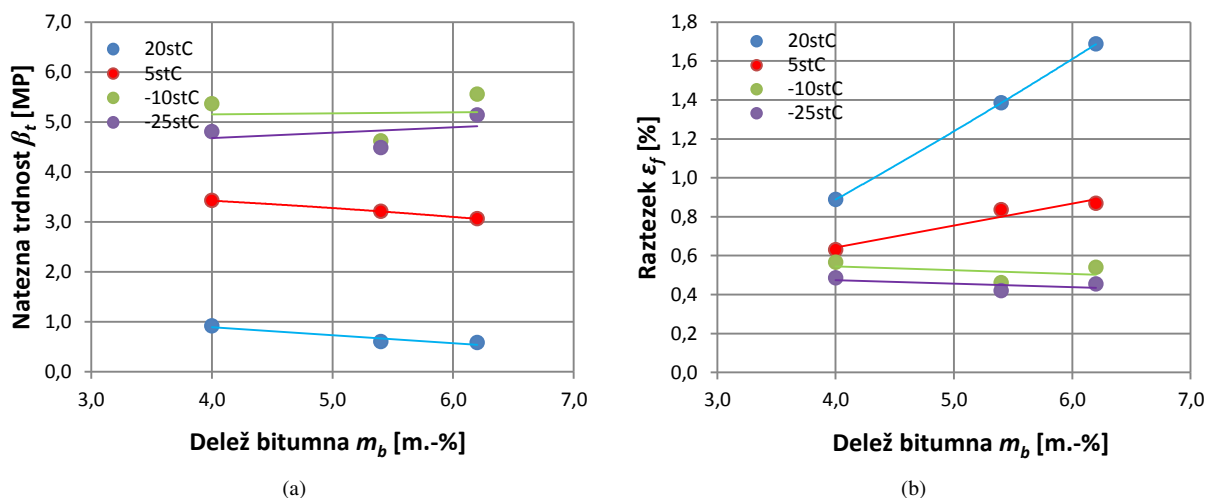
Slika 4.3.2.1 prikazuje natezno napetost ob porušitvi in temperaturo ob porušitvi v odvisnosti od deleža bitumna. Kljub različnim rezultatom različnih laboratorijev opazimo rahel trend, da z naraščanjem deleža bitumna narašča natezna napetost ob porušitvi in pada temperatura ob

porušitvi. Podobno kot pri bitumenizirani zmesi AC 11 surf tudi pri AC 8 surf iz rezultatov UTST (podatki iz preglednic 4.2.3, 6 in 9 za ZAG) vidimo, da se natezna trdnost v odvisnosti od deleža bitumna zelo malo spreminja (slika 4.3.2.2). Raztezek ob porušitvi se pri višjih temperaturah v odvisnosti od deleža bitumna v sestavi bistveno razlikuje (z večanjem deleža se povečuje), dosežene vrednosti pa so praktično enake pri nižjih temperaturah. Rezultati bitumeniziranih zmesi AC 8 surf v vseh treh laboratorijih kažejo, da se s povečevanjem deleža bitumna v sestavi povečuje vrednost največje rezerve natezne trdnosti in zmanjšuje temperatura pri največji rezervi trdnosti. Rezultati so med laboratoriji različni tudi pri enaki sestavi bitumenizirane zmesi.



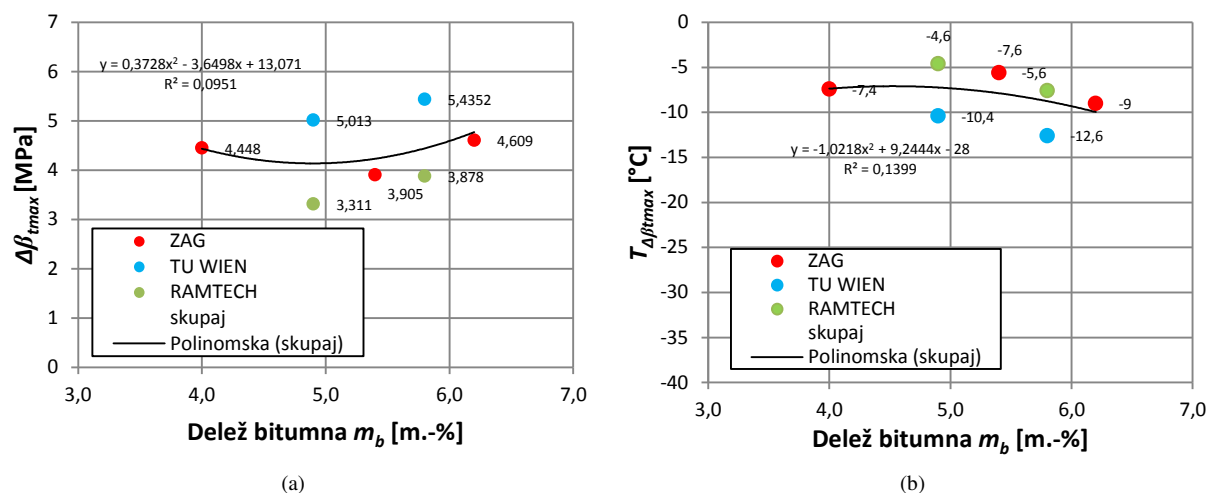
Slika 4.3.2.1: Preskus TSRST za bitumenizirano zmes AC 8 surf v odvisnosti od deleža bitumna: (a) Največje natezne napetosti, (b) Temperatura pri porušitvi

Figure 4.3.2.1: TSRST test at AC 8 surf depending of the content of bitumen: (a) Maximum tensile stress, (b) Failure temperature



Slika 4.3.2.2: (a) Natezna trdnost in (b) Raztezek v odvisnosti od deleža bitumna pri bitumenizirani zmesi AC 8 surf (ZAG)

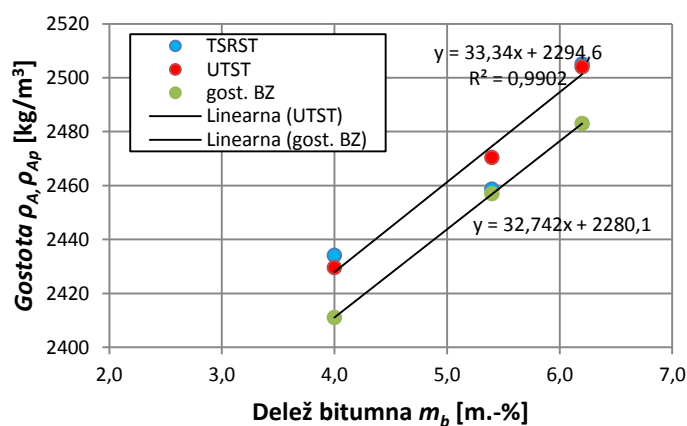
Figure 4.3.2.2: (a) Tensile strength and (b) Strain depending of the content of bitumen for AC 8 surf (ZAG)



Slika 4.3.2.3: (a) Največje rezerve natezne trdnosti in (b) Temperature pri največji rezervi natezne trdnosti v odvisnosti od deleža bitumna

Figure 4.3.2.3: (a) Maximum tensile strength reserve and (b) Temperature at maximum tensile strength reserve depending of the content of bitumen

Povprečna gostota z votlinami prizmatičnih preskušancev UTST in TSRST se dobro ujema pri 4 m.-% in 6,2 m.-% bitumna v sestavi bitumenizirane zmesi AC 8 surf. Pri 5,4 m.-% bitumna se nekoliko bolj ujemata gostoti z votlinami bitumenizirane zmesi in gostota z votlinami preskušancev UTST (slika 4.3.2.4). Podobno je pri sestavi AC 11 surf.



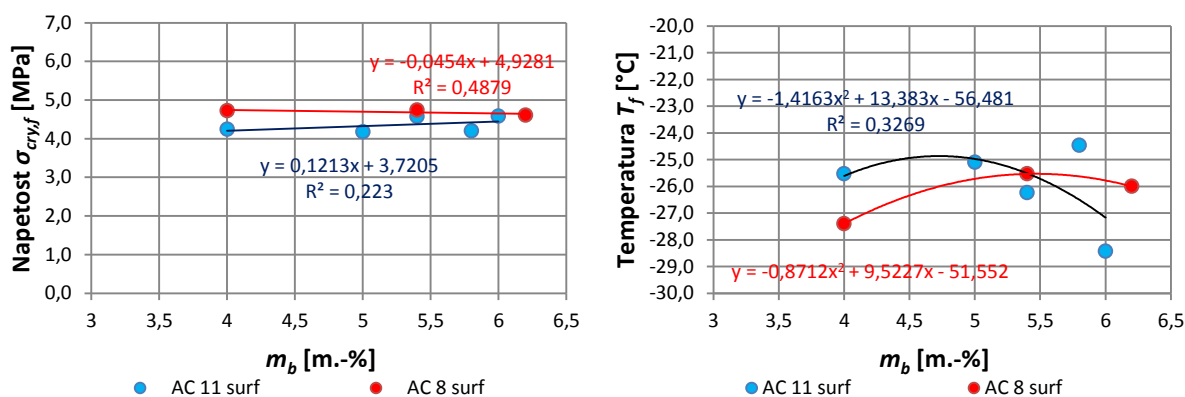
Slika 4.3.2.4: Diagram gostote z votlinami bitumenizirane zmesi ter preskušancev TSRST in UTST v odvisnosti od deleža bitumna

Figure 4.3.2.4: Diagram of bulk density of asphalt mixture and sample TSRST and UTST depending of the content of bitumen

4.3.3 Primerjava bitumeniziranih zmesi AC 11 surf in AC 8 surf (ZAG)

V tem poglavju so primerjani rezultati preskusov TSRST in UTST v odvisnosti od deleža bitumna v bitumenizirani sestavi na preskušancih bitumeniziranih zmesi AC 11 surf in AC 8

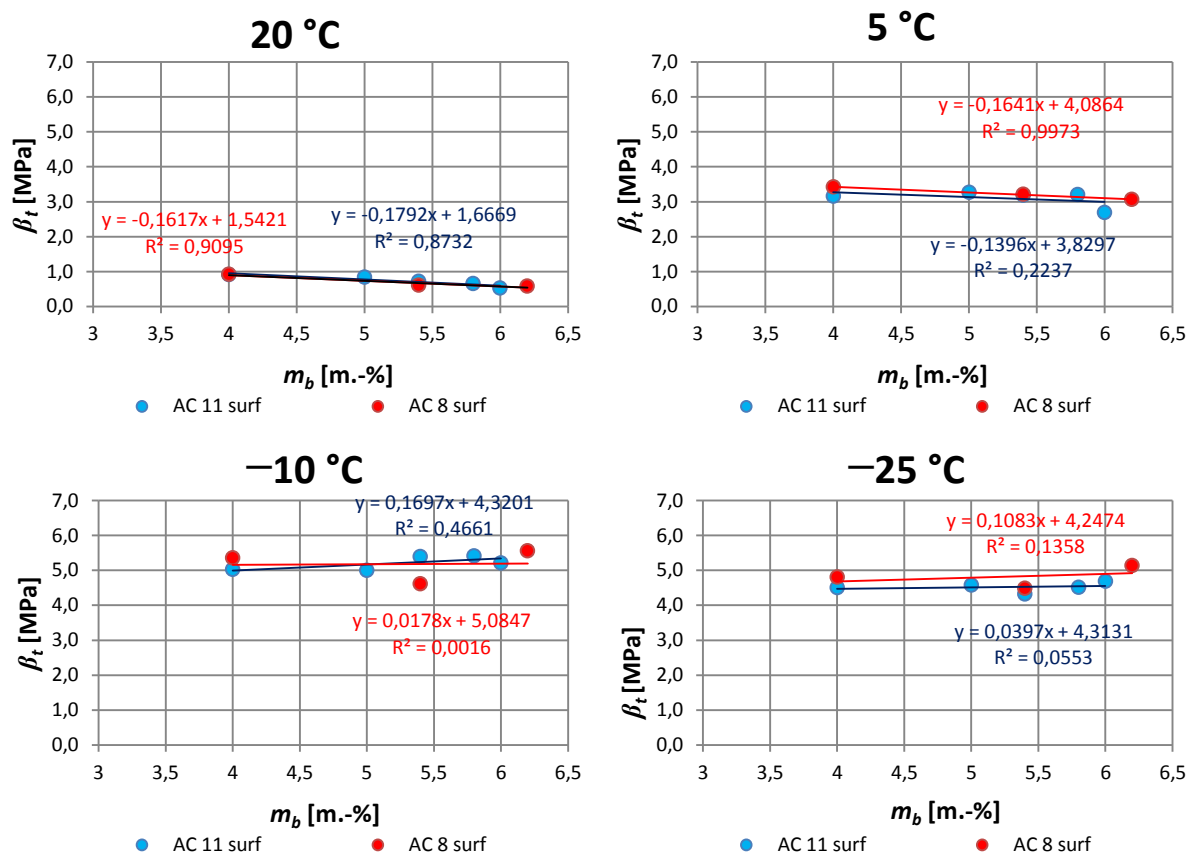
surf, ki so bili izvedeni na ZAG-u. S tem želimo izključiti druge vplive na rezultate (npr. opreme, priprave ipd.). Na sliki 4.3.3.1a je opaziti nekoliko večje vrednosti natezne napetosti ob porušitvi pri bitumenizirani zmesi AC 8 surf v primerjavi z AC 11 surf pri manjših deležih bitumna. Temperatura pri natezni napetosti pokaže velik raztros rezultatov (slika 4.3.3.1b).



Slika 4.3.3.1: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf v odvisnosti od deleža bitumna: (levo) natezne napetosti ob porušitvi, (desno) temperatura pri porušitvi

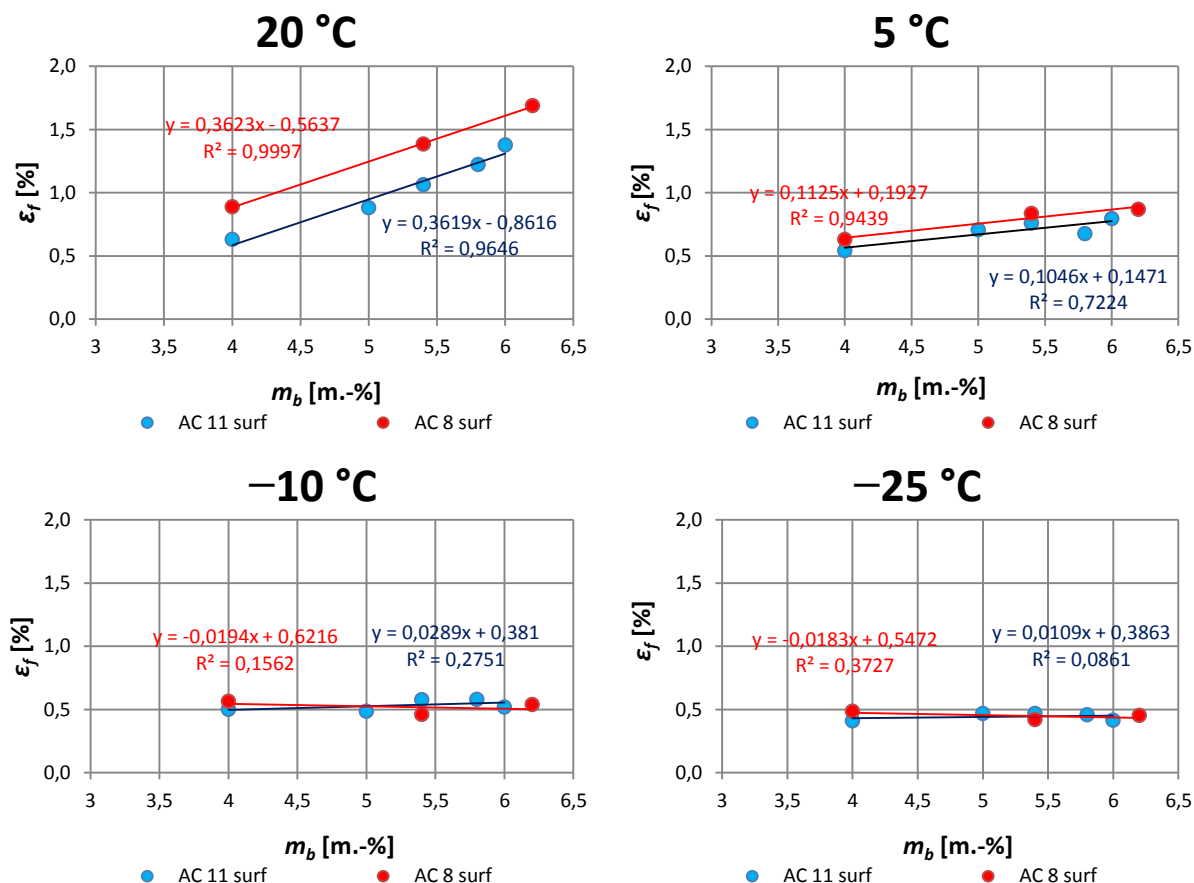
Figure 4.3.3.1: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf depending of the content of bitumen: (left) tensile stress of failure, (right) failure temperature

Natezna trdnost β_t bitumeniziranih zmesi AC 11 surf in AC 8 surf v odvisnosti od deleža bitumna ne kaže bistvenih razlik oz. so te zelo majhne (slika 4.3.3.2). Vrednosti natezne trdnosti so za AC 8 surf in AC 11 surf, ne glede na temperaturo, pri kateri je bil izveden preskus, podobne. Povsem drugače se to odraža pri raztezk ε_t (slika 4.3.3.3): pri višji temperaturi preskusa UTST 20 °C je razlika med AC 8 surf in AC 11 surf očitna. Bitumenizirana zmes AC 8 surf izkazuje večji raztezek in enakomernejši odmik glede na AC 11 surf. Z nižanjem temperature se odmik zmanjšuje in pri temperaturah preskusa -10 °C in -25 °C ni opaziti razlike. To pomeni, da se oba materiala pri tako nizki temperaturi obnašata podobno. Obnašanje je elastično, ne glede na delež bitumna v sestavi je raztezek enak. Tudi pri rezultatih največje rezerve natezne trdnosti $\Delta\beta_{\max}$ v odvisnosti od deleža bitumna pri bitumeniziranih zmesih AC 8 surf in AC 11 surf je opaziti majhno razliko, predvsem pri večjem deležu bitumna AC 11 surf izkazuje višje vrednosti (slika 4.3.3.4a). Iz rezultatov temperature pri največji rezervi natezne trdnosti v odvisnosti od deleža bitumna vidimo, da ima AC 11 surf nižje vrednosti kot AC 8 surf, kar je ugodnejše (slika 4.3.3.4b).



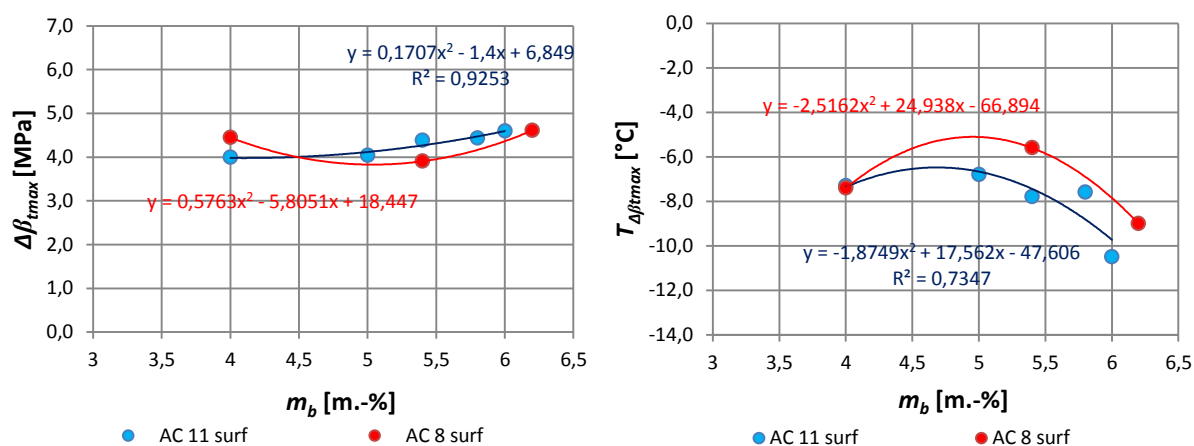
Slika 4.3.3.2: Diagram funkcije natezna trdnost – delež bitumna pri bitumenizirani zmesi AC 11 surf

Figure 4.3.3.2: Diagram function of tensile strength depending – bitumen content at AC 11 surf



Slika 4.3.3.3: Diagram funkcije raztezek ob porušitvi – delež bitumna pri bitumenizirani zmesi AC 11 surf

Figure 4.3.3.3: Diagram function of failure strain depending – bitumen content at AC 11 surf



Slika 4.3.3.4a: Diagram funkcije največje rezerve natezne trdnosti in deleža bitumna

Figure 4.3.3.4a: Diagram depending of maximum tensile strength reserve and of the bitumen content

Slika 4.3.3.4b: Diagram funkcije temperature pri največji rezervi natezne trdnosti in deleža bitumna

Figure 4.3.3.4b: Diagram depending of temperature at maximum tensile strength reserve and bitumen content

4.4 Vpliv mehanskih lastnosti bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah

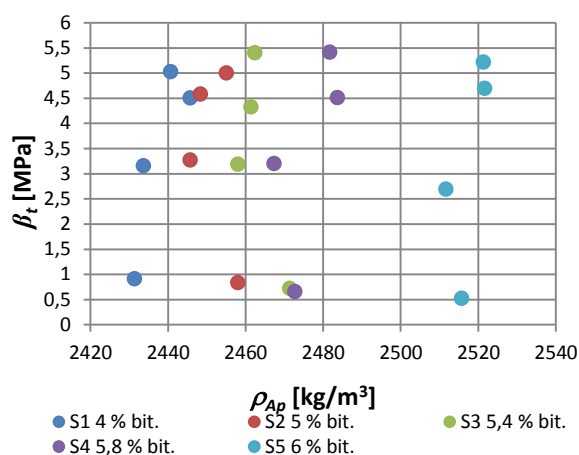
4.4.1 Bitumenizirana zmes AC 11 surf

V tem poglavju so analizirani rezultati raziskav lastnosti bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah glede na vsebnost votlin, gostoto z votlinami, VFB in togost po Marshallu. V sestavah bitumeniziranih zmesi sta se spreminjala delež bitumna in vsebnost votlin, sestava zmesi kamnitih zrn pa se ni spreminjala, le polnilo je minimalno variiralo, vendar v mejah pričakovanega (glej poglavje 3.2.2). Vsebnost votlin se je spreminjala zaradi različnega deleža bitumna, zato so si odvisnosti podobne ali komplementarne. Variiranje vsebnosti polnila je povzročilo, da ni popolne korelacije med deležem bitumna in vsebnostjo votlin ($R^2 = 0,996$). Praktično sta v korelaciji z deležem bitumna tudi stopnja zapolnjenosti votlin VFB ($R^2 = 0,997$) in gostota z votlinami ($R^2 = 0,995$). Na sliki C.4.4.1.1 (priloga C) so predstavljeni rezultati preskusa TSRST v odvisnosti od vsebnosti votlin v preskušancu V_{Ap} . Vidimo, da ima vsebnost votlin v preskušancu manjši vpliv na natezno napetost kot na temperaturo ob porušitvi. Preskušanec pri vsebnosti votlin 2,3 V.-% je vprašljiv, saj bistveno odstopa od pričakovanj, kar je lepo vidno tudi na sliki C.4.4.1.1b (priloga C). Pri rezultatih največje rezerve natezne trdnosti in temperatur pri največji rezervi trdnosti v odvisnosti od vsebnosti votlin v bitumenizirani zmesi V_v je vidna dobra korelacija (slika C.4.4.1.2a in slika C.4.4.1.2b – priloga C). Pri obeh slikah vidimo zrcalno oz. podobno sliko kot pri sliki v odvisnosti od deleža bitumna (glej sliki C.4.3.1.3a in b – priloga C). *Z manjšanjem vsebnosti votlin se največja rezerva natezne trdnosti nelinearno povečuje in temperatura pri največji rezervi natezne trdnosti $T_{\Delta\beta_{tmax}}$ zmanjšuje. Preskok (V_{vmax}) je opaziti v območju pri vsebnosti votlin okoli 5,9 V.-%, kar je nižje od predpisane zgornje meje po TSC.*

Z naraščanjem gostote z votlinami preskušancev oz. z večanjem deleža bitumna v sestavi narašča natezna napetost ob potrušitvi (slika 4.4.1.3a – priloga C) in pada temperatura ob porušitvi pri preskusu TSRST. S povečevanjem gostote z votlinami preskušanca ρ_{Av} z 2450 kg/m^3 na 2520 kg/m^3 se temperatura pri porušitvi T_f zniža z $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ na $-28 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T_f = 3 \text{ }^\circ\text{C}$). Oznake S na slikah pomenijo sestavo bitumeniziranih zmesi.

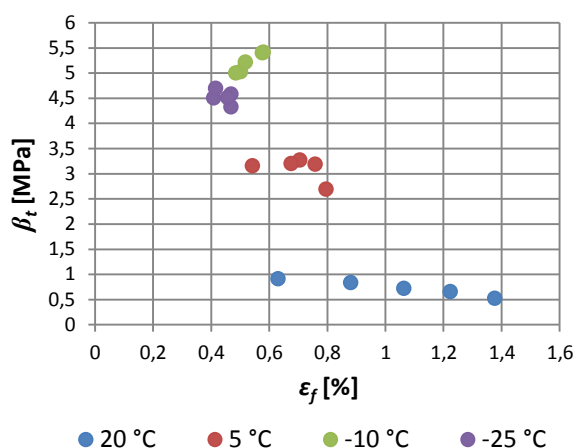
Na sliki 4.4.1.4a so prikazani rezultati gostote z votlinami preskušanca in natezne trdnosti glede na različno sestavo. Vidno je, da so se pri isti sestavi bitumenizirane zmesi gostote z votlinami preskušancev spremenile za več kot 15 kg/m^3 (sestava 4). Tudi to je lahko vzrok za

manjša odstopanja pri rezultatih UTST glede na druge lastnosti. Na sliki 4.4.1.4b je vidno, kako je raztezek ob porušitvi pri višji temperaturi odvisen od sestave in obratno, pri nižjih temperaturah pa je skorajda enak. Pri temperaturi 20 °C je razmik praktično enak, razen med 4 m.-% in 5 m.-% bitumna, kjer je nekoliko večji. Iz slike 4.4.1.4b tudi vidimo, da se s povečevanjem raztezka ob porušitvi natezna trdnost zelo malo spreminja. Podobno je tudi pri 5 °C. Pri nižjih temperaturah pa je opazno, da so vrednosti med seboj bolj zgoščene in brez urejenega zaporedja. Na slikah C.4.4.1.5a in C.4.4.1.5b (priloga C) je prikazana odvisnost med rezervo natezne trdnosti, temperaturo pri največji rezervi natezne trdnosti in gostoto z votlinami bitumenizirane zmesi ρ_A . Korelacija je v obeh primerih zelo dobra in vidimo podobnost s sliko v odvisnosti od deleža bitumna. Tudi tu vidimo, da se z večanjem gostote z votlinami nelinearno povečuje največja rezerva natezne trdnosti $\Delta\beta_{\text{tmax}}$ in nižja temperatura pri največji rezervi natezne trdnosti $T_{\Delta\beta_{\text{tmax}}}$.



Slika 4.4.1.4a: Diagram v odvisnosti med natezno trdnostjo in gostoto preskušancev za AC 11 surf

Figure 4.4.1.4a: Diagram depending of tensile strength and the bulk density of specimen at AC 11 surf



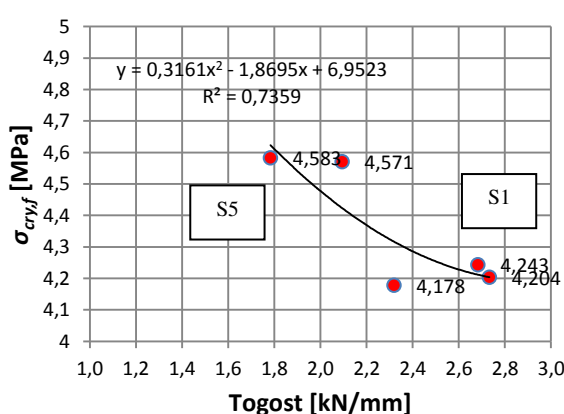
Slika 4.4.1.4b: Diagram v odvisnosti med natezno trdnostjo in raztezkom ob porušitvi za AC 11 surf

Figure 4.4.1.4b: Diagram depending of tensile strength and failure strain at AC 11 surf

Sliki C.4.4.1.6a in C.4.4.1.6b (priloga C) prikazujeta razmerja med natezno napetostjo ob porušitvi in temperaturo ob porušitvi v odvisnosti od zapolnjenosti votlin v zmesi zrn z bitumnom (VFB). Korelacija je pri rezultatih TSRST slaba ($R^2 < 0,25$), vendar je trend rasti napetosti in temperature še vedno usmerjen enako kot pri slikah C.4.4.1.3a in C.4.4.1.3b (priloga C) v kombinaciji s TSRST. Na slikah C.4.4.1.7a in C.4.4.1.7b vidimo dobro korelacijo ($R^2 > 0,8$) med rezervo natezne trdnosti, temperaturo pri največji rezervi trdnosti in zapolnjenostjo votlin v zmesi zrn z bitumnom (VFB) ter znova vidimo podobnost s slikama

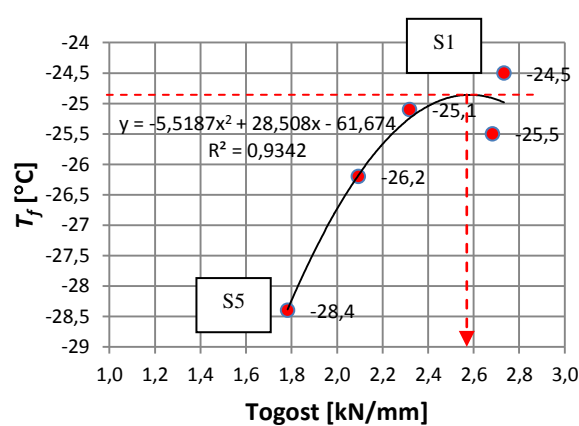
C.4.4.1.5a in C.4.4.1.5b v odvisnosti od gostote z votlinami. Večji ko je VFB, večja je rezerva natezne trdnosti $\Delta\beta_{\text{tmax}}$ in nižja je temperatura $T_{\Delta\beta_{\text{tmax}}}$. Vertikalne modre črtkane linije ponazarjajo meje, ki so predpisane v trenutno veljavnem standardu SIST 1038-1. Na sliki C.4.4.1.7b (priloga C) vidimo, da je v našem primeru preskok (vrh krivulje) ravno na spodnji dovoljeni meji ($\text{VFB}_{\text{min65}}$), to pomeni, da je meja $\text{VFB}_{\text{min65}}$ na optimalnem mestu, vezano na temperaturo pri največji rezervi natezne trdnosti.

