

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



ROK ROŠER

**TEMPERATURN A SEGREGACIJA PRI
VGRADNJI ASFALJNIH ZMESI**

MAGISTRSKO DELO

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE
STOPNJE GRADBENIŠTVO**

Ljubljana, 2020

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Jamova cesta 2, p.p. 3422
1001 Ljubljana, Slovenija
T: (01) 47 68 500
E: referat@fgg.uni-lj.si
W: www.fgg.uni-lj.si*



**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE
STOPNJE GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

ROK ROŠER

TEMPERATURN A SEGREGACIJA PRI VGRADNJI ASFALJNIH ZMESI

Magistrsko delo št.:

TEMPERATURE SEGREGATION IN ASPHALT MIXTURE PLACEMENT

Graduation – Master thesis No.:

Mentor:

izr. prof. dr. Marijan Žura

Predsednik komisije:

Somentor:

viš. pred. dr. Robert Rijavec

Član komisije:

Ljubljana, 2020

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 625.7:691(043.3)
Avtor: Rok Rošer, dipl. inž. grad. (UN)
Mentor: izr. prof. dr. Marijan Žura
Naslov: Temperaturna segregacija pri vgradnji asfaltnih zmesi
Tip dokumenta: Magistrsko delo
Obseg in oprema: 113 str., 19 pregl., 32 graf., 79 sl., 2 pril.
Ključne besede: asfaltna zmes, asfaltna vozišča, temperaturna segregacija, tehnična specifikacija za ceste, kontrola temperature, infrardeča termografija

IZVLEČEK

V magistrskem delu je obravnavan problem temperaturne segregacije pri vgradnji asfaltnih zmesi. Jedro vsebine je vrednotenje ustreznosti slovenske tehnične regulative glede kontrole temperaturne segregacije, do katere pride zaradi različnega ohlajanja asfaltnih zmesi med transportom in vgrajevanjem. V magistrskem delu so najprej na splošno opisane asfaltnih zmesi, njihova sestava in klasifikacija. Nato je predstavljena temperaturna segregacija, za katero literatura navaja, da je zelo pogost problem, ki se pojavlja pri vgrajevanju asfaltnih zmesi. Temperaturna segregacija poslabša lastnosti asfaltnih zmesi, zaradi česar se lahko njihova življenjska doba zmanjša tudi za 50 % in več. Vse to vodi v povečanje stroškov, saj je treba asfaltno vozišče predčasno sanirati. V magistrskem delu je predstavljena uporaba infrardeče termografije, ki omogoča učinkovito odkrivanje temperaturne segregacije. Nadalje je proučena slovenska tehnična regulativa v zvezi s kontrolo temperature pri vgrajevanju asfaltnih zmesi. Poleg tega so proučene specifikacije iz ZDA, s Švedske in Norveške, saj so v njih predpisani postopki za kontrolo temperaturne segregacije.

Po teoretičnem opisu tematike so predstavljene izvedene meritve temperature. Meritve so se izvedle v okviru projekta odstranitve cestninske postaje Videž na avtocesti A1, kjer se je del avtoceste rekonstruiral. Merjenje temperature je potekalo na več načinov, saj so se uporabljali infrardeči termometer, kontaktni termometer, termovizijska kamera in termoskenner. Izvajanje in vrednotenje meritev je potekalo v skladu s slovensko tehnično regulativo in tujimi specifikacijami. Meritve so pokazale, da je med vgrajevanjem prišlo do temperaturne segregacije, ki pa je kontrola, predpisana s slovensko tehnično regulativo, ni uspela v celoti zaznati, kot tudi ne ovrednotiti. Po drugi strani so tuje specifikacije uspešno ocenile temperaturno segregacijo, saj imajo predpisane postopke in merila za vrednotenje omenjenega problema. V zadnjem poglavju magistrskega dela so obravnavani ukrepi, ki se lahko izvajajo v primeru, če do temperaturne segregacije pride, in ukrepi za njeno preprečevanje. V zaključku so podane ugotovitve, komentarji in predlogi za izboljšanje slovenske tehnične regulative.

»Ta stran je namenoma prazna.«

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 625.7:691(043.3)
Author: Rok Rošer, B. Sc. Civil Engineering
Supervisor: Assoc. Prof. Marijan Žura, Ph. D.
Title: Temperature Segregation in Asphalt Mixture Placement
Document type: Master Thesis
Scope and tools: 113 p., 19 tab., 32 graph., 79 fig., 2 ann.
Keywords: asphalt mixture, asphalt pavements, temperature segregation, technical specification for roads, temperature control, infrared thermography

ABSTRACT

The master's thesis addresses the temperature segregation problem in asphalt mixture placement. The core of the content is adequacy evaluation of the Slovenian technical legislation regarding the control of temperature segregation, which occurs due to different cooling of the asphalt mixture during transport and placement. The master's thesis first describes asphalt mixtures in general, their composition and classification. Next, the temperature segregation is presented. Literature reports the latter to be a very common problem that occurs during the placement of asphalt mixture. Temperature segregation impairs the properties of the asphalt mixture, which can reduce its lifetime by as much as 50% or more. All this leads to an increase in costs as the asphalt pavement needs to be repaired prematurely. In the master's thesis the use of an IR thermography, which enables an efficient detection of the temperature segregation, is presented. The Slovenian technical legislation regarding the temperature control during the placement of asphalt mixture is further examined. In addition, specifications from the USA, Sweden and Norway are reviewed, as they set out procedures for controlling temperature segregation.

After the theoretical description of the topic, the performed temperature measurements are presented. Measurements were carried out during the project of Videž toll station removal on the A1 highway, where part of the highway was reconstructed. The temperature was measured in several ways, using an IR thermometer, a contact thermometer, a thermal camera and an IR temperature scanner. Measurements were carried out and evaluated in accordance with Slovenian and foreign specifications. Measurements showed that during the asphalt placement temperature segregation occurred, which the control prescribed by Slovenian technical legislation failed to fully detect or evaluate. On the other hand, foreign specifications have successfully evaluated temperature segregation, as they have prescribed procedures and criteria for evaluating the considered problem. The last chapter of the master's thesis addresses measures that can be taken if the temperature segregation occurs and measures that can be taken to prevent it. In the conclusion, findings, comments and suggestions for improving the Slovenian technical legislation are given.

»Ta stran je namenoma prazna.«

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Marijanu Žuri in somentorju viš. pred. dr. Robertu Rijavcu za strokovne nasvete in usmerjanje pri pisanju magistrskega dela. Prav tako se iskreno zahvaljujem prezgodaj preminulemu izr. prof. dr. Romanu Kuniču, ki je priskrbel merilno opremo in mi svetoval pri njeni uporabi.

Velika zahvala gre zaposlenim v podjetju Kolektor CPG, d. o. o., ki so priskrbeli svojo merilno opremo in omogočili izvajanje meritev. Zahvaljujem se ge. Karmen Čibej za podporo in usmerjanje znotraj njihovega podjetja in za koordiniranje izvajanja meritev, g. Sebastjanu Černigoju za posredovane meritve in programsko opremo za analizo meritev ter nasvete pri uporabi programske opreme, g. Simonu Operčkalu za posredovano dokumentacijo in podatke o projektu in g. Valterju Ličerju za posredovane dodatne meritve, ki sem jih vključil v magistrsko delo. Vsem zaposlenim se neizmerno zahvaljujem za njihov čas in trud, saj so prispevali velik del pri nastajanju magistrskega dela.

Hvala družini za vso podporo, razumevanje in toplino. Iskreno se zahvaljujem staršem, ki so mi omogočili študij, me pri tem podpirali in spodbujali.

Zahvaljujem se svojim prijateljem, s katerimi sem preživel študentska leta in ki so mi ta čas polepšali ter naredili nekaj posebnega.

Posebej se zahvaljujem svoji puncici Valentini, ki mi je ves čas stala ob strani, me spodbujala in mi svetovala ter me s svojo ljubeznijo vedno podpirala.

Na koncu bi se zahvalil tudi Republiki Sloveniji, ki mi je omogočila brezplačen študij in vso finančno pomoč v obliki državne štipendije, subvencioniranega bivanja in subvencionirane študentske prehrane. Čeprav se to morda zdi samoumevno, pa je redko kje zaslediti takšno podporo študiju, kot jo imamo v naši državi.

»Ta stran je namenoma prazna.«

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE.....	I
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	V
ZAHVALA.....	VII
KAZALO VSEBINE.....	IX
KAZALO PREGLEDNIC.....	XI
KAZALO GRAFIKONOV.....	XII
KAZALO SLIK.....	XIV
SEZNAM PRILOG.....	XVII
LIST OF TABLES.....	XVIII
LIST OF GRAPHS.....	XIX
LIST OF FIGURES.....	XXI
LIST OF APPENDICES.....	XXIV
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	XXV
SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK.....	XXVII
1 UVOD.....	1
1.1 Namen, cilj in hipoteza magistrskega dela.....	2
1.2 Metode in tehnike dela.....	3
2 ASFALTNE ZMESI.....	4
2.1 Sestava asfaltnih zmesi.....	4
2.1.1 Bitumenska veziva.....	4
2.1.1.1 Splošno o bitumenskih vezivih.....	4
2.1.1.2 Vrste bitumenskih veziv.....	6
2.1.2 Zmesi zrn.....	7
2.1.3 Dodatki.....	9
2.2 Vrste asfaltnih zmesi.....	9
3 TEMPERATURNNA SEGREGACIJA PRI VGRADNJI ASFALTNIH ZMESI.....	12
3.1 Opis problema in vzroki za nastanek.....	12
3.2 Vpliv temperaturne segregacije na asfaltne zmesi.....	15
3.3 Odkrivanje temperaturne segregacije s pomočjo IR termografije.....	20
4 REGULATIVA IN TEMPERATURA ASFALTNIH ZMESI.....	26
4.1 Slovenska tehnična regulativa.....	26
4.2 Pregled tuje literature.....	28
4.3 Specifikacija Tex-244-F (ZDA).....	30
4.3.1 Predhodne študije in opredelitev stopenj temperaturne segregacije.....	30

4.3.2	<i>Uporaba termovizijske kamere</i>	32
4.3.3	<i>Uporaba termoskeniranja</i>	33
4.4	Švedska/norveška metoda – ŠNM	36
5	TEMPERATURA IN TEMPERATURN A SEGREGACIJA PRI VGRADNJI ASFALTNE ZMESI NA IZBRANEM PROJEKTU	39
5.1	Opis projekta in merilne metode	39
5.2	Analiza in vrednotenje rezultatov meritev z IR in kontaktnim termometrom	44
5.3	Analiza in vrednotenje rezultatov meritev s termovizijsko kamero	47
5.4	Analiza in vrednotenje rezultatov meritev s termoskeniranjem.....	51
5.4.1	<i>Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s TSC</i>	54
5.4.2	<i>Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s specifikacijo Tex-244-F</i>	60
5.4.3	<i>Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s ŠNM</i>	64
5.5	Diskusija in predlogi za izboljšanje slovenske tehnične regulative.....	67
6	ANALIZA UKREPOV OB POJAVU TEMPERATURNE SEGREGACIJE IN UKREPOV ZA NJENO PREPREČEVANJE NA IZBRANEM PROJEKTU	69
6.1	Pregled ukrepov – domače in tuje izkušnje	69
6.1.1	<i>Povečanje energije zgoščevanja</i>	69
6.1.2	<i>Uporaba toplotnih zabojsnikov in tovornjakov z izoliranimi kesoni</i>	72
6.1.3	<i>Uporaba tovornjakov s tehnologijo potiskanja</i>	74
6.1.4	<i>Uporaba podajalnikov asfaltn e zmesi</i>	77
6.2	Analiza vpliva uporabe podajalnika Vögele na temperaturno segregacijo na izbranem projektu.....	86
6.2.1	<i>Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s TSC</i>	88
6.2.2	<i>Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s specifikacijo Tex-244-F</i>	91
6.2.3	<i>Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s ŠNM</i>	95
7	ZAKLJUČEK	99
8	CONCLUSION	102
9	VIRI	106

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Standardizirani cestogradbeni bitumni in s polimeri modificirani bitumni (Henigman in sod., 2016: str. 20–21).	6
Preglednica 2: (a) Nazivne velikosti stranic kvadratnih odprtin na sitih in (b) nazivne velikosti frakcij zmesi zrn d/D (Henigman in sod., 2016: str. 35).	8
Preglednica 3: Izboljšanje lastnosti asfaltne zmesi z uporabo različnih dodatkov (Henigman in sod., 2016: str. 56).	9
Preglednica 4: Vpliv temperaturne segregacije na lastnosti asfaltnih zmesi (Stroup-Gardiner, Brown, 2000: str. 81).	19
Preglednica 5: Stopnje temperaturne segregacije, ki sta jih predlagala Stroup-Gardiner in Brown (2000: str. 3).	19
Preglednica 6: Priporočena in najnižja temperatura asfaltne zmesi pri vgrajevanju (MzP, DRSC, 2009: str. 12).	27
Preglednica 7: Pogostost meritev temperature za notranjo in zunanjo kontrolo (MzP, DRSC, 2009: str. 15, 16).	27
Preglednica 8: Stopnje temperaturne segregacije, določene po AASHTO (Von Quintus, Reiter, 2017: str. 33).	32
Preglednica 9: Povprečje površinskih temperatur na tovornjakih za posamezno asfaltno zmes.	50
Preglednica 10: Opis temperaturnih polj.	53
Preglednica 11: Stopnje temperaturne segregacije, določene po AASHTO (Von Quintus, Reiter, 2017: str. 33).	60
Preglednica 12: Vrednosti $T_{1,0}$, $T_{98,5}$ in ΔT po posameznih pododsekih temperaturnega polja 4.	60
Preglednica 13: Rezultati temperaturne segregacije po posameznih temperaturnih poljih.	63
Preglednica 14: Izračun pribitkov/odbitkov temperaturnih polj.	66
Preglednica 15: Rezultati projektov v okviru Norveške uprave za javne ceste (Telle, 2016: str. 7–8).	82
Preglednica 16: Opis temperaturnih polj, izvedenih v okviru rekonstrukcije hitre ceste H4 v Vipavski dolini.	87
Preglednica 17: Vrednosti $T_{1,0}$, $T_{98,5}$ in ΔT po posameznih pododsekih temperaturnega polja III.	92
Preglednica 18: Rezultati temperaturne segregacije po posameznih temperaturnih poljih z uporabo podajalnika.	94
Preglednica 19: Izračun pribitkov/odbitkov temperaturnih polj (uporaba podajalnika).	98

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Temperatura asfaltne zmesi AC 32 base B 50/70 A1 ob polžu finišerja.	45
Grafikon 2: Temperatura asfaltne zmesi AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 ob polžu finišerja.....	45
Grafikon 3: Temperatura asfaltne zmesi AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 v vsebniku finišerja. .	45
Grafikon 4: Temperatura asfaltne zmesi SMA 11 PmB 45/80-65 A1 ob polžu finišerja.....	46
Grafikon 5: Temperatura asfaltne zmesi SMA 11 PmB 45/80-65 A1 v vsebniku finišerja.	46
Grafikon 6: Primer grafikona porazdelitvene funkcije površinske temperature asfaltne zmesi SMA 11 PmB 45/80-65 A1 na tovarnjaku.	48
Grafikon 7: Površinske temperature asfaltne zmesi AC 32 base B 50/70 A1 na tovarnjakih.	49
Grafikon 8: Površinske temperature asfaltne zmesi AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 na tovornjakih.	49
Grafikon 9: Površinske temperature asfaltne zmesi SMA 11 PmB 45/80-65 A1 na tovarnjakih.	49
Grafikon 10: Maksimalna in minimalna temperatura polja 4 ter minimalna predpisana temperatura.	57
Grafikon 11: Delež vgrajene asfaltne zmesi s temperaturo, nižjo od minimalne mejne temperature.	59
Grafikon 12: Vrednosti $T_{1,0}$ in $T_{98,5}$ temperaturnega polja 4.....	61
Grafikon 13: Vrednosti ΔT po posameznih pododsekih temperaturnega polja 4.....	61
Grafikon 14: Delež pododsekov glede na stopnjo temperaturne segregacije temperaturnega polja 4.	62
Grafikon 15: Maksimalna, minimalna in mejna temperatura polja 4.....	64
Grafikon 16: Vrednosti p_{TO} posameznih temperaturnih polj.	65
Grafikon 17: Deleži asfaltnih zmesi s temperaturo, nižjo od predpisane minimalne temperature, po TSC in ŠNM.	66
Grafikon 18: Povprečna temperatura vseh asfaltnih zmesi, vgrajenih s tovarnjaki prekucniki in tovarnjaki s tehnologijo potiskanja (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: str. 55).	76
Grafikon 19: Vrednosti p_{TO} asfaltnih zmesi, vgrajenih s podajalnikom Shuttle Buggy (Telle, 2016: str. 7–8).....	83
Grafikon 20: Vrednosti p_{TO} asfaltnih zmesi, vgrajenih z drugimi vrstami podajalnikov (Telle, 2016: str. 7–8).....	83
Grafikon 21: Vrednosti p_{TO} asfaltnih zmesi, prepeljanih z ladjo in vgrajenih z drugimi vrstami podajalnikov (Telle, 2016: str. 7–8).	84
Grafikon 22: Vrednosti p_{TO} asfaltnih zmesi, prepeljanih s tovarnjaki in raztovorjenih neposredno v finišer (Telle, 2016: str. 7–8).	84
Grafikon 23: Vrednosti p_{TO} asfaltnih zmesi, prepeljanih z ladjo in raztovorjenih neposredno v finišer (Telle, 2016: str. 7–8).	85
Grafikon 24: Povprečne vrednosti p_{TO} za posamezni način transporta oziroma vgrajevanja (Telle, 2016: str. 7–8).....	85
Grafikon 25: Maksimalna in minimalna temperatura polja III ter minimalna predpisana temperatura.	90
Grafikon 26: Delež vgrajene asfaltne zmesi s temperaturo, nižjo od minimalne mejne temperature.	91
Grafikon 27: Vrednosti $T_{1,0}$ in $T_{98,5}$ temperaturnega polja III.....	92

Grafikon 28: Vrednosti ΔT po posameznih pododsekih temperaturnega polja III.....	93
Grafikon 29: Delež pododsekov glede na stopnjo temperaturne segregacije temperaturnega polja III.....	93
Grafikon 30: Maksimalna, minimalna in mejna temperatura polja III.....	96
Grafikon 31: Vrednosti p_{TO} posameznih temperaturnih polj z uporabo podajalnika.	97
Grafikon 32: Deleži asfaltnih zmesi s temperaturo, nižjo od predpisane minimalne temperature po TSC in ŠNM (uporaba podajalnika).....	98