Nekatere osnovne mehanske lastnosti (stabilnost, tečenje in togost po Marshallu) pa se v novih tehničnih smernicah ne analizirajo več zaradi vpliva sestave bitumenizirane zmesi. Korelacija med stabilnostjo in tečenjem po Marshallu ter rezultati preskusov TSRST (sliki 4.4.1.8a in 4.4.1.8b) in temperaturo pri največji rezervi natezne trdnosti je zadovoljiva (slika 4.4.1.9b). Na sliki 4.4.1.8b vidimo tudi presenetljivo dobro korelacijo med temperaturo ob porušitvi in togostjo po Marshallu. Ugotavljamo, da potekajo krivulje nelinearno in *manjša* ko je togost po Marshallu, *večja* je natezna napetost *ob porušitvi* $\sigma_{\text{cry},f}$ in *nižja* je temperatura ob porušitvi T_f . Med rezultati rezerve natezne trdnosti in togostjo po Marshallu vidimo slabo korelacijo; le trend kaže, da če je manjša togost, je večja rezerva natezne trdnosti (slika 4.4.1.9a). Na sliki 4.4.1.9b pa je nepričakovano dobra korelacija med togostjo po Marshallu in temperaturo pri največji rezervi napetosti, kjer je $R^2 = 0,999$. Regresijska kvadratna krivulja ima dno pri togosti 2,4 kN/mm in temperaturi pri največji rezervi natezne trdnosti $T_{\Delta\beta_{\text{tmax}}} = -7^\circ\text{C}$. *Manjša ko je togost (sestave z več bituminoznega veziva), nižja je temperatura pri največji rezervi natezne trdnosti* $T_{\Delta\beta_{\text{tmax}}}$.



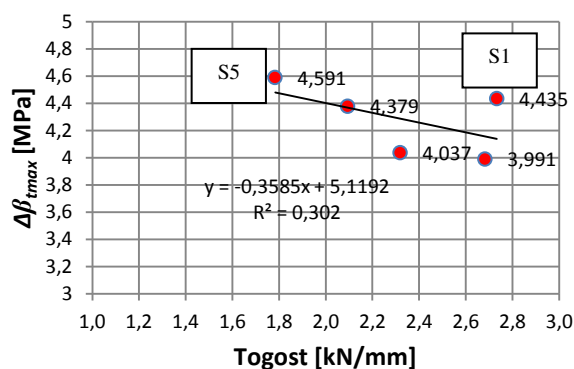
Slika 4.4.1.8a: Diagram funkcije natezne napetosti ob porušitvi in togosti po Marshallu za AC 11 surf

Figure 4.4.1.8a: Diagram function of tensile stress and Marshall stiffness at AC 11 surf



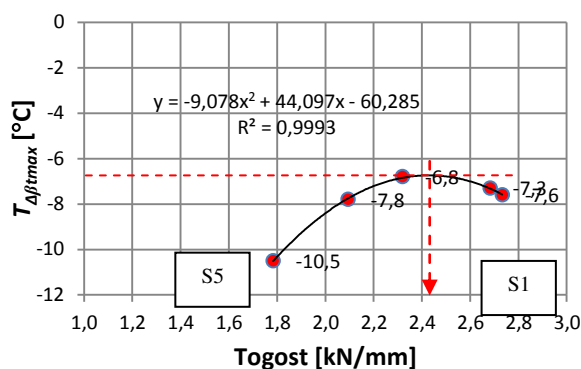
Slika 4.4.1.8b: Diagram funkcije temperature ob porušitvi in togosti po Marshallu za AC 11 surf

Figure 4.4.1.8b: Diagram function of temperature of failure and Marshall stiffness at AC 11 surf



Slika 4.4.1.9a: Diagram funkcije največje rezerve natezne trdnosti in togosti po Marshallu za AC 11 surf

Figure 4.4.1.9a: Diagram function of max. tensile strength reserve and Marshall stiffness at AC 11 surf



Slika 4.4.1.9b: Diagram funkcije temperature pri največji rezervi in togosti po Marshallu za AC 11 surf

Figure 4.4.1.9b: Diagram function of temperature at maximum reserve and Marshall stiffness at AC 11 surf

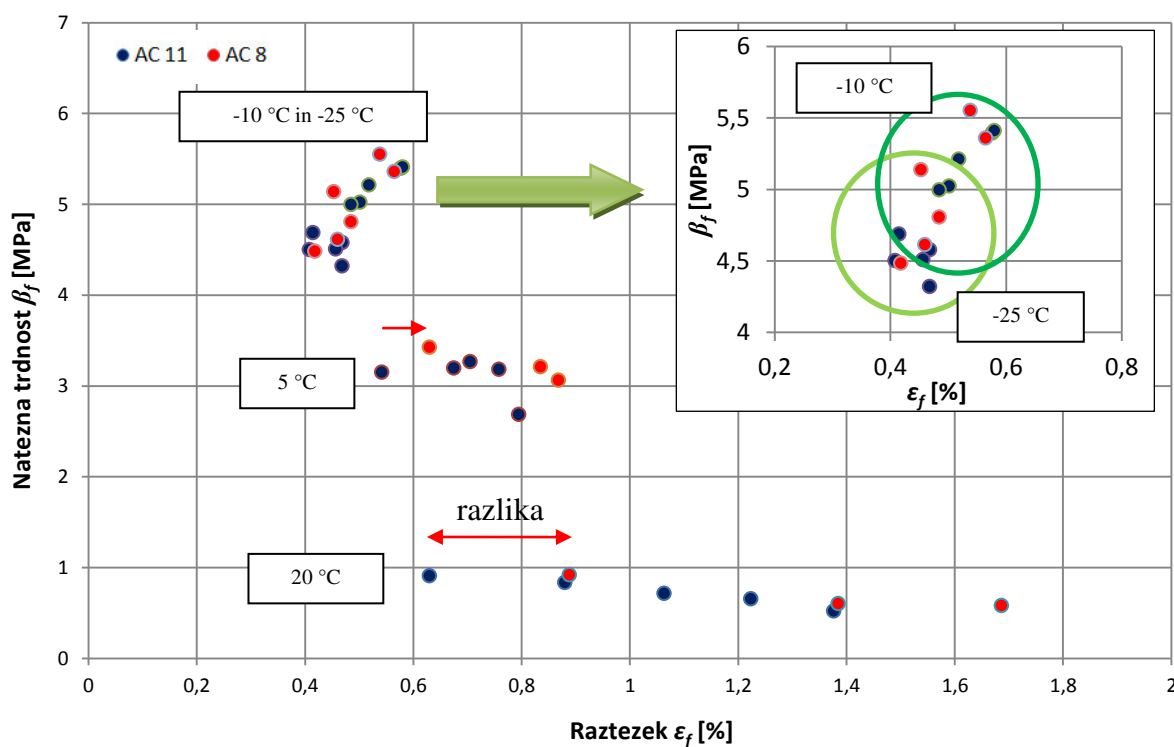
4.4.2 Primerjava bitumeniziranih zmesi AC 11 surf in AC 8 surf

V tem poglavju bomo primerjali rezultate preskusov TSRST in UTST ter rezerve natezne trdnosti v odvisnosti od prostorskih lastnosti bitumeniziranih zmesi AC 11 surf in AC 8 surf. Preskusi so bili opravljeni na ZAG-u. Pri raziskavah smo se odločili, da poskušamo obdržati konstantno vsebnost polnila in sestavo zmesi kamnitih zrn v bitumeniziranih zmesih ter spreminjati delež bitumna in vsebnost votlin. Vsebnost votlin se je spreminjala v odvisnosti od variiranja deleža bitumna v sestavi bitumenizirane zmesi, zato so odvisnosti podobne ali komplementarne. Iz grafa, ki prikazuje natezno napetost ob porušitvi in vsebnost votlin v preskušancu (slika C.4.4.2.1a – priloga C) vidimo, da je natezna napetost pri AC 8 surf nekoliko večja kot pri AC 11 surf, temperatura ob porušitvi pri AC 8 surf pa malenkostno nižja kot pri AC 11 (slika C.4.4.2.1b – priloga C). Skratka, gre za majhne razlike, vendar iz tega ugotavljamo, da je v našem primeru bitumenizirana zmes AC 8 surf nekoliko bolj odporna proti nastanku razpok pri nizkih temperaturah kot AC 11 surf, čeprav smo uporabili nekoliko slabše vezivo. Rezerva natezne trdnosti v primerjavi z vsebnostjo votlin v bitumenizirani zmesi ne kaže, da so rezultati pri AC 11 surf in AC 8 surf podobni (slika 4.4.2.2a – priloga C). Pri temperaturi pri največji rezervi trdnosti pa kaže, da obstajajo razlike, in sicer tokrat v prid AC 11 surf, ki izkazuje nižjo temperaturo pri največji rezervi trdnosti, kot jo izkazuje AC 8 surf (slika 4.4.2.2b – priloga C).

Zelo podobno obnašanje, kot je opisano zgoraj, je mogoče opaziti na slikah C.4.4.2.3, C.4.4.2.4 in C.4.4.2.5 (priloga C), kjer so prikazani rezultati TSRST, največje rezerve natezne

trdnosti in temperature pri največji rezervi v odvisnosti od povprečne gostote z votlinami preskušancev ρ_{Ap} , gostote z votlinami bitumenizirane zmesi ρ_A in VFB.

Graf natezne trdnosti v odvisnosti od raztezka ob porušitvi za bitumenizirani zmesi AC 11 surf in AC 8 surf je prikazan na sliki 4.4.2.6. Ugotavljamo, da pri temperaturah 20 °C in 5 °C obstaja med AC 11 surf in AC 8 surf zamik (označen s puščico), pri AC 8 surf pa nekoliko večje natezne trdnosti. Pri temperaturi 20 °C ima AC 8 surf večje raztezke ob porušitvi kot AC 11 surf pri isti sestavi. Zamik je večji pri višji temperaturi, ker ta vpliva na viskozno obnašanje bitumenske malte v sestavi AC 8 surf. Pri nižjih temperaturah (< -10 °C) so raztezki majhni (elastično obnašanje materiala) in ni opaziti takšnih zamikov, le natezne trdnosti so nekoliko večje pri AC 8 surf.



Slika 4.4.2.6: Diagram primerjave med AC 11 surf in AC 8 surf – graf natezne trdnosti v odvisnosti od raztezka ob porušitvi

Figure 4.4.2.6: Diagram of comparison between AC 11 surf and AC 8 surf – graph of tensile strength depending of the failure strain

4.5 Vpliv različne začetne temperature pri preskusu TSRST

V raziskovalni nalogi je preverjen tudi vpliv začetne temperature preskusa T_0 na rezultate pri preskusu TSRST na preskušancih AC 8 surf s 6,2 m.-% bitumna. Preskusi so bili opravljeni v skladu s standardom EN 12697-46 v laboratoriju ISTU na TU Wien. Izbrana je začetna temperatura $T_0 = 10$ in 20 °C. Slednja začetna temperatura, $T_0 = 20$ °C, je priporočena v standardu SIST EN 12697-46. V laboratoriju ISTU na TU Wien pa obstaja dolgoletna tradicija izvajanja preskusa TSRST pri začetni temperaturi $T_0 = 10$ °C.

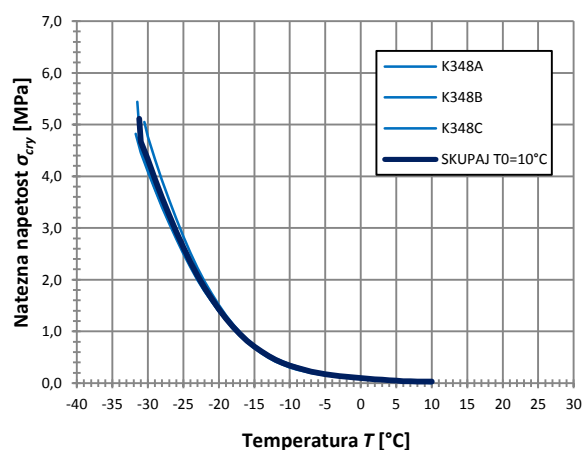
V preglednici 4.5.1 so predstavljeni rezultati gostote z votlinami in vsebnostjo votlin preskušanca, povprečna širina in dolžina preskušanca, natezna napetost ob porušitvi $\sigma_{\text{cry},f}$ in temperatura ob porušitvi T_f pri preskusu TSRST. Na treh preskušancih (od K348A do C) je bil izveden preskus TSRST pri začetni temperaturi $T_0 = 10$ °C in na treh preskušancih (od K348D do G) pri začetni temperaturi preskusa $T_0 = 20$ °C. Statistično gledano, rezultati natezne napetosti ob porušitvi kažejo, da je njihov razpon nekoliko nad dovoljeno mejo 0,5 MPa. Pri temperaturi ob porušitvi pa so rezultati znotraj zahtev (< 2 °C). Če rezultate razvrstimo po začetni temperaturi, vidimo, da v obeh primerih ne presegamo omenjenih zahtev.

Na slikah 4.5.1a in 4.5.2a je prikazan graf funkcije napetost – temperatura preskusa TSRST pri začetnih temperaturah $T_0 = 10$ in 20 °C. Vse krivulje so zvezne. Sliki 4.5.1b in 4.5.2b grafično ponazarjata rezultate natezne napetosti ob porušitvi in temperature ob porušitvi pri preskusu TSRST. Iz poteka krivulje napetost – temperatura pri začetnih temperaturah $T_0 = 10$ in 20 °C ni mogoče opaziti razlike. Krivulji v relaksacijskem območju praktično potekata po isti krivulji, v elastičnem območju pa se nekoliko razcepita, vendar znotraj pričakovanj (slika 4.5.3a). Rezultati natezne napetosti in temperature ob porušitvi so prikazani na sliki 4.5.3b, kjer vidimo, da so rezultati povsem primerljivi. Na podlagi te raziskave ugotavljamo, da za bitumenizirano zmes AC 8 surf B50/70 (6,2 m.-% bit.) *začetna temperatura preskusa* ($T_0 = 10$ °C ali 20 °C) *ne vpliva na končni rezultat preskusa TSRST*.

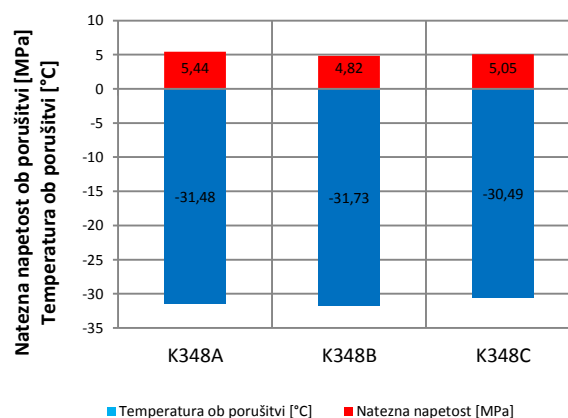
Preglednica 4.5.1: Rezultati preskusa TSRST pri različni začetni temperaturi preskusa

Table 4.5.1: Results of some basic tests on rectangular specimen and TSRST test

Lab. številka preskušanca	Začetna temperatura preskusa	Gostota z votlinami preskušanca	Vsebnost votlin preskušanca	Povprečna širina preskušanca	Povprečna dolžina preskušanca	Natezna napetost ob porušitvi	Temperatura ob porušitvi
	T_0	ρ_{Ap}	Vv_p	ξ	L	$\sigma_{cry,f}$	T_f
	[°C]	[kg/m ³]	[V.-%]	[mm]	[mm]	[MPa]	[°C]
K348A	10	2507	1,4	40,40	161	5,44	-31,5
K348B	10	2505	1,5	40,59	161	4,82	-31,7
K348C	10	2503	1,5	40,29	161	5,05	-30,5
K348D	20	2513	1,1	40,64	161	5,07	-31,4
K348F	20	2497	1,8	40,44	161	5,5	-31,4
K348G	20	2512	1,2	40,27	161	4,99	-30,5
STATISTIKA							
Število meritev – n	6	6	6	6	6	6	6
Povprečna vrednost – $\bar{x}$	2506,167	1,417	40,438	161,000	5,145	-31,167	
Standardna deviacija – s	5,947	0,248	0,152	0,000	0,267	0,528	
Maksimalna vrednost – x_{max}	2513,000	1,800	40,640	161,000	5,500	-30,500	
Minimalna vrednost – x_{min}	2497,000	1,100	40,270	161,000	4,820	-31,700	
Razpon – R	16,000	0,700	0,370	0,000	0,680	1,200	
$\bar{x} + 3 \cdot s$	2524,008	2,162	40,894	161,000	5,947	-29,583	
$\bar{x} - 3 \cdot s$	2488,326	0,672	39,982	161,000	4,343	-32,750	
$G_{min} (< 1,8221; \alpha = 0,05)$	1,541	1,275	1,108	-	1,216	1,010	
$G_{max} (< 1,8221; \alpha = 0,05)$	1,149	1,544	1,327	-	1,328	1,263	



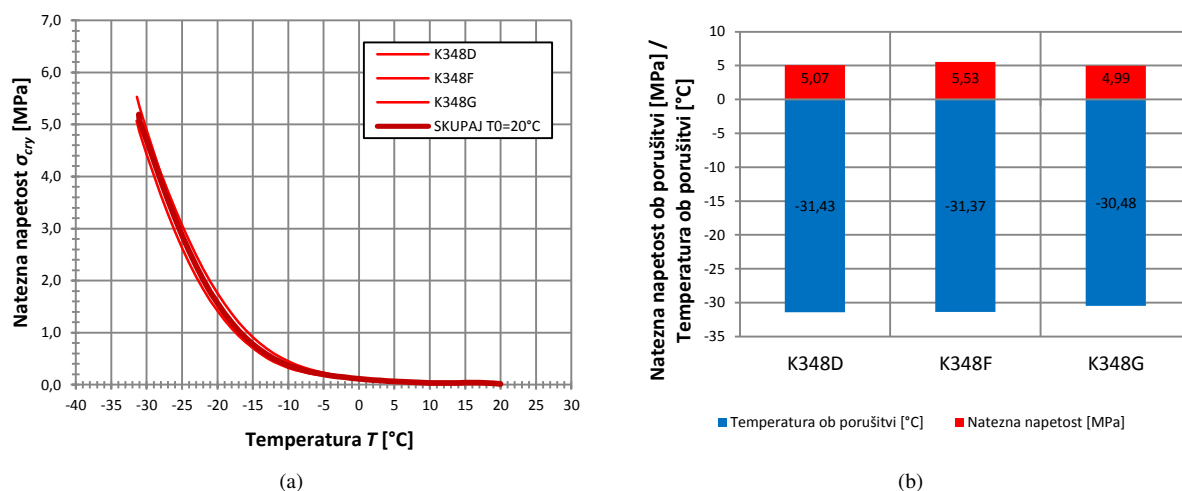
(a)



(b)

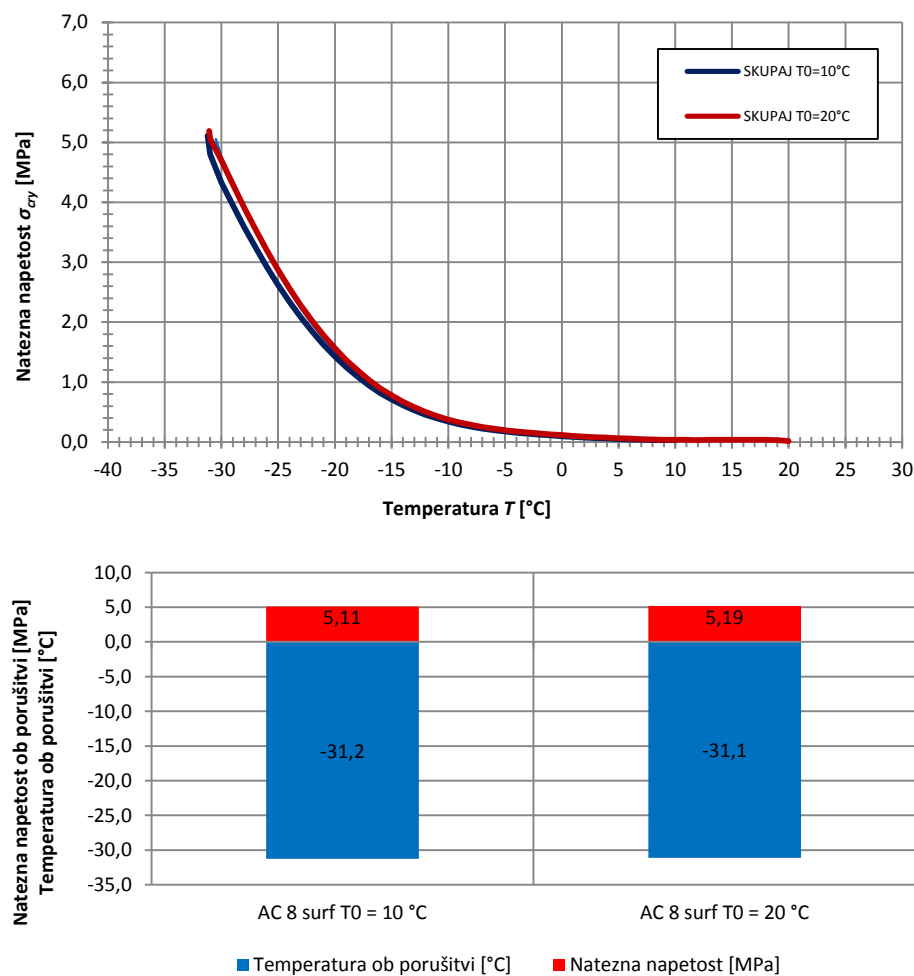
Slika 4.5.1: Preskusa TSRST pri začetni temperaturi $T_0 = 10^\circ\text{C}$: (a) Natezna napetost $\sigma_{cry}(T)$, (b) Napetost ob porušitvi $\sigma_{cry,f}$ in temperatura ob porušitvi T_f

Figure 4.5.1 TSRST test at start temperature $T_0 = 10^\circ\text{C}$: (a) Tensile stress $\sigma_{cry}(T)$, (b) Failure stress $\sigma_{cry,f}$ and the failure temperature T_f



Slika 4.5.2: Preskusa TSRST pri začetni temperaturi $T_0 = 20$ °C: (a) Natezna napetost $\sigma_{cry}(T)$, (b) Napetost ob porušitvi $\sigma_{cry,f}$ in temperatura ob porušitvi T_f

Figure 4.5.2 TSRST test at start temperature $T_0 = 20$ °C: (a) Tensile stress $\sigma_{cry}(T)$, (b) Failure stress $\sigma_{cry,f}$ and the failure temperature T_f



Slika 4.5.3: Rezultati preskusa TSRST pri začetni temperaturi $T_0 = 10$ in 20 °C: (a) Natezna napetost $\sigma_{cry}(T)$, (b) Napetost ob porušitvi $\sigma_{cry,f}$ in temperatura ob porušitvi T_f

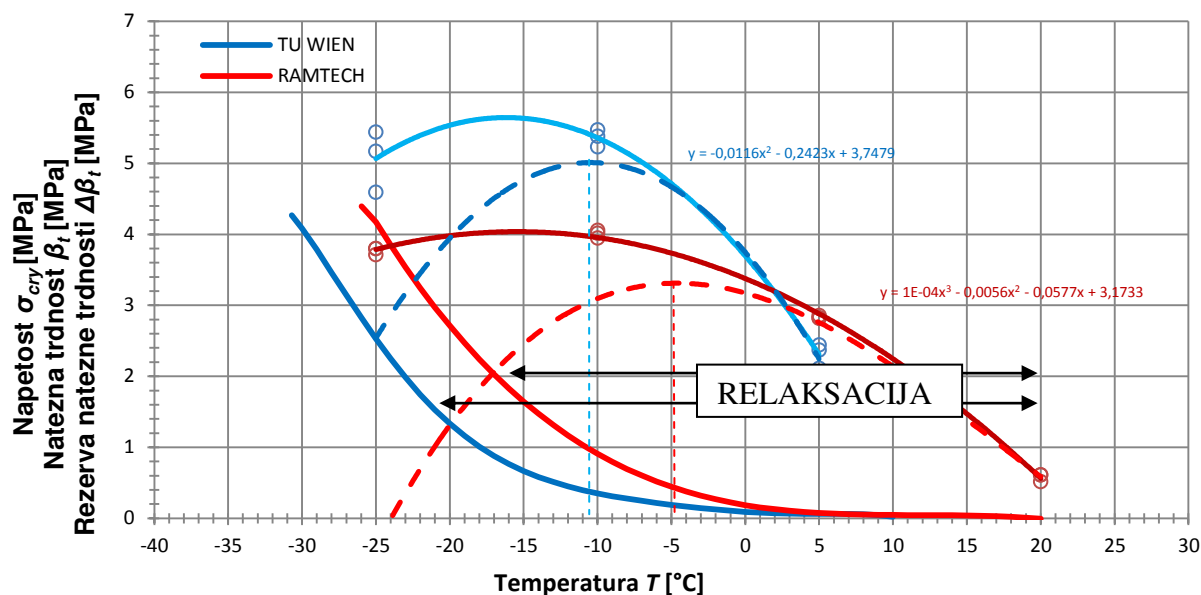
Figure 4.5.3 Results of TSRST test at start temperature $T_0 = 10$ and 20 °C: (a) Tensile stress $\sigma_{cry}(T)$, (b) Failure stress $\sigma_{cry,f}$ and the failure temperature T_f

4.6 Primerjalna analiza rezultatov med laboratoriji

Opravljeni sta bili dve primerjalni analizi preskusov pri nizkih temperaturah v različnih laboratorijih. Prva analiza je bila zasnovana tako, da se izvedeta preskusa TSRST in UTST na povsem enaki bitumenizirani zmesi AC 8 surf B50/70, in sicer na dveh sestavah, s 5,0 m.-% in 5,8 m.-% bitumna. Preskusi so bili izvedeni v laboratorijih ISTU na TU Wien (A) in Ramtech v Zagrebu (HR). Oba laboratorija uporabljata za preskuse pri nizkih temperaturah povsem enako opremo proizvajalca Wille Geotechnik iz Nemčije, kar zmanjšuje vpliv opreme na zanesljivost standardiziranega postopka EN 12697-46. Omenjena raziskava je predvsem pomembna za odpravljanje pomankljivosti omenjenega standarda oz. ugotavljanje, kaj lahko poleg opreme še vpliva na standardizirani postopek. Hkrati želimo ugotoviti, ali so rezultati primerljivi med laboratorijema. Za drugo medlaboratorijsko analizo je bil izveden preskus TSRST na bitumenizirani zmesi AC 8 surf B50/70, sestava 5 (6,2 m.-% bit.), v laboratorijih TU Wien in ZAG. S to raziskavo pa smo želeli preveriti morebiten vpliv opreme na preskus.

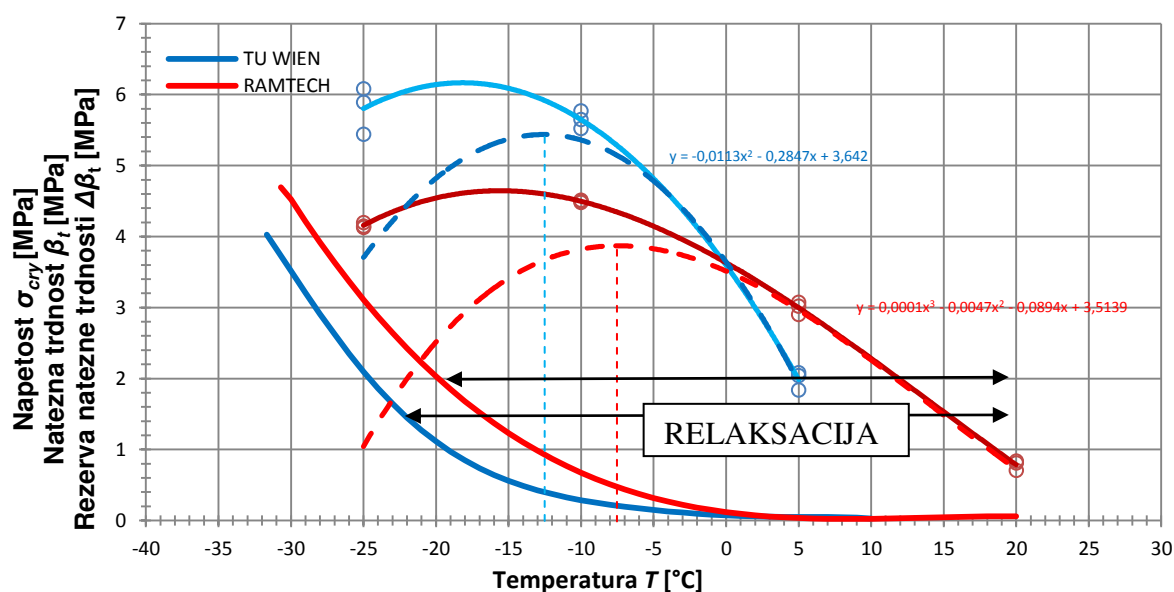
4.6.1 Primerjava rezultatov iz laboratorijev Ramtech in TU Wien

Primerjali smo preskus TSRST na enakih preskušancih bitumenizirane zmesi AC 8 surf B50/70, sestave 2 (5 m.-% bit.) in sestave 4 (5,8 m.-% bit.). Na sliki 4.6.1.1 je prikazan graf funkcije napetost – temperatura preskusa TSRST prekušancev sestave 2 (5 m.-%), ki je bil izveden v laboratorijih Ramtech (rdeča krivulja) in TU Wien (modra krivulja). Preskus TSRST je bil v Ramtechu izveden pri začetni temperaturi $T_0 = 20\text{ °C}$, na TU Wien pa pri $T_0 = 10\text{ °C}$. Ugotavljamo, da se krivulji pri temperaturi pod 3 °C razdvojita. Pri natezni napetosti $1,0\text{ MPa}$ je temperaturna razlika med krivuljama okoli 6 °C in ostajata nespremenjeni vse do porušitve. Dolžina relaksacijskega območja je različna. TU Wien ima bistveno daljšo relaksacijsko območje. Tudi pri rezultatih UTST opazimo, da sta krivulji povsem različni. Krivulja TU Wien ima večje natezne trdnosti β_t pri -10 in -25 °C in manjše pri 5 °C . Krivulja rezerve natezne trdnosti $\Delta\beta_t$ pri TU Wien je višja in nekoliko premaknjena v levo. Tudi krivulji rezerve natezne trdnosti nista primerljivi. Podobno se razlikujejo rezultati in krivulje TSRST, UTST in rezerve natezne trdnosti pri sestavi bitumenizirane zmesi 4 s 5,8 m.-% bitumna (slika 4.6.1.2).



Slika 4.6.1.1: Primerjava rezultatov preskusov TSRST in UTST ter rezerve natezne trdnosti v laboratorijih Ramtech in TU Wien na preskušancih sestave 2 (5 m.-% bit.)

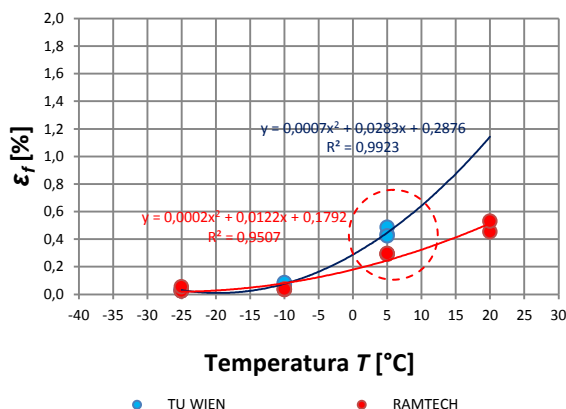
Figure 4.6.1.1: Comparison between results of TSRST, UTST test and tensile strength reserve between Ramtech and TU Wien on samples of Mixture 2 (5 m.-% bit.)