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematični prikaz sestave asfaltne zmesi (Henigman in sod., 2006: str. 43).	4
Slika 2: Merjenje penetracije bitumna (Chouhan, 2018).	5
Slika 3: Merjenje temperature zmečkaišča bitumna (Baunetz, 2019).	5
Slika 4: Primer mejnih krivulj zrnivosti za zmes kamnitih zrn za drobir z bitumenskim mastiksom SMA 11 in SMA 11 hg (ZAS, 2010, str. 53).	8
Slika 5: Značilne plasti v vozišni konstrukciji za težko prometno obremenitev (Henigman in sod., 2016: str. 68).	10
Slika 6: Ločevanje grobih in finih zrn med natovarjanjem asfaltne zmesi na tovornjak (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).	12
Slika 7: Primer zrnovostne segregacije z visokim deležem grobih zrn (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).	13
Slika 8: Zdrs ohlajenega dela ob začetku raztovarjanja asfaltne zmesi s tovornjaka v finiier (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).	14
Slika 9: Asfaltna zmes pred raztovarjanjem, prikazana z (a) navadno sliko in (b) s termografsko sliko.	14
Slika 10: Pojav ohlajenega mesta asfaltne zmesi ob menjavi tovornjaka, prikazan z (a) navadno sliko in (b) s termografsko sliko.	14
Slika 11: Pojav ohlajenega mesta asfaltne zmesi zaradi ustavitve finiierja, prikazan z (a) navadno sliko in (b) s termografsko sliko.	15
Slika 12: Optimalni čas in temperatura zgoščevanja asfaltne zmesi (Bijleveld in sod., 2012: str. 3).	16
Slika 13: (a) Zastajanje vode po deževnem dogodku in (b) propadanje vozišča zaradi temperaturne segregacije (Pavement Interactive, 2019; Sebesta, Scullion, Saarenketo, 2013: str. 9).	17
Slika 14: Primera poslabšanja asfaltnih zmesi zaradi ciklične temperaturne segregacije (Brock, Jakob, 2019: str. 19; Hedderich, 2014: str. 5).	17
Slika 15: Razpad odvzetega jedra zaradi visoke stopnje segregacije (Von Quintus, Reiter, 2018: str. 5).	18
Slika 16: (a) Infrardei termometer in (b) termovizijska kamera (Distrimesure, 2019; Flir Systems, Inc., 2019).	20
Slika 17: (a) Ohlajena mesta, posneta s termovizijsko kamero, in (b) zastajanje vode na slabo zgoščenih mestih, posnetih z navadnim fotoaparatom (Willoughby in sod., 2001: str. 38).	21
Slika 18: Koncept merilnega sistema iz droga in infrardeih merilnikov (Sebesta in sod., 2006: str. 4).	21
Slika 19: Merilni sistem, narejen iz droga in infrardeih merilnikov (Sebesta in sod., 2006: str. 5).	22
Slika 20: Primer temperaturnega polja (Sebesta, Scullion, 2012: str. 29).	22
Slika 21: Drog z infrardeimi merilniki, nameščen na finiierju (TxDOT, 2019: str. 6–46).	22
Slika 22: (a) Termoskener in (b) naaiin zajemanja podatkov s termoskenerjem (TXAPA, 2019: str. 18; ForConstructionPros, 2015).	23
Slika 23: Merilna oprema za zajemanje podatkov med vgrajevanjem asfaltne zmesi (MOBA Mobile Automation AG, 2020).	24

Slika 24: Ohlajena mesta zaradi ciklične temperaturne segregacije z značilno obliko črke »V« (Sebesta in sod., 2006: str. 7).	24
Slika 25: Ohlajena mesta pravokotne oblike zaradi ustavitv finišerja (Rand, 2010: str. 7).	25
Slika 26: Digitalni kontaktni termometer (Priggen, 2019).	27
Slika 27: Uporaba specifikacij o IR sistemih v ZDA (AASHTO, 2019).	29
Slika 28: Profil gostote za primer točkovno segregiranega območja (Willoughby in sod., 2001: str. 28).	30
Slika 29: Profil gostote za primer linijsko segregiranega območja (Willoughby in sod., 2001: str. 28).	31
Slika 30: Profil gostote, ki izpolnjuje predpisane kriterije (Willoughby in sod., 2001: str. 31).	31
Slika 31: Profil gostote, ki ne izpolnjuje predpisanih kriterijev (Willoughby in sod., 2001: str. 32).	31
Slika 32: Merjenje temperature s termovizijsko kamero na polju dolžine 45 m (TxDOT, 2015: str. 3).	33
Slika 33: Temperaturna razlika ΔT med $T_{98,5}$ in $T_{1,0}$ (Von Quintus, Reiter, 2017: str. 32).	34
Slika 34: Merjenje temperature s termoskeniranjem na polju dolžine 45 m (TxDOT, 2015: str. 5).	34
Slika 35: Primeri temperaturnih polj za (a) ničelno segregacijo ($\Delta T = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$), (b) zmerno segregacijo ($\Delta T = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$) in (c) visoko segregacijo ($\Delta T = 53\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Rand, 2012: str. 5; Sebesta, Scullion, 2012: str. 14, 15).	35
Slika 36: Način izračuna $T_{DS, x}$, $T_{max, mejna, x}$ in $T_{min, mejna, x}$ na razdalji x .	36
Slika 37: Profil temperature vgrajene asfaltne zmesi in temperaturno polje s 5,76 % tveganih območij (EAPA, 2017: str. 68).	37
Slika 38: Kriterij za določitev pribitka/odbitka po švedskem pravilniku (Olsson, 2018: str. 8).	38
Slika 39: Lokacija cestninske postaje Videž (Monolit, TSmedia, 2019).	39
Slika 40: Prikaz območja cestninske postaje in dolžine rekonstrukcije avtoceste (Sinergise d.o.o., 2013).	40
Slika 41: (a) Avtocesta pred rušenjem cestninske postaje (Google, 2019) in (b) avtocesta med rušenjem cestninske postaje.	41
Slika 42: Prikaz rekonstrukcije desnega smernega vozišča avtoceste, na katerem so potekale meritve (PNZ d.o.o., 2017: str. 47–49).	42
Slika 43: Vgrajevanje asfaltne zmesi z dvema vzporednima finišerjema.	43
Slika 44: Pozicija meritev temperature asfaltne zmesi: (a) v vsebniku finišerja in (b) ob polžu finišerja.	44
Slika 45: Termovizijska kamera.	47
Slika 46: Asfaltna zmes SMA 11 PmB 45/80-65 A1 na tovornjaku, prikazana z (a) navadno sliko in (b) s termografsko sliko.	48
Slika 47: Termoskenir Vögele Roadscan.	51
Slika 48: Mreža temperaturnih točk, izmerjenih s termoskeniranjem Vögele Roadscan (Joseph Vögele AG, 2019a: str. 7).	51
Slika 49: Nadzorna plošča, ki omogoča sprotno spremljanje temperature asfaltnih zmesi (Joseph Vögele AG, 2019a: str. 8–9).	52
Slika 50: Program Witos Paving Analysis za analizo podatkov.	53
Slika 51: Temperaturno polje 4 iz programa Witos Paving Analysis.	54
Slika 52: Grafično obdelano temperaturno polje 4 iz programa Excel.	55
Slika 53: Visoka temperaturna razlika na razdalji enega tovornjaka asfaltne zmesi.	56

Slika 54: Temperaturno polje in grafikon s pripadajočimi temperaturami za prvih 200 m polja 4.	56
Slika 55: Temperaturno polje 4 z označenimi ustavitvami finišerja.	57
Slika 56: Temperaturno polje 4 z označenim odsekom ohlajene asfaltne zmesi celotnega tovarnjaka.	58
Slika 57: Tvegana območja temperaturnega polja 4, označena s črno barvo.	65
Slika 58: Komunikacija med operaterji strojne mehanizacije pri vgrajevanju asfaltnih zmesi (Raczon, 2019).	70
Slika 59: Dolžina segregiranih območij na odseku 0–200 m temperaturnega polja 4.	71
Slika 60: Povečanje amplitude vibriranja na segregiranih območjih pri uporabi vibracijskih valjarjev.	71
Slika 61: (a) Notranjost toplotnega zabojnika, (b) toplotni zabojnik, vgrajen neposredno na šasijo tovarnjaka, (c) mobilni toplotni zabojnik, nameščen na tovarnjak prekucnik, in (d) mobilni toplotni zabojnik, nameščen na prikolico (ATC A. Richter GmbH, 2013; ATC A. Richter GmbH, 2011a; ATC A. Richter GmbH, 2011b; ATC A. Richter GmbH, 2011c).	72
Slika 62: Tovarnjak z izoliranim kesonom z okroglim dnom (Asfaltskolan, 2020).	73
Slika 63: Nastanek segregiranega območja ob menjavi tovarnjakov z izoliranim kesonom (Olsson, 2018: str. 13).	74
Slika 64: Raztovarjanje asfaltne zmesi s tehnologijo potiskanja (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: str. 38; LECTURA Press, 2017).	74
Slika 65: Uporaba tovarnjakov prekucnikov in tovarnjakov s tehnologijo potiskanja po posameznih odsekih asfaltiranja (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: str. 50).	75
Slika 66: Vgrajevanje asfaltne zmesi s podajalnikom (Jöseph Vögele AG, 2007: str. 5).	77
Slika 67: Podajalnik Shuttle Buggy (ASTEC MOBILE MACHINERY GmbH, 2019).	78
Slika 68: Transport in mešanje asfaltne zmesi prek podajalnika Shuttle Buggy (Phillips, Willoughby, Mahoney, 2003: str. 8).	78
Slika 69: (a) Oblika dozirnega polža in (b) način mešanja ohlajene in vroče asfaltne zmesi (Brock, Renegar, 2011: str. 20; Roadtec WMS, 2006: str. 5).	79
Slika 70: Temperaturno polje in temperaturni profil asfaltne zmesi, vgrajene s podajalnikom Shuttle Buggy (Telle, 2016: str. 3).	80
Slika 71: (a) Natovarjanje asfaltne zmesi na ladjo in (b) raztovarjanje asfaltne zmesi z ladje na tovarnjak (Snilsberg, Hoven, Telle, 2016: str. 9, 12).	81
Slika 72: Uporaba podajalnika Vögele pri vgrajevanju asfaltne zmesi (avtor: Sebastjan Černigoj).	86
Slika 73: Sprejemni vsebnik podajalnika Vögele z dozirnima polžema (Joseph Vögele AG, 2019b: str. 1).	87
Slika 74: Transport asfaltne zmesi prek podajalnika Vögele (Joseph Vögele AG, 2010: str. 10).	87
Slika 75: Temperaturno polje III.	88
Slika 76: Temperaturno polje in grafikon s pripadajočimi temperaturami za prvih 200 m polja III.	89
Slika 77: Temperaturno polje I.	95
Slika 78: Tvegana območja temperaturnega polja III.	96
Slika 79: Tvegana območja temperaturnega polja I.	97

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A: TEMPERATURNA POLJA – REKONSTRUKCIJA AVTOCESTE A1 V OKVIRU
RUŠITVE CESTNINSKE POSTAJE VIDEŽ

PRILOGA B: TEMPERATURNA POLJA – REKONSTRUKCIJA HITRE CESTE H4 Z
UPORABO PODAJALNIKA

LIST OF TABLES

Table 1: Standardized bitumens and polymer modified bitumens (Henigman et al., 2016: p. 20–21).	6
Table 2: (a) Nominal sizes of square opening sides on sieves and (b) nominal sizes of aggregate fractions d/D (Henigman et al., 2016: p. 35).	8
Table 3: Improvement of asphalt mixture properties using various additives (Henigman et al., 2016: p. 56).	9
Table 4: Influence of the temperature segregation on the asphalt mixture properties (Stroup-Gardiner, Brown, 2000: p. 81).	19
Table 5: Temperature segregation levels suggested by Stroup-Gardiner and Brown (2000: p. 3).	19
Table 6: Recommended and minimum placement temperature of asphalt mixture (MzP, DRSC, 2009: p. 12).	27
Table 7: Frequency of temperature measurements for internal and external control (MzP, DRSC, 2009: p. 15–16).	27
Table 8: Temperature segregation levels determined according to AASHTO (Von Quintus, Reiter, 2017: p. 33).	32
Table 9: The average of surface temperatures on trucks for each asphalt mixture.	50
Table 10: A description of thermal profiles.	53
Table 11: Temperature segregation levels determined by AASHTO (Von Quintus, Reiter, 2017: p. 33).	60
Table 12: Values of T _{1,0} , T _{98,5} and ΔT by each subsection of the thermal profile 4.	60
Table 13: Temperature segregation results of the each thermal profile.	63
Table 14: A calculation of thermal profile bonuses/deductions.	66
Table 15: Results of projects under the Norwegian Public Roads Administration (Telle, 2016: p. 7–8).	82
Table 16: A description of thermal profiles performed during the reconstruction of the H4 expressway in the Vipava Valley.	87
Table 17: Values of T _{1,0} , T _{98,5} and ΔT by each subsection of the thermal profile III.	92
Table 18: Temperature segregation results of each thermal profile using the feeder.	94
Table 19: A calculation of thermal profile bonuses/deductions (feeder use).	98

LIST OF GRAPHS

Graph 1: The temperature of the asphalt mixture AC 32 base B 50/70 A1 at the paver auger.	45
Graph 2: The temperature of the asphalt mixture AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 at the paver auger.	45
Graph 3: The temperature of the asphalt mixture AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 in the paver hopper.	45
Graph 4: The temperature of the asphalt mixture SMA 11 PmB 45/80-65 A1 at the paver auger.	46
Graph 5: The temperature of the asphalt mixture SMA 11 PmB 45/80-65 A1 in the paver hopper.	46
Graph 6: An example graph of the distribution function for the surface temperature of the asphalt mixture SMA 11 PmB 45/80-65 A1 on a truck.	48
Graph 7: Surface temperatures of the AC 32 base B 50/70 A1 asphalt mixture on trucks.	49
Graph 8: Surface temperatures of the AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 asphalt mixture on trucks.	49
Graph 9: Surface temperatures of the SMA 11 PmB 45/80-65 A1 asphalt mixture on trucks.	49
Graph 10: The maximum and minimum temperature of profile 4 and the minimum prescribed temperature.	57
Graph 11: A share of the placed asphalt mixture with a temperature lower than the minimum limit temperature.	59
Graph 12: $T_{1,0}$ and $T_{98,5}$ values of the thermal profile 4.	61
Graph 13: ΔT values by each subsection of the thermal profile 4.	61
Graph 14: A percentage of subsections according to the temperature segregation level of the thermal profile 4.	62
Graph 15: The maximum, minimum and limit temperature of the profile 4.	64
Graph 16: p_{TO} values of the each thermal profile.	65
Graph 17: Shears of asphalt mixtures with a temperature lower than the prescribed minimum temperature according to the TSC and the Swedish/Norwegian method.	66
Graph 18: An average temperature of all asphalt mixtures placed by tipper trucks and trucks with a push-off technology (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: p. 55).	76
Graph 19: p_{TO} values of asphalt mixtures placed with the Shuttle Buggy feeder (Telle, 2016: p. 7–8).	83
Graph 20: p_{TO} values of asphalt mixtures placed with other types of feeders (Telle, 2016: p. 7–8).	83
Graph 21: p_{TO} values of asphalt mixtures transported by a ship and placed with other types of feeders (Telle, 2016: p. 7–8).	84
Graph 22: p_{TO} values of asphalt mixtures transported by trucks and unloaded directly into the paver (Telle, 2016: p. 7–8).	84
Graph 23: p_{TO} values of asphalt mixtures transported by a ship and unloaded directly into the paver (Telle, 2016: p. 7–8).	85
Graph 24: Average p_{TO} values for the each type of transport and placement, respectively (Telle, 2016: p. 7–8).	85

Graph 25: The maximum and minimum temperature of the profile III and the minimum prescribed temperature.....	90
Graph 26: A share of the placed asphalt mixture with a temperature lower than the minimum limit temperature.....	91
Graph 27: $T_{1,0}$ and $T_{98,5}$ values of the thermal profile III.....	92
Graph 28: ΔT values by each subsection of the thermal profile III.....	93
Graph 29: A percentage of subsections according to the temperature segregation level of the thermal profile III.....	93
Graph 30: The maximum, minimum and limit temperature of the profile III.....	96
Graph 31: p_{TO} values of thermal profiles using a feeder.....	97
Graph 32: Shares of asphalt mixtures with a temperature lower than the prescribed minimum temperature according to the TSC and the Swedish/Norwegian method (feeder use)...	98

LIST OF FIGURES

Figure 1: Schematic representation of the asphalt mixture composition (Henigman et al., 2006: p. 43).	4
Figure 2: Bitumen penetration measurement (Chouhan, 2018).	5
Figure 3: Softening point of bitumen measurement (Baunetz, 2019).	5
Figure 4: An example of grading boundary curves for the aggregate of stone mastic asphalt SMA 11 and SMA 11 hg (ZAS, 2010, p. 53).	8
Figure 5: Characteristic layers in the pavement structure for heavy traffic load (Henigman et al., 2016: p. 68).	10
Figure 6: Separation of coarse and fine grains while loading asphalt mixture on the truck (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).	12
Figure 7: An example of gradation segregation with a high share of coarse grains (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).	13
Figure 8: The slip of the cooled part at the beginning of unloading the asphalt mixture from the truck into the paver (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).	14
Figure 9: The asphalt mixture before unloading shown by (a) a regular picture and (b) a thermal picture.	14
Figure 10: Occurrence of the asphalt mixture cooled area at the truck change shown by (a) a regular picture and (b) a thermal picture.	14
Figure 11: Occurrence of the asphalt mixture cooled area due to the paver stop shown by (a) a regular picture and (b) a thermal picture.	15
Figure 12: Optimal compaction time and compaction temperature of the asphalt mixture (Bijleveld et al., 2012: p. 3).	16
Figure 13: (a) Water stagnation after a rainy event and (b) pavement deterioration due to temperature segregation (Pavement Interactive, 2019; Sebesta, Scullion, Saarenketo, 2013: p. 9).	17
Figure 14: Examples of the asphalt mixture deterioration due to the cyclic temperature segregation (Brock, Jakob, 2019: p. 19; Hedderich, 2014: p. 5).	17
Figure 15: Collapse of the taken core due to the high level of segregation (Von Quintus, Reiter, 2018: p. 5).	18
Figure 16: (a) Infrared thermometer and (b) thermal camera (Distrimesure, 2019; Flir Systems, Inc., 2019).	20
Figure 17: (a) Cooled locations taken with a thermal camera and (b) water stagnation in poorly compacted locations taken with a regular camera (Willoughby et al., 2001: p. 38).	21
Figure 18: The concept of a measuring system made of a bar and infrared sensors (Sebesta et al., 2006: p. 4).	21
Figure 19: A measuring system made of a bar and infrared sensors (Sebesta et al., 2006: p. 5).	22
Figure 20: An example of a thermal profile (Sebesta, Scullion, 2012: p. 29).	22
Figure 21: A bar with infrared sensors mounted on the paver (TxDOT, 2019: p. 6–46).	22
Figure 22: (a) The IR temperature scanner and (b) a way of capturing data with the IR temperature scanner (TXAPA, 2019: p. 18; ForConstructionPros, 2015).	23
Figure 23: Measuring equipment for taking data during the placement of asphalt mixture (MOBA Mobile Automation AG, 2020).	24