Slika 4.6.1.2: Primerjava rezultatov preskusov TSRST v laboratorijih Ramtech in TU Wien na preskušancu sestave 4 (5,8 m.-% bit.)

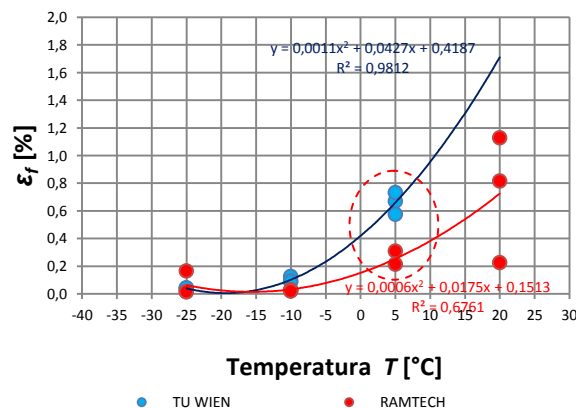
Figure 4.6.1.2: Comparison between results of TSRST test between Ramtech and TU Wien on samples of Mixture 4 (5.8 m.-% bit.)

Graf funkcije raztezek – temperatura pri preskusu UTST v laboratorijih Ramtech in TU Wien za sestavo 2 (5 m.-%) in sestavo 4 (5,8 m.-%) je prikazan na slikah 4.6.1.3 in 4.6.1.4. Iz slik vidimo, da se pri nizki temperaturi raztezki med laboratorijema ne razlikujejo toliko, kot je to opazno pri višjih temperaturah (5 °C in 20 °C).



Slika 4.6.1.3: Graf funkcije raztezek – temperatura pri preskusu UTST v laboratorijih Ramtech in TU Wien preskušanca sestave 2 (5 m.-% bit.)

Figure 4.6.1.3: Comparison between results of TSRST and UTST test between Ramtech and TU Wien on samples of Mixture 2 (5 m.-% bit.)



Slika 4.6.1.4: Graf funkcije raztezek – temperatura pri preskusu UTST v laboratorijih Ramtech in TU Wien preskušanca sestave 4 (5,8 m.-% bit.)

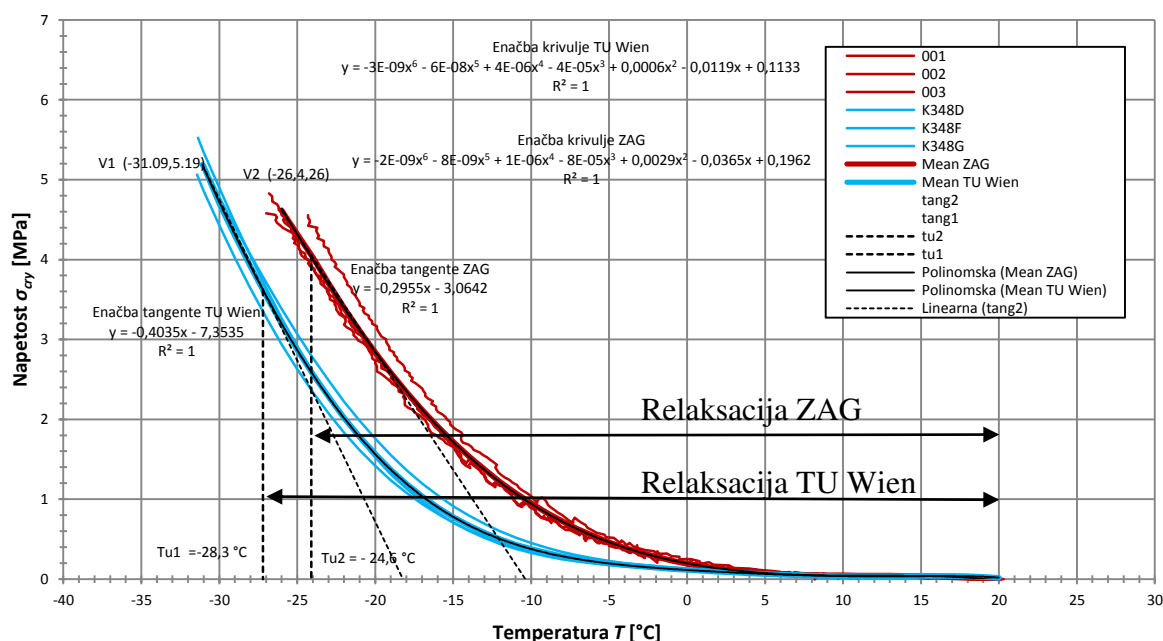
Figure 4.6.1.4: Comparison between results of TSRST and UTST test between Ramtech and TU Wien on samples of Mixture 4 (5.8 m.-% bit.)

4.6.2 Primerjava rezultatov TSRST med laboratorijema ZAG in TU Wien

Preskuse smo izvedli v laboratoriju ZAG Ljubljana (SLO), ki uporablja stiskalno-trgalni stroj proizvajalca Frank, in rezultate primerjali z rezultati TU Wien (A). Slednji pa uporabljajo za preskus TSRST opremo proizvajalca Wille Geotechnik iz Nemčije.

Na sliki 4.6.2 v diagramu funkcije napetost – temperatura sta prikazani krivulji preskusa TSRST, ki je bil izveden na bitumeniziranih prizmatičnih preskušancih sestave 5 (glej poglavje 4.2) v laboratorijih ZAG Ljubljana (rdeča krivulja) in TU Wien (modra krivulja). Iz slike vidimo, da krivulji sovpadata do temperature okoli 0 °C, nato se ločita. Če odvedemo polinom krivulje šeste stopnje $y'(x)$ in upoštevamo začetno točko V1 za krivuljo TU Wien in V2 za krivuljo ZAG, dobimo tangento na krivuljo. Enačbi tangente sta prikazani na sliki 4.6.2.1. Točka razcepa krivulj in tangente predstavlja temperaturo prehoda T_u . Če primerjamo relaksacijsko območje, je pri TU Wien daljše in temperatura T_{u1} nižja. Pri napetosti 1,0 MPa je temperaturna razlika med krivuljama 5–6 °C in ostajata nespremenjeni vse do porušitve.

Razlika med temperaturama ob porušitvi je zunaj dovoljenega območja odstopanja po standardu EN 12697-46 ($\Delta T_f < 2\text{ °C}$). Prav tako je razlika pri natezni napetosti ob porušitvi med obema laboratorijema ($\Delta \sigma_{\text{cry},f} < 0,5\text{ MPa}$) izven dovoljenega. Porušitev pri preskusu TSRST na TU Wien se zgodi pri nižji temperaturi in večji natezni napetosti kot na preskušancih, ki so bili preskušani v laboratoriju ZAG Ljubljana. Rezultati TSRST na preskušancih, ki so bili preskušani v laboratoriju TU Wien, izkazujejo večjo odpornost proti razpokam pri nizkih temperaturah. Iz rezultatov lastnosti bitumeniziranih zmesi (poglavje 4.2, preglednica 4.2.2) vidimo, da so med seboj primerljive. Vsi preskušanci so pripravljene enako in po enakem postopku. Prav tako se je preskus v obeh primerih izvajal pri enaki začetni temperaturi $T_0 = 20\text{ °C}$. Ugotavljamo, da rezultata preskusa TSRST med laboratorijema ZAG Ljubljana in TU Wien nista primerljiva, čeprav se na obeh ustanovah izvaja preskus TSRST po enotnem standardu EN 12697-46. Gotovo je eden od mogočih vzrokov za tolikšno razhajanje v različni opremi ali načinu lepljenja preskušancev.



Slika 4.6.2.1: Primerjava rezultatov preskusov TSRST na ZAG-u in TU Wien na preskušancu sestave 5

(6,2 m. % bit.)

Figure 4.6.2.1: Comparison between results of TSRST test between ZAG and TU Wien on samples of Mixture 5

(6.2 m.-% bit.)

5 STATISTIČNA ANALIZA

5.1 Statistična analiza dolžin preskušancev

V tem sklopu želimo ugotoviti toleranco odstopanja izmerjenih dolžin prizmatičnih preskušancev s statistično obdelavo rezultatov in podati predlog za dopolnitev standarda SIST EN 12697-46. Prizmatični preskušanci bitumenizirane zmesi AC 8 surf s sestavo 2 (5 m.-%), sestavo 4 (5,8 m.-%) in sestavo 5 (6,2 m.-%) so bili uporabljeni za preskuse TSRST in UTST. Standard predpisuje, da je dolžina prizmatičnega preskušanca kvadratnega prereza ($40 \cdot 40 \text{ mm}^2$) $L = 160 \text{ mm}$, ki pa je praktično ni mogoče zagotoviti zaradi robustne opreme (samostojna krožna žaga), ki se uporablja za razrez preskušancev (slika 5.1.1). Debelina diamantnega krožnega rezila, ki se uporablja na ZAG-u, je 4 mm. Dolžina vseh preskušancev je bila izmerjena s kljunastim merilom z natančnostjo $\pm 0,01 \text{ mm}$ (slika 5.1.2). Prva meritev dolžine preskušanca je izmerjena na prednji strani, kjer je laboratorijska oznaka preskušanca, nato se preskušanec zasuje za 90° in se izvede druga meritev. Rezultati na ZAG-u so zapisani z natančnostjo 1 mm.



Slika 5.1.1: Krožna žaga z diamantnim rezilom za razrez preskušancev

Figure 5.1.1: Circular saw with diamond blade for cutting samples



Slika 5.1.2: Meritev dolžine prizmatičnega preskušanca

Figure 5.1.2: Measurement of the length of prismatic sample

V preglednici D.5.1.1 (priloga D) so prikazani rezultati meritev izmerjenih dolžin z natančnostjo 1 mm. Iz statistične obdelave rezultatov meritev populacije ($24 \cdot 6 = 144$) vidimo, da je povprečna vrednost med 160,79 mm in 161,46 mm, minimalna vrednost pri vseh preskušancih je 160 mm in največji razpon 2 mm. *Na podlagi teh statističnih rezultatov ugotavljamo, da je mogoče s to opremo zagotoviti dolžino prizmatičnega preskušanca 160 mm s toleranco ± 2 mm. Za večjo natančnost bi potrebovali povsem drug način rezanja preskušancev* (npr. laserski). Izračunali smo še obojestranski interval zaupanja pri 95-odstotni stopnji zaupanja. Izračunali smo povprečje vseh šestih statističnih preskušancev ($n = 144$) $\bar{x} = 161,1042$, varianco $s = 0,5384$ in $t_{0,95,143} = 1,656$. Od tod dobimo, da je $t_{1-\alpha/2, v} \frac{s}{\sqrt{n}} = 0,074$, ki ga zaokrožimo na 0,1 mm. Za povprečno dolžino preskušanca torej lahko s 95-odstotno verjetnostjo trdimo, da je v območju $161,10 \pm 0,1$ mm, kar je znotraj predlaganega območja tolerance.

V Ramtechu so za preskuse pripravili bitumenizirani zmesi s sestavama 2 in 4, izvedli zgoščevanje in izrezali iz plošče prizmatične preskušance širine 40 ± 2 mm, višine 40 ± 2 mm in dolžine 160 ± 2 mm. V preglednici D.5.1.2 (priloga D) so prikazane izmerjene dimenzije izrezanih prizmatičnih preskušancev z natančnostjo 0,1 mm. Izračunali smo obojestranski interval zaupanja pri 95-odstotni stopnji zaupanja. Izračunali smo tudi povprečje dveh statističnih preskušancev ($n = 28$) $\bar{x} = 160,029$, varianco $s = 0,136$ in $t_{0,95,27} = 1,703$. Od tod dobimo, da je $t_{1-\alpha/2, v} \frac{s}{\sqrt{n}} = 0,043$, ki ga zaokrožimo na 0,1 mm. Za povprečno dolžino preskušanca se torej lahko s 95-odstotno verjetnostjo trdi, da je v območju $160,029 \pm 0,1$ mm, kar je znotraj predlaganega območja tolerance. Ugotavljamo, da je mogoče s trenutno *razpoložljivo opremo na ZAG-u* in v Ramtechu zadostiti predlagani toleranci odstopanja *dolžine prizmatičnega preskušanca* ($L \pm 2$ mm).

5.2 Statistična obdelava rezultatov SMA pri nizkih temperaturah

V tem sklopu so statistično analizirani rezultati preskusov TSRST in UTST ter največjih rezerv trdnosti in temperature pri največji rezervi glede na laboratorij, kjer se je preskus izvedel. Podatki za bitumenizirane zmesi SMA so pridobljeni iz že objavljenih strokovnih revij (Ljubič, 2006, Spiegl, 2008) in posredovani iz laboratorijev, kjer so se izvajali preskusi:

- TU Braunschweig (D),
- TU Wien (A),

- Ramtech (HR) in
- ZAG (SLO).

5.2.1 Podatki

V preglednici 5.2.1.1 so prikazani rezultati preskusov TSRST in UTST ter rezerve nateznih trdnosti in pripadajoče temperature pridobljenih podatkov v omenjenih štirih laboratorijih. Na podlagi osnovnih parametrov statistike vidimo, da so vsi preskušanci v območju $x \pm 3 \cdot s$. Grubbsov test je pokazal v stolpcu REZERVA $\Delta\beta_{tmax}$, da obstaja vsaj ena minimalna ekstremna vrednost, ki odstopa od normalno porazdeljene populacije. Ker vrednost G_{min} v stolpcu REZERVA $\Delta\beta_{tmax}$ ne odstopa veliko od zahtevane G_{min} ($< 2,9033$), ta ekstrem iz populacije ni odstranjen.

Preglednica 5.2.1.1: Rezultati preskusa pri nizkih temperaturah za SMA

Table 5.2.1.1: Results of test at low temperatures for SMA

Zap. št.	Lab.	Vrsta BZ	TSRST	TSRST	UTST	UTST	UTST	REZERVA	REZERVA
			$\sigma_{cry,f}$	T_f	5 °C	-10 °C	-25 °C	$\Delta\beta_{tmax}$	$T_{\Delta\beta tmax}$
			[MPa]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°C]
1	TU BRAUNSCHWEIG	SMA 11s vilabit 65	3,94	-32,9	1,41	4,87	4,13	4,66	-11,5
2		SMA 11s bitupol c	4,65	-33,3	1,99	6,03	5,45	5,62	-11,5
3		SMA 11s zalaplast II	4,57	-32,3	1,84	5,4	4,83	5,01	-11,2
4		SMA 11s bitupol c	4,51	-31,3	2,5	5,56	5,14	4,95	-10,6
5		SMA 8s bitupol b	4,79	-30,6	2,49	6,62	5,07	6,07	-10,3
6		SMA 11s (Polyplast A1)	4,28	-28,2	2,59	6,33	5,26	5,51	-10
7		SMA 8s VILABIT 65	4,67	-32,8	1,85	5,04	5,46	4,61	-12,5
8		SMA 8s Olexobit 45	3,68	-23,9	3,19	4,68	3,53	3,77	-4,9
9		SMA 8s Olexobit 45	2,57	-24	1,96	2,93	2,83	2,09	-5,2
10		SMA 8s Olexobit 45	2,77	-25,1	2,42	3,9	3,37	3,13	-6,9
11		SMA 8s Olexobit 45	4,29	-26	3,27	5,34	3,73	4,44	-6,5
12		SMA 11	3,585	-31,4	1,373	3,865	4,423	3,47	-12,9
13		SMA 11 PmB 45/80-65 A2	4,959	-31	2,295	6,56	5,125	5,839	-10,3
14		SMA 11 S I Pmb 45A	4,053	-25,5	2,795	4,569	3,983	3,697	-6,5
15		SMA 11 S II Pmb 45A	3,848	-25,567	2,757	3,87	3,715	3,103	-3,7
16	TU WIEN	SMA 11s vilabit 65	4,09	-34,9	1,77	4,14	4,91	3,89	-15,1
17		SMA 11s bitupol c	5,11	-33,5	2,85	5,78	5,64	5,07	-11,1
18		SMA 11s zalaplast II	4,01	-34,1	2,01	4,75	4,25	4,48	-11,4
19		SMA 11s bitupol c	4,25	-31,7	2,48	4,61	4,69	4,02	-10,3
20		SMA 8s bitupol b	4,28	-32,1	2,08	4,41	4,36	3,81	-10,2
21		SMA 11s (Polyplast A1)	3,58	-29,5	2,06	4,99	5,16	4,19	-11,2
22		SMA 11 70/100	3,5	-30,5	2,54	4,47	4,43	3,87	-13

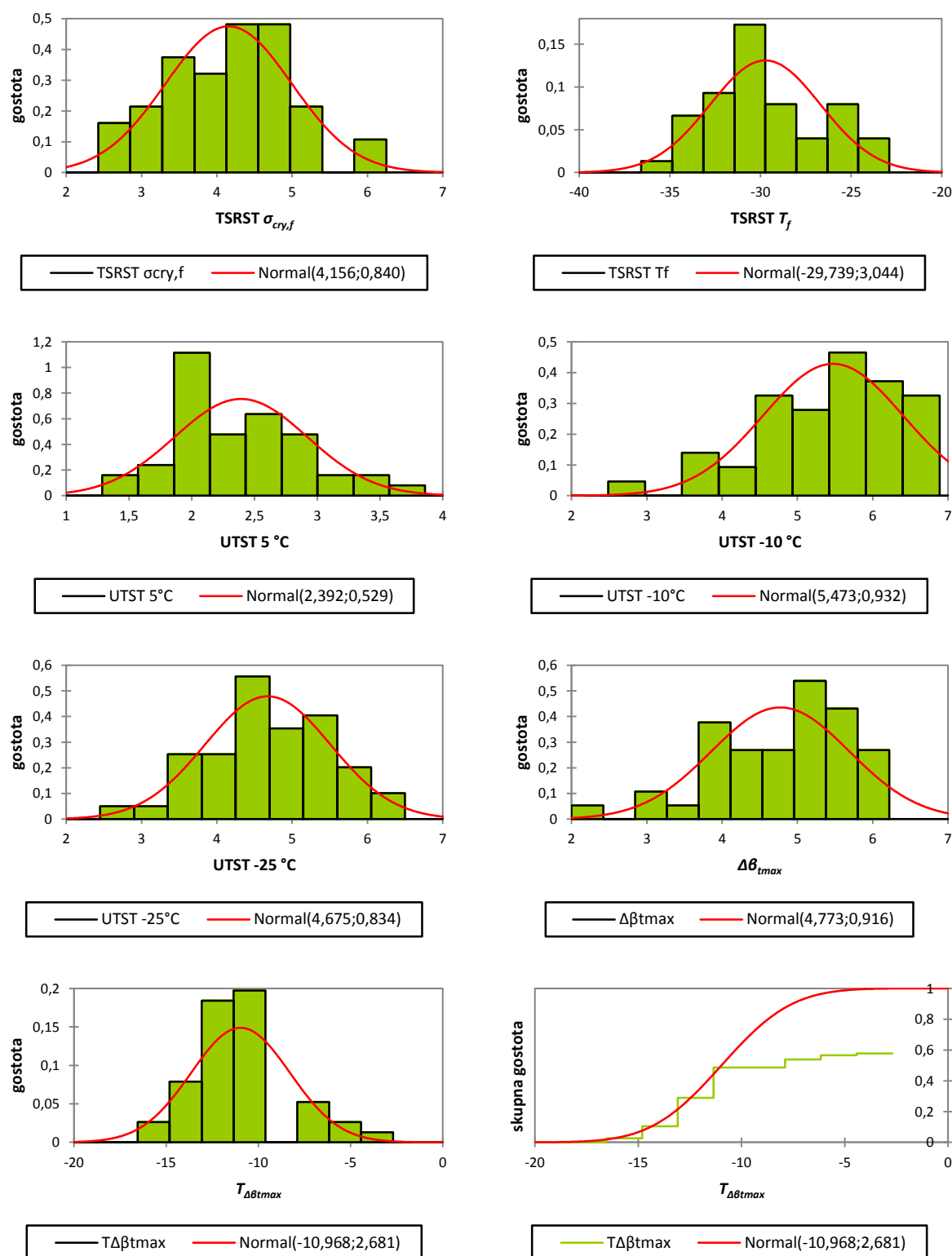
(se nadaljuje ...)

(... nadaljevanje)

(... nadaljevanje)									
23	RAMTECH	SMA 8 PmB 45/80-65 A1, 008	4,61	-27,77	2,44	6,21	4,37	5,28	-11,2
24		SMA 11s -004	4,39	-26,53	2,14	5,8	3,99	5,08	-11,1
25		SMA 11s-PmB III-46A-001	5,25	-24,53	2,91	4,88	3,95	3,72	-6,2
26		SMA 11s-003	3,46	-30,27	2,31	5,86	3,53	5,51	-11,8
27		SMA 11 PmB 45/80-65 A2 -13	3,9	-32,57	2,07	6,31	5,29	6,12	-13,9
28		SMA 11 PmB 45/80-65 A1-015	4,41	-29,8	2,12	5,84	4,36	5,15	-11,9
29		SMA 11 PmB 45/80-65 A1, A2-16	4,43	-30,37	2,12	6,09	5,03	5,72	-13,1
30		SMA 11 PmB 45/80-65 A1, 017	4,87	-28,1	2,66	6,06	5,19	5,39	-11,3
31		SMA 11 PmB 45/80-65 A1, 018	3,26	-33,4	2,37	5,17	4,39	5,13	-13,7
32		SMA 11 PmB 45/80-65 A1, 019	6,15	-29,6	2,83	6,79	5,22	5,38	-10,9
33		SMA 8 PmB 45/80-65 A1, 014	6,03	-25,83	1,97	6,68	4,3	5,58	-11,1
34		SMA 11 PmB 45/80-65 A1, A2	3,31	-29	2,19	5,7	3,21	5,33	-11,6
35		SMA 11 PmB 45/80-65 A1, A2	4,6	-26,8	1,92	5,82	4,42	5,24	-11,8
36		SMA 11 PmB 45/80-65 A1, A2	4,86	-30,7	2,63	6,77	5,65	6,06	-12,6
37		SMA 8 PmB 45/80-65 A2-006	3,35	-31,43	2,14	5,8	3,99	4,66	-10,1
38		SMA 8 PmB 45/80-65 A2 Z4 -007	2,68	-24,93	2,28	5,13	4,37	4,17	-12,3
39	ZAG	SMA 8 PmB 45/80-65 A2	5,018	-33,4	2,045	6,341	5,87	6,001	-13,9
40		SMA 11 PmB 45/80-65 A1, (LJ)	5,131	-29,7	2,978	6,504	6,365	5,654	-12,4
41		SMA 8 PmB 45/80-65 A1,A2 (LJ)	4,45	-32,8	1,917	5,468	4,911	4,859	-13,2
42		SMA 11 PmB 45/80-65 A1,A2	2,852	-29,8	3,759	6,578	5,961	5,121	-13,9
43		SMA 11 PmB 45/80-65 A1	3,022	-29,9	3,554	5,9	5,457	4,392	-12,2
44		SMA 11 PmB 45/80-65 A2	2,862	-31,1	3,393	6,398	6,398	5,149	-15,6
STATISTIKA									
Število meritev – n			44	44	44	44	44	44	44
Povprečna vrednost – x			4,156	-29,739	2,392	5,473	4,675	4,773	-10,968
Standardna deviacija – s			0,840	3,044	0,529	0,932	0,834	0,916	2,681
Maksimalna vrednost – x _{max}			6,15	-23,9	3,759	6,79	6,398	6,12	-3,7
Minimalna vrednost – x _{min}			2,57	-34,9	1,373	2,93	2,83	2,09	-15,6
Razpon – R			3,580	11,000	2,386	3,860	3,568	4,030	11,900
x + 3 · s			6,678	-20,607	3,980	8,268	7,176	7,522	-2,924
x – 3 · s			1,635	-38,870	0,805	2,678	2,175	2,023	-19,012
G _{min} (< 2,9033; α = 0,05)			1,888	1,696	1,926	2,730	2,214	2,927	1,727
G _{max} (< 2,9033; α = 0,05)			2,372	1,918	2,582	1,414	2,067	1,470	2,711

5.2.2 Normalna porazdelitev

Za nadaljnjo statistično obdelavo podatkov smo uporabili programsko orodje Excel, dodatek XLSTAT. Na sliki 5.2.2.1 so prikazani histogrami za vrednosti iz preglednice 5.2.1.1 po posameznih rezultatih preskusov TSRST in UTST ter rezerve natezne trdnosti in pripadajoče temperature. Iz slik je razbrati, da nekateri podatki za popolno normalno porazdelitev ali manjkajo (npr. pri grafu TSRST $\sigma_{\text{cry},f}$ ni podatkov med 5,5 in 6 MPa) ali izstopajo (npr. na grafu UTST 5 °C izstopa stolpec vrednosti 2).



Slika 5.2.2.1: Histogrami rezultatov preskusov pri nizkih temperaturah za SMA

Figure 5.2.2.1: Histograms of the tests at low temperature for SMA

5.2.3 Studentova porazdelitev t

S programom XLSTAT so analizirani podatki za SMA iz preglednice 5.2.1.1 z dvovzorčno Studentovo porazdelitvijo t pri domnevi, da so variance populacij enake. Osnovna statistika analiziranih podatkov je prikazana v preglednici 5.2.3.1. Med laboratoriji je bila opravljena analiza porazdelitve t za spremenljivki TSRST $\sigma_{cry,f}$ in TSRST T_f . Rezultati dvovzorčne statistike t za spremenljivko TSRST $\sigma_{cry,f}$ so prikazani v preglednici 5.2.3.2. Pri vseh primerjalnih analizah je bila prevzeta alternativna hipoteza: sredina1 – sredina2 $\neq$ 0, razlika hipoteze je 0.

Preglednica 5.2.3.1: Osnovna statistika

Table 5.2.3.1: Basic statistic

Spremenljivki	Opazovanja	Minimum	Maksimum	Sredina (povprečje)	Std. deviacija
TSRST $\sigma_{cry,f}$	44	2,570	6,150	4,156	0,840
TSRST T_f	44	-34,900	-23,900	-29,739	3,044

Preglednica 5.2.3.2: Rezultati dvovzorčne porazdelitve t (TSRST $\sigma_{cry,f}$)

Table 5.2.3.2: Results of two sample t-distribution (TSRST $\sigma_{cry,f}$)

Laboratorij	TU Braunschweig	TU Braunschweig	TU Braunschweig	Ramtech	Ramtech	TU Wien
	Ramtech	TU Wien	ZAG	TU Wien	ZAG	ZAG
Razlika	-0,270	-0,039	0,189	0,230	0,458	0,228
t_{izra}	-0,871	-0,131	0,473	0,577	0,943	0,489
t_{krit}	2,045	2,086	2,093	2,080	2,086	2,201
n_{ps} (DF)	29	20	19	21	20	11
Vrednost p	0,391	0,897	0,642	0,570	0,357	0,634
Tveganje α	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Interpretacija rezultatov v preglednici 5.2.3.2:

- H_0 : razlika med sredino je enaka 0;
- H_a : razlika med sredino je večja od 0;
- če je vrednost p večja od $\alpha = 0,05$, potem ne moremo zavrni ničelne hipoteze H_0 ;
- tveganje zavrnitve ničelne hipoteze H_0 je vrednost p [%].

Ugotavljamo, da sta si statistično najbolj oddaljeni srednji vrednosti rezultatov pri TSRST $\sigma_{cry,f}$ med TU Braunschweig in Ramtechom ($p = 39,1$ %) ter Ramtechom in ZAG-om ($p = 35,7$ %). Najbližji sta si med TU Braunschweig in TU Wien z verjetnostjo $p = 89,7$ %.

Rezultati dvovzorčne statistike t med laboratoriji pri TSRST T_f so prikazani v preglednici 5.2.3.3. Pri vseh analiziranih primerjavah smo vzeli alternativno hipotezo: sredina1 – sredina2 $\neq 0$, razlika hipoteze je 0. Tukaj ugotavljamo, da sta si vzorca pri TSRST T_f statistično najbolj oddaljena (velja hipoteza H_a) med Ramtechom in TU Wien ter TU Braunschweig in TU Wien, saj je v obeh primerih $t_{krit} < |t_{izra}|$. Najbližji sta si sredini vzorcev TU Braunschweig in Ramtech z verjetnostjo zaupanja $p = 94,9 \%$.

Preglednica 5.2.3.3: Rezultati dvovzorčne porazdelitve t (TSRST T_f)

Table 5.2.3.3: Results of two sample t -distribution (TSRST T_f)

Laboratorij	TU Braunschweig	TU Braunschweig	TU Braunschweig	Ramtech	Ramtech	TU Wien
	Ramtech	TU Wien	ZAG	TU Wien	ZAG	ZAG
Razlika	-0,073	3,404	2,192	3,477	2,265	-1,212
t_{izra}	-0,065	2,355	1,436	3,110	1,946	-1,201
t_{krit}	2,045	2,086	2,093	2,080	2,086	2,201
n_{ps} (DF)	29	20	19	21	20	11
Vrednost p	0,949	0,029	0,167	0,005	0,066	0,255
Tveganje α	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

5.2.4 Analiza variance (ANOVA)

Z enojno oz. enosmerno (ang. one-way) statistično analizo ANOVA, ki je vgrajena v Excel, ugotavljamo, ali se aritmetične sredine rezultatov (preglednica 5.2.1.1) različnih laboratorijev (TU Braunschweig, TU Wien, Ramtech in ZAG) razlikujejo glede na rezultate pri nizkih temperaturah (TSRST $\sigma_{cry,f}$, TSRST T_f , UTST 5 °C, UTST –10 °C, UTST –25 °C, $\Delta\beta_{tmax}$ in $T_{\Delta\beta tmax}$), in če je tako, katera vrednost najbolj izstopa. V preglednici 5.2.4.1 so prikazani skupine, število v populaciji, vsota, povprečje in varianca glede na posamezen preskušanec. Vzorca iz Ramtecha in s TU Braunschweig obsegata 2/3 populacije.

Preglednica 5.2.4.1: Osnovna statistika

Table 5.2.4.1: Basic statistic

Skupine	Število	Vsota	Povprečje	Varianca
TSRST $\sigma_{cry,f}$				
TU Braunschweig	15	61,165	4,077667	0,495296
TU Wien	7	28,82	4,117143	0,285257
Ramtech	16	69,56	4,3475	0,97318
ZAG	6	23,335	3,889167	1,202743
TSRST T_f				

(se nadaljuje ...)