Figure 24: Cooled locations due to cyclic temperature segregation with the characteristic "V" shape (Sebesta et al., 2006: p. 7).	24
Figure 25: Cooled locations with rectangular shape due to paver stops (Rand, 2010: p. 7).	25
Figure 26: A digital contact thermometer (Priggen, 2019).	27
Figure 27: Use of specifications on IR systems in the USA (AASHTO, 2019).	29
Figure 28: A density profile for a point segregated area (Willoughby et al., 2001: p. 28).	30
Figure 29: A density profile for a line segregated area (Willoughby et al., 2001: p. 28).	31
Figure 30: A density profile that meets the specified criteria (Willoughby et al., 2001: p. 31).	31
Figure 31: A density profile that does not meet the specified criteria (Willoughby et al., 2001: p. 32).	31
Figure 32: Temperature measurement with a thermal camera on a 45 m long profile (TxDOT, 2015: p. 3).	33
Figure 33: Temperature difference ΔT between $T_{98,5}$ and $T_{1,0}$ (Von Quintus, Reiter, 2017: p. 32).	34
Figure 34: Temperature measurement with an IR temperature scanner on a 45 m long profile (TxDOT, 2015: p. 5).	34
Figure 35: Examples of thermal profiles for (a) no segregation ($\Delta T = 11^\circ \text{C}$), (b) moderate segregation ($\Delta T = 16^\circ \text{C}$), and (c) severe segregation ($\Delta T = 53^\circ \text{C}$) (Rand, 2012: p. 5; Sebesta, Scullion, 2012: p. 14–15).	35
Figure 36: Method of calculating the $T_{DS, x}$, $T_{\max, \text{mejna}, x}$ and $T_{\min, \text{mejna}, x}$ over a distance of x .	36
Figure 37: A temperature profile of placed asphalt mixture and a thermal profile with 5,76 % risk areas (EAPA, 2017: p. 68).	37
Figure 38: A criterion for determining a bonus/deduction according to the Swedish regulation (Olsson, 2018: p. 8).	38
Figure 39: Location of the Videž toll station (Monolit, TSmedia, 2019).	39
Figure 40: Representation of the toll station area and the length of the highway reconstruction (Sinergise d.o.o., 2013).	40
Figure 41: (a) The highway before the toll station demolition (Google, 2019); and (b) the highway during the toll station demolition.	41
Figure 42: Reconstruction representation of the right direction highway carriageway on which measurements were taken (PNZ d.o.o., 2017: p. 47–49).	42
Figure 43: Asphalt mixture placement with two parallel pavers.	43
Figure 44: Measurement position of the asphalt mixture temperature: (a) in the paver hopper and (b) at the paver auger.	44
Figure 45: Thermal camera.	47
Figure 46: SMA 11 PmB 45/80-65 A1 asphalt mixture on a truck shown by (a) a regular picture and (b) a thermal picture.	48
Figure 47: The Vögele Roadscan IR temperature scanner.	51
Figure 48: A grid of temperature points measured with the Vögele Roadscan IR temperature scanner (Joseph Vögele AG, 2019a: p. 7).	51
Figure 49: The control panel that allows the asphalt mixture temperature to be monitored in real-time (Joseph Vögele AG, 2019a: p. 8-9).	52
Figure 50: The Witos Paving Analysis program for data analysis.	53
Figure 51: A thermal profile 4 from the Witos Paving Analysis program.	54
Figure 52: A graphically processed thermal profile 4 from the Excel program.	55

Figure 53: A high temperature difference over a distance of one truck asphalt mixture.	56
Figure 54: A thermal profile and a graph with associated temperatures for the first 200 m of profile 4.	56
Figure 55: The thermal profile 4 with paver stops marked.	57
Figure 56: The thermal profile 4 with a marked section of the cooled asphalt mixture of the entire truck.	58
Figure 57: Risk areas of the thermal profile 4 marked with black colour.	65
Figure 58: Communication between machine operators in asphalt mixture placement (Raczon, 2019).	70
Figure 59: Length of the segregated areas in section 0–200 m of the thermal profile 4.	71
Figure 60: An increased vibration amplitude in segregated areas when using vibratory rollers.	71
Figure 61: (a) The inside of the thermal container, (b) the thermal container mounted directly on a truck chassis, (c) the mobile thermal container mounted on a tipper truck and (d) the mobile thermal container mounted on a trailer (ATC A. Richter GmbH, 2013; ATC A. Richter GmbH, 2011a; ATC A. Richter GmbH, 2011b; ATC A. Richter GmbH, 2011c).	72
Figure 62: A truck with an insulated round bottom bed (Asfaltskolan, 2020).	73
Figure 63: A segregated area formation at the exchange of trucks with an insulated bed (Olsson, 2018: p. 13).	74
Figure 64: Unloading the asphalt mixture by a push-off technology (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: p. 38; LECTURA Press, 2017).	74
Figure 65: The use of tipper trucks and trucks with a push-off technology by each paving section (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: p. 50).	75
Figure 66: An asphalt mixture placement with a feeder (Jöseph Vögele AG, 2007: p. 5).	77
Figure 67: The Shuttle Buggy feeder (ASTEC MOBILE MACHINERY GmbH, 2019).	78
Figure 68: An asphalt mixture transport and mixing over the Shuttle Buggy feeder (Phillips, Willoughby, Mahoney, 2003: p. 8).	78
Figure 69: (a) A dosing auger shape and (b) the mixing method of the cooled and hot asphalt mixture (Brock, Renegar, 2011: p. 20; Roadtec WMS, 2006: p. 5).	79
Figure 70: A thermal profile and a temperature profile of the asphalt mixture placed with the Shuttle Buggy feeder (Telle, 2016: p. 3).	80
Figure 71: (a) Loading of asphalt mixture on a ship and (b) unloading of asphalt mixture from a ship to a truck (Snilsberg, Hoven, Telle, 2016: p. 9, 12).	81
Figure 72: The use of the Vögele feeder for an asphalt mixture placement (author: Sebastjan Černigoj).	86
Figure 73: A receiving hopper of a Vögele feeder with dosing augers (Joseph Vögele AG, 2019b: p. 1).	87
Figure 74: An asphalt mixture transport over the feeder Vögele (Joseph Vögele AG, 2010: p. 10).	87
Figure 75: A thermal profile III.	88
Figure 76: A thermal profile and a graph with associated temperatures for the first 200 m of the profile III.	89
Figure 77: A thermal profile I.	95
Figure 78: Risk areas of the thermal profile III.	96
Figure 79: Risk areas of the thermal profile I.	97

LIST OF APPENDICES

- APPENDIX A: TEMPERATURE PROFILES – A1 HIGHWAY RECONSTRUCTION IN
THE PROJECT OF THE VIDEŽ TOLL STATION REMOVAL
- APPENDIX B: TEMPERATURE PROFILES – H4 EXPRESSWAY
RECONSTRUCTION WITH THE FEEDER USE

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

AASHTO – Ameriško združenje državnih avtocestnih in transportnih uradov (angl. American Association of State Highway and Transportation Officials)

AC base – asfaltna zmes za zgornjo vezano nosilno plast (angl. Asphalt concrete – base)

AC base, stab – asfaltna zmes za spodnjo vezano (stabilizirano) plast (angl. Asphalt concrete–base, stabilized)

AC bin – asfaltna zmes za vezno plast (angl. Asphalt concrete – binder)

AC surf – bitumenski beton (angl. Asphalt concrete – surface)

CP – cestninska postaja

DARS – Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji

DRSC – Direkcija Republike Slovenije za ceste

EAPA – Evropsko združenje za vgrajevanje asfalta (angl. European Asphalt Pavement Association)

GNSS – globalni navigacijski satelitski sistem

hg – votlava sestava zmesi (angl. Holow graded)

IR – infrardeče

MA – liti asfalt (angl. Mastic asphalt)

MzP – Ministrstvo za promet

PA – drenažni asfalt (angl. Porous asphalt)

PmB – s polimeri modificirani bitumni

SD – površinska prevleka (angl. Surface dressing)

SIST – Slovenski inštitut za standardizacijo

SMA – drobir z bitumenskim mastiksom (angl. Stone mastic asphalt)

SS – tankoplastna prevleka (angl. Slurry surfacing)

ŠNM – švedska/norveška metoda

TSC – tehnična specifikacija za ceste

TXAPA – Teksaško združenje za vgrajevanje asfalta (angl. Texas Asphalt Pavement Association)

TxDOT – Teksaško ministrstvo za transport (angl. Texas Department of Transportation)

ZAS – Združenje asfalterjev Slovenije

p_{TO} – delež tveganih območij

σ – standardna deviacija

T – temperatura

ΔT – temperaturna razlika

$T_{1,0}$ – vrednost temperature pri 1,0. centilu

$T_{98,5}$ – vrednost temperature pri 98,5. centilu

T_{DS} – povprečna temperatura po metodi drsečih sredin

T_{max} – maksimalna temperatura v preseku temperaturnega polja

T_{min} – minimalna temperatura v preseku temperaturnega polja

$T_{min, predp}$ – minimalna predpisana temperatura po TSC

T_{povp} – povprečna temperatura

$T_{max, mejna}$ – maksimalna mejna temperatura po ŠNM

$T_{min, mejna}/T_{mejna}$ – minimalna mejna temperatura po ŠNM

$V_{B/A}$ – prostornina bitumna

$V_{V/A}$ – prostornina votlin

$V_{ZZ/A}$ – prostornina zmesi zrn

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

Asfaltna zmes je zmes kamnitih zrn polnila, peska, drobirja in/ali proda ter bitumenskega veziva in morebitnih potrebnih dodatkov, ki se večinoma uporablja za izvedbo asfaltne obrabne, vezne in nosilne plasti voziščne konstrukcije (MzP, DRSC, 2009).

Bitumenski beton je z bitumenskim vezivom vezana zmes kamnitih zrn določenih velikosti, ki se uporablja za izvedbo obrabnih in zapornih plasti (MzP, DRSC, 2009).

Bitumenski mastiks je zmes polnila, peska in bitumenskega veziva, ki jo je v vročem stanju mogoče ulivati in zglajevati (MzP, DRSC, 2009).

Centil predstavlja lokacijo v distribuciji, pod katero se nahaja določen odstotek primerov (Frost, 2020).

Dinamični modul (tudi kompleksni modul) je razmerje med napetostjo in specifično deformacijo ter se določi pod vibracijskimi pogoji (Wikimedia Foundation, Inc., 2019a).

Drenažni asfalt je asfaltna zmes z veliko vsebnostjo votlin, v kateri so makrovotline med seboj povezane. Vgrajuje se v obrabno plast in je namenjen za odvajanje vode, preprečitev akvaplaninga in zmanjševanje hrupa vozil (MzP, DRSC, 2009).

Drobir je drobljena zmes kamnitih zrn velikosti med 2 mm in 63 mm, ki imajo najmanj 90 % lomljenih ploskev (MzP, DRSC, 2009).

Drobir z bitumenskim mastiksom je asfaltna zmes, ki se vgrajuje v obrabno, zaporno ali izravnalno plast. Velik delež te zmesi predstavlja skelet zrn, ki se notranje podpira, votline med zrna pa so v veliki meri zapolnjene z bitumenskim mastiksom (MzP, DRSC, 2009).

Duktilnost je definirana kot razmerje med plastično deformacijo in deformacijo na meji tečenja. Predstavlja lastnost materiala/konstrukcije, ki lahko prenese velike plastične deformacije, ne da bi prišlo do porušitve. Nasprotni pomen duktilnosti je krhkost (Amebis, d. o. o., 2017).

Elastični modul (tudi prožnostni modul ali Youngov modul) določa odpornost teles na elastično deformiranje, pri čemer imajo trdnejša telesa višji elastični modul in obratno. Določen je kot razmerje med napetostjo in specifično deformacijo v elastičnem območju teles (Wikimedia Foundation, Inc., 2020a).

Elektromagnetni merilnik je naprava za neporušno merjenje gostote asfaltnih zmesi na podlagi merjenja njihove dielektrične lastnosti (TransTech Systems, Inc., 2020).

Izotopski merilnik je naprava za neporušno merjenje gostote in vlage gradbenih materialov. V osnovi sestoji iz izotopske sonde, ki predstavlja vir sevanja gama žarkov, in detektorja. Gostota se določi na podlagi intenzivnosti sipanja gama žarkov, ki dosežejo detektor (MzP, DRSC, 2001).

Kolesnica je vzdolžni žleb, ki nastane v območju kolesne sledi vozil zaradi preoblikovanja voziščne konstrukcije (Henigman in sod., 2016).

Liti asfalt je asfaltna zmes, ki je v vročem stanju tekoča snov in je pri vgrajevanju ni treba zgoščevati (MzP, DRSC, 2009).

Mejne krivulje zrnivosti so krivulje, ki omejujejo območje dovoljenega nihanja sestave zmesi kamnitih zrn (Henigman in sod., 2016).

Notranja/tekoča kontrola so dejavnosti proizvajalca pri proizvodnji v obratu in/ali izvajalca del pri vgrajevanju proizvoda na gradbišču, namenjene obvladovanju in ugotavljanju skladnosti proizvoda (MzP, DRSC, 2009).

Oksidacija bitumna je kemično reagiranje določenih sestavin bitumna s kisikom, kar povzroča povečanje viskoznosti bitumna. S tem postane bitumen trši in krhkejši, zaradi česar se v asfaltnih zmesih poveča možnost nastanka razpok in izletavanja zrn. Posledično se trajnost asfaltnih zmesi zmanjša (Soenen, Lu, Laukkanen, 2016).

Polimer je snov, katere osnovni gradniki so velike molekule (makromolekule), ki so sestavljene iz ponavljajočih se strukturnih enot (monomerov). Lahko je naravna snov (npr. škrob, celuloza, lignin ...) ali umetno proizvedena snov (plastične mase). Umetni polimeri se delijo na tri glavne skupine, in sicer termoplasti, elastomeri in duromeri. Bitumenskemu vezivu se polimeri dodajajo za izboljšanje njegovih lastnosti, takšno vezivo pa se imenuje s polimeri modificirani bitumen (Wikimedia Foundation, Inc., 2019b; Henigman in sod., 2016).

Površinska prevleka pomeni izdelavo obrabne plasti površine s pobrizgom bitumenskega veziva in posipom zrn drobirja (MzP, DRSC, 2009).

Segregacija pomeni dejanje ali stanje ločevanje nekoga ali česa od skupine ali celote.

Tankoplastna prevleka je obrabna plast asfaltne zmesi majhne debeline (do 20 mm) z maso do 50 kg/m² (MzP, DRSC, 2009).

Drseče povprečje je izračun za analizo podatkovnih točk z ustvarjanjem niza povprečnih vrednosti različnih podmnožic podatkov iz celotnega nabora podatkov (Wikimedia Foundation, Inc., 2020b).

Torna sposobnost vozišča pomeni vpliv kakovosti materiala in geometrijske oblikovanosti vozne površine na velikost pogonskih, zavornih in stranskih sil, ki se lahko prenašajo s pnevmatike vozila na vozišče (MzP, DRSC, 2009).

Viskoznost je določena kot razmerje med strižno napetostjo in strižno hitrostjo. Predstavlja notranje trenje tekočin in določa odpornost tekočine na pretok (Farlex, Inc., 2020).

Zrnavost pomeni porazdelitev velikosti zrn, izraženo z masnimi odstotki presejkov skozi določen stavek sit (Henigman in sod., 2016).

Zunanja kontrola so dejavnosti institucije, namenjene nadzoru nad notranjo kontrolo, ki vodijo k potrditvi skladnosti proizvoda ali odobritvi notranje kontrole proizvodnje in/ali prevzemanju vgrajenega gradbenega proizvoda (Henigman in sod., 2016).

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Asfaltna voziščne konstrukcije predstavljajo utrjene prometne površine, ki so namenjene transportnim dejavnostim v cestnem prometu. Da lahko zagotavljajo ustrezne pogoje uporabe v času svoje življenjske dobe, morajo biti primerno načrtovane, zgrajene in vzdrževane, kar zahteva dobro poznavanje vseh postopkov v procesu projektiranja in gradnje. Slabša izvedba se odraža v hitrejšem propadanju vozišč, kar pomeni dodatne stroške za investitorja v fazi uporabe. Ker so ceste linijski objekti, pri katerih se porabijo velike količine materiala, so lahko zaradi napak tudi stroški precej visoki.

Pogost vzrok za predčasno propadanje voziščnih konstrukcij je pomanjkljiva izvedba gradbenih del. Da bi se temu izognili, se je treba problema lotiti sistematično in proučiti dejavnike, ki vplivajo na dano situacijo. V Sloveniji je tako pogosto težava že v samem razpisu za določitev izvajalca gradbenih del, kjer se kot glavni kriterij upošteva najnižja cena, pozablja pa se na kakovost. Potekajo številne razprave, kako to spremeniti in določiti kriterije, ki bi zagotovili ekonomsko najučinkovitejše rešitve v celotni življenjski dobi nekega objekta.

Poleg izbire ustreznega izvajalca so za kakovostno izvedbo potrebne še ostale dejavnosti, kot so zagotavljanje in kontrola kakovosti, izobraževanje in strokovno usposabljanje kadra, prilagajanje in dopolnjevanje tehnične regulative itd. Za doseganje dobrih rešitev je treba vzpostaviti sistem, ga nenehno vzdrževati in nadgrajevati.