(... nadaljevanje)

TU Braunschweig	15	-433,867	-28,9245	12,60356
TU Wien	7	-226,3	-32,3286	3,819048
Ramtech	16	-461,63	-28,8519	6,993136
ZAG	6	-186,7	-31,1167	2,653667
UTST 5 °C				
TU Braunschweig	15	34,73	2,315333	0,331086
TU Wien	7	15,79	2,255714	0,141629
Ramtech	16	37,1	2,31875	0,089678
ZAG	6	17,646	2,941	0,620392
UTST -10 °C				
TU Braunschweig	15	75,564	5,0376	1,201606
TU Wien	7	33,15	4,735714	0,283795
Ramtech	16	94,91	5,931875	0,313656
ZAG	6	37,189	6,198167	0,184038
UTST -25 °C				
TU Braunschweig	15	66,046	4,403067	0,722909
TU Wien	7	33,44	4,777143	0,248124
Ramtech	16	71,26	4,45375	0,448492
ZAG	6	34,962	5,827	0,322249
$\Delta\beta_{\text{max}}$				
TU Braunschweig	15	65,969	4,397933	1,339655
TU Wien	7	29,33	4,19	0,204033
Ramtech	16	83,52	5,22	0,38324
ZAG	6	31,176	5,196	0,325122
$T_{\Delta\beta\text{max}}$				
TU Braunschweig	15	-134,5	-8,96667	9,140952
TU WIEN	7	-82,3	-11,7571	3,022857
Ramtech	16	-184,6	-11,5375	3,079833
ZAG	6	-81,2	-13,5333	1,542667

Rezultati enojne analize variance so prikazani v preglednici 5.2.4.2. Pri spremenljivki $\text{TSRST } \sigma_{\text{cry},f}$ je vrednost statistike $F < F_{\text{krit}}$, zato ničelne domneve ne moremo zavrniti. Z verjetnostjo 68 % laboratorij ne vpliva na rezultat $\text{TSRST } \sigma_{\text{cry},f}$. Pri vseh preostalih spremenljivkah je vrednost statistike $F > F_{\text{krit}}$, kar pomeni, da ničelno domnevo zavrnemo in sprejmemo alternativno. Pri vseh preostalih spremenljivkah obstaja 5-odstotna verjetnost tveganja, da vsaj eden od laboratorijev vpliva na rezultat.

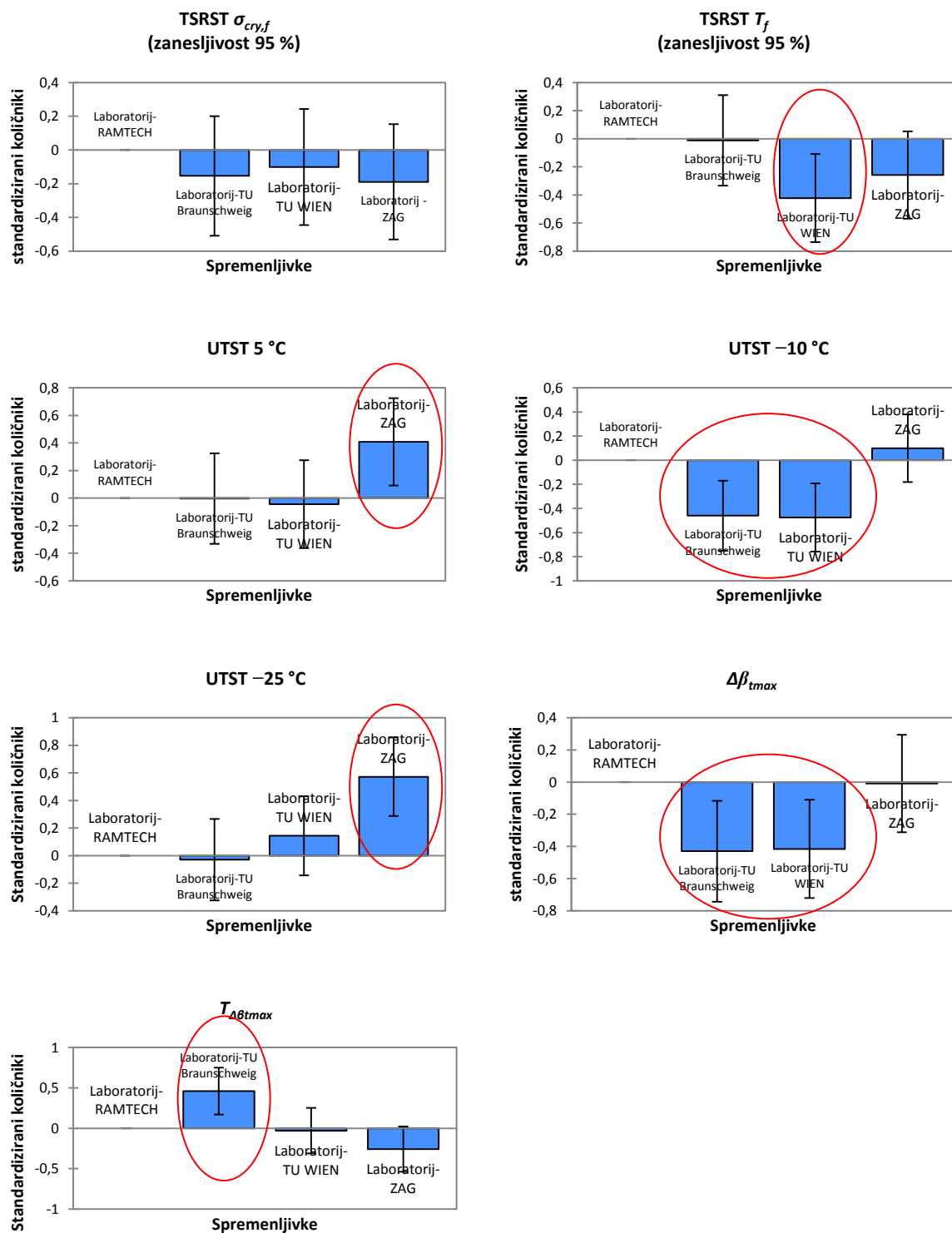
Preglednica 5.2.4.2: Rezultati analize variance

Table 5.2.4.2: Results of analysis of variance

Vir odstopanj	Vsota kvadratov	Prostostne stopnje	Povprečni kvadrati	Statistika F	Vrednost p	Statistika F _{krit}
	SS	n _{ps}	MS			
TSRST σ _{cry,f}						
Faktor	1,116561	3	0,372187	0,50885	0,67844	2,838745
Napaka	29,25709	40	0,731427			
Skupaj	30,37365	43				
TSRST T _f						
Faktor	80,87277	3	26,95759	3,395915	0,02692	2,838745
Napaka	317,5296	40	7,938239			
Skupaj	398,4023	43				
UTST 5 °C						
Faktor	2,112431	3	0,704144	2,835828	0,050164	2,838745
Napaka	9,932106	40	0,248303			
Skupaj	12,04454	43				
UTST −10 °C						
Faktor	13,17299	3	4,390996	7,272787	0,000527	2,838745
Napaka	24,15028	40	0,603757			
Skupaj	37,32327	43				
UTST −25 °C						
Faktor	9,928096	3	3,309365	6,635954	0,000961	2,838745
Napaka	19,94809	40	0,498702			
Skupaj	29,87619	43				
Δβ _{umax}						
Faktor	8,759859	3	2,919953	4,269939	0,010463	2,838745
Napaka	27,35358	40	0,68384			
Skupaj	36,11344	43				
T _{Δftmax}						
Faktor	109,1141	3	36,37138	7,273501	0,000526	2,838745
Napaka	200,0213	40	5,000533			
Skupaj	309,1355	43				

V programu XLSTAT je bila izvedena analiza variance, kjer se je primerjalo odstopanje preostalih spremenljivk in Ramtecha. Rezultat te analize je diagram standardiziranih količnikov v odvisnosti od spremenljivk (slika 5.2.4.1). Pri spremenljivki TSRST $\sigma_{cry,f}$ laboratoriji podobno odstopajo in so vrednosti v razponu standardne deviacije posameznega laboratorija. Pri TSRST T_f je najbližji TU Braunschweig in najbolj oddaljen TU Wien, pri UTST 5 °C najbolj izstopa ZAG. Pri UTST -10 °C najbolj izstopata TU Braunschweig in TU Wien ter najmanj ZAG, vrednost Ramtecha je v razponu standardne variacije. Pri UTST

$-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ najbolj izstopa ZAG, pri $\Delta\beta_{tmax}$ pa TU Braunschweig in TU Wien. Pri $T_{\Delta\beta tmax}$ najbolj izstopa TU Braunschweig. Ob analizi ANOVA ugotavljamo, da ne moremo primerjati spremenljivk TSRST T_f , UTST $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, UTST $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, UTST $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\Delta\beta tmax}$ in $\Delta\beta_{tmax}$ med laboratoriji, saj vsaj enkrat kateri od njih izstopa, razen pri TSRST $\sigma_{cry,f}$.



Slika 5.2.4.1: Diagram standardiziranih količnikov po spremenljivkah

Figure 5.2.4.1: Diagram of standardized coefficients by variables

5.2.5 Metoda glavnih komponent (PCA)

Opravljen je bila multivariatna statistična analiza po metodi glavnih komponent – PCA (ang. principal component analysis), s katero želimo ugotoviti medsebojno odvisnost spremenljivk $\text{TSRST } \sigma_{\text{cry},f}$, $\text{TSRST } T_f$, $\text{UTST } 5^\circ\text{C}$, $\text{UTST } -10^\circ\text{C}$, $\text{UTST } -25^\circ\text{C}$, $\Delta\beta_{\text{tmax}}$ in $T_{\Delta\beta_{\text{tmax}}}$. Analiza PCA je izvedena s programsko opremo XLSTAT. V preglednici 5.2.5.1 so podani rezultati analize: lastne vrednosti (ang. eigenvalues), variabilnost in kumulativa glede na posamezne faktorje F. Če izberemo dvorazsežen prostor z dvema osema (F1 in F2), vidimo, da je kumulativna variabilnost 71,24 %, kar je zadovoljivo. Rezultati korelacije med spremenljivkami in faktorji so prikazani v preglednici 5.2.5.2 in na slikah 5.2.5.1a in 5.2.5.1b. Na podlagi slike 5.2.5.1b ugotavljamo, da so spremenljivke razdeljene v tri osnovne skupine. V prvi skupini sta $\text{TSRST } T_f$ in $T_{\Delta\beta_{\text{tmax}}}$, v drugi so $\text{TSRST } \sigma_{\text{cry},f}$, $\text{UTST } -10^\circ\text{C}$, $\text{UTST } -25^\circ\text{C}$ in $\Delta\beta_{\text{tmax}}$, med njima je $\text{UTST } 5^\circ\text{C}$.

Preglednica 5.2.5.1: Lastne vrednosti

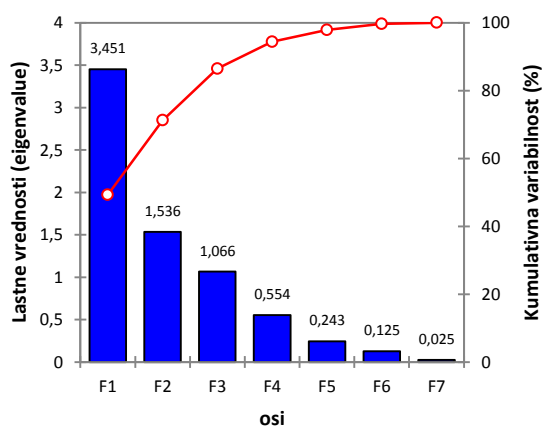
Table 5.3.5.1: Eigenvalues

Faktorji	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Lastne vrednosti	3,451	1,536	1,066	0,554	0,243	0,125	0,025
Variabilnost [%]	49,298	21,941	15,230	7,912	3,475	1,787	0,357
Kumulativa [%]	49,298	71,239	86,469	94,381	97,856	99,643	100,000

Preglednica 5.2.5.2: Korelacije med spremenljivkami in faktorji

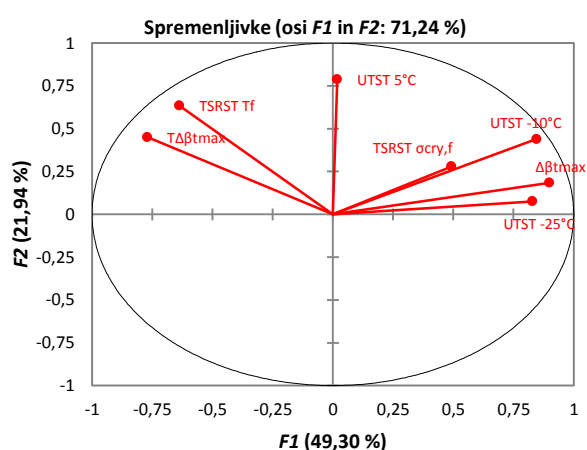
Table 5.2.5.2: Correlations between variables and factors

Spremenljivka	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
$\text{TSRST } \sigma_{\text{cry},f}$	0,493	0,280	0,732	0,352	0,046	-0,134	-0,005
$\text{TSRST } T_f$	-0,637	0,634	0,110	-0,255	0,337	0,007	-0,024
$\text{UTST } 5^\circ\text{C}$	0,018	0,788	-0,556	0,177	-0,142	-0,136	-0,022
$\text{UTST } -10^\circ\text{C}$	0,845	0,439	0,055	-0,273	-0,035	0,032	0,114
$\text{UTST } -25^\circ\text{C}$	0,829	0,076	-0,305	0,365	0,217	0,184	-0,010
$\Delta\beta_{\text{tmax}}$	0,898	0,184	0,169	-0,315	-0,127	0,070	-0,104
$T_{\Delta\beta_{\text{tmax}}}$	-0,771	0,450	0,292	0,165	-0,206	0,221	0,009



Slika 5.2.5.1a: Diagram lastnih vrednosti in kumulativne variabilnosti

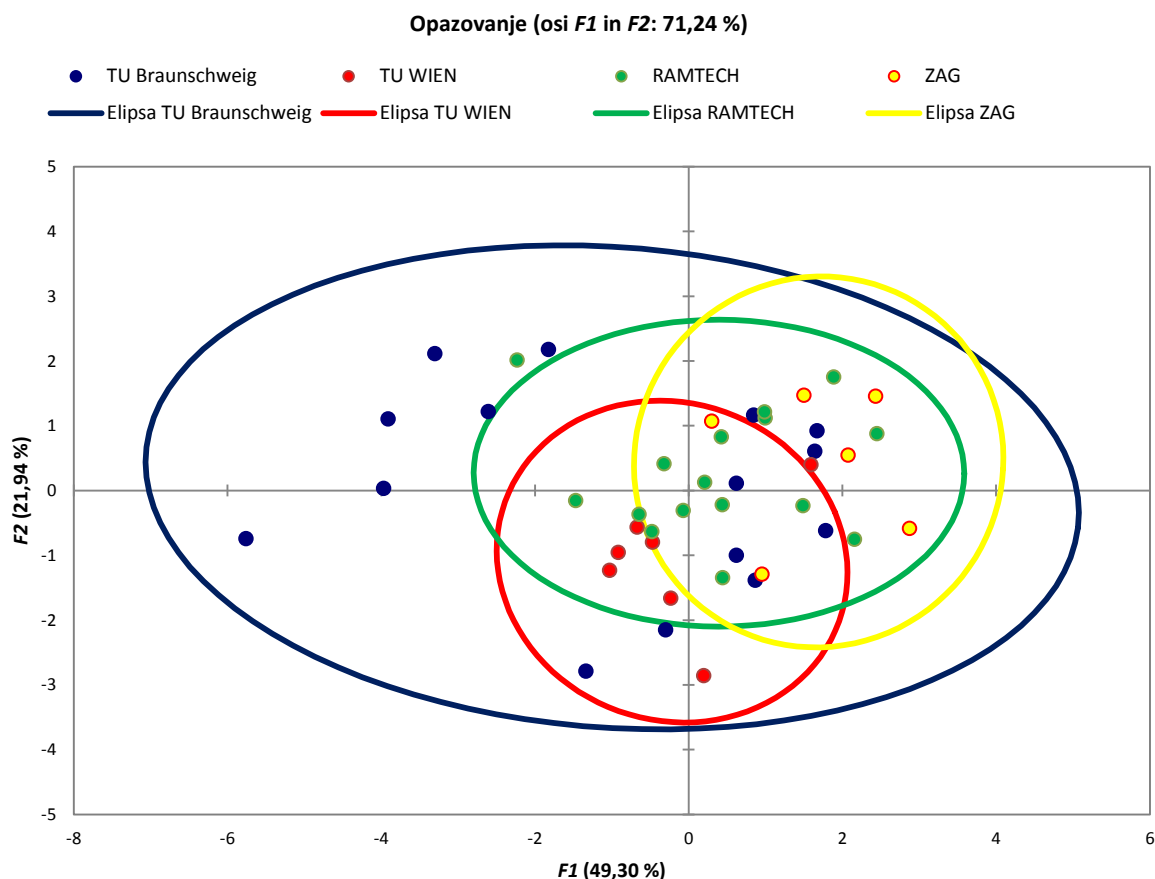
Figure 5.2.5.1a: Diagram of eigenvalue and cumulative variability



Slika 5.2.5.1b: Dvorazsežni prostor spremenljivk

Figure 5.2.5.1b: 2D space of variables

Po analizi PCA smo pridobljene vrednosti faktorjev razdelili še po laboratorijih (preglednica E.5.2.5.3 – priloga E). Omenjeni rezultati opazovanja so grafično prikazani po laboratorijih v dvorazsežnem prostoru za osi F1 in F2 (slika 5.2.5.2). Rezultati so omejeni z elipsoidnimi klastri (skupki), ki imajo težišče v sredini opazovanj oz. vrednosti meritev. Iz omenjene slike ugotavljamo, da se skupki med seboj prekrivajo in da ni mogoče opaziti sistemske napake. Še največje odstopanje je med ZAG-om in TU Wien, saj je tu prekrivanje med skupki *manjše kot* med preostalimi. Največji skupek je pri TU Braunschweig, kar kaže na največjo variabilnost med meritvami. Razlog za tako odstopanje je lahko v različnih materialih (npr. tip bitumna, zmes kamnitih zrn) ali v manjši natančnosti meritev.



Slika 5.2.5.2: Opazovanje (osi F1 in F2) po laboratorijih

Figure 5.2.5.2: Observation (axle F1 and F2) by the laboratory

5.2.6 Metoda delnih najmanjših kvadratov (PLS)

Z multivariatno statistično metodo delnih najmanjših kvadratov (PLS) želimo preveriti vpliv vhodnih spremenljivk X (TSRST $\sigma_{cry,f}$, TSRST T_f , UTST 5 °C, UTST -10 °C, UTST -25 °C) in izhodnih spremenljivk Y ($\Delta\beta_{tmax}$, $T_{\Delta\beta tmax}$), ki so prikazane v preglednici 5.2.1.1. V preglednici 5.2.6.1 so tabelarično prikazani rezultati kakovostnega modela po metodi PLS. Slika 5.2.6.1a grafično prikazuje kakovostni model po posameznih komponentah. Pri drugi komponenti Komp2 je $Q^2 = 67,4 \%$ in povprečje R^2_Y in R^2_X je $R^2 = 69,7 \%$, kar je zadovoljivo. V preglednici 5.2.6.2 je tabelarično prikazana matrika korelacij spremenljivk s komponentami t glede na spremenljivki X in Y. To pa je grafično prikazano na sliki 5.2.6.1b. Tukaj ugotavljamo, da je UTST -10 °C in UTST -25 °C *najbližja* $\Delta\beta_{tmax}$ ter TSRST T_f je *najbližja* $T_{\Delta\beta tmax}$, kar se ujema s PCA.

Preglednica 5.2.6.1: Kakovostni model

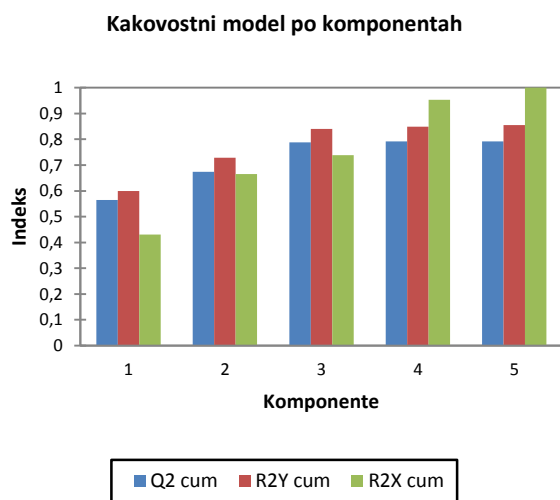
Table 5.2.6.1: Model quality

Indeks	Komp1	Komp2	Komp3	Komp4	Komp5
Q^2 kum	0,565	0,674	0,788	0,792	0,791
R^2_Y kum	0,599	0,729	0,841	0,849	0,855
R^2_X kum	0,431	0,665	0,738	0,953	1,000

Preglednica 5.2.6.2: Matrika korelacij spremenljivk s komponentami t

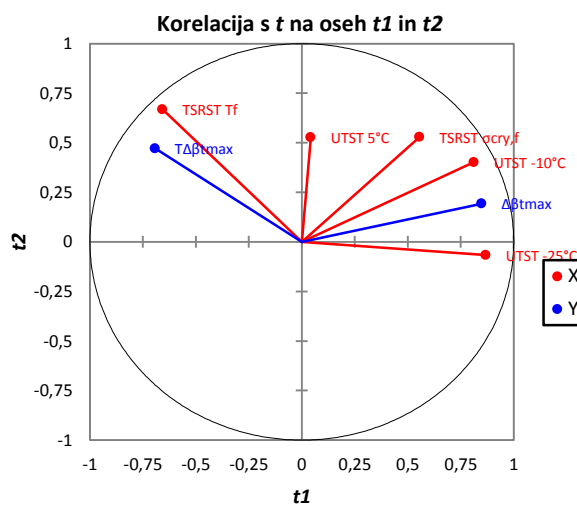
Table 5.2.6.2: Correlation matrix of the variables with the t components

Spremenljivke	t1	t2	t3	t4	t5
TSRST $\sigma_{cry,f}$	0,555	0,528	-0,213	0,602	-0,072
TSRST T_f	-0,657	0,668	0,132	-0,182	-0,266
UTST 5 °C	0,042	0,526	-0,278	-0,733	0,327
UTST -10 °C	0,812	0,402	0,384	-0,168	0,056
UTST -25 °C	0,868	-0,067	-0,280	-0,337	-0,224
$\Delta\beta_{tmax}$	0,848	0,192	0,428	0,026	0,073
$T_{\Delta\beta tmax}$	-0,692	0,471	-0,201	0,129	0,081



Slika 5.2.6.1a: Kakovostni model po komponentah

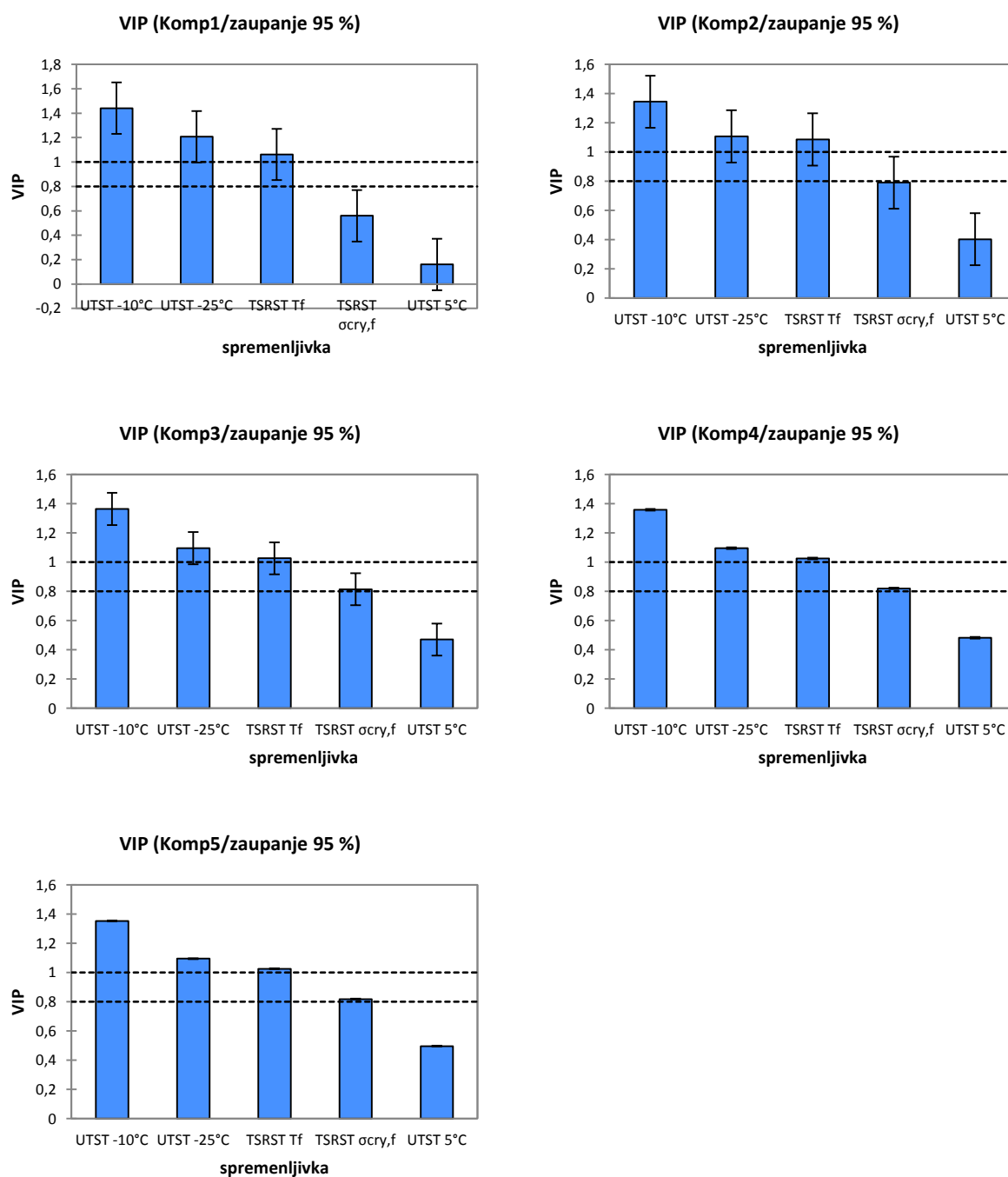
Figure 5.2.6.1a: Model quality by number of components



Slika 5.2.6.1b: Korelacije s t na oseh t1 in t2

Figure 5.2.6.1b: Correlations with t on axes t1 and t2

Predstavljeni so grafi VIP (ang. variable importance in projection) funkcije pojasnjevalne spremenljivke – vrednost VIP po posameznih komponentah pri 95-odstotnem zaupanju (slika 5.2.6.2). Iz grafov na sliki 5.2.6.2 ugotavljamo, da so pri vseh komponentah najpomembnejše spremenljivke projekcije (nad 1,0) UTST -10 °C, UTST -25 °C, TSRST T_f in manj pomembna UTST 5 °C, ki je dober kandidat, da jo izključimo iz modela.



Slika 5.2.6.2: Najpomembnejša spremenljivka v projekciji (VIP)

Figure 5.2.6.2: Variable importance in the projection (VIP)

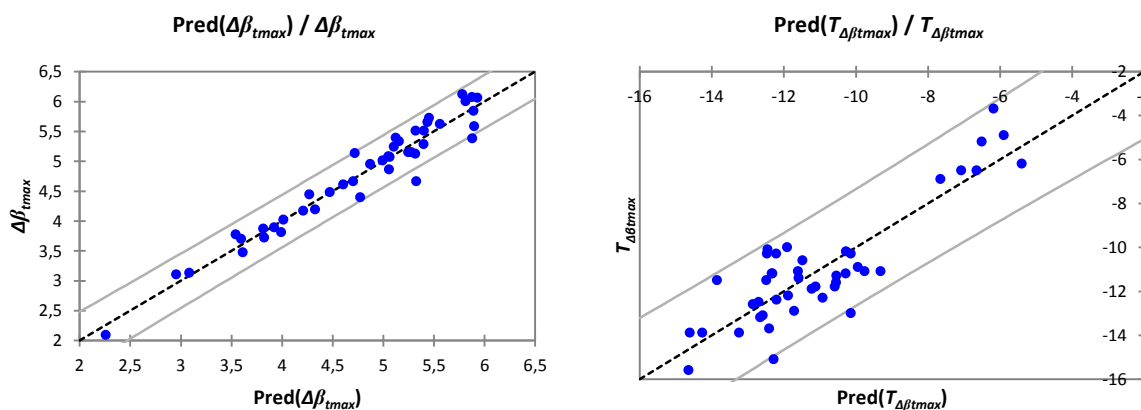
Končni rezultat analize PLS sta enačbi modela za odvisni spremenljivki $\Delta\beta_{tmax}$ in $T_{\Delta\beta tmax}$ v odvisnosti od pojasnjevalnih spremenljivk. Enačbi modela za največjo rezervo natezne trdnosti $\Delta\beta_{tmax}$ in temperaturo pri največji rezervi napetosti $T_{\Delta\beta tmax}$ imata obliko:

$$\begin{aligned}
\Delta\beta_{tmax} = & \\
& -1,15 + 6,79E-03 \cdot (TSRST \sigma_{cry,f}) - 5,81E-02 \cdot (TSRST T_f) \\
& - 0,29 \cdot (UTST 5^\circ C) + 0,98 \cdot (UTST - 10^\circ C) - 0,10 \\
& \cdot (UTST - 25^\circ C) \\
& (R^2 = 0,945)
\end{aligned}
\tag{5.2.6.1}$$

$$\begin{aligned}
T_{\Delta\beta_{tmax}} = & \\
& 0,64 + 1,29 \cdot (TSRST \sigma_{cry,f}) + 0,28 \cdot TSRST T_f + 1,91 \\
& \cdot (UTST 5^\circ C) - 1,28 \cdot (UTST - 10^\circ C) - 1,36 \\
& \cdot (UTST - 25^\circ C) \\
& (R^2 = 0,765)
\end{aligned}
\tag{5.2.6.2}$$

Analiza je pokazala zelo dobro ujemanje modela ($R^2 = 0,945$) za izhodno spremenljivko $\Delta\beta_{tmax}$ in nekoliko slabše ($R^2 = 0,765$) za $T_{\Delta\beta_{tmax}}$, vendar še vedno zadovoljivo.

Napovedi (ang. predictions) spremenljivk $\Delta\beta_{tmax}$ in $T_{\Delta\beta_{tmax}}$ so grafično prikazane na sliki 5.2.6.3. Na grafu funkcije $\Delta\beta_{tmax} - \text{pred}(\Delta\beta_{tmax})$ vidimo, da so več ali manj vsa opazovanja znotraj območja, kar kaže na dobro ujemanje modela. Bistveno slabše ujemanje modela je prikazano na grafu funkcije $T_{\Delta\beta_{tmax}} - \text{pred}(T_{\Delta\beta_{tmax}})$, kjer vidimo večji raztros opazovanj.



Slika 5.2.6.3: Napovedi (pred) spremenljivke $\Delta\beta_{tmax}$ in $T_{\Delta\beta_{tmax}}$

Figure 5.2.6.3: Predictions (pred) of variable $\Delta\beta_{tmax}$ and $T_{\Delta\beta_{tmax}}$

Na podlagi predhodnih ugotovitev, da na rezultat $\Delta\beta_{tmax}$ najbolj vplivajo UTST $-10^\circ C$, UTST $-25^\circ C$ in TSRST T_f , na rezultat $T_{\Delta\beta_{tmax}}$ pa TSRST T_f in UTST $5^\circ C$, je bil pripravljen nov, racionalnejši model s samo temi spremenljivkami. Za novi model predpostavljamo, da zaradi racionalnosti preskusov (stroškov) izvedemo samo dva preskusa (UTST $-10^\circ C$ in

TSRST) namesto petih. Ponovna analiza PLS je pokazala, da za izhodno spremenljivko $\Delta\beta_{tmax}$ še vedno obstaja zelo dobro ujemanje modela ($R^2 = 0,914$), za spremenljivko $T_{\Delta\beta tmax}$ je ujemanje nekoliko slabše ($R^2 = 0,665$), vendar še vedno zadovoljivo. Tako sta enačbi za novi model s tremi spremenljivkami naslednji:

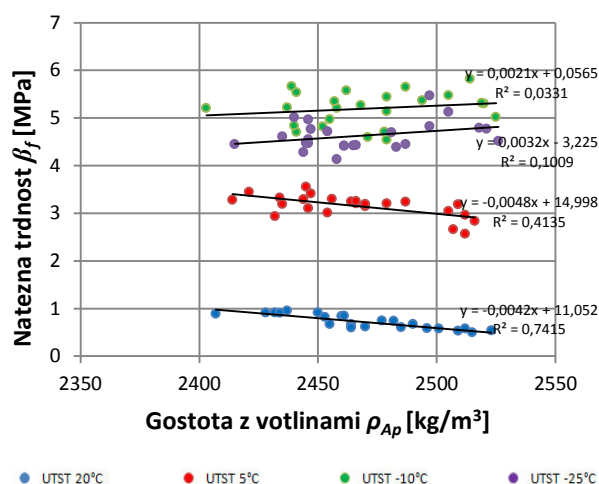
$$\begin{aligned} \Delta\beta_{tmax} = & \\ -2,06 + 5,77E - 02 \cdot (TSRST \sigma_{cry,f}) - 0,07 \cdot (TSRST T_f) + 0,85 & \\ \cdot (UTST - 10 \text{ } ^\circ C) & \\ (R^2 = 0,914) & \end{aligned} \quad (5.2.6.1)$$

$$\begin{aligned} T_{\Delta\beta tmax} = & \\ 9,51 + 0,93 \cdot (TSRST \sigma_{cry,f}) + 0,56 \cdot (TSRST T_f) - 1,38 \cdot (UTST & \\ - 10 \text{ } ^\circ C) & \\ (R^2 = 0,665) & \end{aligned} \quad (5.2.6.2)$$

5.3 Statistična določitev največjega razpona gostote z votlinami preskušanca

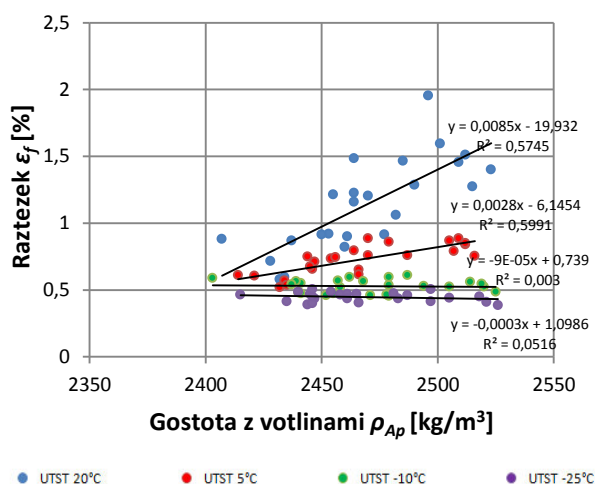
V tem poglavju želimo s statistično analizo podatkov določiti največji dovoljeni razpon gostote z votlinami ρ_{Ap} med tremi paralelnimi prizmatičnimi preskušanci. Iz eksperimentalnega dela doktorske disertacije (glej poglavji 4.1 in 4.2) smo analizirali podatke preskušancev preskusov UTST bitumeniziranih zmesi AC 8 surf in AC 11 surf, ki so se izvajali na ZAG-u (preglednica F.5.3.1 – priloga F).

Prikazan je graf funkcije natezne trdnosti ob porušitvi in gostote z votlinami preskušancev (slika 5.3.1a) ter graf funkcije raztezka ob porušitvi in gostote z votlinami preskušancev (slika 5.3.1b). Pri natezni trdnosti ob porušitvi so z nižanjem temperature rezultati bolj raztreseni. Nasprotno je pri raztezu ob porušitvi. Na sliki 5.3.2 je prikazan 3D-graf funkcije gostote z votlinami preskušancev, natezne trdnosti in raztezka ob porušitvi. Iz slike vidimo, da obstaja ekstrem v območju gostote z votlinami 2500 kg/m^3 .



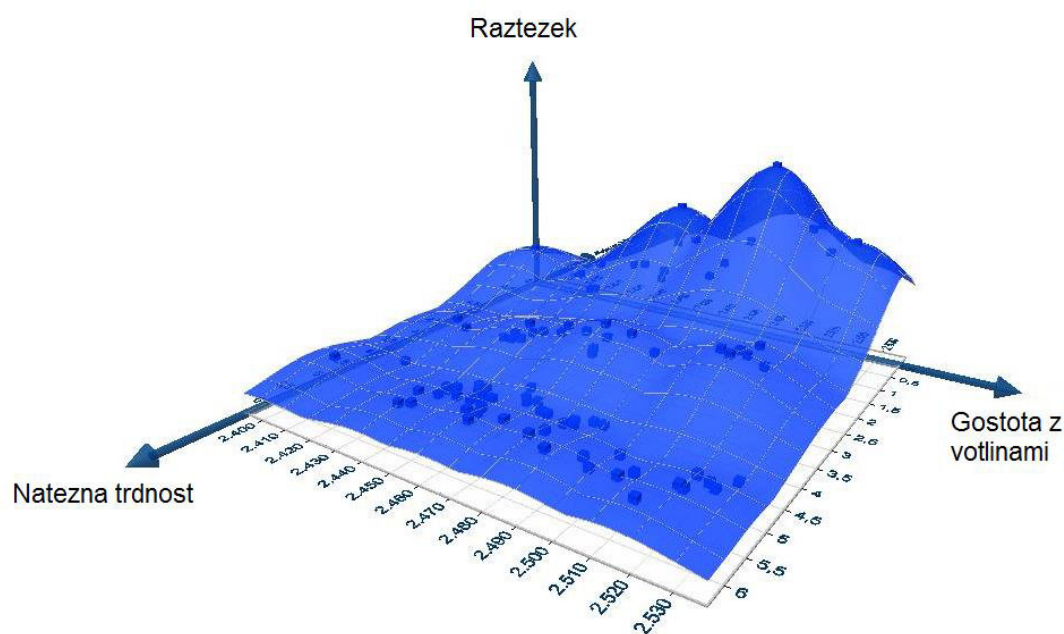
Slika 5.3.1a: UTST – funkcija natezne trdnosti in prostorske gostote preskušanca

Figure 5.3.1a: UTST – function of the bulk density of sample and tensile strength



Slika 5.3.1b: UTST – funkcija raztezka ob porušitvi in prostorske gostote preskušanca

Figure 5.3.1b: UTST – function of the bulk density of sample and strain at failure



Slika 5.3.2: 3D-graf funkcije gostote z votlinami preskušanca, natezne trdnosti in raztezka ob porušitvi

Figure 5.3.2: 3D chart function of the bulk density of sample, tensile strength and strain at failure

V preglednici 5.3.2 sta prikazana izračunani standardni odklon (STDEV) in razpon (R) za gostoto z votlinami preskušanca, natezno trdnost ob porušitvi in raztezek ob porušitvi v odvisnosti od UTST 20 °C.

Preglednica 5.3.2: Standardni odklon in razpon za UTST 20 °C (ZAG)

Table 5.3.2: Standard deviation and range for UTST 20 °C (ZAG)

Preskus	Vrsta BZ	Gostota z votlinami preskušanca	Natezna trdnost β_t	Raztezek ε_f	Gostota z votlinami preskušanca	Natezna trdnost β_t	Raztezek ε_f
		STDEV – s	STDEV – s	STDEV – s	Razpon – R	Razpon – R	Razpon – R
UTST 20 °C	AC 11 surf (4 m.-%)	3,055	0,005	0,074	6	0,009	0,135
	AC 11 surf (5 m.-%)	4,359	0,016	0,053	8	0,029	0,1
	AC 11 surf (5,4 m.-%)	14,364	0,042	0,150	27	0,075	0,3
	AC 11 surf (5,8 m.-%)	15,011	0,025	0,063	26	0,043	0,125
	AC 11 surf (6,0 m.-%)	7,024	0,021	0,092	14	0,039	0,18
	AC 8 surf (4,0 m.-%)	22,053	0,033	0,024	43	0,065	0,045
	AC 8 surf (5,4 m.-%)	10,817	0,012	0,156	21	0,023	0,28
	AC 8 surf (6,2 m.-%)	8,185	0,005	0,236	16	0,008	0,445
Povprečna vrednost – x		10,609	0,020	0,106	20,125	0,036	0,201
Standardna deviacija – s		6,317	0,013	0,070	11,993	0,024	0,131
Razpon – R		18,998	0,0376	0,213	37	0,067	0,4
ZAHTEVA						$R(\beta_t) \leq 0,1$ MPa	

Na podlagi linearne interpolacije razpona gostote z votlinami in natezne trdnosti smo izračunali največjo dovoljeno gostoto z votlinami med tremi preskušanci za UTST 20 °C. Ob upoštevanju, da je največji dovoljeni razpon 0,1 MPa, dobimo, da je največji dovoljeni razpon gostote z votlinami med tremi paralelnimi preskušanci ≤ 44 kg ($y = 367,39 \cdot x + 6,7612$; $R^2 = 0,56$). Pri preostalih preskusih UTST ni bilo mogoče določiti razpona gostote z votlinami, ker je raztros rezultatov velik. Korelacija med razponom natezne trdnosti in raztežkom ob porušitvi je slaba pri vseh preskusih UTST. Rezultat izračuna je predstavljen v preglednici 5.3.3. *Pri izbiri treh preskušancev in ob upoštevanju največjega dovoljenega razpona gostote z votlinami med preskušanci zmanjšamo tveganje za neuspeh pri preskusu UTST 20 °C.*

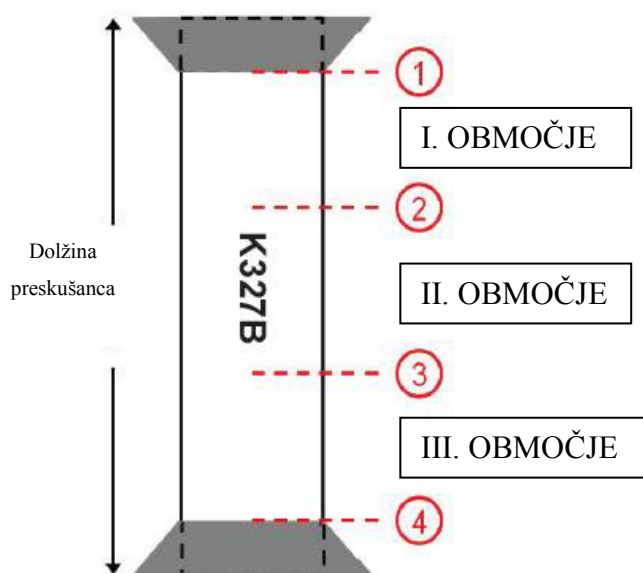
Preglednica 5.3.3: Izračun največjega dovoljenega razpona gostote z votlinami preskušancev za UTST 20 °C

Table 5.3.3: Calculated maximum range of specimens bulk density for UTST 20 °C

Preskus	Izračun največjega razpona gostote z votlinami treh preskušancev ρ_{Ap} [kg]	Največji dovoljeni razpon napetosti ob porušitvi β_t po standardu EN 12697-46 [MPa]
UTST 20 °C (ZAG)	≤ 44 ($R^2 = 0,56$)	$\leq 0,1$

5.4 Analiza mesta nastanka razpoke v preskušancu (TU Wien)

V poročilih TU Wien za preskusa UTST in TSRST je označeno mesto nastanka porušitve (razpoke) na preskušancu. Po višini je preskušanec razdeljen na tri območja, omejena s štirimi linijami, kjer predhodno izmerimo širino preskušanca (slika 5.4.1). Želimo, da nastane porušitev v II. območju (v srednji tretjini), kjer je čisti nateg. Območja porušitev za sestavo 2 (5 m.-% bit.), sestavo 4 (5,8 m.-% bit.) in sestavo 5 (6,2 m.-% bit.) so tabelarično prikazana v preglednicah od 5.4.1 do 5.4.3. Iz preglednice 5.4.1 (skupaj za preskusa TSRST in UTST) vidimo, da je pri sestavi 2 (5 m.-% bit.) največ porušitev (42 %) nastalo v I. območju, v II. območju jih je nastalo 36 % in v III. območju 23 %. Prav tako je iz preglednice 5.4.1 razvidno, da so pri preskusu UTST različno razporejena območja nastanka razpoke, pri preskusu TSRST pa je razpoka največkrat nastala v I. območju (50 %). Iz preglednic od 5.4.1 do 5.4.3 za preskusa TSRST in UTST ugotavljamo, da je v našem primeru v skrajnem I. (zgornjem) in III. (spodnjem) območju nastalo 77,5 % vseh evidentiranih razpok. Menimo, da na porušitev, ki nastane v zgornji in spodnji tretjini preskušanca, vplivajo poleg nateznih še strižne napetosti, ki nastanejo med jekleno ploščo, lepilom in preskušancem.



Slika 5.4.1: Območje porušitve preskušanca pri preskusih TSRST in UTST

Figure 5.4.1: Cracked area of the sample at TSRST and UTST test

Preglednica 5.4.1: Območja porušitev pri AC 8 surf – sestava 2 (5 m.-%)

Table 5.4.1: Cracked area at AC 8 surf – Mixture 2 (5 m.-%)

Številka preskušanca		UTST			TSRST	
		5 °C	−10 °C	−25 °C	10 °C	
K327A	1	2				
K327B	2				3	
K327C	3	1				
K327D	4				1	
K327E	5		3			
K327F	6				1	
K327G	7		3			
K327H	8			2		
K327I	9	1				
K327J	10			1		
K327K	11		1			
K327L	12			2		
K327M	13				2	
K327N	14	2				
STATISTIKA						
Število – n	14	4	3	3	4	Povprečje
Območje	I	50 %	33 %	33 %	50 %	42 %
	II	50 %	0 %	67 %	25 %	36 %
	III	0 %	67 %	0 %	25 %	23 %

Preglednica 5.4.2: Območja porušitev pri AC 8 surf – sestava 4 (5,8 m.-%)

Table 5.4.2: Cracked area at AC 8 surf – Mixture 4 (5.8 m.-%)

Številka preskušanca		UTST			TSRST	
		5 °C	−10 °C	−25 °C	T ₀ = 10 °C	
K328A	1	3				
K328B	2	2				
K328C	3	1				
K328D	4		3			
K328E	5		3			
K328F	6				2	
K328G	7		1			
K328H	8			3		
K328I	9				3	
K328J	10			3		
K328K	11			1		
K328L	12				2	
K328M	13				1	
STATISTIKA						
Število – n	13	3	3	3	4	Povprečje
Območje	I	33 %	33 %	33 %	25 %	31 %
	II	33 %	0 %	0 %	50 %	21 %
	III	33 %	67 %	67 %	25 %	48 %

Preglednica 5.4.3: Območja porušitev pri AC 8 surf – sestava 5 (6,2 m.-%)

Table 5.4.3: Cracked area at AC 8 surf – Mixture 5 (6.2 m.-%)

Številka preskušanca		TSRST	TSRST	
		T ₀ = 10 °C	T ₀ = 20 °C	
K348A	1	1		
K348B	2	1		
K348C	3	1		
K348D	4		1	
K348E	5		1	
K348F	6		3	
K348G	7		3	
STATISTIKA				
Število – n	7	3	4	Povprečje
Območje	I	100 %	50 %	75 %
	II	0 %	0 %	0 %
	III	0 %	50 %	25 %

6 SKUPNI ZAKLJUČKI IN DISKUSIJA

6.1 Rezultati in ugotovitve preskusov in analiz

Rezultati preskusov TSRST in UTST ter rezerve nateznih trdnosti pri nizkih temperaturah pri bitumeniziranih zmesih AC 11 surf, ki so bili izvedeni v laboratoriju na ZAG-u, kažejo, da se z večanjem deleža bitumna v sestavi bitumenizirane zmesi izboljšuje odpornost proti nastanku razpok pri nizkih temperaturah. Do podobnih ugotovitev, le da pri drugačnih bitumeniziranih zmesih, so prišli tudi Arand (1987), Read in sodelavci (2003) ter Spiegl (2008). Vendar so analize pokazale, da se rezultati pri nizkih temperaturah z deležem bitumna nelinearno spreminjajo. Krivulje TSRST pri manjšem deležu bitumna (4 m.-%) bolj nihajo kot krivulje z večjim deležem (6 m.-%), predvsem v elastičnem območju. Vzrok za to je v nenehnih notranjih prerazporeditvah napetosti in nastanku oslabitev (razpok) v preskušancu. Vse krivulje TSRST potekajo vzporedno, razen krivulje bitumenizirane zmesi s 6 m.-% bitumna, ki ima daljše relaksacijsko območje. Največjo rezervo natezne trdnosti in najnižjo temperaturo pri največji rezervi ima sestava bitumenizirane zmesi z največjim deležem bitumna (6 m.-%). Ugotovljeno je, da porušitev pri preskušancih z manjšim deležem bitumna (4 m.-%) tudi pri višjih temperaturah preskusa UTST ne poteka le skozi bitumensko malto, ampak tudi skozi posamezna kamnita zrna. Iz diagramov sila – deformacija pri preskusih UTST pri 20 °C za različne sestave je ugotovljeno, da se z večanjem deleža bitumna povečuje deformacija ob porušitvi in zmanjšuje natezna trdnost. Pri preskusu UTST pri temperaturi 5 °C najbolj izstopata sestavi s 4 in 6 m.-% bitumna. Sestava s 4 m.-% bitumna ima najmanjšo deformacijo ob porušitvi, sestava z večjim deležem bitumna pa najmanjšo natezno napetost in največjo deformacijo ob porušitvi, kar je posledica vpliva večjega deleža viskozne komponente v sestavi. Krivulje UTST pri nižjih temperaturah preskusa praktično potekajo linearno in po podobnih linijah. Krivulja UTST pri -10 °C ima v nasprotju z UTST pri -25 °C večjo deformacijo in zato večjo natezno trdnost, ker obstaja pri višji temperaturi (-10 °C) še vedno zmožnost lezenja.

Na podlagi analize ugotavljamo, da če vstavimo v Arandov diagram naše podatke za AC 11 surf, ta diagram ni najprimernejši za napovedovanje temperature ob porušitvi pri večjem deležu bitumna v sestavi bitumenizirane zmesi. Vpliv deleža bitumna najboljše opisujeta največja rezerva natezne trdnosti in temperatura pri največji rezervi, pri čemer ugotavljamo, da s povečanjem deleža bitumna v sestavi nad 5 m.-% bistveno izboljšamo odpornost

bitumenizirane zmesi proti nizkim temperaturam. Glede na preskuse pri nizkih temperaturah smo ugotovili, da je najmanjši delež bitumna $B_{\min}$ za obravnavano bitumenizirano zmes AC 11 surf okoli 4,6 m.-%, kar je bistveno večji delež bitumna od trenutno veljavnih zahtev. Od leta 2009 veljavni TSC 06.300/06.410:2009 se sklicuje na standard SIST EN 13108-1, točko 5.3.1.3, kjer ni s številko navedenega najmanjšega deleža veziva, le v točki 5.4.1.2 standarda SIST EN 13108-1 je zahtevano, da mora biti najmanjši delež veziva vsaj 3,0 m.-%. Prav tako je ugotovljena vrednost večja od zahtev po standardu SIST EN 13108-20 oz. od umaknjene predloga TSC 06.300/06.410 (marec, 2008), ki za AC surf zahteva, da mora biti najmanjši delež veziva $B_{\min 4,4}$ vsaj 4,4 m.-%.

V sestavi bitumenizirane zmesi se pri spreminjanju deleža bitumna spreminjata vsebnost votlin in vsebnost polnila, pri čemer se sestava zmesi kamnitih zrn ne spreminja. Od tod sledi, da so si odvisnosti med temi lastnostmi podobne ali komplementarne. Podobna je ugotovitev, da obstaja dobra korelacija med največjo rezervo natezne trdnosti in temperaturo pri največji rezervi z vsebnostjo votlin v bitumenizirani zmesi V_v , s povprečno gostoto z votlinami preskušanca ρ_{Ap} in z zapolnjenostjo votlin v zmesi zrn z bitumnom VFB. Iz opravljenih poskusov smo ugotovili, da je priporočena največja vsebnost votlin $V_{vmax} = 5,9$ V.-%, kar je nižje od zahtevane zgornje meje po TSC 06.300/06.410:2009, kjer je določeno, da mora biti največja vsebnost votlin manjša ali enaka 6,5 V.-%. Opazili pa smo tudi preskok ($VFB_{\min}$) ravno na spodnji dovoljeni meji po TSC (≥ 60 %). Natezna trdnost pri preskusu UTST se s povečevanjem deleža bitumna v sestavi malo spreminja. Obratno je pri raztezu ob porušitvi, kjer se pri UTST 20 °C z večanjem deleža bitumna ta raztezek bistveno povečuje, ker večji delež viskozne komponente (bitumna) vpliva na visko-elastično obnašanje bitumenizirane zmesi. Pri nižjih temperaturah je raztezek praktično enak, ne glede na količino bitumna, ki je v sestavi, ker viskozna komponenta preide v elastično. Od tod sklepamo, da je pri napovedovanju obnašanja pri nizkih temperaturah pomemben raztezek ob porušitvi, vsaj v temperaturnem območju med 20 in -10 °C.

Za bitumenizirano zmes AC 8 surf so bili preskusi izvedeni pri nizkih temperaturah v treh različnih laboratorijih, ZAG, ISTU – TU Wien (A) in Ramtech (HR). Rezultati kažejo, da so razlike med laboratoriji bistvene tudi pri enaki sestavi bitumenizirane zmesi. Krivulje TSRST potekajo v dveh osnovnih linijah. V prvi liniji potekajo krivulje ZAG-a in v drugi krivulje TU Wien. Med njima sta krivulji Ramtecha. Največje razlike pri TSRST med laboratoriji so pri temperaturi ob porušitvi, kjer so vrednosti TU Wien bistveno nižje od vrednosti ZAG-a. Tudi

pri preskusih UTST izkazujejo najboljše lastnosti rezultati TU Wien in najslabše rezultati Ramtecha. Posledično so temu primerni rezultati rezerve natezne trdnosti. Posebnost smo opazili pri rezultatih UTST pri 5 °C, kjer so najmanjše vrednosti natezne trdnosti pri TU Wien. Porušitev pri višjih temperaturah preskusa UTST (20 °C) je potekala večinoma skozi bitumensko malto (površina enakomerno temna). Pri nižjih temperaturah preskusov UTST in TSRST smo opazili, da poteka porušitev skozi bitumensko malto in kamnita zrna. Porušitev preskušancev pri višjih temperaturah preskusa UTST je pokazala, da je linija porušitve poševna in bolj razgibana, kot je to opaziti pri nižjih temperaturah UTST in TSRST, kjer je linija porušitve praktično vodoravna. Tudi v diagramih sila – deformacija pri preskusu UTST so opazne razlike med laboratoriji. Najočitnejša je pri rezultatih UTST pri –10 °C in pri –25 °C (TU Wien), kjer so krivulje praktično enake, pri preostalih dveh laboratorijih je vedno večja vrednost sile pri UTST pri –10 °C. Vpliv deleža bitumna je v tem primeru nekoliko težje določljiv zaradi razlik v rezultatih med laboratoriji. Kljub temu obstaja tendenca, da se z večanjem deleža bitumna večja največja rezerva natezne trdnosti in nižja temperatura pri največji rezervi. Ni pa mogoče iz teh rezultatov določiti minimalnega deleža bitumna, kot je to pri AC 11 surf. Podobno kot pri AC 11 surf se tudi pri AC 8 surf pri višjih temperaturah preskusa UTST natezna trdnost v odvisnosti od deleža bitumna malo spreminja, v primerjavi z raztezkom ob porušitvi, ki je tem večji, čim večji je delež bitumna.

Primerjava rezultatov med AC 11 surf in AC 8 surf pri preskusu TSRST je pokazala, da so rezultati slednjega pri natezni napetosti ob porušitvi nekoliko večji in pri temperaturi ob porušitvi med seboj primerljivi, v odvisnosti od deleža bitumna, vsebnosti votlin, prostorske gostote preskušanca in zapolnjenosti votlin v zmesi zrn z bitumnom VFB. Ob tem je bil bitumen, uporabljen za AC 8 surf, celo nekoliko slabše kakovosti. Natezne trdnosti pri preskusu UTST so med AC 11 surf in AC 8 surf podobne. Razlike so opazne pri raztezkih ob porušitvi, kjer je očitna razlika pri višjih temperaturah in zelo majhna pri nižjih temperaturah. Pri bitumenizirani zmesi AC 8 surf je predvsem pri višji temperaturi opaziti večji raztezek ob porušitvi (natezna trdnost se praktično ne spreminja) kot pri AC 11 surf. Domnevamo, da večja zrna v sestavi ustvarjajo primeren skelet, ki vpliva na manjšo deformabilnost bitumenizirane zmesi pri višjih temperaturah. Primerjava med AC 8 surf in AC 11 surf pri rezervi natezne trdnosti in temperaturi pri največji rezervi je pokazala manjšo razliko. Na podlagi analiz in rezultatov ugotavljamo, da bitumenizirana zmes AC 8 surf izkazuje večjo odpornost proti nastanku razpok pri nizkih temperaturah kot AC 11 surf. Domnevamo, da bi bili rezultati za AC 8 surf še nekoliko boljši, če bi imel uporabljeni bitumen podobne lastnosti,

kot jih ima pri AC 11 surf. Spiegl (2008) je ugotovil, da izmed bitumeniziranih zmesi AC 11 surf, SMA 11 in PA 11 izkazuje najboljšo odpornost proti nizkim temperaturam AC 11 surf. Torej enakomerna sestava bitumenizirane zmesi z manjšim deležem votlin dobro vpliva na odpornost pri nizkih temperaturah.

Pri rezultatih preskusov na TU Wien smo analizirali vpliv začetne temperature pri preskusu TSRST za bitumenizirano zmes AC 8 surf s 6,2 m.-% bitumna in na tej podlagi ugotavljamo, da ni bistvene razlike med rezultati TSRST med začetnima temperaturama $T_0 = 20\text{ °C}$ in 10 °C . Na univerzi Nevada Reno so izvajali preskuse pri začetnih temperaturah $T_0 = 5\text{ °C}$ in 20 °C ter ugotovili, da rezultati nekoliko odstopajo, vendar na rezultate TSRST bistveno bolj vpliva hitrost ohlajanja (Hajj, 2010).

Opravljeni sta bili dve primerjalni analizi rezultatov med domačimi in tujimi priznanimi laboratoriji pri preskusih pri nizkih temperaturah. Ugotovili smo, da obstajajo bistvene razlike med laboratoriji, ki izvajajo preskuse po istem standardu SIST EN 12697-46. Prva primerjava rezultatov preskusov TSRST in UTST je bila izvedena na povsem enakih preskušancih bitumenizirane zmesi AC 8 surf, in sicer na dveh sestavah, z deležem bitumna 5 in 5,8 m.-%. Preskusi so bili izvedeni na TU Wien in v Ramtechu, ki uporabljata enako opremo za preskušanje. Analiza je pokazala, da med njima obstajajo razlike tako pri preskusu TSRST kot tudi pri preskusu UTST. Iz rezultatov TU Wien je opaziti, da je relaksacijsko območje pri TSRST bistveno daljše, natezna trdnost pri preskusu UTST -10 °C in -25 °C precej večja in pri UTST 5 °C nerazumljivo manjša. Največja rezerva napetosti je pri TU Wien v obeh primerih bistveno večja (za okoli 1,5 MPa) in temperatura pri največji rezervi nižja (za okoli 5 °C). Druga primerjalna analiza je bila izvedena med laboratorijema ZAG in TU Wien, ki uporabljata pri preskusu TSRST opremo različnih proizvajalcev, na povsem enakih preskušancih bitumenizirane zmesi AC 8 surf s 6,2 m.-% bitumna. Tudi v tem primeru ima krivulja TU Wien bistveno daljše relaksacijsko območje in večjo odpornost proti razpokam pri nizkih temperaturah. Domnevamo, da je vzrok za tolikšno razhajanje v načinu lepljenja preskušancev, zato bi bilo treba standard SIST EN 12697-46 dopolniti, predvsem v delu o pripravi preskušancev.

Da bi ugotovili toleranco odstopanja, je bila opravljena statistična analiza dolžin preskušancev. V standardu EN 12697-46 je predpisana minimalna dolžina preskušanca 160 mm. Ker ni omejitve navzgor, je lahko dolžina tudi bistveno večja. Jung in sodelavci

(1994) so ugotovili, da dimenzija preskušanca vpliva na temperaturo ob porušitvi. Na podlagi statistične analize rezultatov meritev dolžin preskušancev, ki so se pripravljali na ZAG-u in v Ramtechu, smo ugotovili, da bi bila primerna toleranca odstopanja dolžine preskušanca (za zdajšnjo opremo) ± 2 mm ($L = 160 \pm 2$ mm).

Z različnimi statističnimi univariatnimi in multivariatnimi analizami je bila opravljena obširnejša analiza rezultatov SMA pri nizkih temperaturah, pridobljenih iz štirih različnih laboratorijev: TU Braunschweig, TU Wien, Ramtech in ZAG. Z dvovzorčnim Studentovim t-testom je bilo ugotovljeno, da sta si statistično najbolj oddaljeni srednji vrednosti rezultatov pri TSRST $\sigma_{cry,f}$ med TU Braunschweig in Ramtechom ter Ramtechom in ZAG-om. Najbližji pa sta si med TU Braunschweig in TU Wien. Z enostransko analizo variance (ANOVA) ugotavljamo, da ne moremo primerjati rezultatov pri nizkih temperaturah (TSRST T_f , UTST $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, UTST $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, UTST $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\Delta\beta_{tmax}}$ in $\Delta\beta_{tmax}$) med laboratoriji, saj vsaj enkrat kateri od njih izstopa, razen pri rezultatih TSRST $\sigma_{cry,f}$. Statistična analiza po metodi glavnih komponent (PCA) je pokazala, da so spremenljivke razdeljene v tri osnovne skupine. V prvi skupini sta TSRST T_f in $T_{\Delta\beta_{tmax}}$, v drugi so TSRST $\sigma_{cry,f}$, UTST $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, UTST $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $\Delta\beta_{tmax}$, med njima je UTST $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z multivariatno analizo PCA smo pridobljene vrednosti faktorjev razdelili še po laboratorijih in jih omejili z elipsoidnimi klastri. Ugotavljamo, da se elipsoidni klastri (skupki) med seboj prekrivajo in da ni mogoče opaziti sistemskih napake. Še največje odstopanje je med ZAG-om in TU Wien, saj se ti skupki prekrivajo manj kot drugi. Največji skupek je pri TU Braunschweig, kar kaže na največjo variabilnost med rezultati meritev. Razlog za tako odstopanje je lahko v različnih materialih (npr. tip bitumna, zmes kamnitih zrn) ali v manjši natančnosti rezultatov. Z multivariatno statistično metodo delnih najmanjših kvadratov (PLS) ugotavljamo, da sta UTST $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ in UTST $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ najbližja $\Delta\beta_{tmax}$ ter TSRST T_f je najbližji $T_{\Delta\beta_{tmax}}$. Iz grafov VIP ugotavljamo, da so najpomembnejše spremenljivke projekcije UTST $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, UTST $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, TSRST T_f in manj pomembna UTST $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ki je dober kandidat za izključitev iz modela. Z analizo PLS smo dobili empirično enačbo (model) za odvisnost spremenljivk $\Delta\beta_{tmax}$ in $T_{\Delta\beta_{tmax}}$ od sestave bitumenizirane zmesi. Omenjeni empirični model smo zaradi stroškov preskusov (dva preskusa namesto petih) še racionalizirali in dobili še vedno dobro ujemanje modela.