V magistrskem delu smo se osredotočili na vgrajevanje asfaltnih zmesi, kar predstavlja končno fazo v izvedbi voziščnih konstrukcij. Eden ključnih faktorjev v tej fazi je ustrezna temperatura vgrajevanja, od katere je odvisno doseganje ustrezne gostote asfaltnih zmesi. Pogosto se dogaja, da med vgrajevanjem prihaja do temperaturnih razlik, ki nastanejo zaradi neenakomernega ohlajanja med prevozom in vgrajevanjem. Takšen pojav se imenuje temperaturna segregacija.

Problem temperaturne segregacije so nizke temperature, zaradi katerih ni možno zgostiti asfaltnih zmesi do ustrezne gostote. Posledično se lastnosti asfaltnih zmesi poslabšajo, kar vodi v zmanjšanje njihove življenjske dobe tudi do 50 % in več (Bode, 2012). Vse to vodi v povečanje stroškov, saj je treba asfaltno vozišče predčasno sanirati.

Med vgrajevanjem je tako pomembno spremljati temperaturo asfaltnih zmesi, s čimer se lahko odkrijejo morebitne nepravilnosti in poiščejo rešitve za preprečevanje nastanka napak. Enostavna naprava za merjenje temperature je kontaktni termometer, s katerim se meritve izvajajo z vstavitvijo merilne sonde v asfaltno zmes. Lahko pa se temperatura določi z brezkontaktnim merjenjem na podlagi infrardeče (IR) termografije. Merilni napravi te metode, ki se uporabljata v splošni uporabi, sta IR termometer in termovizijska kamera. Kot inovativna rešitev za merjenje temperature med vgrajevanjem asfaltnih zmesi pa je bil razvit infrardeči temperaturni čitalnik oziroma termoskenner. Ta se namesti na zadnji del finišeja (polagalnika asfalta) in zajema meritve po celotni asfaltirani površini, izmerjene temperature pa so prikazane v obliki temperaturnega polja.

Postopki, ki določajo kontrolo temperature asfaltnih zmesi, so predpisani v tehnični regulativi. V magistrskem delu smo zato želeli ugotoviti, kakšna je učinkovitost slovenske tehnične regulative glede odkrivanja in vrednotenja temperaturne segregacije. V ta namen smo proučili njeno vsebino, ki predpisuje, da se za merjenje temperature uporablja kontaktni in IR termometer, in opravili meritve na izbranem projektu.

Poleg slovenske tehnične regulative smo pregledali tuje specifikacije, pri čemer se je izkazalo, da so postopke za kontrolo temperaturne segregacije izdelali v ZDA, na Švedskem in Norveškem. Specifikacija, ki se v ZDA najpogosteje uporablja, predpisuje uporabo termovizijske kamere in termoskenerja, na Švedskem in Norveškem pa je predpisana samo uporaba termoskenerja. Pri izvajanju meritev smo upoštevali tudi te specifikacije in naredili primerjave s slovenskimi predpisi.

Ker je temperatura neposredno povezana z doseganjem predpisane gostote in ustreznih lastnosti asfaltnih zmesi, predstavlja ta količina enega pomembnih kazalnikov kakovosti asfaltnih zmesi. Vendar pa s samim izvajanjem kontrole kakovost le ocenimo, ne pa tudi spremenimo. V primeru neustrezno vgrajenih asfaltnih zmesi bodo njihove lastnosti ostale poslabšane, kljub temu da smo to odkrili s kontrolo. Dobro izvedbo je mogoče doseči šele z izbiro pravih postopkov vgrajevanja. V zadnjem poglavju magistrskega dela smo zato proučili ukrepe, ki jih lahko izvajamo za zmanjševanje negativnega vpliva, če do temperaturne segregacije pride, in ukrepe za njeno preprečevanje.

1.1 Namen, cilj in hipoteza magistrskega dela

Namen

Namen magistrskega dela je proučiti slovensko tehnično regulativo glede kontrole temperature pri vgrajevanju asfaltnih zmesi. Namen je predstaviti problematiko temperaturne segregacije, ki se pojavlja pri vgrajevanju asfaltnih zmesi, in možnosti za njeno odkrivanje. Poleg kontaktnega in IR termometra, ki jih predpisuje regulativa, je predstavljena uporaba zmogljivejših naprav, in sicer termovizijske kamere in termoskenerja. Vključene so tuje specifikacije, ki določajo postopke za vrednotenje temperaturne segregacije in predpisujejo uporabo termovizijske kamere ter termoskenerja, s čimer je prikazana uporaba teh merilnih naprav. Namen magistrskega dela je tudi predstavitev rešitev, ki zmanjšujejo posledice temperaturne segregacije oziroma preprečujejo njen nastanek, s čimer se doseže boljša kakovost vgrajenih asfaltnih zmesi.

Cilj

Cilj magistrskega dela je oceniti učinkovitost slovenske tehnične regulative glede odkrivanja in vrednotenja temperaturne segregacije. Poleg tega je cilj podati morebitne predloge za izboljšanje tehnične regulative.

Hipoteza

Obstoječa tehnična regulativa v Sloveniji ne omogoča učinkovitega zaznavanja temperaturne segregacije v celotnem obsegu pri vgrajevanju asfaltnih zmesi.

1.2 Metode in tehnike dela

V magistrskem delu smo na začetku naredili pregled literature in predstavili obravnavano tematiko. Najprej smo na splošno opisali asfaltne zmesi, njihovo sestavo in klasifikacijo. Nato smo predstavili temperaturno segregacijo, vzroke za nastanek, njen vpliv na asfaltne zmesi in možnosti za njeno detekcijo. Nadalje smo proučili slovensko tehnično regulativo v zvezi s kontrolo temperature pri vgrajevanju asfaltnih zmesi. Poleg tega smo proučili tuje specifikacije, v katerih so predpisani postopki za kontrolo temperaturne segregacije.

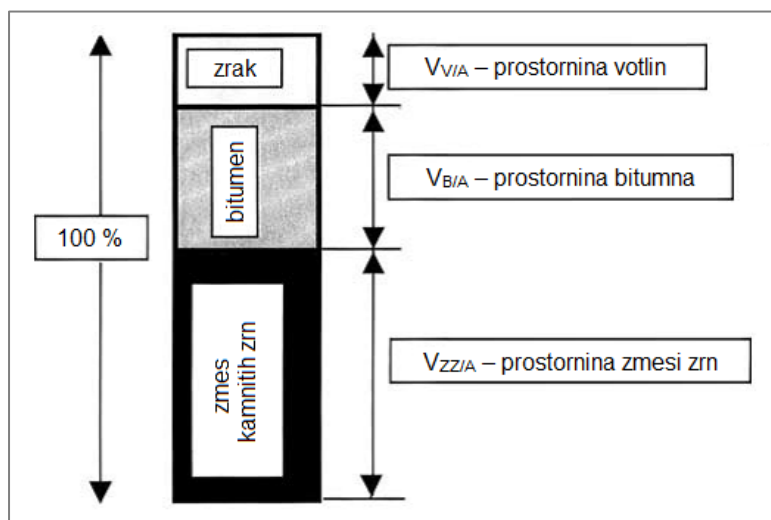
Po teoretičnem opisu tematike je sledila izvedba meritev temperature na izbranem projektu. Merjenje temperature je potekalo na več načinov, saj so se uporabljali IR termometer, kontaktni termometer, termovizijska kamera in termoskener. Izvajanje in vrednotenje meritev je potekalo v skladu s slovensko tehnično regulativo in tujimi specifikacijami. Na podlagi rezultatov smo ovrednotili učinkovitost slovenske tehnične regulative pri odkrivanju temperaturne segregacije in jo primerjali s tujimi specifikacijami.

V zadnjem poglavju magistrskega dela smo obravnavali ukrepe, ki jih lahko izvajamo v primeru, če do temperaturne segregacije pride, in ukrepe za njeno preprečevanje. V zaključku smo podali komentarje in predloge na podlagi ugotovitev, pridobljenih skozi magistrsko delo.

2 ASFALTNE ZMESI

2.1 Sestava asfaltnih zmesi

Asfaltne zmesi so sestavljene iz zmesi zrn, bitumenskega veziva in zračnih votlin, kar je shematično prikazano na sliki 1. V majhnih količinah se jim lahko dodajajo dodatki, s katerimi se izboljšajo njihove lastnosti in poveča njihova trajnost. Večinoma se asfaltne zmesi uporabljajo pri gradnji cest, uporabljajo pa se tudi za druge namene, kot so letališke steze, hidroizolacija (npr. na premostitvenih objektih in na ravnih strehah objektov), podlaga pri gradnji železniških prog, igrišča, športne steze in drugo (Henigman in sod., 2016).



Slika 1: Shematični prikaz sestave asfaltne zmesi (Henigman in sod., 2006: str. 43).

Figure 1: Schematic representation of the asphalt mixture composition (Henigman et al., 2006: p. 43).

Delež posameznih sestavin v asfaltni zmesi je lahko različen in je odvisen predvsem od njene namembnosti. Največji delež predstavlja zmes zrn (praviloma 92–96 % glede na maso oziroma 80–85 % glede na prostornino), vsebnost ostalih komponent pa je temu primerno manjša. Natančna sestava se določi s projektiranjem in predhodnimi preiskavami, s katerimi se preveri ustrezna uporabnost asfaltne zmesi (Henigman in sod., 2016).

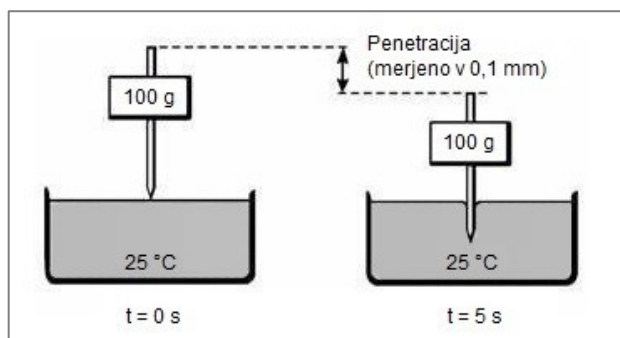
2.1.1 Bitumenska veziva

2.1.1.1 Splošno o bitumenskih vezivih

Bitumen je težko hlapljiva temnobarvna zmes, ki vsebuje različne organske substance, pridobiva pa se iz naravnih nahajališč ali s predelavo nafte. Ker so nahajališča naravnega bitumna redka, poteka pridobivanje večinoma industrijsko, kjer se surova nafta predeluje s frakcionirano destilacijo. V asfaltnih zmesih se bitumen uporablja kot vezivo in čeprav se uporablja v sorazmerno majhnih količinah, bistveno izboljša lastnosti asfaltnih zmesi (Henigman in sod., 2016).

Za bitumne, ki so proizvedeni za uporabo v asfaltnih voziščih, so pomembne predvsem fizikalne lastnosti. Na podlagi tega so razvrščeni v posamezne tipe in kot osnova za takšno razvrstitev se uporabljata penetracija in zmečičišče bitumnov.

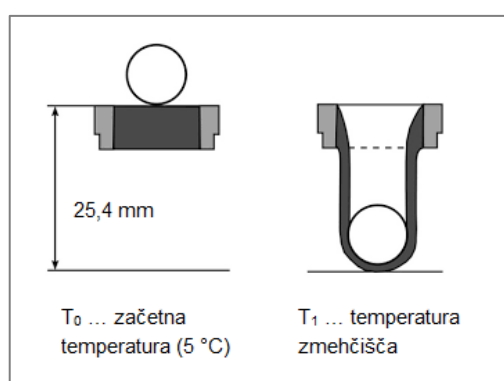
Penetracija je postopek, pri katerem se določi trdoto bitumna in je prikazan na sliki 2. Postopek se izvede s standardizirano iglo, ki se jo obremeni z maso 100 gramov in vtiskuje 5 sekund v bitumen s temperaturo 25 °C. Izmeri se globina vtisa v enotah 0,1 mm, pri čemer višja vrednost pomeni, da je bitumen mehkejši in obratno (Žmavc, 2007).



Slika 2: Merjenje penetracije bitumna (Chouhan, 2018).

Figure 2: Bitumen penetration measurement (Chouhan, 2018).

Zmečičišče predstavlja temperaturo, pri kateri se začne tečenje bitumna. Postopek poteka po standardizirani metodi, pri kateri se v prstan vgradi plast bitumna in se nanjo položi jekleno kroglico (slika 3). Začetna temperatura bitumna je 5 °C in se nato postopoma povečuje. Značilnost bitumna je, da postaja s segrevanjem mehkejši, vendar nima tališča. Med postopkom se začne deformirati, dokler ne doseže določene deformacije. Pripadajoča temperatura označuje njegovo zmečičišče in služi kot izhodišče za oceno obnašanja bitumna pri višjih temperaturah, ki jim je izpostavljen v poletnem času (Žmavc, 2007).



Slika 3: Merjenje temperature zmečičišča bitumna (Baunetz, 2019).

Figure 3: Softening point of bitumen measurement (Baunetz, 2019).

Za natančnejši opis bitumnov se določajo še ostale fizikalne lastnosti, kot so pretrgališče po Fraassu, indeks penetracije, viskoznost, duktilnost, gostota idr. (Žmavc, 2007).

2.1.1.2 Vrste bitumenskih veziv

Bitumenska veziva se razvrščajo glede na zahtevane fizikalne lastnosti, ki so določene v ustreznih standardih. V Sloveniji so to standardi SIST in SIST EN, glede na njih pa se bitumni delijo na naslednje skupine (Henigman in sod., 2016):

- standardizirani cestogradbeni bitumni,
- s polimeri modificirani bitumni (PmB),
- hladna bitumenska veziva,
- predhodno pripravljene bitumne z nižjo viskoznostjo,
- z gumo modificirani bitumni (RmB),
- trši cestogradbeni bitumni,
- oksidirani bitumni (namenjeni za industrijsko uporabo) in
- trdi industrijski bitumni (namenjeni za industrijsko uporabo).

Standardi določajo 12 standardiziranih cestogradbenih bitumnov in 5 s polimeri modificiranih bitumnov, ki so navedeni v preglednici 1.

Preglednica 1: Standardizirani cestogradbeni bitumni in s polimeri modificirani bitumni (Henigman in sod., 2016: str. 20–21).

Table 1: Standardized bitumens and polymer modified bitumens (Henigman et al., 2016: p. 20–21).

Standardizirani cestogradbeni bitumni (penetracija od 20 do 200 x 0,1 mm)		Standardizirani cestogradbeni bitumni (penetracija od 250 do 900 x 0,1 mm)	S polimeri modificirani bitumni (PmB)
B 20/30	B 50/70	B 250/330	PmB 10/40-60
B 30/45	B 70/100	B 330/430	PmB 25/55-65
B 35/50	B 100/150	B 500/650	PmB 45/80-50
B 40/60	B 160/200	B 650/900	PmB 45/80-65
			PmB 90/150-45

Številke v oznakah se nanašajo na vrednost penetracije oziroma zmehčišča. Tako na primer B 20/30 označuje standardizirani cestogradbeni bitumen, pri katerem znaša penetracija med 2 in 3 mm, PmB 10/40-60 pa označuje s polimeri modificiran bitumen, pri katerem znaša penetracija med 1 in 4 mm, temperatura zmehčišča pa 60 °C.

Standardizirani cestogradbeni bitumni so proizvod predelane nafte in brez posebnih dodatkov, kot takšni pa ohranjajo svoje naravne lastnosti. Z željo po izboljšavah so se jim začele dodajati razne umetne snovi, predvsem polimeri, ki izboljšajo njihove fizikalne in reološke lastnosti.

Najpomembnejša prednost PmB je razširjeno temperaturno območje, v katerem se zagotavlja ustrezna uporabnost. Asfaltne plasti imajo zaradi tega večjo odpornost proti nastanku kolesnic, ki so posledica visokih temperatur in težkih prometnih obremenitev, obenem pa tudi večjo odpornost proti nastanku razpok v času nizkih temperatur. Ostale izboljšave se kažejo v boljši sprejemljivosti s kamnitimi zrni, večji termični stabilnosti in večji odpornosti proti staranju (Henigman in sod., 2016). Asfaltne zmesi imajo zaradi naštetega daljšo življenjsko dobo, saj se jim ob uporabi PmB trajnost poveča za 25 do 35 % (Žmavc, 2007).

Med hladna bitumenska veziva spadajo bitumenske emulzije, fluksirani bitumni in rezani bitumni. V cestogradnji imajo pomembnejšo vlogo zlasti kationske bitumenske emulzije, ki se uporabljajo za pobrizg površine pred asfaltiranjem, za izvedbo tankoplastne ali površinske prevleke, pri sanaciji asfaltnih vozišč idr. (Henigman in sod., 2016).

2.1.2 Zmesi zrn

Zrna v asfaltnih zmesih kot osnovno nalogo opravljajo prenos prometnih obremenitev iz zgornjih plasti v nižje. Pri tem so izpostavljena zunanjim vplivom, kot so:

- mehanski vplivi prometa (pritiski in udarci pnevmatik) in
- klimatski vplivi (dež, sneg, led, zmrzal, oksidacijski procesi).

Zmes zrn se praviloma deli glede na nastanek oziroma način pridobivanja:

- naravna zrna, ki se nahajajo v rečnih nanosih (gramoznice, prodišča) ali ob vznožjih kamnitih pobočij in se pridobivajo z izkopom,
- drobljena zrna, ki so proizvedena z drobljenjem lomljenega naravnega ali umetnega kamna,
- mešana zrna, ki so pridobljena z mešanjem naravnih in drobljenih zrn,
- reciklirana zrna, ki se pridobivajo z drobljenjem že uporabljenih asfaltnih zmesi ali z izkopom materialov iz nevezanih plasti in
- umetna zrna, ki nastanejo v industrijskih procesih (npr. različne žindre pri proizvodnji kovin).