S statistično analizo rezultatov gostot z votlinami preskušancev je bil določen največji razpon gostote z votlinami med tremi paralelnimi prizmatičnimi preskušanci, ob predpostavki, da

želimo doseči zahteve iz standarda SIST EN 12697-46. Za analizo so bili uporabljeni rezultati preskusov UTST in TSRST (ZAG) za bitumenizirani zmesi AC 11 surf in AC 8 surf. Analiza je pokazala, da je mogoče določiti največji dovoljeni razpon gostote z votlinami treh preskušancev v odvisnosti od zahtevanega razpona natezne trdnosti po standardu. Samo za preskus UTST pri temperaturi 20 °C je dovoljeni razpon gostote z votlinami treh preskušancev $R(\rho_{Ap}) \leq 44$ kg pri zahtevanem razponu natezne trdnosti ($R(\beta_t) \leq 0,1$ MPa). Pri preostalih preskusih UTST je raztros rezultatov prevelik.

Na preskušancih bitumeniziranih zmesi velikosti $4 \cdot 4 \cdot 16$ cm³ (TU Wien) smo analizirali mesto nastanka porušitve (razpoke) pri preskusih TSRST in UTST. Želeno je, da nastane porušitev v osrednji tretjini višine prizmatičnega preskušanca, kjer je čisti nateg. Z analizo je ugotovljeno, da najmanj (22,5 %) razpok nastane ravno v osrednjem delu preskušanca (II. območje). Menimo, da je vzrok v neprimerni pripravi (načinu lepljenja) preskušancev in obliki preskušanca, zato bi bilo treba obstoječi standard SIST EN 12697-46 dopolniti tudi v tem delu.

6.2 Prispevek doktorske disertacije

Med prispevke k znanosti lahko prištevamo analizo vpliva deleža bitumna B50/70, vsebnosti votlin, prostorske gostote preskušanca in zapolnjenosti votlin v zmesi zrn z bitumnom (VFB) v sestavi bitumeniziranih zmesi AC 8 surf in AC 11 surf na rezultate preskusov pri nizkih temperaturah ter primerjavo med njimi. V dostopni znanstveni literaturi lahko zasledimo le analize bitumenizirane zmesi AC 11 surf pri nizkih temperaturah, vendar z drugačnimi osnovnimi materiali. Prispevek k znanosti je tudi ugotovitev, da se s povečanjem deleža bitumna nad 5 m.-% bistveno izboljša odpornost bitumenskega betona AC 11 surf proti nizkim temperaturah. Pomembna ugotovitev na tem področju je, da izkazujejo najboljšo korelacijo mehanskih lastnosti bitumenizirane zmesi z največjo rezervo natezne trdnosti in temperaturo pri največji rezervi.

Podrobneje smo pri bitumeniziranih zmesih AC 8 surf in AC 11 surf pregledali odnos med natezno trdnostjo (silo) in raztezkom (deformacijo), ki v znanstveni literaturi ni tako podrobno razložen in analiziran. Prispevek k znanosti je gotovo ugotovitev, da se pri preskusih UTST pri temperaturi 20 °C natezna trdnost, glede na delež bitumna v sestavi, malo spreminja. Pri višjih temperaturah pa se raztezek, glede na delež bitumna, bistveno spreminja, predvsem

zaradi lezenja viskozne komponente v sestavi. Pri nižjih temperaturah preskusa UTST je tudi deformacija enaka, ne glede na to, koliko bitumna je v sestavi. Prav tako ugotavljamo, da je v standardu EN 12697-46 pri preskusu UTST kot merilo ustreznosti preveč poudarjena natezna trdnost in premalo raztezek. Dostopna znanstvena literatura predvsem proučuje vpliv različnih dodatkov in različnih vrst bitumna na odpornost pri nizkih temperaturah.

Za prispevek k znanosti lahko štejemo tudi obsežno mednarodno primerjalno analizo rezultatov med priznanimi inštituti TU Wien (A), ZAG (SLO) in Ramtech (HR) pri nizkih temperaturah na enakih bitumeniziranih zmesih, kjer ugotavljamo, da obstajajo razlike med rezultati kljub enotnemu standardu EN 12697-46, po katerem se izvajajo preskusi pri nizkih temperaturah. V dostopni znanstveni literaturi to spoznanje še ni bilo objavljeno. Ugotovitve pomenijo, da bi bilo v prihodnje smiselno izboljšati zdajšnji standard EN 12697-46, predvsem:

- natančneje določiti pripravo (tolerance dolžine preskušanca?) in lepljenje preskušancev (način, vrsta, količina itd.);
- natančneje predpisati enačbo za izračun relativnega raztezka ob porušitvi ε_f , predvsem dolžino preskušanca L , saj nekateri inštituti v izračunu upoštevajo dejansko dolžino preskušanca, drugi pa predpisano dolžino preskušanca (npr. 160 mm);
- natančneje predpisati začetno temperaturo preskusa TSRST in
- določiti največji razpon med tremi posameznimi gostotami z votlinami preskušanca, saj s tem bistveno povečamo verjetnost, da bodo rezultati znotraj zahtevanih toleranc (ponavljanje preskusa zahteva dodaten čas in strošek).

Pri prečnem prikazu porušitve preskušancev je ugotovljeno, da je pri višjih temperaturah porušitev poševna in razgibana, pri nižjih pa praktično vodoravna, kar pomeni, da je porušitev nenadna (brez zmožnosti relaksacije) in poteka skozi bitumensko malto in kamnita zrna. Slednje je že predstavil v svoji doktorski disertaciji Mullenhauer (2008), vendar je uporabil drugačne osnovne materiale za bitumenizirane zmesi.

Prispevek k znanosti je celovita statistična analiza pridobljenih podatkov bitumenizirane zmesi SMA štirih mednarodno uveljavljenih in priznanih laboratorijev iz Evrope, med katerimi sta tudi dva, ki sta na tem področju vodilna na svetu. Ugotovitev z multivariatno statistično analizo po metodi glavnih komponent (PCA) je pokazala medsebojno odvisnost

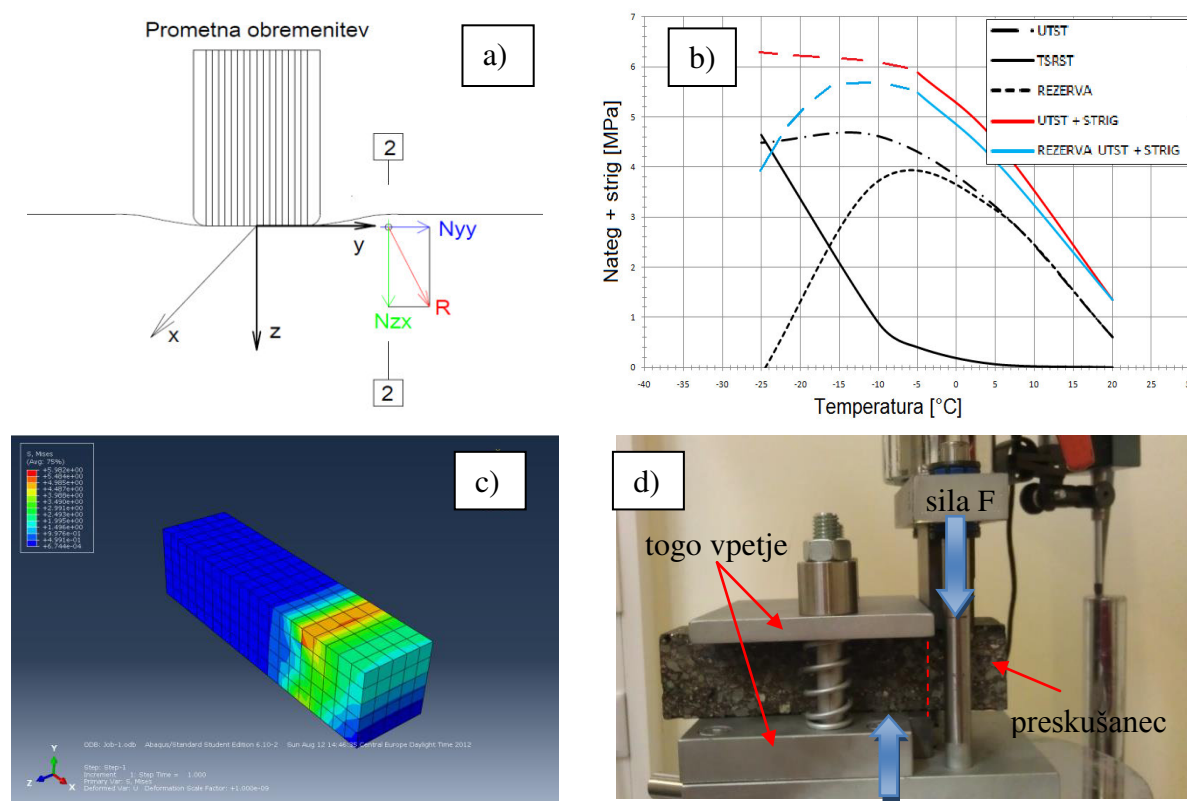
med rezultati TSRST, UTST in največjo rezervo natezne trdnosti ter temperaturo pri največji rezervi, prav tako tudi, statistično gledano, primerljivost rezultatov pri nizkih temperaturah med laboratoriji. Z metodo delnih najmanjših kvadratov (PLS) je predstavljena enačba modela za empirično določitev največje rezerve natezne trdnosti in temperature pri največji rezervi.

6.3 Priporočila in napotki za nadaljnje delo

Ob kolesni sledi deluje poleg natezne tudi strižna sila. S preskusom UTST, ki se trenutno izvaja za ugotavljanje enosne natezne trdnosti pri nizkih temperaturah, se določi predvsem natezna komponenta v odvisnosti od temperature.

To je koncept, ki ga je razvil Arand že leta 1987. Smiselno bi ga bilo nadgraditi s strižno komponento. Osnovna ideja, da bi določili tudi strižno komponento v odvisnosti od temperature ob kolesnici, je prikazana na sliki 6.3.1. V prerezu 2-2 ob kolesnici deluje poleg natezne sile N_{yy} tudi strižna sila N_{zx} (slika 6.3.1a). Rezultanta obeh sil je R . Tako bi dobili dopolnjen graf funkcije natezna trdnost – temperatura. Primer je prikazan na sliki 6.3.1b, kjer rdeča krivulja predstavlja rezultanto natezne in strižne sile R , modra krivulja pa sedaj spremenjeno rezervo trdnosti. Da bi določili strižno komponento, je treba razviti povsem novo laboratorijsko opremo, s katero bi lahko izvajali preskuse na enakih preskušancih in pod enakimi pogoji kot pri nateznem preskusu UTST. Prav gotovo bi bilo, predvsem zaradi stroškov, prej smiselno razviti model s sodobno računalniško opremo, kot je npr. ABAQUS, s katerim lahko modeliramo tudi visko-elastično obnašanje bitumenizirane zmesi (slika 6.3.1c). Prototip takšne enostavne strižne naprave je prikazan na sliki 6.3.1d, z njo je mogoče določiti strig na bitumeniziranem preskušancu $4 \cdot 4 \cdot 16 \text{ cm}^3$ pri določeni temperaturi.

Ker vemo, da promet ciklično obremenjuje vozišče, bi bilo treba to še nadalje razvijati. S tem bi bistveno prispevali k še boljšemu razumevanju obnašanja razpok na voziščih pri nizkih temperaturah.



Slika 6.3.1: Ideja in prototip naprave za določitev striga prizmatičnih preskušancev bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah

Figure 6.3.1: Idea and prototype of shear device for prismatic asphalt samples at low temperatures

7 POVZETEK

Razpoke različnih oblik in velikosti sodijo med najbolj razširjene poškodbe na bitumeniziranih voziščih. Osnovni vzrok za nastanek razpok v bitumenizirani plasti je naraščanje nateznih in strižnih napetosti in deformacije vse do točke prekoračitve trdnosti materiala. Takšna prekoračitev je predvsem posledica temperaturnih sprememb, sprememb bitumenskega veziva, čezmernih prometnih obremenitev in/ali pomanjkljivosti pri graditvi in vzdrževanju. Zato je poznavanje obnašanja razpok bistvenega pomena za raziskovalce, načrtovalce, graditelje in vzdrževalce. Izhodišče in jedro naloge je ugotoviti obnašanje bitumeniziranih zmesi AC 8 surf in AC 11 surf pri nizkih temperaturah, simuliranih v laboratoriju. V poglavju Pregled literature so zbrana zadnja znanstvena spoznanja o obnašanju bitumeniziranih zmesi pri nizkih temperaturah. Eksperimentalni del disertacije začnemo z laboratorijskimi preskusi bitumeniziranih zmesi AC 8 surf in AC 11 surf pri nizkih temperaturah, da bi ugotovili vpliv deleža bitumna in mehanskih lastnosti na rezultate preskusov TSRST in UTST ter največje rezerve natezne trdnosti in temperature pri največji rezervi. Laboratorijske preskuse nadaljujemo z analiziranjem vpliva različne začetne temperature pri preskusu TSRST na bitumenizirano zmes AC 8 surf pri 6,2 m.-% bitumna, izvedenem na TU Wien. Predstavljeni sta dve mednarodni primerjalni analizi rezultatov med TU Wien in Ramtechom ter med TU Wien in ZAG-om. Na podlagi ugotovitev analize podajamo predlog za izboljšavo standarda EN 12697-46, predvsem z natančnejšo navedbo priprave in lepljenja preskušancev, določitvijo enačbe za izračun raztezka in napetosti, upoštevanjem raztezka, ne samo napetosti in trdnosti, določitvijo začetne temperature preskusa TSRST. Med statističnimi analizami predstavljamo analizo tolerance, statistično analizo bitumeniziranih zmesi SMA, analizo največjega razpona prostorske gostote med tremi preskušanci za posamezen preskus in analizo mesta nastanka razpoke na preskušancu. Pri statistični analizi bitumenizirane zmesi SMA predstavljamo normalno porazdelitev, Studentov t-test, interval zaupanja, analizo variance (ANOVA), metodo glavnih komponent (PCA) in metodo najmanjših delnih kvadratov (PLS). Ob koncu dela podamo priporočila za nadaljnje raziskovalno delo, ob upoštevanju natezne in strižne napetosti ob kolesni sledi, v povezavi z nizkimi temperaturami na bitumeniziranih vozni površinah.

8 SUMMARY

Cracks of various shapes and sizes are among the most widespread damage to road surfaces. The main reason for the formation of cracks in the asphalt layer is increasing tensile and shear stress and strain to the point when the strength of the material exceeds. These damages are primarily due to temperature changes, changes in bituminous binder, excessive traffic load and/or deficiencies in construction and maintenance. So, the knowledge of the behaviour of cracks is essential both for researchers, planners and civil engineers. In the dissertation we focus on the behaviour of asphalt mixtures AC 8 surf and AC 11 surf at low temperatures, simulated in the laboratory. The latest scientific findings of behaviour of the asphalt mixtures at low temperatures are collected in the chapter Literature review. Experimental part of the dissertation begins with the laboratory tests of the asphalt mixture AC 8 surf and AC 11 surf at low temperatures to establish the influence of bitumen content and mechanical properties on the results of the TSRST and UTST tests as well as the maximum tensile strength reserve and the temperatures at maximum reserve. Laboratory tests continue with analyzing the influence of different start temperature at TSRST test on the asphalt mixture AC 8 surf at 6.2 m.-% content of bitumen. These tests were carried out at the TU Wien. The paper presents two international comparison analyses at low temperatures, one between TU Wien and Ramtech and the other between TU Wien and ZAG. Based on these findings we present a proposal to improve the standard EN 12697-46, especially with more accurate indication of preparation and gluing specimens, determining the formula for calculating strain and tension, taking into account the strain not only tension and strength, determining the start test temperature at TSRST. In the part of statistical analyses we present the analysis of tolerance, the statistical analysis of stone mastic asphalt (SMA) mixtures, the analysis of large scale bulk density of three samples for each test and the analysis where the crack occurred in the specimen. Within the statistical analysis of the SMA mixture we present the normal distribution, Student's t-test, the trust interval, the analysis of variance (ANOVA), the principal components method (PCA) and the partial least squares method (PLS). At the end of the work there are recommendations for further researches based on tensile and shear stress at low temperatures on the asphalt pavements.

VIRI

Arand, W. 1983. Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf das Ermüdungsverhalten von Asphalten. Straße und Autobahn, Heft 10: 424–430.

Arand, W. 1987a. Kälteverhalten von Asphalt; Teil 1: Bewertungshintergrund zur Beurteilung des Verhaltens von Walzasphalten bei Kälte. Die Asphaltstraße, Heft 3: 5–16.

Arand, W. 1987b. Influence of Bitumen hardness on the Fatigue Behavior of Asphalt Pavements of Different Thickness due to Bearing Capacity of Subbase, Traffic Loading and Temperature. Proceedings, 6th International Conference on Structural Behavior of Asphalt Pavements, Michigan, ISAP: 65–71.

Arand, W. 1996. Funktionelle Anforderungen an Bitumen und Asphalt – Prüftechnische Ansprache des Verformungswiderstandes der Riss Resistenz und der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten, Hamburg, ARBIT, Heft 3: 116 str.

Arand, W. 2000. Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten. Forschungsergebnisse und Schlussfolgerungen, Asphalt, Heft 1: 15–25.

Arand, W. 2002. On the crack resistance and the fatigue behavior of asphalts for pavements: 7. kolokvij o bitumnih. Gozd Martuljek, Združenje asfalterjev Slovenije: 3–15.

ARSO, Absolutna najnižja temperatura zraka s povratno dobo 50 let obdobje: 1952–2005, <http://www.arso.gov.si/vreme/podnebje/karte/karta4020.html> (pridobljeno 10. 2. 2012).

Bjerrum, J. T., Nielsen, O. H., Wang, Y. L., Olsen J. 2008. Technology Insight: metabonomics in gastroenterology – basic principles and potential clinical applications, Nature Clinical Practice Gastroenterology & Hepatology 5: 332–343.
http://www.nature.com/nrgastro/journal/v5/n6/fig_tab/ncpgasthep1125_F6.html (pridobljeno 20. 11. 2012).

Büchler, S., Mollenhauer, K., Renken, P. 2007. Einfluss von modifizierten Bitumen auf die Kälte – und Ermüdungseigenschaften von Asphalt und deren Veränderung während der

Nutzungsdauer. Wirtschaftsverlag N. W. Verlag für neue Wissenschaft, Forschungsbericht FE 07.208/2004/BGB: 102–105.

Büchler, S. 2010. Rheologisches Modell zur Beschreibung des Kälteverhaltens von Asphalten. Doktorat Dissertation. Braunschweig, Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig: 22–26, 32–33.

http://rzbl04.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00_011077/Dissertation_Buechler.pdf (pridobljeno 20. 1. 2012).

Boutin, G., Lupien C. 2000. Thermal cracking of asphalt pavement, 2nd Euroasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona 2000 – Proc.0267.uk, Book II. Barcelona, Eurobitume: 46–50.

Croarkin, C., Tobias, P. 2012. NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods. Gaithersburg (USA), National Institute of Standards and Technology.

<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm> (pridobljeno 20. 10. 2012).

Des Croix, P. 2004. Mechanical fatigue and thermal cracking test to evaluate pavement performance and comparison with binder properties, Eurobitume & Eurasphalt Congress, Vienna (database ID 641). In: Blab, R., Eberhardsteiner, J. 2005. Methoden der Strukturoptimierung flexibler Straßenbefestigungen, Vienna, TU Wien (ISTU), Heft 17: 341–361.

Drobne, S. 2009. Statistika z elementi informatike. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 143–145, 192–200.

http://www.fgg.uni-lj.si/sdrobne/Pouk/STAT/SEI_TUN_2prosojnici.pdf

(pridobljeno 25. 1. 2013).

Eulitz, H. 1987. Kälteverhalten von Walzasphalten; Prüftechnische Ansprache und Einfluss kompositioneller Merkmale (Low temperature performance of hot rolled asphalt: Laboratory testing and impact of compository characteristics), Braunschweig, Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig; Heft 7.

Ferligoj, A. 2013. Multivariatna analiza: Metoda glavnih komponent, Podiplomski študij statistike (predavanja). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko: 1–10.

<http://vlado.fmf.uni-lj.si/vlado/podstat/Mva/PCA.pdf> (pridobljeno 18. 10. 2013).

Grass, T. P., Hanson, D., Anderson, R. M., Wylie, K., Hansen, L., Duval, J., Humer, B., Young, T. J., Skinner, T., Warren, J., Phillips, J. A., Zimmerman, K., Compbell, R. 2007. The Asphalt Handbook (7th ed.) MS-4. Lexington, Asphalt Institute, Chapter 2, 11: 56–58, 506–545.

Grubbs, F. E. 1969. Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. American Statistical Association and American Society for Quality, Technometrics, Vol. 11, No. 1: 1–21.

http://web.ipac.caltech.edu/staff/fmasci/home/statistics_refs/OutlierProc_1969.pdf

(pridobljeno 18. 10. 2013).

Guericke, R., Höppel, H.-E. 2001. ARBIT-Untersuchungsprogramm 1998/99 an 36 Bindemitteln, Bitumen 1/2001, (database ID 700), In: Blab, R., Eberhardsteiner, J. 2005. Methoden der Strukturoptimerung flexibler Straßenbefestigungen. Vienna, TU Wien (ISTU), Heft 17: 341–361.

Hajj, E. Y. 2010. Updates on ARC Work Element E2d: Thermal Cracking Testing of Asphalt Mixtures, Asphalt Mixture & Construction Expert Task Group. Wisconsin – Madison, University of Nevada Reno: 25–27.

http://www.arc.unr.edu/Presentations/EYHajj_ARC_Update_Thermal_Cracking.pdf

(pridobljeno 18. 10. 2013).

Henigman, S. 2010. Voziščne konstrukcije na avtocestah in v predorih – asfalt ali beton? 14. od skupščine do skupščine, Strokovni prispevki. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije: 24–27.

Henigman, S., Bašelj, R., Britovšek, Z., Cotič, Z., Donko, D., Fortuna, I., Jurgele, M., Lamut, T., Ljubič, A., Naglič, O., Prešeren, M., Prosen, J., Tušar, M., Žmavc, J. 2011. Asfalt, 2. izd. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije: 262–279, 315–333.

Hribar, D. 2010. Asfalt in nastanek razpok pri nizkih temperaturah. Gradbenik, okt. 2010, priloga 2 (Ceste 2010): 17–18.

Hribar, D. 2011. Fenomen polkrožno oblikovanih razpok in model širjenja razpoke na vozišču: 13. kolokvij o asfaltih in bitumnih. Bled, Združenje asfalterjev Slovenije, Sklop 3: 177–185.

Hribar, D., Tušar, M. 2012. Vpliv deleža bitumna v sestavi bitumenskega betona na rezultate preskusov pri nizkih temperaturah (Properties of asphalt concrete at low temperatures). Gradbeni vestnik 61, 10: 241–246.

Jäger, A., Lackner, R., Eisenmenger-Sittner, Ch., Blab, R. 2004. Identification of four material phases in bitumen by atomic force microscopy. Road Materials and Pavement Design, Vol. 5, No. 1: 5–24.

Jung, D. H., in Vinson, T. S. 1994. SHRP-A-400, Low temperature cracking: test selection. Washington DC, SHRP, National Research Council: 5–93.

Justin, D., Bohinc, D. 2010. Vpliv staranja na reološke lastnosti bitumnov, 10. slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 136–138.

Karcher, C., Mollenhauer, K. 2009. Measuring and evaluating the characteristics of asphalt at low temperatures. The International Journal of Pavement Engineering & Asphalt Technology: 21–32.

http://www.ljmu.ac.uk/BLT/BUE_Docs/CompleteJournalMay2009FINAL.pdf (pridobljeno 10. 12. 2012).

Kononenko, I. 2005. Strojno učenje, 1. izd.. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko: 21–267.

Košmelj, K. 2007a. Uporabna statistika – 2., dopolnjena izd.. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta: 9–10.

http://www.bf.uni-lj.si/fileadmin/groups/2721/Uporabna_statistika_okt_2007/Uporabna_statistika_01.pdf (pridobljeno 6. 10. 2013).

Košmelj, K. 2007b. Metoda glavnih komponent: osnove in primer. *Acta agriculturae Slovenica*: 159–160.

<http://www.dlib.si/stream/URN:NBN:SI:doc-5HPSAL4U/3c55701d-91d6-4c4d-9e42-0880ea89aee5/PDF> (pridobljeno 22. 2. 2013).

Kumar Das, P. 2012. Thermally Induced Fracture Performance of Asphalt Mixtures. Division of Highway and Railway Engineering, KTH, Royal Institute of Technology; ISBN 978-91-85539-91-8: 12–15.

<ftp://ftp.mdt.mt.gov/research/LIBRARY/MN2007-43.PDF> (pridobljeno 10. 12. 2012).

Lecomte, M. J., Durand, G., Robert, M., Phillips M. C. 2000. Examination of the capability of SUPERPAVE test to predict the low-temperature performance of polymer-modified binders, Eurobitume & Eurasphalt congress, Barcelona, (database ID 514), In: Blab, R. Eberhardsteiner, J. 2005. Methoden der Strukturoptimerung flexibler Straßenbefestigungen. Vienna, TU Wien (ISTU), Heft 17: 341–361.

Lackner, R., Spiegl, M., Blab, R. 2005. Is low-temperature creep of asphalt mastic independent of filler shape and mineralogy? Arguments from multiscale analysis. *Journal of materials in civil engineering*, Vol. 17, Issue 5: 485–491.
DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:5(485).

Leutner, R., Renken, P., Lühje, U. 2000. Nutzungsdauer von Asphaltbefestigungen in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad. Braunschweig, AiF-Forschungsvorhaben, Nr. 11239, In: Mollenhauer, K., Karcher, C. 2009. Prüfung und Bewertung des Tieftemperaturverhaltens von Asphalt. *Gestrata Jurnal* 124: 21–28.

http://www.gestrata.at/archiv/journal/Journal_124.pdf (pridobljeno 2. 10. 2013).

Ljubič, A. 2006. Rezultati preiskav asfaltnih zmesi pri nizkih temperaturah, 8. slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 1–13.

Marasteanu, M., Zofka, A., Turos, M., Li, X., Velasquez, R., Li, X., Buttlar, W., Paulino, G., Braham, A., Dave, E., Ojo, J., Bahia, H., Williams, C., Bausano, J., Kvasnak, A., Gallistel, A., McGraw, J. 2007. Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt, Pavements-A Transportation Pooled Fund Study, MN/RC 2007-43. Minnesota, Department of Civil Engineering, University of Minnesota: 105–106, 155–156.

<http://www.lrrb.org/PDF/200743.pdf> (pridobljeno 2. 2. 2012).

Mohseni, A. 1998. FHWA-RD-97-103, LTPP Seasonal asphalt concrete (AC) pavement temperature models. McLean, Federal Highway Administration: 5–11, 17–27.

<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/97103/97103.pdf> (pridobljeno 20. 10. 2012).

Mollenhauer, K. 2008. Dimensionierungsrelevante Prognose des Ermüdungsverhaltens von Asphalt mittels einaxialer Zug-Schwellversuche, Doktorat Dissertation. Braunschweig, TU Braunschweig: 35–38, 44–46, 61–63.

<http://d-nb.info/990703789/34> (pridobljeno 20. 10. 2012).

Part, M. N., Vinso T. S. 1998. Abkühlverhalten von Splittmastix und Gussasphalt. Zürich, Straße und Verkehr Nr. 3: 86–92.

http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/17442/---/l (pridobljeno 20. 12. 2012).

Read, J., Whiteoak, D. 2003. The Shell Bitumen Handbook, 5th edition. London, Tomas Telford Publishing: 195–200.

SIST EN 12697-1:2012 – Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi – 1. del: Topni delež veziva.

SIST EN 12697-6:2004+A1:2007 (Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vzorčenje asfaltne zmesi – 6. del: Ugotavljanje gostote bitumenskih preskušancev), postopek B: SSD.

SIST EN 12697-33:2004+A1:2007 (Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vzorčenje asfaltne zmesi – 33. del: Preskušanci, pripravljani z valjastim zgoščevalnikom).

SIST EN 12697-46:2012 Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi – 46. del: Odpornost asfaltne plasti proti razpokam pri nizkih temperaturah z enoosnimi nateznimi preskusi; Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt – Part 46: Low temperature cracking and properties by uniaxial tension tests.

SIST EN 1426:2007 – Bitumen in bitumenska veziva – Določevanje penetracije igle.

SIST EN 1427:2007 – Bitumen in bitumenska veziva – Določevanje zmehčišča – Metoda prstana in kroglice.

SIST EN 12591:2009 – Bitumen in bitumenska veziva – Specifikacije za cestogradbene bitumne.

SIST EN 12593:2007 – Bitumen in bitumenska veziva – Določevanje pretrgališča po Fraassu.

SIST EN 14771:2012 – Bitumen in bitumenska veziva – Ugotavljanje upogibne togosti – Reometer z nosilcem, obremenjenim na upogib (BBR).

SIST EN 12697-23:2004 Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi – 23. del: Ugotavljanje posredne natezne trdnosti bitumenskih preskušancev.

SIST EN ISO 3838:2004 – Surova nafta in tekoči ali trdni naftni proizvodi – Določanje gostote ali relativne gostote – Metoda s piknometrom s kapilarnim zamaškom in metoda z graduiranim bikapilarnim piknometrom (ISO 3838:2004).

SIST EN 933-1:2012 – Preskusi geometričnih lastnosti agregatov – 1. del: Ugotavljanje zrnivosti – Metoda sejanja.

SIST EN 13043:2002/AC:2004 – Agregati za bitumenske zmesi in površinske prevleke za ceste, letališča in druge prometne površine.

SIST EN 13108-1:2006 – Bitumenske zmesi – Specifikacije materialov – 1. del: Bitumenski beton.

SIST EN 13108-20:2006 – Bitumenske zmesi – Specifikacije materialov – 20. del: Začetni preskus.

SIST 1038-1:2008/AC101:2009 – Bituminizirane zmesi – Specifikacije materialov – 1. del: Bitumenski beton – Zahteve – Pravila za uporabo SIST EN 13108-1 – Popravek AC101.

SIST EN 1097-3:1999 – Preskusi mehanskih in fizikalnih lastnosti agregatov – 3. del: Določevanje prostorninske mase in votlin v nasutem stanju.

SIST EN 12697-5:2010/AC:2012 – Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi – 5. del: Ugotavljanje največje gostote.

SIST EN 12697-8:2004 – Bitumenske zmesi – Preskusne metode za vroče asfaltne zmesi – 8. del: Ugotavljanje značilnosti votlin v bitumenskih preskušancih.

Spiegl, M., Wistuba, M., Lackner, R., Blab, R. 2005. Risk assessment of low-temperature cracking of asphalt – an experimental study, 11th International Conference on Fracture. Turin, Curran Associates, Vol. 3: 2376–2382.

<http://www.icf11.com/proceeding/EXTENDED/4546.pdf> (pridobljeno 15. 3. 2012).

Spiegl, M., Wistuba, M., Lackner, R., Blab, R. 2005. Evaluation of Temperature Associated cracking in Asphalt mixtures by means of performance – based laboratory testing, Proceedings of the 7th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Trondheim, Norway, In: Blab, R., Eberhardsteiner, J. 2005. Methoden der Strukturoptimierung flexibler Straßenbefestigungen. Vienna, TU Wien (ISTU), Heft 17: 195–211.

Spiegl, M. 2008. Tieftemperaturverhalten von bituminösen Baustoffen – Labortechnische Ansprache und numerische Simulation des Gebrauchsverhaltens, Dissertation. Vienna, TU Wien (ISTU), Heft 19: 13–41, 140–150.

Stangl, K., Blab, R. 2005. Bitumen test validation Project (BiTVal), In: Blab, R., Eberhardsteiner, J. 2005. Methoden der Strukturoptimierung flexibler Straßenbefestigungen, Bitumen test validation Project (BiTVal). Vienna, TU Wien (ISTU), Heft 17: 341–356.

Šajn Slak, A., Čarman, S., Kršmanc, R., Ivačič, M., Černivec, R., Herga, L. 2010. Vidiki razvoja cestnovremenskega informacijskega sistema, 10. slovenski kongres o cestah in prometu. Portorož, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 497 str.

TSC 06.300/06.410:2009 – Smernice in tehnični pogoji za graditev asfaltnih plasti. Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste: 16–22.

http://www.dc.gov.si/fileadmin/dc.gov.si/pageuploads/pdf_datoteke/TSC/TSC_06-300_410-2009.pdf (pridobljeno 12. 2. 2013).

TSC 06.300/06.410 (predlog, marec 2008) – Smernice in tehnični pogoji za graditev asfaltnih plasti, Ljubljana, Direkcija Republike Slovenije za ceste: 16–22.

Turk, G., Güttles, S., Jurišić, A., Zupan, D. 2012. Verjetnosti račun in statistika. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 203–209.

Tušar, M., Žorga, M. 2000. Asfalt 4: Statistika v asfalterstvu. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije: 5–50.

Tušar, M., Novič, M. 2009. Data exploration on standard asphalt mix analyses. Journal of chemometrics, Volume: 23, Issue: 5–6, DOI: 10.1002/cem.1229: 283–293.

Ulčar, M. 2006. Meritve na vodovodnih sistemih in ocena merilne negotovosti, diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 13–14.

http://drugg.fgg.uni-lj.si/807/1/VKI_0050_Ulcar.pdf (pridobljeno 12. 2. 2013).

Wistuba, M. 2002. Klimaeinflüsse auf Asphaltstraßen – Maßgebende Temperatur für die analytische Oberbaubemessung in Österreich, Dissertation. Vienna, TU Wien (ISTU): 29–151.

Wistuba, M. 2012. Innovations in asphalt pavement analysis: Mechanistic design using hourly time-increments, Delavnica o projektiranju voziščnih konstrukcij. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije: 1–19.

http://www.zdruzenje-zas.si/Razno/Delavnica_Projektiranje_Voziscnih_Konstrukcij/Michael_Wistuba.pdf (pridobljeno 25. 2. 2013).

Wistuba, Michael P., Walther, A. 2013. Consideration of climate change in the mechanistic pavement design. Road materials and pavement design, Volume: 14, Special Issue: SI, Supplement: 1, DOI: 10.1080/14680629.2013.774759: 227–241.

Wold, S; Sjöström, M.; Eriksson, L. 2001. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 58 (2): 109–130.

XLSTAT, the leading data analysis and statistical solution for Microsoft Excel. <http://www.xlstat.com/en/home/> (pridobljeno 25. 1. 2013).

Žmavc, J. 2010. Vzdrževanje cest, 1. izd.. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo in Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije: 38–41.

PRILOGE

PRILOGA A: REZULTATI PRESKUSOV ZA AC 11 SURF

Preglednica A.4.1.1: Rezultati preskusov TSRST in rezerve natezne trdnosti bitumeniziranih zmesi AC 11 surf

Table A.4.1.1: Results of TSRST test and tensile strength reserve of the asphalt mixtures AC 11 surf

Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca	Vsebnost votlin v preskušancu	Temp. ob porušitvi	Napetost ob porušitvi	Temperatura pri največji rezervi trdnosti	Največja rezerva natezne trdnosti
	ρ_{Ap}	V_{Ap}	T_f	$\sigma_{cry,f}$	$T_{\Delta\beta_{tmax}}$	$\Delta\beta_{tmax}$
	[kg/m ³]	[V.-%]	[°C]	[MPa]	[°C]	[MPa]
Sestava 1 (4 m.-% bitumna)						
002	2430	7,0	−24,8	3,842	$T_{\Delta\beta_{tmax}}$	$\Delta\beta_{tmax}$
003	2434	6,9	−26,3	4,282		
005	2436	6,8	−25,5	4,606	[°C]	[MPa]
x =	2433	6,9	−25,5	4,243	−7,3	3,991
s =	3,1	0,1	0,8	0,4		
Sestava 2 (5 m.-% bitumna)						
001	2432	5,3	−26,1	4,348	$T_{\Delta\beta_{tmax}}$	$\Delta\beta_{tmax}$
002	2449	4,7	−24,6	4,141		
003	2457	4,4	−24,6	4,044	[°C]	[MPa]
x =	2446	4,8	−25,1	4,178	−6,8	4,037
s =	12,8	0,5	0,9	0,2		
Sestava 3 (5,4 m.-% bitumna)						
001	2469	3,5	−25,4	4,537	$T_{\Delta\beta_{tmax}}$	$\Delta\beta_{tmax}$
004	2460	3,9	−26,5	4,679		
005	2461	3,8	−26,8	4,498	[°C]	[MPa]
x =	2463	3,7	−26,2	4,571	−7,8	4,379
s =	4,9	0,2	0,7	0,1		
Sestava 4 (5,8 m.-% bitumna)						
002	2474	2,3	−23,9	3,887	$T_{\Delta\beta_{tmax}}$	$\Delta\beta_{tmax}$
003	2475	2,3	−25,7	4,676		
004	2475	2,3	−23,8	4,049	[°C]	[MPa]
x =	2475	2,3	−24,5	4,204	−7,6	4,435
s =	0,6	0,0	1,1	0,4		
Sestava 5 (6 m.-% bitumna)						
001	2524	0,2	−28,9	4,583	$T_{\Delta\beta_{tmax}}$	$\Delta\beta_{tmax}$
002	2514	0,6	−27,5	4,399		
003	2518	0,5	−28,9	4,768	[°C]	[MPa]
x =	2519	0,4	−28,4	4,583	−10,5	4,591
s =	5,0	0,2	0,8	0,2		

Preglednica A.4.1.2: Rezultati preskusov UTST – sestava 1 (4 m.-%)

Table A.4.1.2: Results of UTST test – Mixture 1 (4 m.-%)

Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ε_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+20	003	2432	x = 2431 s = 3,055	0,913	x = 0,910 s = 0,005	0,58	x = 0,630 s = 0,074
	004	2434		0,904		0,595	
	005	2428		0,913		0,715	
+5	001	2434	x = 2434 s = 1,528	3,327	x = 3,152 s = 0,198	0,57	x = 0,542 s = 0,026
	002	2432		2,937		0,52	
	003	2435		3,192		0,535	
-10	002	2441	x = 2441 s = 0,577	4,702	x = 5,025 s = 0,447	0,475	x = 0,502 s = 0,042
	003	2441		5,535		0,55	
	004	2440		4,837		0,48	
-25	001	2447	x = 2446 s = 1,528	4,761	x = 4,503 s = 0,243	0,435	x = 0,408 s = 0,024
	002	2444		4,278		0,39	
	003	2446		4,469		0,4	

Preglednica A.4.1.3: Rezultati preskusov UTST – sestava 2 (5 m.-%)

Table A.4.1.3: Results of UTST test – Mixture 2 (5 m.-%)

Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ε_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+20	001	2460	x = 2458 s = 4,359	0,842	x = 0,834 s = 0,016	0,82	x = 0,880 s = 0,053
	003	2453		0,816		0,92	
	004	2461		0,845		0,9	
+5	001	2446	x = 2446 s = 1,528	3,104	x = 3,269 s = 0,154	0,655	x = 0,705 s = 0,048
	003	2444		3,294		0,75	
	004	2447		3,41		0,71	
-10	001	2452	x = 2455 s = 3,000	4,819	x = 4,999 s = 0,196	0,46	x = 0,485 s = 0,031
	003	2455		4,969		0,475	
	004	2458		5,208		0,52	
-25	001	2445	x = 448 s = 4,933	4,472	x = 4,579 s = 0,125	0,47	x = 0,468 s = 0,018
	002	2454		4,716		0,485	
	003	2446		4,549		0,45	

Preglednica A.4.1.4: Rezultati preskusov UTST – sestava 3 (5,4 m.-%)

Table A.4.1.4: Results of UTST test – Mixture 3 (5,4 m.-%)

Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ε_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+20	002	2482	x = 2471 s = 14,364	0,739	x = 0,717 s = 0,042	1,06	x = 1,063 s = 0,150
	003	2477		0,743		0,915	
	004	2455		0,668		1,215	
+5	001	2454	x = 2458 s = 5,292	3,008	x = 3,184 s = 0,154	0,735	x = 0,758 s = 0,032
	002	2456		3,296		0,745	
	004	2464		3,248		0,795	
-10	001	2468	x = 2462 s = 5,508	5,267	x = 5,397 s = 0,161	0,565	x = 0,577 s = 0,016
	002	2462		5,577		0,595	
	004	2457		5,348		0,57	
-25	001	2458	x = 2461 s = 3,512	4,134	x = 4,323 s = 0,164	0,465	x = 0,468 s = 0,003
	002	2461		4,415		0,47	
	004	2465		4,421		0,47	

Preglednica A.4.1.5: Rezultati preskusov UTST – sestava 4 (5,8 m.-%)

Table A.4.1.5: Results of UTST test – Mixture 4 (5,8 m.-%)

Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ε_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+20	001	2490	x = 2473 s = 15,011	0,671	x = 0,656 s = 0,025	1,285	x = 1,223 s = 0,063
	002	2464		0,67		1,16	
	003	2464		0,628		1,225	
+5	001	2466	x = 2467 s = 2,309	3,201	x = 3,198 s = 0,052	0,65	x = 0,675 s = 0,076
	002	2466		3,249		0,615	
	004	2470		3,145		0,76	
-10	001	2479	x = 2482 s = 4,619	5,142	x = 5,413 s = 0,256	0,535	x = 0,580 s = 0,040
	003	2479		5,445		0,595	
	004	2487		5,651		0,61	
-25	002	2483	x = 2484 s = 3,055	4,385	x = 4,510 s = 0,164	0,435	x = 0,457 s = 0,020
	003	2487		4,449		0,46	
	004	2481		4,696		0,475	

Preglednica A.4.1.6: Rezultati preskusov UTST – sestava 5 (6 m.-%)

Table A.4.1.6: Results of UTST test – Mixture 5 (6 m.-%)

Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ε_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+20	001	2523	x = 2516 s = 7,024	0,537	x = 0,521 s = 0,021	1,4	x = 1,377 s = 0,092
	002	2515		0,498		1,275	
	003	2509		0,529		1,455	
+5	001	2512	x = 2512 s = 4,509	2,566	x = 2,687 s = 0,135	0,84	x = 0,795 s = 0,043
	002	2507		2,661		0,79	
	003	2516		2,833		0,755	
-10	002	2520	x = 2521 s = 3,215	5,302	x = 5,213 s = 0,166	0,525	x = 0,518 s = 0,031
	003	2525		5,022		0,485	
	004	2519		5,315		0,545	
-25	001	2526	x = 2522 s = 4,041	4,513	x = 4,690 s = 0,154	0,385	x = 0,415 s = 0,033
	003	2521		4,77		0,41	
	004	2518		4,788		0,45	

PRILOGA B: REZULTATI PRESKUSOV ZA AC 8 SURF

Preglednica B.4.2.2: Rezultati preskusov TSRST in rezerve natezne trdnosti bitumeniziranih zmesi AC 8 surf

Table B.4.2.2: Results of TSRST test and tensile strength reserve of the asphalt mixtures AC 8 surf

Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca	Vsebnost votlin v preskušancu	Temp. ob porušitvi	Napetost ob porušitvi	REZERVA	
	ρ_{Ap}	V_{Ap}	T_f	$\sigma_{cry,f}$		
	[kg/m3]	[V.-%]	[°C]	[MPa]		
Sestava 1 (4 m.-%) ZAG (začetna temperatura $T_0 = 20\text{ °C}$)						
002	2436	6,0	-26,4	4,73	$T_{\Delta\beta_{max}}$	$\Delta\beta_{umax}$
003	2432	6,1	-28,2	4,70		
004	2433	6,1	-27,5	4,75	[°C]	[MPa]
x =	2434	6,1	-27,4	4,73	-7,4	4,448
s =	2,1	0,1	0,9	0,0		
Sestava 2 (5 m.-%) TU WIEN (začetna temperatura $T_0 = 10\text{ °C}$)						
K327D	2464	4,9	-32,3	4,25	$T_{\Delta\beta_{max}}$	$\Delta\beta_{umax}$
K327F	2445	5,6	-29,3	4,42		
K327M	2457	5,2	-30,0	4,17	[°C]	[MPa]
x =	2455	5,2	-30,5	4,28	-10,4	5,013
s =	9,6	0,4	1,6	0,1		
Sestava 2 (5 m.-%) RAMTECH (začetna temperatura $T_0 = 20\text{ °C}$)						
074-1	2445	5,6	-26,2	4,54	$T_{\Delta\beta_{max}}$	$\Delta\beta_{umax}$
074-2	2449	5,5	-25,5	4,33		
074-3	2453	5,3	-26,2	4,31	[°C]	[MPa]
x =	2449	5,5	-26,0	4,39	-4,6	3,311
s =	4,0	0,2	0,4	0,1		
Sestava 3 (5,4 m.-%) ZAG (začetna temperatura $T_0 = 20\text{ °C}$)						
001	2440	5,3	-25,4	4,86	$T_{\Delta\beta_{max}}$	$\Delta\beta_{umax}$
002	2455	4,7	-26,2	4,87		
003	2481	3,7	-25,0	4,50	[°C]	[MPa]
x =	2459	4,6	-25,5	4,74	-5,6	3,905
s =	20,7	0,8	0,6	0,2		
Sestava 4 (5,8 m.-%) TU WIEN (začetna temperatura $T_0 = 10\text{ °C}$)						
K328F	2464	3,7	-32,1	4,26	$T_{\Delta\beta_{max}}$	$\Delta\beta_{umax}$
K328L	2476	3,2	-31,4	3,78		
K328M	2466	3,6	-31,6	4,23	[°C]	[MPa]
x =	2469	3,5	-31,7	4,09	-12,6	5,435
s =	6,4	0,3	0,4	0,3		
Sestava 4 (5,8 m.-%) RAMTECH (začetna temperatura $T_0 = 20\text{ °C}$)						
075-1	2489	2,7	-30,0	4,52	$T_{\Delta\beta_{max}}$	$\Delta\beta_{umax}$
075-2	2469	3,5	-30,6	4,81		
075-3	2468	3,5	-31,5	4,75	[°C]	[MPa]
x =	2475	3,2	-30,7	4,69	-7,6	3,878

(se nadaljuje ...)

(... nadaljevanje)

s =	11,8	0,5	0,8	0,2		
Sestava 5 (6,2 m.-%) ZAG (začetna temperatura T ₀ = 20 °C)						
001	2509	1,3	−27,0	4,58	T _{Δβ_{max}}	Δβ _{max}
002	2504	1,5	−24,3	4,45		
003	2501	1,6	−26,8	4,83	[°C]	[MPa]
x =	2505	1,5	−26,0	4,62	−9,0	4,609
s =	4,0	0,2	1,5	0,2		
Sestava 5 (6,2 m.-%) TU WIEN (začetna temperatura T ₀ = 10 °C)						
K348A	2507	1,4	−31,5	5,44	T _{Δβ_{max}}	Δβ _{max}
K348B	2505	1,5	−31,7	4,82		
K348C	2503	1,5	−30,5	5,05	[°C]	[MPa]
x =	2505	1,5	−31,2	5,10	n. p.	n. p.
s =	2,0	0,1	0,6	0,3		
Sestava 5 (6,2 m.-%) TU WIEN (začetna temperatura T ₀ = 20 °C)						
K348D	2513	1,1	−31,4	5,07	T _{Δβ_{max}}	Δβ _{max}
K348F	2497	1,8	−31,4	5,5		
K348G	2512	1,2	−30,5	4,99	[°C]	[MPa]
x =	2507	1,4	−31,1	5,19	n. p.	n. p.
s =	8,9	0,4	0,5	0,3		

Preglednica B.4.2.3: Rezultati preskusov UTST – sestava 1 (4 m.-%), ZAG

Table B.4.2.3: Results of UTST test – Mixture 1 (4 m.-%), ZAG

Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ϵ_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+20	001	2450	x = 2431 s = 22,053	0,914	x = 0,919 s = 0,033	0,915	x = 0,888 s = 0,024
	003	2437		0,954		0,87	
	004	2407		0,889		0,88	
+5	001	2414	x = 2427 s = 16,258	3,275	x = 3,426 s = 0,140	0,61	x = 0,630 s = 0,039
	003	2445		3,553		0,675	
	004	2421		3,449		0,605	
-10	001	2439	x = 2426 s = 20,232	5,661	x = 5,361 s = 0,260	0,565	x = 0,565 s = 0,025
	003	2403		5,205		0,59	
	004	2437		5,218		0,54	
-25	001	2440	x = 2434 s = 16,442	5,009	x = 4,807 s = 0,313	0,485	x = 0,485 s = 0,020
	002	2415		4,446		0,465	
	003	2446		4,965		0,505	

Preglednica B.4.2.4: Rezultati preskusov UTST – sestava 2 (5 m.-%), TU WIEN

Table B.4.2.4: Results of UTST test – Mixture 2 (5 m.-%), TU WIEN

Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ε_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+5	K327A	2444	x = 2458 s = 12,503	2,44	x = 2,307 s = 0,174	0,434	x = 0,447 s = 0,033
	K327I	2467		2,11		0,4851	
	K327N	2464		2,37		0,4225	
-10	K327E	2471	x = 2457 s = 16,371	5,47	x = 5,360 s = 0,121	0,0795	x = 0,077 s = 0,008
	K327G	2439		5,23		0,0671	
	K327K	2461		5,38		0,0829	
-25	K327H	2464	x = 2459 s = 5,033	4,59	x = 5,067 s = 0,434	0,0235	x = 0,030 s = 0,006
	K327J	2458		5,44		0,0348	
	K327L	2454		5,17		0,0328	

Preglednica B.4.2.5: Rezultati preskusov UTST – sestava 2 (5 m.-%), RAMTECH

Table B.4.2.5: Results of UTST test – Mixture 2 (5 m.-%), RAMTECH

Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ε_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+20	074-3	2446	x = 2443 s = 4,243	0,611	x = 0,579 s = 0,055	0,283	x = 0,307 s = 0,034
	074-4	2440		0,515		0,331	
	074-5	n.p.		0,611		n.p.	
+5	074-6	2442	x = 2438 s = 3,606	2,857	x = 2,833 s = 0,022	0,183	x = 0,182 s = 0,003
	074-7	2437		2,816		0,179	
	074-8	2435		2,825		0,184	
-10	074-9	2439	x = 2441 s = 4,933	4,014	x = 4,004 s = 0,055	0,021	x = 0,022 s = 0,002
	074-10	2438		3,944		0,021	
	074-11	2447		4,053		0,024	
-25	074-12	2449	x = 2447 s = 3,464	3,798	x = 3,769 s = 0,051	0,015	x = 0,021 s = 0,011
	074-13	2443		3,711		0,015	
	074-14	2449		3,799		0,034	

Preglednica B.4.2.6: Rezultati preskusov UTST – sestava 3 (5,4 m.-%), ZAG

Table B.4.2.6: Results of UTST test – Mixture 3 (5.4 m.-%), ZAG

Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ε_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+20	001	2470	x = 2473 s = 10,817	0,617	x = 0,604 s = 0,012	1,205	x = 1,385 s = 0,156
	002	2464		0,594		1,485	
	003	2485		0,602		1,465	
+5	001	2470	x = 2479 s = 8,505	3,191	x = 3,211 s = 0,026	0,885	x = 0,835 s = 0,066
	002	2479		3,201		0,86	
	003	2487		3,241		0,76	
-10	002	2479	x = 2476 s = 4,359	4,544	x = 4,616 s = 0,084	0,455	x = 0,460 s = 0,005
	003	2471		4,597		0,46	
	005	2478		4,708		0,465	
-25	001	2435	x = 2454 s = 16,643	4,611	x = 4,485 s = 0,109	0,415	x = 0,418 s = 0,015
	002	2466		4,43		0,405	
	003	2461		4,415		0,435	

Preglednica B.4.2.7: Rezultati preskusov UTST – sestava 4 (5,8 m.-%), TU WIEN

Table B.4.2.7: Results of UTST test – Mixture 4 (5.8 m.-%), TU WIEN

Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ε_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+5	K328A	2476	x = 2476 s = 0,577	1,84	x = 1,987 s = 0,129	0,6700	x = 0,659 s = 0,079
	K328B	2476		2,04		0,7325	
	K328C	2477		2,08		0,5758	
-10	K328D	2479	x = 2475 s = 9,292	5,77	x = 5,647 s = 0,125	0,1264	x = 0,102 s = 0,021
	K328E	2481		5,65		0,0942	
	K328G	2464		5,52		0,0857	
-25	K328H	2491	x = 2489 s = 2,646	5,44	x = 5,803 s = 0,329	0,0335	x = 0,040 s = 0,005
	K328J	2490		5,89		0,0417	
	K328K	2486		6,08		0,0433	

Preglednica B.4.2.8: Rezultati preskusov UTST – sestava 4 (5,8 m.-%), RAMTECH

Table B.4.2.8: Results of UTST test – Mixture 4 (5.8 m.-%), RAMTECH

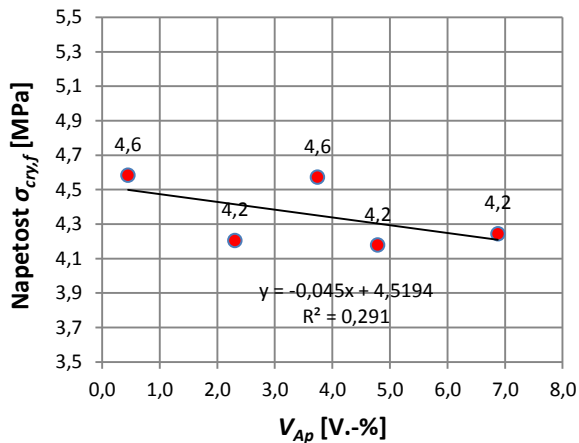
Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ε_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+20	075-3	2484	x = 2486 s = 8,737	0,835	x = 0,784 s = 0,068	0,81625	x = 0,723 s = 0,459
	075-4	2496		0,707		1,1275	
	075-5	2479		0,81		0,224375	
+5	075-6	2489	x = 2477 s = 16,971	2,9	x = 2,997 s = 0,089	0,31	x = 0,263 s = 0,063
	075-7	2465		3,074		0,215	
	075-8	n.p.		3,018		n.p.	
-10	075-9	2493	x = 2478 s = 13,000	4,481	x = 4,497 s = 0,016	0,028	x = 0,026 s = 0,005
	075-10	2471		4,496		0,029	
	075-11	2470		4,513		0,020	
-25	075-12	2491	x = 2478 s = 12,530	4,146	x = 4,156 s = 0,035	0,016	x = 0,065 s = 0,086
	075-13	2477		4,195		0,014	
	075-14	2466		4,127		0,164	

Preglednica B.4.2.9: Rezultati preskusov UTST – sestava 5 (6,2 m.-%), ZAG

Table B.4.2.9: Results of UTST test – Mixture 5 (6.2 m.-%), ZAG

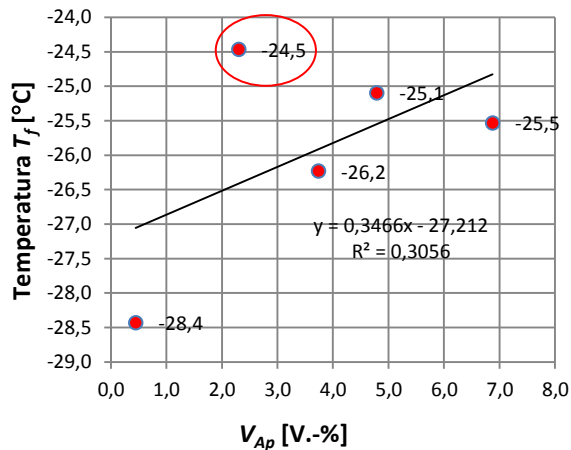
Temperatura pri preskusu T_i [°C]	Oznaka prizme	Gostota z votlinami preskušanca		Natezna trdnost ob porušitvi		Raztezek ob porušitvi	
		ρ_{Ap}		β_t		ε_t	
		[kg/m ³]		[MPa]		[%]	
+20	001	2496	x = 2503 s = 8,185	0,586	x = 0,581 s = 0,005	1,955	x = 1,687 s = 0,236
	002	2501		0,578		1,595	
	003	2512		0,578		1,51	
+5	001	2505	x = 2509 s = 3,512	3,041	x = 3,062 s = 0,111	0,87	x = 0,868 s = 0,018
	002	2512		2,963		0,85	
	003	2509		3,182		0,885	
-10	001	2505	x = 2504 s = 10,017	5,476	x = 5,554 s = 0,235	0,525	x = 0,538 s = 0,019
	003	2514		5,818		0,56	
	004	2494		5,369		0,53	
-25	001	2497	x = 2500 s = 4,619	5,471	x = 5,140 s = 0,324	0,505	x = 0,453 s = 0,046
	002	2497		4,824		0,415	
	004	2505		5,124		0,44	

PRILOGA C: VPLIV MEHANSKIH LASTNOSTI BITUMENIZIRANIH ZMESI PRI NIZKIH TEMPERATURAH



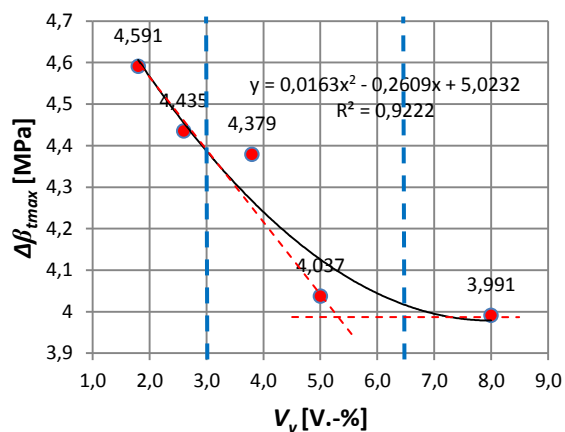
Slika C.4.4.1.1a: Diagram soodvisnosti med natežno napetostjo ob porušitvi in vsebnostjo votlin v preskušancu za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.1a: Diagram depending of tensile stress of failure and voids in sample at AC 11 surf



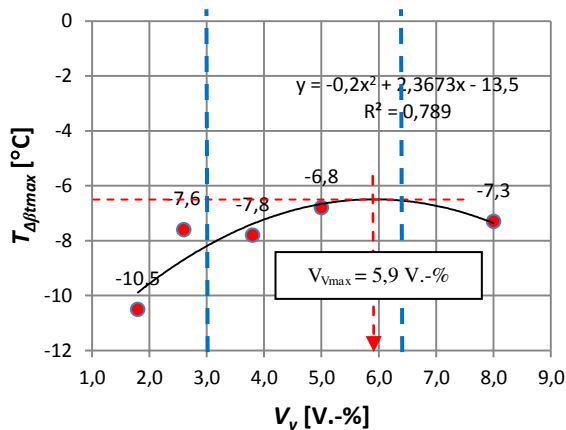
Slika C.4.4.1.1b: Diagram soodvisnosti med temperaturo ob porušitvi in vsebnostjo votlin v preskušancu za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.1b: Diagram depending of failure temperature and voids in sample at AC 11 surf



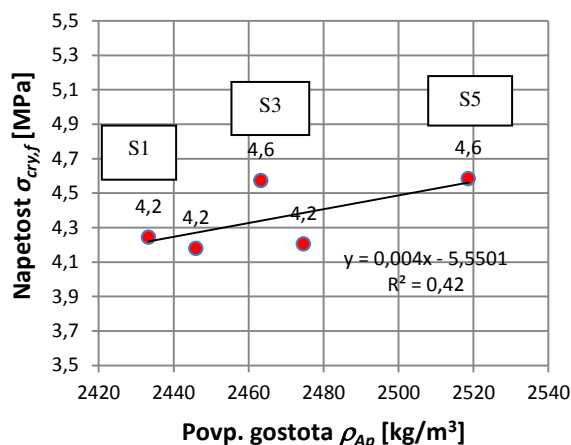
Slika C.4.4.1.2a: Diagram soodvisnosti med največjo rezervo natezne trdnosti in vsebnostjo votlin v bitumenizirani zmesi za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.2a: Diagram depending of maximum tensile strength reserve and voids in asphalt mixture AC 11 surf



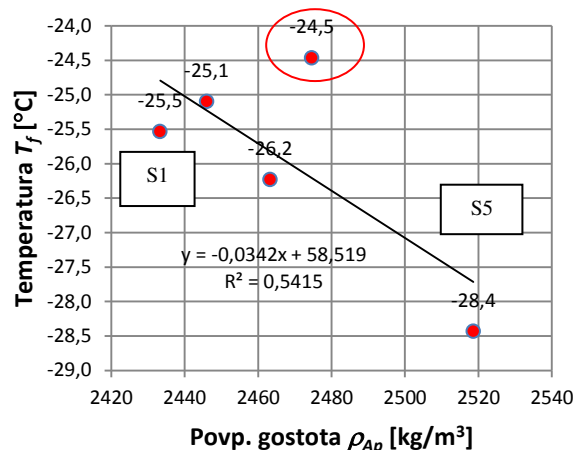
Slika C.4.4.1.2b: Diagram soodvisnosti med temperaturo pri največji rezervi natezne trdnosti in vsebnostjo votlin v bitumenizirani zmesi za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.2b: Diagram depending of temperature at maximum tensile strength reserve and voids in asphalt mixture AC 11 surf



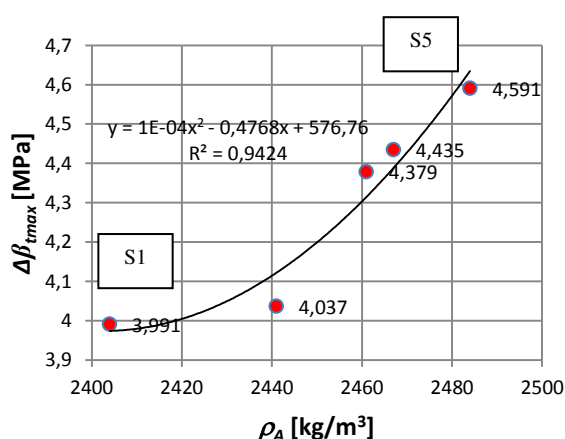
Slika C.4.4.1.3a: Diagram soodvisnosti med natežno napetostjo ob porušitvi in povprečno gostoto z votlinami preskušanca za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.3a: Diagram depending of tensile stress of failure and average bulk density of specimen at AC 11 surf