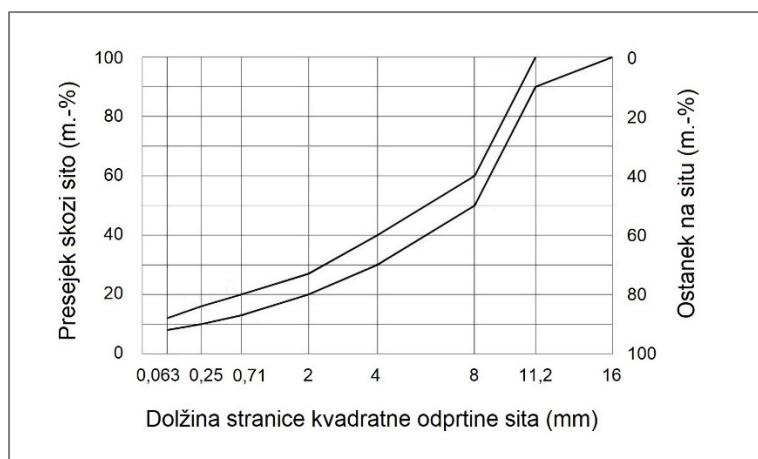
Zmes zrn je sestavljena iz ene ali več frakcij, ki jih dobimo s pomočjo sejalnih sit, ali pa ima že v naravi ustrezno sestavo zrn, ki jo lahko uporabimo za določene namene. Sestava zmesi zrn predstavlja pomembno lastnost, na podlagi katere je določena njena uporabnost in je predpisana za vsako vrsto asfaltne zmesi posebej. Frakcije, ki opisujejo sestavo zmesi zrn, so določene na podlagi spodnje (d) in zgornje (D) mejne velikosti kvadratnih odprtin na sitih, ki so opisane v preglednici 2. Sestava zmesi zrn iz frakcij se mora grafično prikazati z mejnimi krivuljami zrnivosti na ustreznem grafikonu, katerega primer je prikazan na sliki 4 (Henigman in sod., 2016).

Preglednica 2: (a) Nazivne velikosti stranic kvadratnih odprtih na sitih in (b) nazivne velikosti frakcij zmesi zrn d/D (Henigman in sod., 2016: str. 35).

Table 2: (a) Nominal sizes of square opening sides on sieves and (b) nominal sizes of aggregate fractions d/D (Henigman et al., 2016: p. 35).

(a)		(b)	
Osnovna sita (mm)	Vmesna sita (mm)	Osnovne frakcije (mm)	Vmesne frakcije (mm)
0,063		0/4	0/1
	0,09		0/2
0,125			1/4
0,25			2/4
0,5		4/8	
	0,71	8/16	8/11
1			11/16
2		16/31	16/22
4			22/31
	5,6	31/63	31/45
8			31/56
	11,2 (11)*		45/63
16			
	22,4 (22)*		
31,5 (31)*			
	45		
	56		
63			

*Vrednosti označujejo nazivne velikosti zrn



Slika 4: Primer mejnih krivulj zrnivosti za zmes kamnitih zrn za drobir z bitumenskim mastiksom SMA 11 in SMA 11 hg (ZAS, 2010, str. 53).

Figure 4: An example of grading boundary curves for the aggregate of stone mastic asphalt SMA 11 and SMA 11 hg (ZAS, 2010, p. 53).

2.1.3 Dodatki

Dodatki se uporabljajo za izboljšanje lastnosti asfaltnih zmesi. Obstaja vrsta različnih dodatkov, s katerimi se lahko dosežejo naslednje izboljšave (Henigman in sod., 2016):

- povečanje togosti zmesi in njene odpornosti proti nastanku kolesnic v času visokih temperatur,
- povečanje elastičnosti zmesi in s tem zmanjšanje nastajanja razpok v času nizkih temperatur,
- večja odpornost zmesi proti utrujanju,
- boljša sprijemljivost med kamnitimi zrni in bitumnom, s čimer se zmanjša občutljivost na vodo (luščenje),
- večja odpornost proti obrabi zmesi,
- obnovitev starega bitumenskega veziva,
- povečanje debeline bitumenskega veziva okoli zrn in s tem podaljšanje trajnosti zmesi in
- večja odpornost bitumenskega veziva proti oksidaciji in staranju.

V preglednici 3 so prikazani različni dodatki in označene lastnosti asfaltne zmesi, ki jih izboljšajo.

Preglednica 3: Izboljšanje lastnosti asfaltne zmesi z uporabo različnih dodatkov (Henigman in sod., 2016: str. 56).

Table 3: Improvement of asphalt mixture properties using various additives (Henigman et al., 2016: p. 56).

Vrsta dodatka	Trajne deformacije	Temperaturne razpoke	Razpoke zaradi utrujanja	Poškodbe zaradi vlage (luščenje)	Staranje
elastomeri	+	+	+		+
plastomeri	+				
guma		+	+		
ogljik	+				+
žveplo	+				
dopolnila	+				
antioksidanti					+
dopi				+	+
apno				+	+

2.2 Vrste asfaltnih zmesi

Asfaltne zmesi morajo biti sposobne prevzeti obremenitve, ki so jim izpostavljene skozi svojo življenjsko dobo. Njihove lastnosti in sestava se razlikujejo odvisno od položaja v voziščni konstrukciji, zato jih v osnovi delimo na:

- asfaltne zmesi, namenjene za nosilne in vezne plasti in
- asfaltne zmesi, namenjene za obrabne plasti.

Nosilne in vezne plasti se nahajajo pod obrabno plastjo, njihov osnovni namen pa je zagotoviti ustrezno nosilnost. Zato morajo biti v njih vgrajene asfaltna zmesi z določenim deležem večjih zrn, saj tvorijo takšna zrna skeletno sestavo in so bolj odporna proti preoblikovanju.

Obrabne plasti predstavljajo vrhno plast voziščnih konstrukcij in morajo poleg prevzemanja obremenitev zagotavljati še ostale lastnosti, kot so:

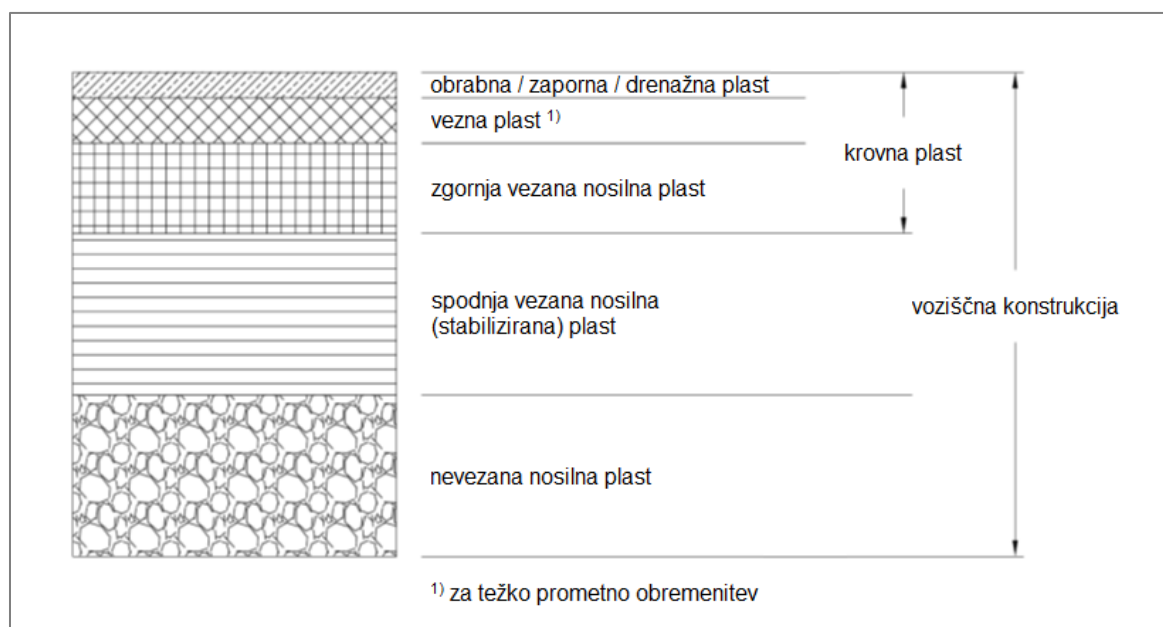
- primerna ravnost in torna sposobnost vozne površine,
- odpornost proti zaglajevanju,
- zaščita spodnjih plasti proti vremenskim vplivom in
- odpornost proti prekomernemu staranju.

V določenih pogojih morajo zagotavljati tudi posebne lastnosti, kot so (Henigman in sod., 2016; Žmavc, 2007):

- tesnitev vozne površine,
- dreniranje vozne površine,
- zmanjšanje hrupa zaradi vozil in
- svetlost vozne površine.

Glede na zahtevane lastnosti se poleg obrabne plasti uporablja tudi naziv zaporna oziroma drenažna plast (Henigman in sod., 2016).

Voziščna konstrukcija je poleg asfaltnih plasti zgrajena iz drugih plasti, ki tvorijo njeno celoto. Na sliki 5 je prikazana voziščna konstrukcija, ki je značilna za težko prometno obremenitev.



Slika 5: Značilne plasti v voziščni konstrukciji za težko prometno obremenitev (Henigman in sod., 2016: str. 68).

Figure 5: Characteristic layers in the pavement structure for heavy traffic load (Henigman et al., 2016: p. 68).

V Sloveniji so za posamezno plast voziščne konstrukcije uveljavljene naslednje asfaltne zmesi (ZAS, 2010):

- obrabna plast:
 - asfaltni beton za obrabno plast, tudi bitumenski beton – AC surf (angl. Asphalt concrete – surface),
 - drobir z bitumenskim mastiksom – SMA (angl. Stone mastic asphalt),
 - drenažni asfalt – PA (angl. Porous asphalt),
 - liti asfalt – MA (angl. Mastic asphalt),
 - tankoplastna prevleka – SS (angl. Slurry surfacing),
 - površinska prevleka – SD (angl. Surface dressing),
- vezna plast:
 - asfaltni beton za vezno plast – AC bin (angl. Asphalt concrete – binder),
- zgornja vezana nosilna plast:
 - asfaltni beton za zgornjo vezano nosilno plast – AC base (angl. Asphalt concrete – base) in
- spodnja vezana nosilna (stabilizirana) plast:
 - asfaltni beton za spodnjo vezano (stabilizirano) plast – AC base, stab (angl. Asphalt concrete – base, stabilized).

Glede na temperaturo proizvodnje ločimo vroče, tople in hladne asfaltne zmesi. Vroče asfaltne zmesi se v proizvodnem obratu pripravljajo z mešanjem pri temperaturah 150–190 °C, odvisno od vrste izbranega bitumna, oziroma tudi pri višjih temperaturah, kot na primer liti asfalti. Ustrezna temperatura predstavlja enega ključnih faktorjev za uspešno vgrajevanje asfaltnih zmesi, saj se s segrevanjem viskoznost bitumna zmanjša, s tem pa je omogočeno ustrezno zgoščevanje asfaltnih zmesi.

Tople asfaltne zmesi se proizvajajo pri temperaturah, ki so do 40 °C nižje kot pri proizvodnji z vročim postopkom. Za ohranjanje enake viskoznosti bitumna se uporabljajo posebne tehnike proizvodnje ali različni dodatki. Razlog za razvoj toplih asfaltnih zmesi je v manjši porabi energije pri proizvodnji in manjši količini emisij pri vgrajevanju, s čimer je zmanjšana obremenjenost okolja in delavcev. Zaradi nižje temperature je staranje bitumna v času proizvodnje in vgrajevanja počasnejše, kar podaljša življenjsko dobo asfaltnih zmesi. Kot prednost se šteje tudi podaljšan čas vgrajevanja, po vgradnji pa je mogoče cesto prej prepustiti prometu.

Hladne asfaltne zmesi so namenjene pretežno za krpanje udarnih jam in ostalih poškodb, zlasti na manj obremenjenih cestah. Pri vgradnji pride do kemične reakcije, ki povzroči naraščanje togosti hladne asfaltne zmesi skozi čas (Henigman in sod., 2016).

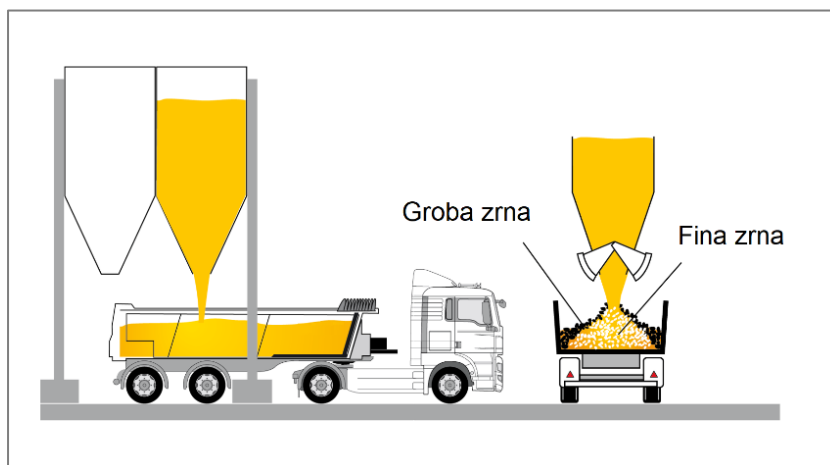
3 TEMPERATURN A SEGREGACIJA PRI VGRADNJI ASFALTNIH ZMESI

3.1 Opis problema in vzroki za nastanek

Stroup-Gardiner in Brown (2000) definirata segregacijo v asfaltnih zmesih kot pomanjkanje homogenosti sestavin v takšni meri, ki povzroči pospešeno propadanje asfaltnih zmesi. Sestavine predstavljajo bitumensko vezivo, zmes zrn, dodatki in zračne votline. Avtorja navajata tri vrste segregacije, do katerih lahko pride pri vgrajevanju asfaltnih zmesi:

- zrn avostna segregacija,
- temperaturna segregacija in
- segregacija agregat – bitumensko vezivo.

Zrn avostna segregacija predstavlja neenakomerno porazdelitev zmesi zrn v vgrajeni asfaltni zmesi. Pojavi se lahko med proizvodnjo, transportom in pri vgradnji, lokalno segregirana območja pa imajo povečan delež grobih ali finih zrn. Območja z visokim deležem grobih zrn imajo običajno povečano vsebnost zračnih votlin in zmanjšan delež bitumenskega veziva, posledice pa se kažejo kot poškodbe zaradi vlage, nastanek udarnih jam, nastanek razpok zaradi utrujanja in izletavanje zrn ter grudic asfalta. Nasprotno imajo območja z visokim deležem finih zrn zmanjšano vsebnost zračnih votlin in povečan delež bitumenskega veziva, zaradi česar so podvržena nastanku kolesnic in znojenju bitumenskega veziva na vozno površino. Na sliki 6 je prikazan pojav zrn avostne segregacije med natovarjanjem asfaltne zmesi na tovornjak, na sliki 7 pa je takšna segregacija vidna na vgrajeni asfaltni zmesi (Stroup-Gardiner, Brown, 2000).



Slika 6: Ločevanje grobih in finih zrn med natovarjanjem asfaltne zmesi na tovornjak (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).

Figure 6: Separation of coarse and fine grains while loading asphalt mixture on the truck (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).



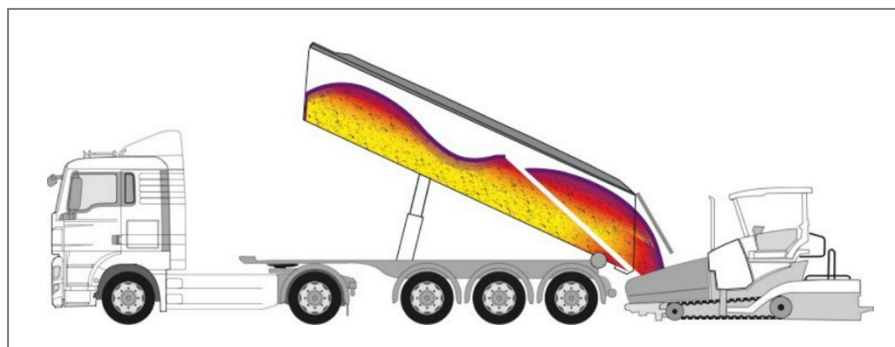
Slika 7: Primer zrnnavostne segregacije z visokim deležem grobih zrn (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).

Figure 7: An example of gradation segregation with a high share of coarse grains (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).

Temperaturna segregacija se pojavi zaradi različnega ohlajanja asfaltna zmesi pri transportu in vgradnji, zaradi česar pride do neenakomernih temperatur v vgrajeni plasti. Pri tem so kritične nizke temperature, ki onemogočajo doseganje zadostne zgoščenosti asfaltna zmesi. S tem se povečuje vsebnost zračnih votlin, kar poslabša lastnosti asfaltnih zmesi in vodi v njihovo hitrejše propadanje (Willoughby in sod., 2001; Stroup-Gardiner, Brown, 2000).

Kot tretja oblika je opredeljena segregacija med agregatom in bitumenskim vezivom, do katere pride zaradi odtekanja bitumenskega veziva pri transportu in vgradnji. Takšna segregacija je značilna predvsem za drobir z bitumenskim mastiksom (SMA), ki vsebuje visok delež bitumenskega veziva, zaradi česar se mu dodaja stabilizator, kot so na primer celulozna vlakna (Henigman in sod., 2016; Stroup-Gardiner, Brown, 2000).

V magistrskem delu smo se osredotočili na problematiko temperaturne segregacije. Obstajata dve značilni obliki temperaturne segregacije, ki nastaneta zaradi transporta asfaltna zmesi in zaradi ustavitve finišeja. V prvem primeru prihaja med transportom do ohlajanja asfaltna zmesi, zaradi česar se ustvarja ohlajen sloj na površju in ob stranicah kesona tovornjaka. Ob začetku raztovarjanja pride do zdrsa večje količine površinskega ohlajenega sloja v finiše, kar povzroči lokalno ohlajeno mesto vgrajene asfaltna zmesi (slike 8–10). Takšna mesta se pojavljajo vzdolž celotne asfaltirane površine ob menjavah tovornjakov, zaradi česar se ta segregacija imenuje tudi ciklična segregacija (Gunter, 2012; Willoughby in sod., 2001).

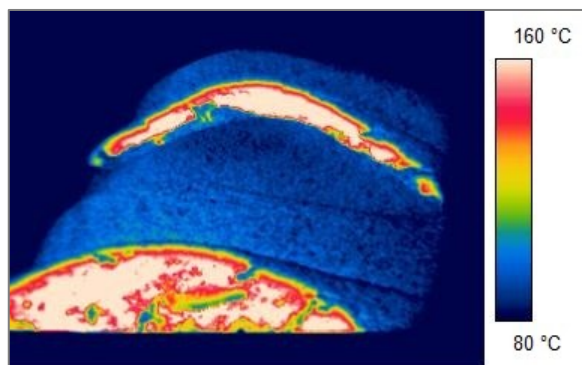


Slika 8: Zdrs ohlajenega dela ob začetku raztovarjanja asfaltna zmesi s tovornjaka v finišer (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).

Figure 8: The slip of the cooled part at the beginning of unloading the asphalt mixture from the truck into the paver (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019).