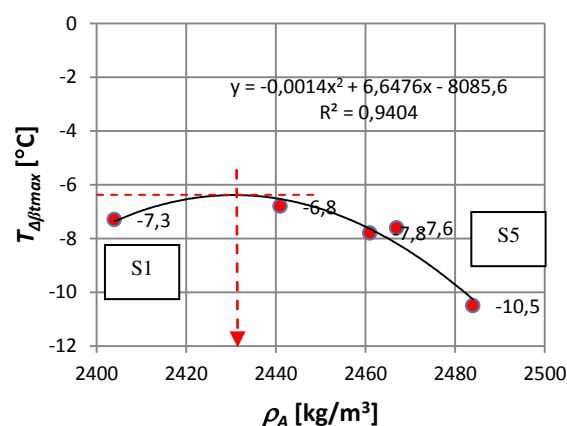
Slika C.4.4.1.3b: Diagram soodvisnosti med temperaturo ob porušitvi in povprečno gostoto z votlinami preskušanca za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.3b: Diagram depending of temperature at failure and average bulk density of specimen at AC 11 surf



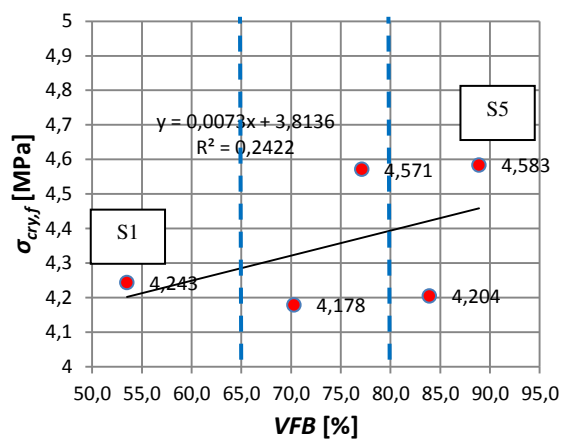
Slika C.4.4.1.5a: Diagram funkcije največje rezerve natezne trdnosti in gostote bitumenizirane zmesi za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.5a: Diagram depending of maximum tensile strength reserve and bulk density at AC 11 surf



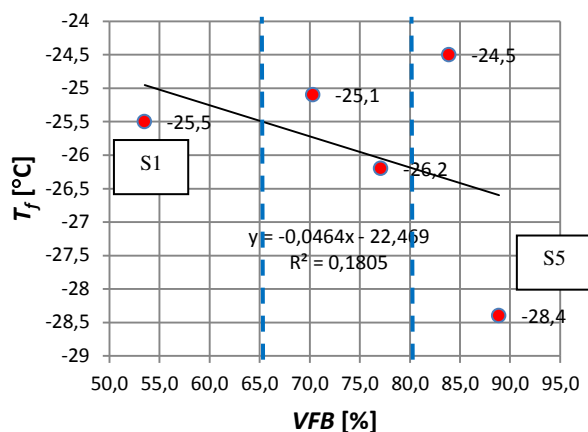
Slika C.4.4.1.5b: Diagram funkcije temperature pri največji rezervi in gostote bitumenizirane zmesi za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.5b: Diagram depending of temperature at maximum tensile strength reserve and bulk density at AC 11 surf



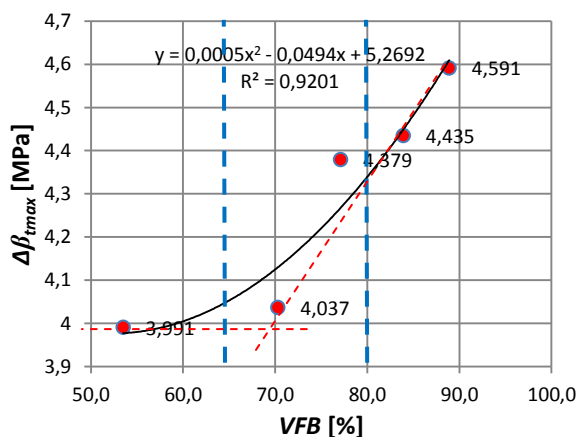
Slika C.4.4.1.6a: Diagram funkcije natezne napetosti ob poružitvi in VFB za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.6a: Diagram function of tensile stress and VFB at AC 11 surf



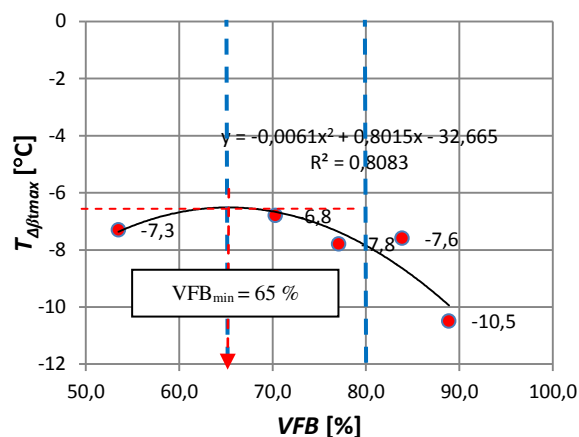
Slika C.4.4.1.6b: Diagram funkcije temperature ob poružitvi in VFB za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.6b: Diagram function of temperature of failure and VFB at AC 11 surf



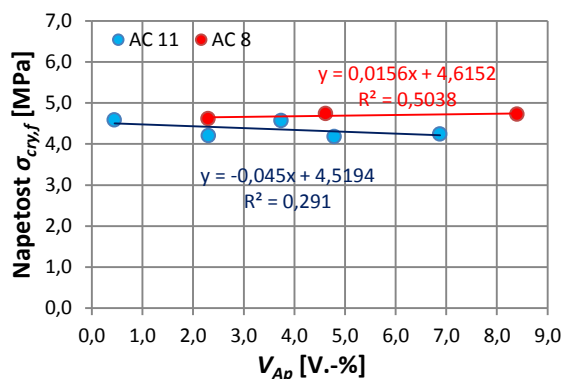
Slika C.4.4.1.7a: Diagram funkcije največje rezerve natezne trdnosti in VFB za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.7a: Diagram function of max. tensile strength reserve and VFB at AC 11 surf



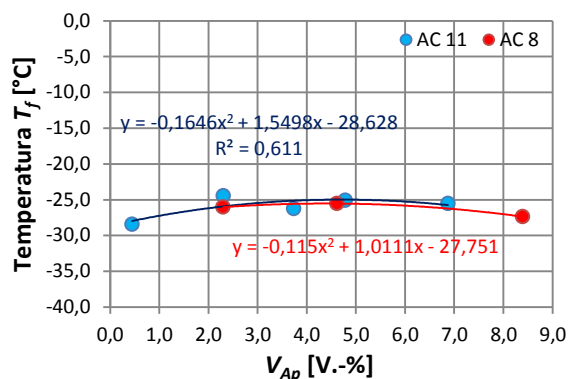
Slika C.4.4.1.7 b: Diagram funkcije temperature pri največji rezervi in VFB za AC 11 surf

Figure C.4.4.1.7b: Diagram function of temperature at maximum reserve and VFB at AC 11 surf



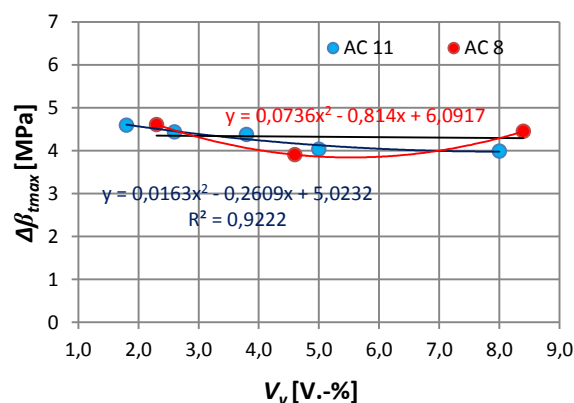
Slika C.4.4.2.1a: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: natezne napetosti ob porušitvi v odvisnosti od vsebnosti votlin v preskušancu

Figure C.4.4.2.1a: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: tensile stress at failure depending of voids in asphalt sample



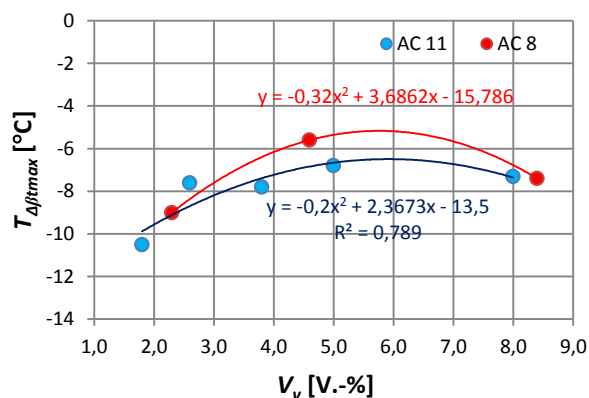
Slika C.4.4.2.1b: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: temperature ob porušitvi v odvisnosti od vsebnosti votlin v preskušancu

Figure C.4.4.2.1b: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: temperature at failure depending of voids in asphalt sample



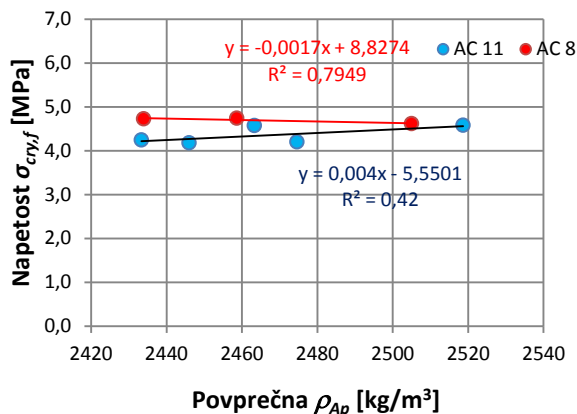
Slika C.4.4.2.2a: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: največja rezerva natezne trdnosti v odvisnosti od vsebnosti votlin bitumenizirane zmesi

Figure C.4.4.2.2a: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: maximum tensile strength reserve depending of voids in asphalt mixture



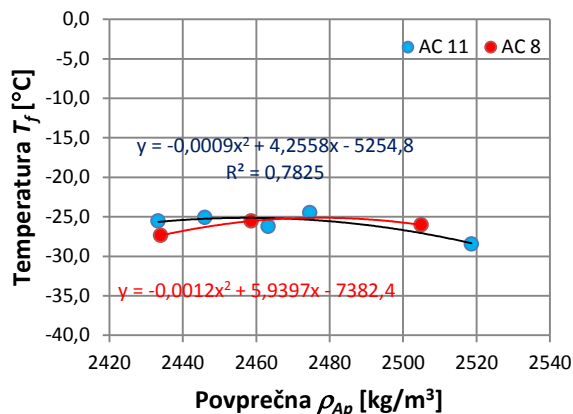
Slika C.4.4.2.2b: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: temperature pri največji rezervi v odvisnosti od vsebnosti votlin bitumenizirane zmesi

Figure C.4.4.2.2b: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: temperature at maximum reserve depending of voids in asphalt mixture



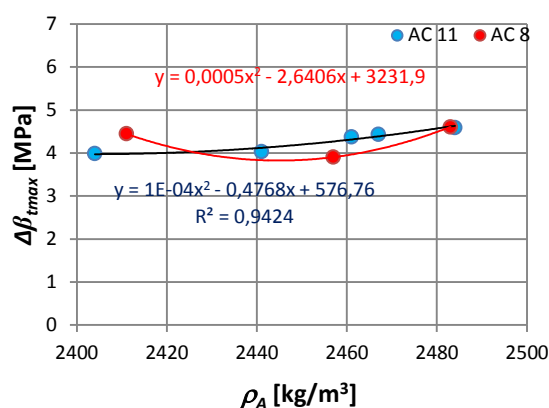
Slika C.4.4.2.3a: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: natezne napetosti ob porušitvi v odvisnosti od povprečne gostote z votlinami preskušancev

Figure C.4.4.2.3a: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: tensile stress at failure depending of bulk density of samples



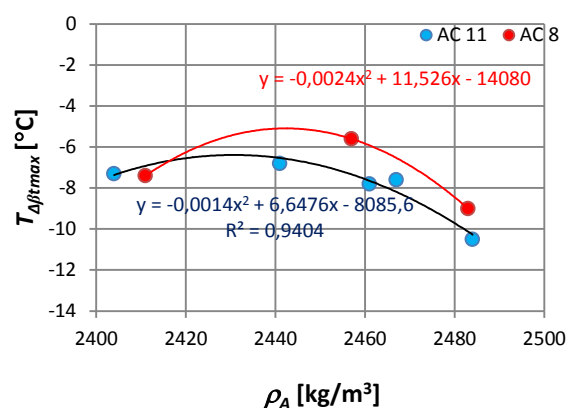
Slika C.4.4.2.3b: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: temperature ob porušitvi v odvisnosti od povprečne gostote z votlinami preskušancev

Figure C.4.4.2.3b: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: temperature at failure depending of bulk density of samples



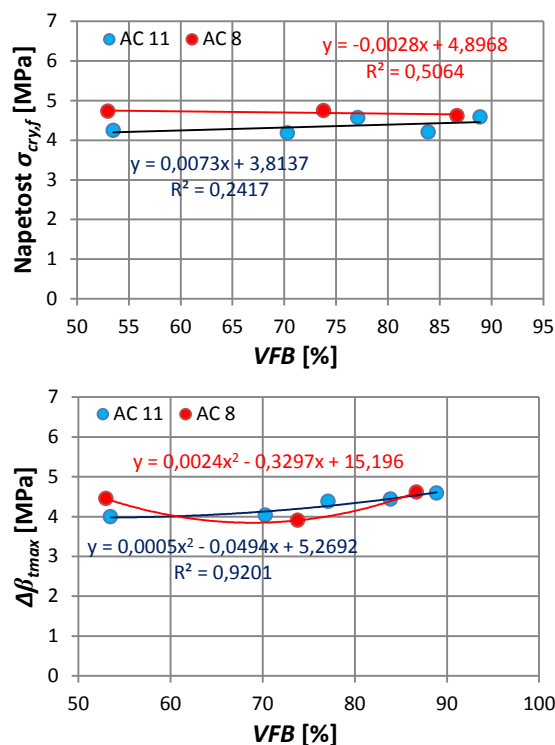
Slika C.4.4.2.4a: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: največja rezerva trdnosti v odvisnosti od gostote bitumeniziranih zmesi za AC 11 surf in AC 8 surf

Figure C.4.4.2.4a: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: max. strength reserve depending of the bulk density of asphalt mixture



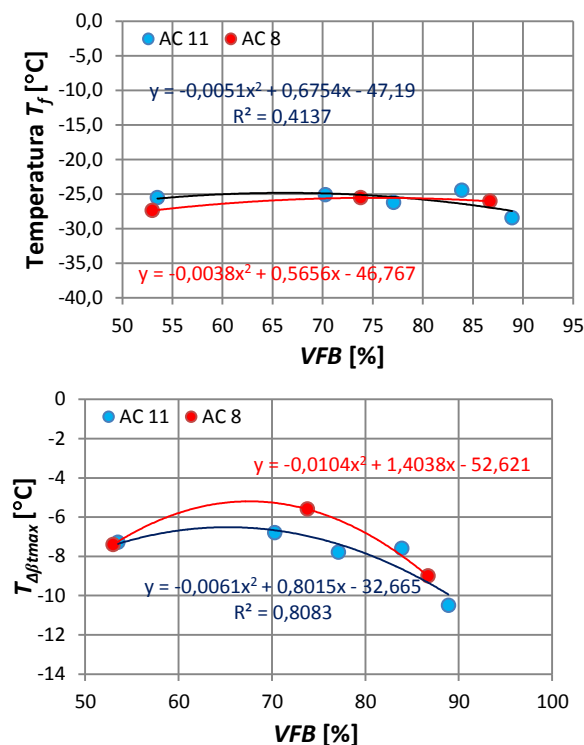
Slika C.4.4.2.4b: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: temperature pri največji rezervi v odvisnosti od prostorske gostote bitumeniziranih zmesi za AC 11 surf in AC 8 surf

Figure C.4.4.2.4b: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: temperature at max. strength reserve depending of the bulk density of asphalt mixture



Slika C.4.4.2.5a: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: rezultat TSRST in največja rezerva trdnosti v odvisnosti od VFB

Figure C.4.4.2.5a: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: results of TSRST and max. strength reserve depending of VFB



Slika C.4.4.2.5b: Primerjava med AC 11 surf in AC 8 surf: rezultat TSRST in temperature pri največji rezervi v odvisnosti od VFB

Figure C.4.4.2.5b: Comparison between AC 11 surf and AC 8 surf: results of TSRST and temperature at max. reserve depending of VFB

PRILOGA D: REZULTATI STATISTIČNE ANALIZE DOLŽIN PRESKUŠANCEV

Preglednica D.5.1.1: Rezultati izmerjenih dolžin prizmatičnega preskušanca (ZAG)

Table D.5.1.1: Results of measurement of the length of prismatic sample (ZAG)

Preskušane št.	Sestava 2 (5 % m.-bit.)		Sestava 4 (5,8 % m.-bit.)		Sestava 5 (6,2 % m.-bit.)	
	Dolžina preskušanca		Dolžina preskušanca		Dolžina preskušanca	
	1. meritev	2. meritev	1. meritev	2. meritev	1. meritev	2. meritev
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	161	161	161	161	161	161
2	161	161	161	161	161	161
3	161	160	161	161	161	161
4	161	161	161	161	161	161
5	160	161	160	160	161	161
6	160	161	160	160	161	161
7	161	161	162	162	161	161
8	161	161	162	162	161	161
9	160	161	162	162	161	161
10	160	161	162	162	161	160
11	161	161	162	162	160	160
12	161	161	162	162	161	160
13	161	161	162	162	161	161
14	161	161	161	162	162	161
15	161	161	162	162	162	162
16	161	161	161	161	161	161
17	161	161	161	161	161	161
18	161	161	161	161	161	161
19	161	161	162	162	161	161
20	161	161	162	162	161	161
21	161	161	162	162	161	161
22	160	161	161	161	161	161
23	161	161	161	161	161	161
24	161	161	161	162	162	162
STATISTIKA						
Povprečna vrednost – $\bar{x}$	160,8	161,0	161,4	161,5	161,1	161,0
Standardna deviacija – s	0,4	0,2	0,7	0,7	0,4	0,5
Največja vrednost – $x_{\max}$	161,0	161,0	162,0	162,0	162,0	162,0
Najmanjša vrednost – $x_{\min}$	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0
Razpon – R	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0
$\bar{x} + 3 \cdot s$	162,0	161,6	163,4	163,4	162,3	162,4
$\bar{x} - 3 \cdot s$	159,6	160,4	159,4	159,5	159,9	159,6
$G_{\min} (< 2,64164; \alpha = 0,05)$	1,9	*4,7	2,1	2,2	2,7	2,1
$G_{\max} (< 2,64164; \alpha = 0,05)$	0,5	0,2	1,0	0,8	2,3	2,2

*V celotnem vzorcu je samo ena meritev z vrednostjo 160, preostale so 161, zato $G_{\min}$ ni merodajen podatek.

Preglednica D.5.1.2: Rezultati izmerjenih dolžin prizmatičnega preskušanca (RAMTECH)

Table D.5.1.2: Results of measurement of the length of prismatic sample (RAMTECH)

Opis	Preskušane št.	Širina	Višina	Dolžina
		[mm]	[mm]	[mm]
Sestava 2 (5 m.-%. bit.)	1	39,7	40,3	160,2
	2	39,8	40,2	160,2
	3	39,9	40,1	160,2
	4	40,1	39,8	160,2
	5	40,1	39,9	160,1
	6	40,2	39,9	160,1
	7	40,1	39,9	160,0
	8	40,1	39,8	160,0
	9	40,3	39,7	160,0
	10	40,1	39,8	159,9
	11	40,0	40,1	159,8
	12	40,0	40,0	159,9
	13	39,8	40,2	159,9
	14	39,9	40,2	159,9
Sestava 4 (5,8 m.-%. bit.)	1	39,8	40,2	160,2
	2	40,0	39,9	160,2
	3	40,1	39,8	160,2
	4	40,0	40,0	160,2
	5	40,0	39,9	160,1
	6	40,0	40,1	160,1
	7	39,9	40,1	160,0
	8	39,9	40,1	160,0
	9	39,8	40,2	160,0
	10	39,8	40,1	159,9
	11	40,1	40,0	159,8
	12	40,0	40,0	159,9
	13	39,9	40,2	159,9
	14	39,7	40,3	159,9
STATISTIKA				
Število meritev – n		28	28	28
Povprečna vrednost – x		39,97	40,03	160,03
Standardna deviacija – s		0,15	0,17	0,14
Največja vrednost – $x_{\max}$		40,30	40,30	160,20
Najmanjša vrednost – $x_{\min}$		39,70	39,70	159,80
Razpon – R		0,60	0,60	0,40
$x + 3 \cdot s$		40,42	40,53	160,44
$x - 3 \cdot s$		39,52	39,53	159,62
$G_{\min} (< 2,7122; \alpha = 0,05)$		1,76	1,96	1,68
$G_{\max} (< 2,7122; \alpha = 0,05)$		2,23	1,62	1,26

PRILOGA E: REZULTATI STATISTIČNE ANALIZE PCA

Preglednica E.5.2.5.3: Vrednosti faktorjev po laboratorijih

Table E.5.2.5.3: Factor scores by laboratory

Laboratorij	Opazovanje	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
TU BRAUNSCHWEIG	Obs1	-0,297	-2,154	0,798	-0,284	-0,332	0,247	0,069
	Obs2	1,786	-0,623	0,558	0,303	-0,319	0,653	0,016
	Obs3	0,625	-1,004	0,788	0,267	-0,175	0,289	0,013
	Obs4	0,624	0,109	0,045	0,618	-0,241	0,177	-0,052
	Obs5	1,671	0,919	0,639	-0,269	-0,531	0,437	-0,071
	Obs6	0,850	1,162	0,032	-0,272	0,139	0,652	-0,026
	Obs7	0,867	-1,385	0,388	0,982	0,401	0,202	-0,034
	Obs8	-3,299	2,110	-0,188	0,038	-0,387	0,075	-0,163
	Obs9	-5,758	-0,744	-0,056	-0,100	0,429	0,432	0,112
	Obs10	-3,968	0,032	-0,530	-0,346	0,134	0,260	-0,037
	Obs11	-1,822	2,175	0,092	0,069	-0,722	-0,314	-0,122
	Obs12	-1,336	-2,791	0,060	0,339	0,784	-0,058	0,046
	Obs13	1,643	0,603	0,904	-0,051	-0,396	0,480	0,111
	Obs14	-2,603	1,219	0,127	0,466	0,033	0,068	-0,094
	Obs15	-3,908	1,103	0,237	0,971	-0,346	0,480	-0,108
TU WIEN	Obs16	0,200	-2,858	-0,360	1,004	0,293	-0,694	-0,075
	Obs17	1,595	0,396	-0,080	1,480	-0,571	-0,121	-0,020
	Obs18	-0,233	-1,663	0,126	0,376	-0,817	-0,186	-0,001
	Obs19	-0,670	-0,564	-0,199	1,076	-0,300	-0,203	-0,041
	Obs20	-1,027	-1,232	0,303	0,948	-0,284	-0,176	0,107
	Obs21	-0,468	-0,797	-0,472	0,228	0,671	0,586	0,102
	Obs22	-0,912	-0,959	-1,088	0,285	0,196	-0,744	-0,125
RAMTECH	Obs23	0,427	0,828	0,626	-0,676	0,144	-0,293	0,095
	Obs24	-0,320	0,410	0,879	-1,039	0,436	-0,265	-0,024
	Obs25	-2,229	2,011	1,130	0,960	0,229	-0,471	0,015
	Obs26	-0,068	-0,309	-0,051	-1,622	-0,875	-0,346	-0,088
	Obs27	2,159	-0,756	-0,230	-0,812	-0,153	0,411	-0,196
	Obs28	0,441	-0,221	0,597	-0,560	0,007	-0,216	0,082
	Obs29	1,491	-0,237	0,343	-0,552	0,245	0,062	-0,186
	Obs30	0,996	1,117	0,316	0,097	0,412	-0,072	-0,218
	Obs31	0,445	-1,347	-1,013	-0,548	-0,721	-0,374	-0,305
	Obs32	1,888	1,752	1,252	0,838	0,021	-0,606	0,346
	Obs33	0,990	1,211	2,507	-0,663	0,828	-0,491	0,222
	Obs34	-0,643	-0,367	0,085	-1,932	-0,676	-0,392	-0,080
	Obs35	0,211	0,124	1,076	-0,874	0,812	-0,057	-0,108
	Obs36	2,450	0,875	0,104	-0,058	0,041	0,140	-0,073
	Obs37	-0,475	-0,638	-0,151	-0,793	-0,833	0,322	0,591
	Obs38	-1,469	-0,155	-1,133	-1,313	1,234	0,115	0,009
ZAG	Obs39	2,876	-0,589	0,492	0,295	0,140	0,258	-0,125
	Obs40	2,436	1,453	-0,311	0,878	0,595	0,151	-0,189
	Obs41	0,955	-1,295	0,323	0,215	0,052	-0,162	0,137
	Obs42	1,502	1,471	-3,168	-0,200	0,052	-0,102	0,143
	Obs43	0,301	1,067	-2,624	0,269	-0,116	-0,174	0,270
	Obs44	2,076	0,543	-3,173	-0,036	0,467	0,019	0,075

PRILOGA F: REZULTATI STATISTIČNE ANALIZE RAZPONA GOSTOTE PRESKUŠANCEV

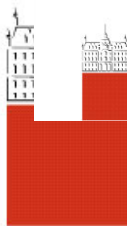
Preglednica F.5.3.1: Podatki o gostoti presku. in rezultati preskusa UTST za AC 11 surf in AC 8 surf (ZAG)

Table F.5.3.1: Data of bulk density of samples and results of UTST test for AC 11 surf and AC 8 surf (ZAG)

Vrsta BZ	UTST 20 °C			UTST 5 °C			UTST -10 °C			UTST -25 °C		
	ρ_{Ap}	β_t	ε_f	ρ_{Ap}	β_t	ε_f	ρ_{Ap}	β_t	ε_f	ρ_{Ap}	β_t	ε_f
	[kg/m ³]	[MPa]	[%]	[kg/m ³]	[MPa]	[%]	[kg/m ³]	[MPa]	[%]	[kg/m ³]	[MPa]	[%]
AC 11 surf (4 m.-% bit.)	2432	0,913	0,58	2434	3,327	0,57	2441	4,702	0,475	2447	4,761	0,435
	2434	0,904	0,595	2432	2,937	0,52	2441	5,535	0,55	2444	4,278	0,39
	2428	0,913	0,715	2435	3,192	0,535	2440	4,837	0,48	2446	4,469	0,4
AC 11 surf (5 m.-% bit.)	2460	0,842	0,82	2446	3,104	0,655	2452	4,819	0,46	2445	4,472	0,47
	2453	0,816	0,92	2444	3,294	0,75	2455	4,969	0,475	2454	4,716	0,485
	2461	0,845	0,9	2447	3,41	0,71	2458	5,208	0,52	2446	4,549	0,45
AC 11 surf (5,4 m.-% bit.)	2482	0,739	1,06	2454	3,008	0,735	2468	5,267	0,565	2458	4,134	0,465
	2477	0,743	0,915	2456	3,296	0,745	2462	5,577	0,595	2461	4,415	0,47
	2455	0,668	1,215	2464	3,248	0,795	2457	5,348	0,57	2465	4,421	0,47
AC 11 surf (5,8 m.-% bit.)	2490	0,671	1,285	2466	3,201	0,65	2479	5,142	0,535	2483	4,385	0,435
	2464	0,67	1,16	2466	3,249	0,615	2479	5,445	0,595	2487	4,449	0,46
	2464	0,628	1,225	2470	3,145	0,76	2487	5,651	0,61	2481	4,696	0,475
AC 11 surf (6 m.-% bit.)	2523	0,537	1,4	2512	2,566	0,84	2520	5,302	0,525	2526	4,513	0,385
	2515	0,498	1,275	2507	2,661	0,79	2525	5,022	0,485	2521	4,77	0,41
	2509	0,529	1,455	2516	2,833	0,755	2519	5,315	0,545	2518	4,788	0,45
AC 8 surf (4 m.-% bit.)	2450	0,914	0,915	2414	3,275	0,61	2439	5,661	0,565	2440	5,009	0,485
	2437	0,954	0,87	2445	3,553	0,675	2403	5,205	0,59	2415	4,446	0,465
	2407	0,889	0,88	2421	3,449	0,605	2437	5,218	0,54	2446	4,965	0,505
AC 8 surf (5,4 m.-% bit.)	2470	0,617	1,205	2470	3,191	0,885	2479	4,544	0,455	2435	4,611	0,415
	2464	0,594	1,485	2479	3,201	0,86	2471	4,597	0,46	2466	4,43	0,405
	2485	0,602	1,465	2487	3,241	0,76	2478	4,708	0,465	2461	4,415	0,435
AC 8 surf (6,2 m.-% bit.)	2496	0,586	1,955	2505	3,041	0,87	2505	5,476	0,525	2497	5,471	0,505
	2501	0,578	1,595	2512	2,963	0,85	2514	5,818	0,56	2497	4,824	0,415
	2512	0,578	1,51	2509	3,182	0,885	2494	5,369	0,53	2505	5,124	0,44
ZAHTEVA (EN 12697-46)	$R(\beta_t) \leq 0,1 \text{ MPa}$			$R(\beta_t) \leq 0,3 \text{ MPa}$			$R(\beta_t) \leq 0,7 \text{ MPa}$			$R(\beta_t) \leq 0,7 \text{ MPa}$		
Število meritev – n	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Povprečna vrednost – x	2469,54	0,718	1,142	2466,29	3,149	0,726	2470,96	5,197	0,528	2468,50	4,630	0,447
Standardna deviacija – s	30,456	0,148	0,343	31,087	0,232	0,112	31,130	0,356	0,049	29,898	0,299	0,035
Največja vrednost – x _{max}	2523,00	0,954	1,955	2516,00	3,553	0,885	2525,00	5,818	0,610	2526,00	5,471	0,505
Najmanjša vrednost – x _{min}	2407,00	0,498	0,580	2414,00	2,566	0,520	2403,00	4,544	0,455	2415,00	4,134	0,385
Razpon – R	116,00	0,456	1,375	102,00	0,987	0,365	122,00	1,274	0,155	111,000	1,337	0,120
x + 3 · s	2560,909	1,162	2,170	2559,552	3,845	1,062	2564,349	6,266	0,674	2558,195	5,528	0,551
x – 3 · s	2378,174	0,274	0,113	2373,031	2,452	0,390	2377,568	4,129	0,382	2378,805	3,731	0,342
G _{min} (< 2,578; α = 0,05)	2,054	1,485	1,638	1,682	2,508	1,841	2,183	1,835	1,503	1,789	1,655	1,774
G _{max} (< 2,578; α = 0,05)	1,755	1,596	2,372	1,599	1,741	1,421	1,736	1,743	1,683	1,923	2,810	1,678

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



DEJAN HRIBAR

**ANALIZA VPLIVA NIZKIH TEMPERATUR NA
ZNAČILNOSTI BITUMENIZIRANIH ZMESI ZA
OBRABNE PLASTI NA VOZIŠČIH**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ljubljana, 2014