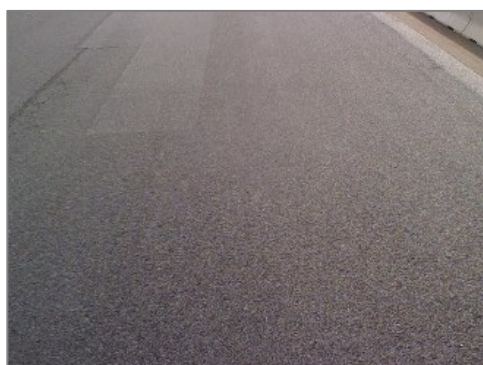
(a)



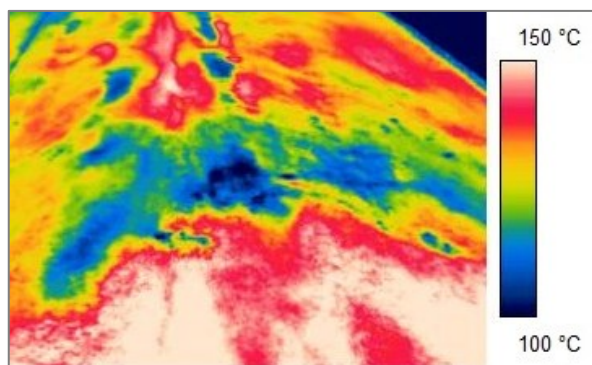
(b)

Slika 9: Asfaltna zmes pred raztovarjanjem, prikazana z (a) navadno sliko in (b) s termografsko sliko.

Figure 9: The asphalt mixture before unloading shown by (a) a regular picture and (b) a thermal picture.



(a)

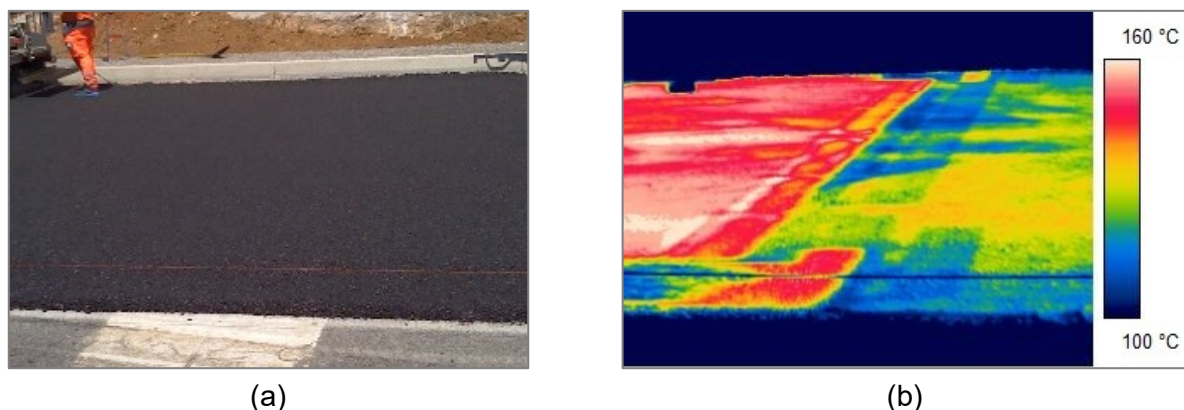


(b)

Slika 10: Pojav ohlajenega mesta asfaltna zmesi ob menjavi tovornjaka, prikazan z (a) navadno sliko in (b) s termografsko sliko.

Figure 10: Occurrence of the asphalt mixture cooled area at the truck change shown by (a) a regular picture and (b) a thermal picture.

V drugem primeru prihaja do neenakomernega ohlajanja zaradi ustavitve finišerja, ki se običajno pojavijo zaradi menjave tovarnjakov ali čakanja na dostavo asfaltne zmesi. Tik za finišerjem je podlaga izven dosega valjarjev, zaradi česar se na tem mestu začne asfaltna zmes ohlajevati še pred zgoščevanjem. Na sliki 11 je prikazan primer ohlavitve vgrajene asfaltne zmesi zaradi 10-minutne ustavitve finišerja (Stroup-Gardiner, 2015).



Slika 11: Pojav ohlajenega mesta asfaltne zmesi zaradi ustavitve finišerja, prikazan z (a) navadno sliko in (b) s termografsko sliko.

Figure 11: Occurrence of the asphalt mixture cooled area due to the paver stop shown by (a) a regular picture and (b) a thermal picture.

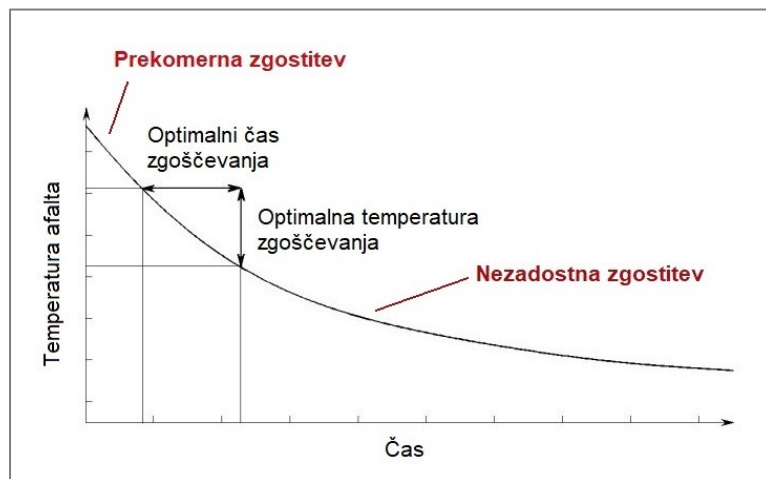
3.2 Vpliv temperaturne segregacije na asfaltne zmesi

Obnašanje bitumna v asfaltnih zmesih se spreminja glede na temperaturo, saj se s segrevanjem zmanjšuje njegova viskoznost. Bitumen tako prehaja od trde snovi pri nižjih temperaturah do tekoče snovi pri visokih temperaturah. Pri proizvodnji mora zato biti bitumen dovolj segret, da ima ustrezno viskoznost in lahko med mešanjem obda kamnita zrna. Prav tako mora biti pri vgrajevanju temperatura bitumna dovolj visoka, da je omogočeno ustrezno zgoščevanje asfaltne zmesi.

V fazi zgoščevanja se zmanjšuje vsebnost zračnih votlin v asfaltni zmesi in povečuje njena gostota, s čimer se izboljšujejo njene mehanske lastnosti. Vendar pa to izboljšanje poteka le do neke mere, saj je za doseganje optimalnih lastnosti še vedno potreben določen delež zračnih votlin, ki znaša za obrabne plasti 3–6 v. % in nosilne plasti 4–9 v. %. Bitumensko vezivo v primeru prekomernega zgoščevanja zapolni zračne votline in razmakne kamnita zrna, zaradi česar se prekine njihov medsebojni stik. Notranje trenje se tako v asfaltni zmesi zmanjša, kar ima za posledico zmanjšanje odpornosti proti deformacijam. V skrajnem primeru lahko pride do iztisnjenja bitumna na površino (znojenje), zaradi česar je zmanjšana tudi torna sposobnost površine (Henigman in sod., 2016; Bijleveld in sod., 2012; Žmavc, 2007).

Med zgoščevanjem predstavlja temperatura enega ključnih faktorjev, saj zelo vpliva na obnašanje bitumna in posledično na asfaltne zmesi. Zaradi različnih tipov bitumna ima vsaka vrsta asfaltne zmesi predpisano optimalno temperaturo vgrajevanja, pri kateri je omogočena ustrezna zgostitev. Če je temperatura asfaltne zmesi previsoka, lahko zaradi premajhne viskoznosti bitumna pride do prekomerne zgostitve, če pa je temperatura prenizka, je

doseganje zgostitve oteženo ali celo onemogočeno (slika 12). Pri temperaturni segregaciji se zgodi problem prenizkih temperatur, kar posledično povzroči premajhno zgoščenost asfaltnih zmesi (Bijleveld in sod., 2012; Willoughby in sod., 2001).



Slika 12: Optimalni čas in temperatura zgoščevanja asfaltni zmesi (Bijleveld in sod., 2012: str. 3).

Figure 12: Optimal compaction time and compaction temperature of the asphalt mixture (Bijleveld et al., 2012: p. 3).

Gostota je eden najpomembnejših kazalnikov kakovosti vgrajene asfaltni zmesi, saj neposredno vpliva na lastnosti, kot so togost, odpornost proti utrujanju, odpornost proti deformacijam, odpornost proti razpokam, odpornost proti izletavanju zrn, prepustnost in odpornost proti staranju (Bijleveld in sod., 2012; Willoughby in sod., 2001).

Z doseganjem optimalne gostote se dosežejo tudi optimalne lastnosti, pri temperaturni segregaciji pa se zaradi premajhne zgoščenosti lastnosti poslabšajo. Izkazalo se je, da predstavlja temperaturna segregacija enega najpogostejših problemov pri vgradnji asfaltnih zmesi, ki ima precejšen škodljiv vpliv na trajnost asfaltnih zmesi (Sebesta, Scullion, Saarenketo, 2013; Stroup-Gardiner, Brown, 2000).

Na sliki 13 (a) je prikazano zastajanje vode po deževnem dogodku, ki se je pojavilo na segregiranem mestu zaradi povečane prepustnosti asfaltni zmesi. Zaradi odprte strukture je poleg vdora vode omogočen dostop tudi zraku, zaradi česar se poveča oksidacija in otrjevanje bitumna. Na sliki 13 (b) je prikazano propadanje vozišča zaradi nastanka razpok in izletavanja zrn, ki sta značilni obliki propadanja asfaltni zmesi zaradi temperaturne segregacije (Willoughby in sod., 2001).



(a)



(b)

Slika 13: (a) Zastajanje vode po deževnem dogodku in (b) propadanje vozišča zaradi temperature segregacije (Pavement Interactive, 2019; Sebesta, Scullion, Saarenketo, 2013: str. 9).

Figure 13: (a) Water stagnation after a rainy event and (b) pavement deterioration due to temperature segregation (Pavement Interactive, 2019; Sebesta, Scullion, Saarenketo, 2013: p. 9).

Pri ciklični temperaturni segregaciji se segregirana območja pojavljajo lokalno in zajemajo le določen delež asfaltirane površine (v najslabšem primeru polovico površine). Vendar pa zaradi kontinuirnega pojavljanja narekujejo življenjsko dobo celotnega odseka vozišča, za katerega je treba v celoti izvesti predčasno vzdrževanje oziroma sanacijo (slika 14) (Willoughby in sod., 2001).



Slika 14: Primera poslabšanja asfaltnih zmesi zaradi ciklične temperature segregacije (Brock, Jakob, 2019: str. 19; Hedderich, 2014: str. 5).

Figure 14: Examples of the asphalt mixture deterioration due to the cyclic temperature segregation (Brock, Jakob, 2019: p. 19; Hedderich, 2014: p. 5).

Stopnja temperature segregacije je odvisna od magnitude temperaturnih razlik, pri čemer imajo večje razlike večji negativen vpliv. Na zelo segregiranih območjih so lahko lastnosti asfalta poslabšane v tolikšni meri, da v okviru izvajanja kontrole jedra pri odvzemu razpadejo (slika 15) (Stroup-Gardiner, Brown, 2000). Bode (2012) navaja, da je lahko življenjska doba asfaltnih zmesi zaradi segregacije zmanjšana za več kot polovico.



Slika 15: Razpad odvzetega jedra zaradi visoke stopnje segregacije (Von Quintus, Reiter, 2018: str. 5).

Figure 15: Collapse of the taken core due to the high level of segregation (Von Quintus, Reiter, 2018: p. 5).

V obsežni študiji, ki sta jo opravila Stroup-Gardiner in Brown (2000), je bilo analizirano odkrivanje, opredelitev in vrednotenje segregacije ter njenega vpliva na asfaltne zmesi. Študija je bila izvedena v Združenih državah Amerike in je vključevala 14 projektov vgrajevanja asfaltnih zmesi širom države. Meritve so bile opravljene s termovizijsko kamero, s katero je bila merjena temperaturna segregacija, in z laserskim merilnikom površinske teksture, s katerim je bila merjena zrnastostna segregacija. Dodatno so se izvajale meritve zgoščenosti z izotopskim merilnikom.

Na mestih, kjer so bile izvedene omenjene meritve, je bilo odvzetih skupno več kot 100 jeder, ki so jim bile v laboratoriju merjene naslednje količine, s katerimi označujemo nosilnost vozišča:

- vsebnost zračnih votlin,
- delež bitumenskega veziva,
- modul elastičnosti,
- dinamični modul,
- natezna trdnost suhega preskušanca,
- natezna trdnost mokrega preskušanca,
- natezna trdnost pri nizkih temperaturah in
- odpornost proti utrujanju.

V preglednici 4 so prikazani odstotki vrednosti količin glede na vrednosti količin nesegregirane asfaltne zmesi. S stopnjevanjem temperaturne segregacije so se rezultati slabšali, kar pomeni, da je vrednost zračnih votlin naraščala, vrednosti ostalih količin pa so se manjšale. Natezna trdnost pri nizkih temperaturah ni bila določena zaradi težavnosti izvedbe preizkusa.

Preglednica 4: Vpliv temperaturne segregacije na lastnosti asfaltnih zmesi (Stroup-Gardiner, Brown, 2000: str. 81).

Table 4: Influence of the temperature segregation on the asphalt mixture properties (Stroup-Gardiner, Brown, 2000: p. 81).

	Stopnja temperaturne segregacije po Stroup-Gardiner in Brown (2000)			
	ničelna	nizka	zmerna	visoka
Povečanje vsebnosti zračnih votlin	/	2,5–4,5 %	4,5–6,5 %	>6,5 %
Zmanjšanje deleža bitumna	/	0,3–0,75 %	0,75–1,3 %	>1,3 %
Odstotek vrednosti glede na nesegregirano asfaltno zmes				
Modul elastičnosti	Rahlo povečanje.	70–90 %	50–70 %	<50 %
Dinamični modul	Rahlo povečanje.	80–90 %	70–80 %	50–70 %
Natezna trdnost suhega preskušanca	110 %	90–100 %	50–80 %	30–50 %
Natezna trdnost mokrega preskušanca	80–90 %	75 %	50 %	30 %
Natezna trdnost pri nizkih temperaturah	Brez zaključkov zaradi težavnosti izvedbe preizkusa			
Izguba odpornosti proti utrujanju	Brez ocene.	38 %	80 %	99 %

Na podlagi rezultatov so bile določene štiri stopnje temperaturne segregacije, ki so prikazane v preglednici 5. Temperaturna razlika, ki v preglednici definira omenjene stopnje, se nanaša na razliko med najvišjo in najnižjo temperaturo asfaltna zmesi na odsekih dolžine 10 m.

Preglednica 5: Stopnje temperaturne segregacije, ki sta jih predlagala Stroup-Gardiner in Brown (2000: str. 3).

Table 5: Temperature segregation levels suggested by Stroup-Gardiner and Brown (2000: p. 3).

Stopnja temperaturne segregacije	Temperaturna razlika (°C)
ničelna	≤10
nizka	10–16
zmerna	16–21
visoka	>21

3.3 Odkrivanje temperaturne segregacije s pomočjo IR termografije

Prvotno je veljalo mišljenje, da obstaja le zrnavostna segregacija in da je to edini razlog za pojav manj zgoščenih mest pri vgrajevanju asfaltnih zmesi. V zadnjem desetletju 20. stoletja pa se je začela odkrivati temperaturna segregacija in njen vpliv na poslabšanje lastnosti asfaltnih zmesi. Sprva so se lokacije ohlajenih mest ugotavljale z ročnimi merilniki temperature, kasneje pa so se začele iskati boljše in priročneje metode. Kot ena takšnih metod se je izkazala uporaba infrardeče (IR) termografije, ki so jo številne študije potrdile kot učinkovito tehniko odkrivanja temperaturnih razlik (Sebesta, Scullion, Saarenketo, 2013; Hribar, 2008).

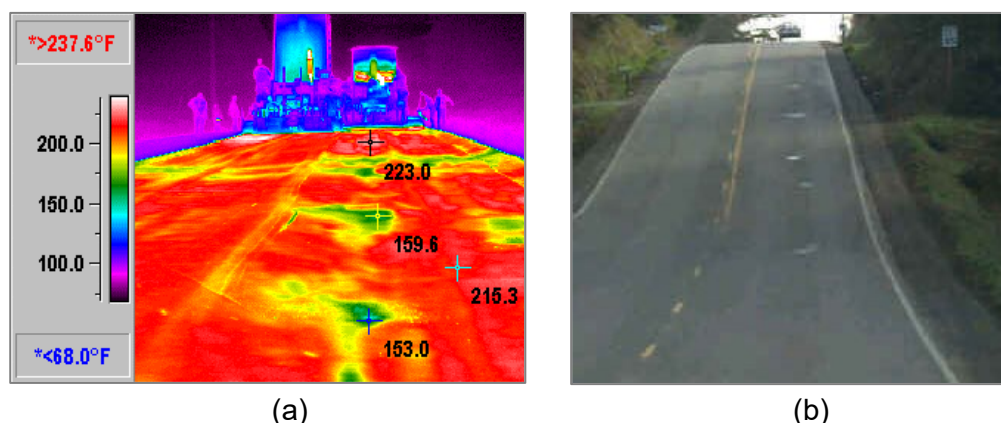
Infrardeča termografija deluje na podlagi sprejemanja infrardečega sevanja, ki ga oddajajo vsa telesa s temperaturo nad absolutno ničlo ($T > 0\text{ K}$). Glede na sprejeto sevanje se določi temperatura telesa, pri čemer imajo telesa z višjo intenziteto oddajanja infrardečega sevanja višjo temperaturo. Osnovna naprava za izvajanje takšnih meritev je infrardeči termometer ali pirometer, ki je namenjen za točkovno merjenje (slika 16 (a)). Druga, zmogljivejša naprava je infrardeča kamera ali termovizijska kamera, ki omogoča širši zajem merjene površine, rezultat pa je termografska slika, ki ji pravimo termogram (slika 16 (b)) (Usamentiaga in sod., 2014).



Slika 16: (a) Infrardeči termometer in (b) termovizijska kamera (Distrimesure, 2019; Flir Systems, Inc., 2019).

Figure 16: (a) Infrared thermometer and (b) thermal camera (Distrimesure, 2019; Flir Systems, Inc., 2019).

Naprave za merjenje temperature na podlagi infrardečega sevanja, zlasti termovizijske kamere, so omogočile poglobljeno proučevanje temperaturne segregacije. Kot primer je na sliki 17 (a) prikazan termogram, na katerem so vidna ohlajena mesta vgrajene asfaltne zmesi, na sliki 17 (b) pa je prikazana navadna fotografija, na kateri je vidno zastajanje vode na slabo zgoščenih mestih (Willoughby in sod., 2001).

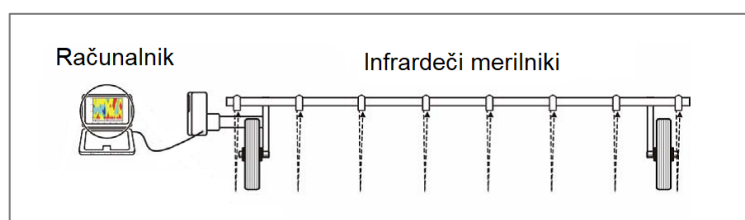


Slika 17: (a) Ohlajena mesta, posneta s termovizijsko kamero, in (b) zastajanje vode na slabo zgoščenih mestih, posnetih z navadnim fotoaparatom (Willoughby in sod., 2001: str. 38).

Figure 17: (a) Cooled locations taken with a thermal camera and (b) water stagnation in poorly compacted locations taken with a regular camera (Willoughby et al., 2001: p. 38).

Čeprav je termovizijska kamera omogočila proučevanje temperaturne segregacije, pa njeno ustreznost za širšo uporabo omejujejo nekatere pomanjkljivosti. Zaradi ročnega izvajanja meritev je potrebno dosledno spremljanje poteka asfaltnih del, pri čemer je poleg zajemanja slik potrebno tudi beleženje lokacije posameznih slik. Po izvedenih meritvah je potrebna obdelava slik, kar je časovno zamudno. Poleg tega se širina zajete površine na slikah zaradi perspektive z oddaljenostjo manjša, čeprav v realnosti ostaja enaka. Pri obdelavi meritev in spreminjanju slik v temperaturna polja se ta širina pretvori v konstantno razdaljo, zaradi česar pride do napak (Ter Huerne, Dorée, Miller, 2009; Stroup-Gardiner, Brown, 2000).

Zaradi omenjenih pomanjkljivosti so se začele iskati nove rešitve, ki bi omogočile avtomatizacijo in natančnejše meritve. Sebesta in sod. (2006) so tako v svoji študiji razvili merilni sistem, ki je bil sestavljen iz droga in infrardečih merilnikov, prikazan na slikah 18 in 19. Poleg tega je vseboval napravo za merjenje razdalje in računalnik za sprotno prikazovanje meritev. Takšen sistem je omogočal zvezno merjenje temperature, kot rezultat pa je nastalo temperaturno polje asfaltirane površine, prikazano s termografsko sliko (slika 20).



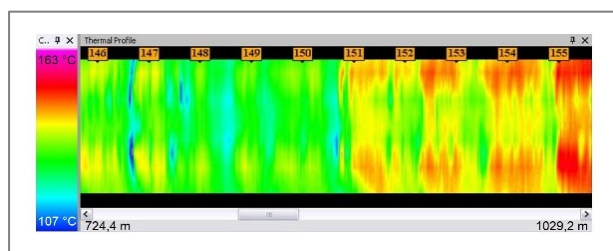
Slika 18: Koncept merilnega sistema iz droga in infrardečih merilnikov (Sebesta in sod., 2006: str. 4).

Figure 18: The concept of a measuring system made of a bar and infrared sensors (Sebesta et al., 2006: p. 4).



Slika 19: Merilni sistem, narejen iz droga in infrardečih merilnikov (Sebesta in sod., 2006: str. 5).

Figure 19: A measuring system made of a bar and infrared sensors (Sebesta et al., 2006: p. 5).



Slika 20: Primer temperaturnega polja (Sebesta, Scullion, 2012: str. 29).

Figure 20: An example of a thermal profile (Sebesta, Scullion, 2012: p. 29).

Opisani merilni sistem je še vedno zahteval ročno upravljanje, zaradi česar se je zasnova oblika, ki je omogočila namestitvev na zadnji del finiŕerja (slika 21). S tem se je zajemanje meritev precej olajŕalo, saj je bila doseŕena polna avtomatizacija postopka (TxDOT, 2019).



Slika 21: Drog z infrardečimi merilniki, nameŕŕen na finiŕerju (TxDOT, 2019: str. 6–46).

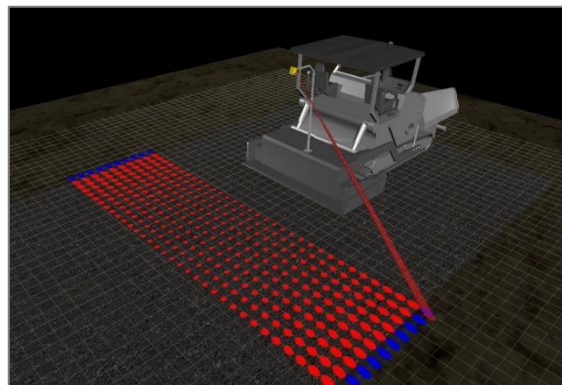
Figure 21: A bar with infrared sensors mounted on the paver (TxDOT, 2019: p. 6–46).

Kasneje je drog z infrardečimi merilniki nadomestila inovativna reŕitev s t. i. infrardečim temperaturnim čitalnikom ali termoskenerjem, ki je prikazan na sliki 22. Zaradi kompaktne oblike zavzame takŕna merilna oprema manj prostora, poleg tega je zaradi viŕje pozicije

omogočeno neovirano gibanje delavcev za finišerjem (TxDOT, 2019). Zajemanje meritev poteka kontinuirno po celotni površini, pri tem pa nastane polje točkovnih meritev, ki se pretvorijo v grafični prikaz v obliki termografske slike temperaturnega polja (Joseph Vögele AG, 2019a).



(a)



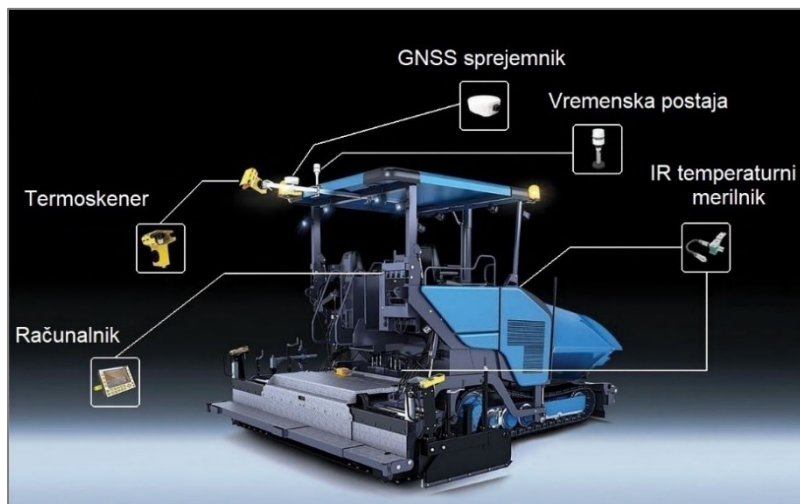
(b)

Slika 22: (a) Termoskener in (b) način zajemanja podatkov s termoskenerjem (TXAPA, 2019: str. 18; ForConstructionPros, 2015).

Figure 22: (a) The IR temperature scanner and (b) a way of capturing data with the IR temperature scanner (TXAPA, 2019: p. 18; ForConstructionPros, 2015).

Avtomatizacija postopka je poleg meritev temperature asfaltne zmesi vključila še spremljanje ostalih podatkov. Na sliki 23 je prikazana merilna oprema, ki zajema naslednje komponente (MOBA Mobile Automation AG, 2020):

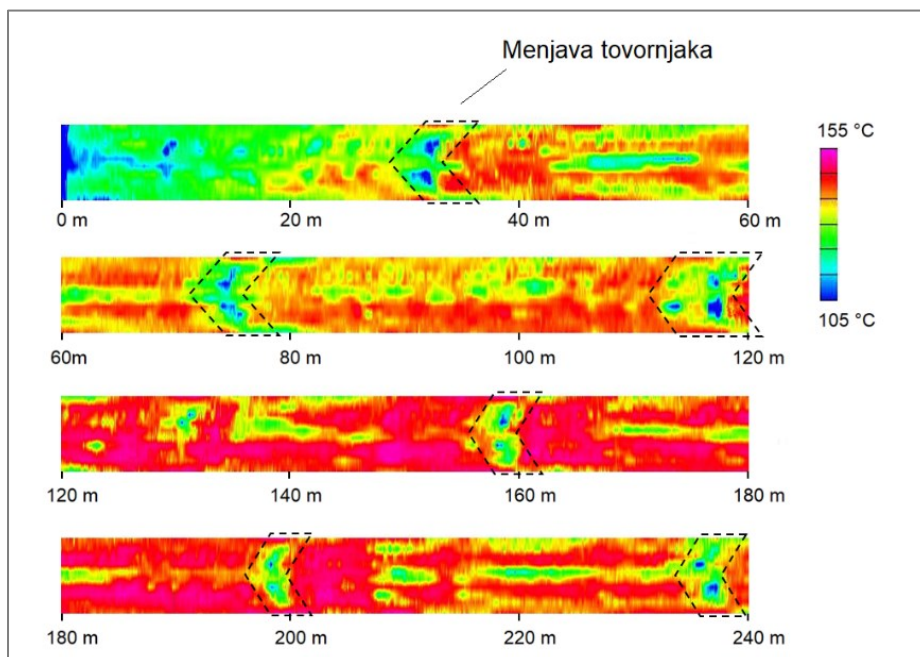
- računalnik – shranjevanje in sprotno spremljanje podatkov,
- termoskener – merjenje temperature asfaltne zmesi,
- GNSS sprejemnik – določanje pozicije meritev,
- vremenska postaja – merjenje temperature zraka, vlažnosti, hitrosti vetra in zračnega pritiska in
- IR točkovni termometer z možnostjo spreminjanja pozicije – dodatno merjenje temperature asfaltne zmesi in/ali merjenje temperature podlage.



Slika 23: Merilna oprema za zajemanje podatkov med vgrajevanjem asfaltne zmesi (MOBA Mobile Automation AG, 2020).

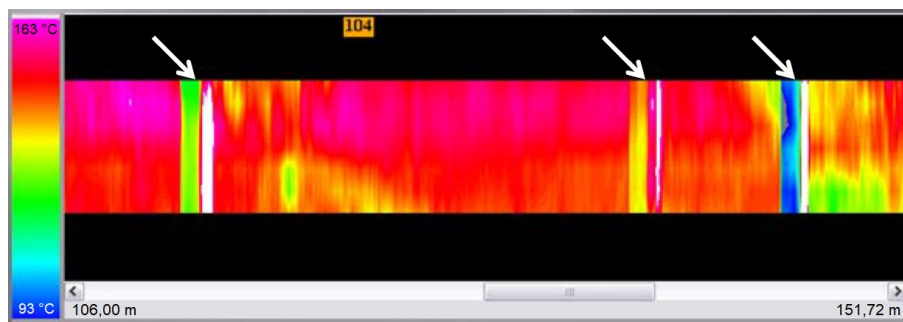
Figure 23: Measuring equipment for taking data during the placement of asphalt mixture (MOBA Mobile Automation AG, 2020).

Razvoj opisanih sistemov je omogočil natančno spremljanje temperature in pregled nad izvajanjem meritev. Na slikah 24 in 25 so predstavljena temperaturna polja, ki prikazujejo oba značilna vzroka za nastanek temperaturnih razlik, in sicer ciklično segregacijo in segregacijo zaradi ustavitve finišeja. Pri ciklični segregaciji imajo ohlajena mesta značilno obliko črke »V« in se na sliki 24 pojavljajo ob menjavah tovornjakov na približno vsakih 40 m, medtem ko imajo ohlajena mesta pri ustavitvah finišeja pravokotno obliko (Milanović, Domitrović, Rukavina, 2012).



Slika 24: Ohlajena mesta zaradi ciklične temperaturne segregacije z značilno obliko črke »V« (Sebesta in sod., 2006: str. 7).

Figure 24: Cooled locations due to cyclic temperature segregation with the characteristic "V" shape (Sebesta et al., 2006: p. 7).



Slika 25: Ohlajena mesta pravokotne oblike zaradi ustavitv finiŕerja (Rand, 2010: str. 7).

Figure 25: Cooled locations with rectangular shape due to paver stops (Rand, 2010: p. 7).

Uporaba termoskenerja se je izkazala kot učinkovita metoda. Poleg avtomatizacije ima naslednje prednosti (Joseph Vögele AG, 2019a; Sebesta, Scullion, Saarenketo, 2013):

- je nekontaktna in neporušna metoda,
- omogoča merjenje celotne površine vgrajene asfaltne zmesi,
- vključno z uporabo GNSS sprejemnika je mogoče natančno določiti lokacijo vsake posamezne točke na temperaturnem polju. S tem je mogoče naknadno preverjanje potencialno šibkih mest,
- meritve so natančne, saj dosegajo termoskenerji natančnost ± 2 °C in
- rezultati meritev so dosegljivi takoj, kar omogoča izvajalcem in nadzornikom sprotno spremljanje vgrajevanja in izvajanje ukrepov ob pojavu morebitnih nepravilnosti.

Vendar pa imajo meritve z infrardečo termografijo to slabost, da merijo temperaturo samo na površini asfaltne zmesi (Stroup-Gardiner, Brown, 2000). V primeru temperaturne segregacije zaradi ustavitv finiŕerja, kjer nastane časovni zamik meritev, pride do razlik med izmerjeno temperaturo na površini in temperaturo v notranjosti asfaltne zmesi, saj se asfaltna zmes na površini hitreje ohlaja kot v notranjosti. Za določitev dejanske temperature v notranjosti bi zato bili potrebni ustrezni izračuni (Ter Huerne, Dorée, Miller, 2009).

4 REGULATIVA IN TEMPERATURA ASFALTNIH ZMESI

V tem poglavju smo proučili slovensko tehnično regulativo glede kontrole temperature med vgrajevanjem asfaltne zmesi. Opisali smo postopke izvajanja kontrole in kriterije, ki jih postavlja regulativa.

Polega tega smo proučili literaturo o tujih specifikacijah glede temperaturne segregacije med vgrajevanjem asfaltne zmesi. Države, v katerih so izdelali specifikacije za kontrolo in vrednotenje omenjenega problema, so ZDA, Švedska in Norveška. V tem poglavju so opisane in predstavljene tudi te specifikacije.

Tako slovensko regulativo kot tuje specifikacije smo nato upoštevali pri analizi in vrednotenju rezultatov, ki smo jih pridobili z meritvami na izbranih projektih in so predstavljeni v poglavjih 5 *TEMPERATURA IN TEMPERATURN A SEGREGACIJA PRI VGRADNJI ASFALTNE ZMESI NA IZBRANEM PROJEKTU* in 6.2 *Analiza vpliva uporabe podajalnika Vögele na temperaturno segregacijo na izbranem projektu*. Na ta način smo lahko ocenili učinkovitost slovenske tehnične regulative glede zaznavanja in vrednotenja temperaturne segregacije in jo primerjali s tujimi specifikacijami.

4.1 Slovenska tehnična regulativa

V Sloveniji se kontrola vgrajevanja asfaltnih zmesi izvaja po postopkih, ki so opisani v tehničnih specifikacijah za ceste (TSC). Postopki, ki se nanašajo na temperaturo asfaltnih zmesi, so opisani v tehnični specifikaciji TSC 06.300 / 06.410 : 2009 Smernice in tehnični pogoji za graditev asfaltnih plasti (MzP, DRSC, 2009).

TSC določa, da je treba pri prevozu asfaltnih zmesi uporabiti ustrezna vozila – tovornjake prekucnike, ki morajo imeti ustrezno zaščito pred hlajenjem, padavinami in onesnaženjem. Za razdalje nad 70 km je treba asfaltne zmesi praviloma prevažati z vozili, ki imajo termo-kesone.

Vgrajevanje asfaltnih zmesi lahko poteka le v primernih vremenskih razmerah. Ustrezna temperatura zraka in podlage mora znašati:

- najmanj 3 °C za obrabne plasti in
- najmanj 0 °C za vezane nosilne plasti.

TSC predpisuje, da mora temperatura asfaltne zmesi pri vgrajevanju znašati znotraj postavljenih mejnih vrednosti. Temperatura je določena glede na vrsto bitumna in je prikazana v preglednici 6, v kateri je poleg priporočene vrednosti predpisana tudi najnižja dovoljena vrednost. V primeru hladnega in vetrovnega vremena ter pri ročnem vgrajevanju mora biti najnižja temperatura za 10 °C višja od predpisane spodnje mejne vrednosti. Najvišja dovoljena temperatura je lahko za 20 °C višja od priporočene. TSC tako določa mejne vrednosti temperature, medtem ko postopkov za odkrivanje in vrednotenje temperaturne segregacije ne predpisuje (MzP, DRSC, 2009).

Preglednica 6: Priporočena in najnižja temperatura asfaltne zmesi pri vgrajevanju (MzP, DRSC, 2009: str. 12).

Table 6: Recommended and minimum placement temperature of asphalt mixture (MzP, DRSC, 2009: p. 12).

Tip bitumna	Priporočena temperatura asfaltne zmesi pri vgrajevanju (°C)	Najnižja temperatura asfaltne zmesi za vgrajevalnim strojem (°C)
B 160/220	135	110
B 100/150	140	115
B 70/100	145	120
B 50/70	155	130
B 35/50	165	140
PmB	Po navodilih proizvajalca PmB	Po navodilih proizvajalca PmB

Meritve temperature asfaltne zmesi se izvajajo v okviru notranje in zunanje kontrole, pogostost meritev pa je prikazana v preglednici 7. TSC določa, da se morajo meritve izvajati v skladu s standardom SIST EN 12697-13 (MzP, DRSC, 2009).

Preglednica 7: Pogostost meritev temperature za notranjo in zunanjo kontrolo (MzP, DRSC, 2009: str. 15, 16).

Table 7: Frequency of temperature measurements for internal and external control (MzP, DRSC, 2009: p. 15–16).

Vrsta asfaltne zmesi	Notranja kontrola	Zunanja kontrola
obrabne plasti	na 500 t	na 2500 t
vezane zgornje nosilne plasti	na 1000 t	na 4000 t

Standard SIST EN 12697-13 opisuje uporabo dveh merilnih instrumentov, in sicer kontaktni termometer in infrardeči (IR) termometer. Primer digitalnega kontaktnega termometra je na sliki 26, primer IR termometra pa je na sliki 16 (a) v poglavju 3.3 *Detekcija temperaturne segregacije s pomočjo IR termografije* (SIST, 2018).



Slika 26: Digitalni kontaktni termometer (Priggen, 2019).

Figure 26: A digital contact thermometer (Priggen, 2019).

a) Kontaktni termometer

Meritve temperature asfaltne zmesi s kontaktnim termometrom se izvajajo na tovornjaku in za finišerjem. Na tovornjaku je treba opraviti meritve na vsaki strani na vsaj štirih različnih mestih. Sondo termometra je treba vstaviti vsaj 100 mm v globino in vsaj 500 mm od robov tovora. Rezultat se izračuna kot povprečje vseh meritev.

Za finišerjem je treba izmeriti temperaturo asfaltne zmesi z vstavitvijo sonde do sredine plasti. Opraviti je treba vsaj štiri meritve pred ali med zgoščevanjem, rezultat pa predstavlja povprečje izmerjenih vrednosti (SIST, 2018).

b) IR termometer

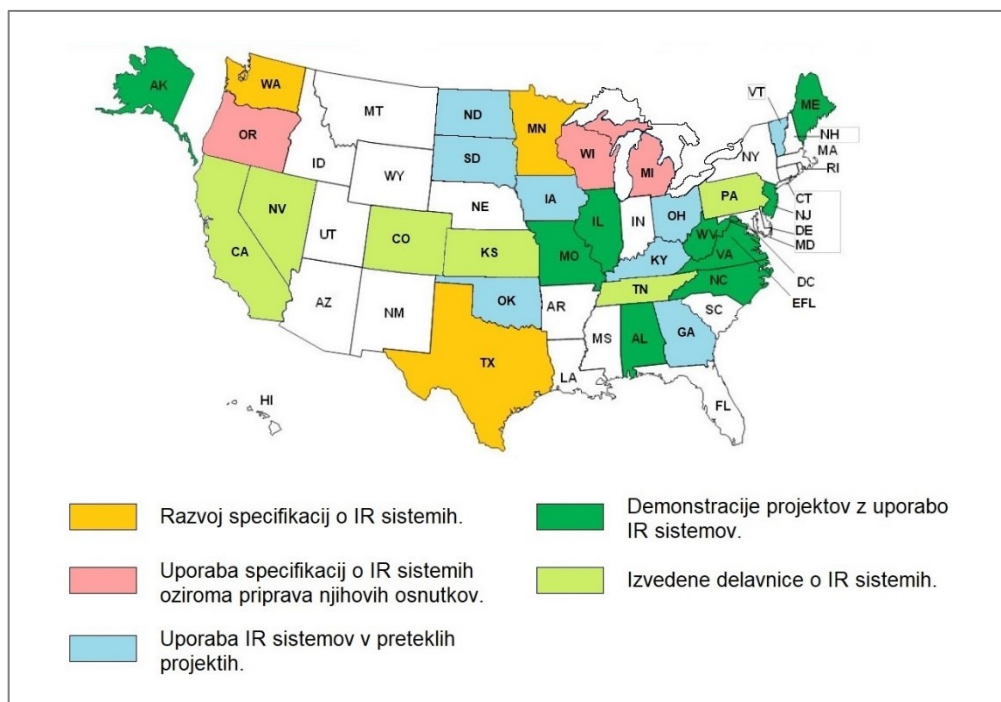
Meritve z IR termometrom se izvajajo na površini asfaltne zmesi na tovornjaku in v vsebniku finišerja. Na tovornjaku je treba opraviti meritve na vsaki strani na vsaj štirih različnih mestih, ki morajo biti oddaljena od roba tovora za vsaj 500 mm. Rezultat se izračuna kot povprečje vseh meritev.

V vsebniku finišerja se temperatura izmeri z usmeritvijo IR termometra v premikajočo asfaltno zmes. Opraviti je treba vsaj štiri meritve, rezultat pa predstavlja povprečje izmerjenih vrednosti (SIST, 2018).

4.2 Pregled tuje literature

Naredili smo pregled literature o tuji praksi kontrole kakovosti, saj smo želeli ugotoviti, ali obstajajo specifikacije, ki določajo postopke in merila za odkrivanje temperaturne segregacije. Izkazalo se je, da so takšne specifikacije izdelali v ZDA, na Švedskem in Norveškem.

V ZDA so začeli v proces kontrole intenzivno vpeljevati IR sisteme zaradi njihove učinkovitosti. Nekatere zvezne države so izdelale specifikacije in začele takšne sisteme uporabljati, v številnih zveznih državah pa potekajo delavnice in predstavitveni projekti na omenjeno temo (slika 27) (AASHTO, 2019).



Slika 27: Uporaba specifikacij o IR sistemih v ZDA (AASHTO, 2019).
Figure 27: Use of specifications on IR systems in the USA (AASHTO, 2019).

Najpogostejše uporabljena specifikacija v ZDA je Tex-244-F, ki jo je razvilo Teksaško ministrstvo za transport (angl. Texas Department of Transportation – TxDOT). Specifikacija predpisuje postopek z uporabo termovizijske kamere in termoskenerja (Von Quintus, 2017).

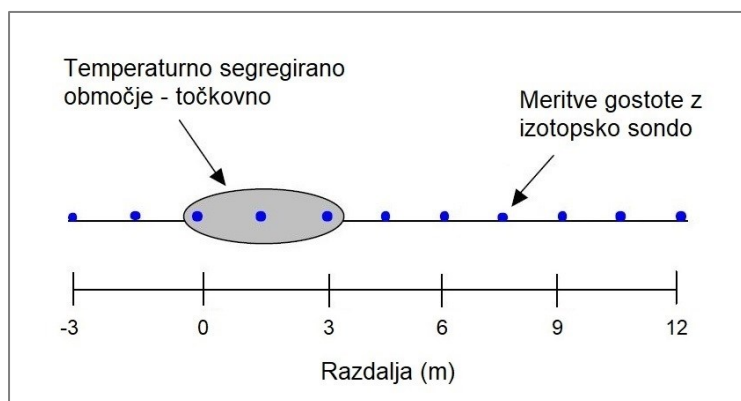
V Evropi so svojo metodo za vrednotenje temperaturne segregacije razvili na Švedskem in Norveškem in vključuje uporabo termoskenerja. V ostalih evropskih državah ob pregledu literature ni bilo zaslediti, da bi se uporabljale specifikacije v zvezi s temperaturno segregacijo (EAPA, 2017; Sebesta, Scullion, Saarenketo, 2013).

4.3 Specifikacija Tex-244-F (ZDA)

4.3.1 Predhodne študije in opredelitev stopenj temperaturne segregacije

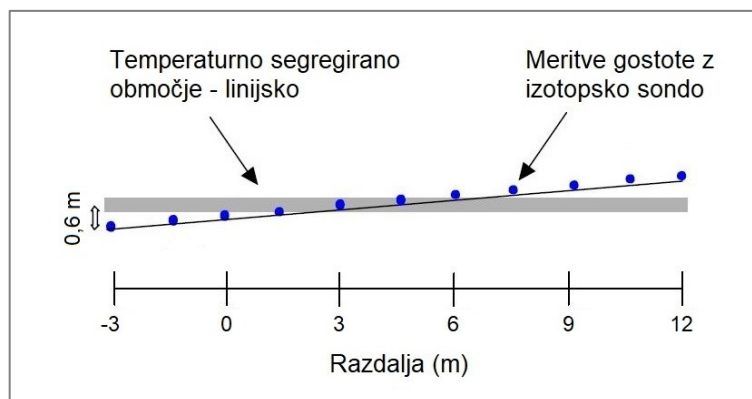
Pred izdelavo specifikacije Tex-244-F so bile opravljene študije, v katerih je bil proučevan vpliv temperaturnih razlik na nihanje gostote vgrajene asfaltni zmesi. V raziskavah, ki so bile izvedene v okviru Washingtonskega ministrstva za transport, je bilo ugotovljeno, da 89 % obravnavanih lokacij s temperaturno razliko nad 14 °C ni dosegalo kriterijev iz njihove specifikacije o enakomernosti gostote (Willoughby in sod., 2001). Do podobnih zaključkov so prišli v Teksaškem inštitutu za transport, kjer so na podlagi raziskav ugotovili, da so pri temperaturnih razlikah, večjih od 14 °C, pričakovane precejšnje spremembe v asfaltni zmesi (Sebesta, Scullion, 2002).

Specifikacija o enakomernosti gostote, ki je bila uporabljena v raziskavah Washingtonskega ministrstva za transport, določa, da je lahko največja razlika med maksimalno in minimalno gostoto 96 kg/m³ in največja razlika med povprečno in minimalno gostoto 48 kg/m³ na razdalji 15 m. Meritve se izvedejo z izotopsko sondo vsakih 1,5 m, rezultat pa je t. i. profil gostote. V primeru točkovne segregacije se mora profil začeti 3 m pred segregiranim območjem in potekati prek tega območja vzporedno z robom ceste (slika 28). V primeru linijske segregacije pa mora biti profil zamaknjen, da se lahko segregirano območje ustrezno ovrednoti (slika 29) (Willoughby in sod., 2001).



Slika 28: Profil gostote za primer točkovno segregiranega območja (Willoughby in sod., 2001: str. 28).

Figure 28: A density profile for a point segregated area (Willoughby et al., 2001: p. 28).

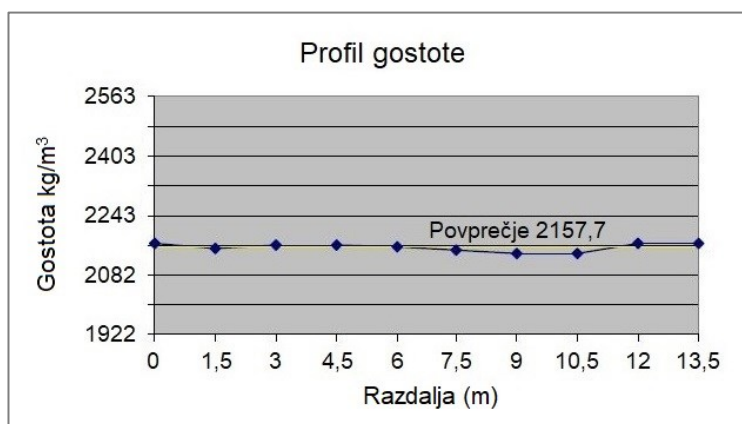


Slika 29: Profil gostote za primer linijsko segregiranega območja (Willoughby in sod., 2001: str. 28).

Figure 29: A density profile for a line segregated area (Willoughby et al., 2001: p. 28).

Na sliki 30 je primer profila gostote, ki izpolnjuje predpisane kriterije, na sliki 31 pa je primer, ki ne izpolnjuje predpisanih kriterijev.

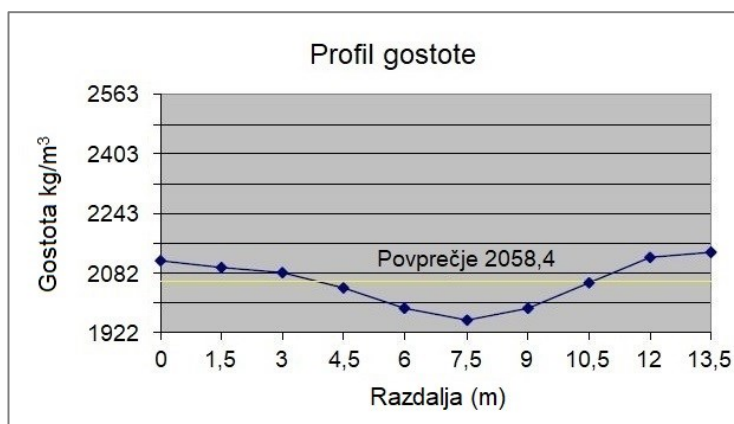
Količina	Vrednost
ΔT	1,1 °C
Povprečje	2156,1 kg/m ³
Maksimum	2168,9 kg/m ³
Minimum	2138,5 kg/m ³
Maks. – Min.	30,4 kg/m ³
Povp. – Min.	17,6 kg/m ³



Slika 30: Profil gostote, ki izpolnjuje predpisane kriterije (Willoughby in sod., 2001: str. 31).

Figure 30: A density profile that meets the specified criteria (Willoughby et al., 2001: p. 31).

Količina	Vrednost
ΔT	36,7 °C
Povprečje	2058,4 kg/m ³
Maksimum	2138,5 kg/m ³
Minimum	1952,7 kg/m ³
Maks. – Min.	185,8 kg/m ³
Povp. – Min.	105,7 kg/m ³



Slika 31: Profil gostote, ki ne izpolnjuje predpisanih kriterijev (Willoughby in sod., 2001: str. 32).

Figure 31: A density profile that does not meet the specified criteria (Willoughby et al., 2001: p. 32).

Izdelava specifikacije Tex-244-F je, podobno kot v primeru študije Stroup-Gardiner in Brown (2000), opredelila temperaturno segregacijo z razlikami med maksimalno in minimalno temperaturo. Meje so definirane nekoliko drugače, saj so povzete po AASHTO, ki določa tri stopnje temperaturne segregacije, prikazane v preglednici 8. Tex-244-F predpisuje, da se temperaturna razlika izračuna za vsak posamezni pododsek v dolžini 45 m, kot merilno orodje pa predpisuje uporabo termovizijske kamere ali termoskenerja. Meritve morajo potekati na nezgoščeni asfaltni zmesi še pred prvim preходом valjarja (Von Quintus, Reiter, 2017; TxDOT, 2015).

Preglednica 8: Stopnje temperaturne segregacije, določene po AASHTO (Von Quintus, Reiter, 2017: str. 33).

Table 8: Temperature segregation levels determined according to AASHTO (Von Quintus, Reiter, 2017: p. 33).

Stopnja temperaturne segregacije	Temperaturna razlika – ΔT (°C)
Ničelna/nizka	≤ 14
Zmerna	14–28
Visoka	> 28

4.3.2 Uporaba termovizijske kamere

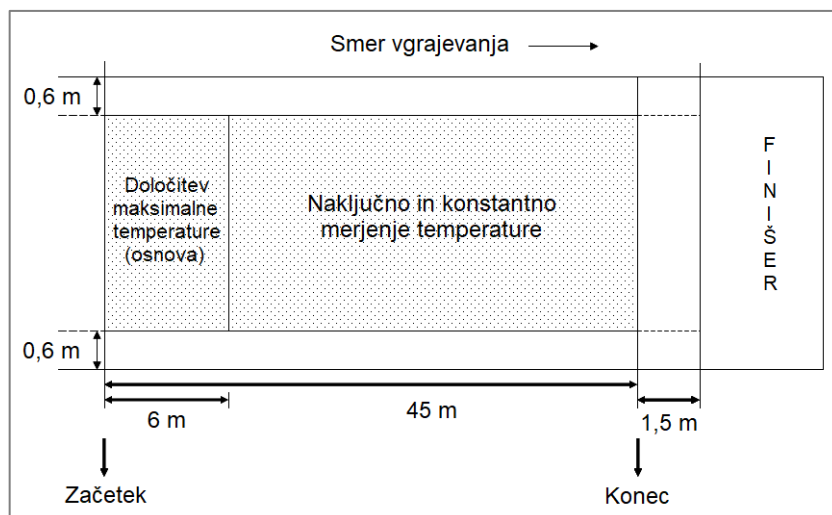
Temperaturna razlika se na podlagi meritev s termovizijsko kamero določi po naslednji enačbi:

$$\Delta T = T_{\text{max, osnova}} - T_{\text{min, polje}}$$

pri čemer je:

- ΔT ... temperaturna razlika v polju dolžine 45 m,
- $T_{\text{max, osnova}}$... maksimalna temperatura v začetnem delu polja (0–6 m) in
- $T_{\text{min, polje}}$... minimalna temperatura v preostalem delu polja (6–45 m).

Meritve s termovizijsko kamero se izvajajo na površini 1,5–4,5 m za finišejem, pri čemer se zunanja robova širine 0,6 m ne upoštevata (slika 32). Oseba, ki izvaja meritve, lahko stoji ob robu asfaltirane površine približno 1,5 m za finišejem ali pa stoji na zadnjem delu finišeja ob upoštevanju varnostnih navodil (TxDOT, 2015).



Slika 32: Merjenje temperature s termovizijsko kamero na polju dolžine 45 m (TxDOT, 2015: str. 3).

Figure 32: Temperature measurement with a thermal camera on a 45 m long profile (TxDOT, 2015: p. 3).

Specifikacije o asfaltnih zmesih, ki jih uporablja Teksaško ministrstvo za transport, predpisujejo, da je treba za vsako posamezno območje, ki ima zmerno ali visoko temperaturno segregacijo, izvesti dodatne meritve gostote in izdelati profil gostote. V primeru visoke segregacije je treba vgrajevanje asfaltne zmesi ustaviti in izvesti ukrepe, ki ob nadaljevanju postopka odpravijo visoko segregacijo. Na območjih, kjer je bila visoka segregacija in profil gostote ni zadostil predpisanim kriterijem o enakomernosti gostote, je treba asfaltno zmes odstraniti in vgraditi novo (TxDOT, 2014).

4.3.3 Uporaba termoskeniranja

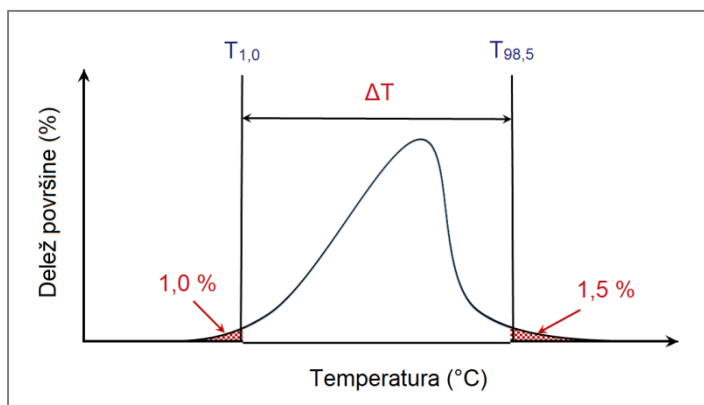
Temperaturna razlika se na podlagi meritev s termoskenirjem določi po naslednji enačbi:

$$\Delta T = T_{98,5} - T_{1,0}$$

pri čemer je:

- ΔT ... temperaturna razlika v polju dolžine 45 m,
- $T_{98,5}$... vrednost temperature pri 98,5. centilu (v celotnem polju dolžine 45 m) in
- $T_{1,0}$... vrednost temperature pri 1,0. centilu (v celotnem polju dolžine 45 m).

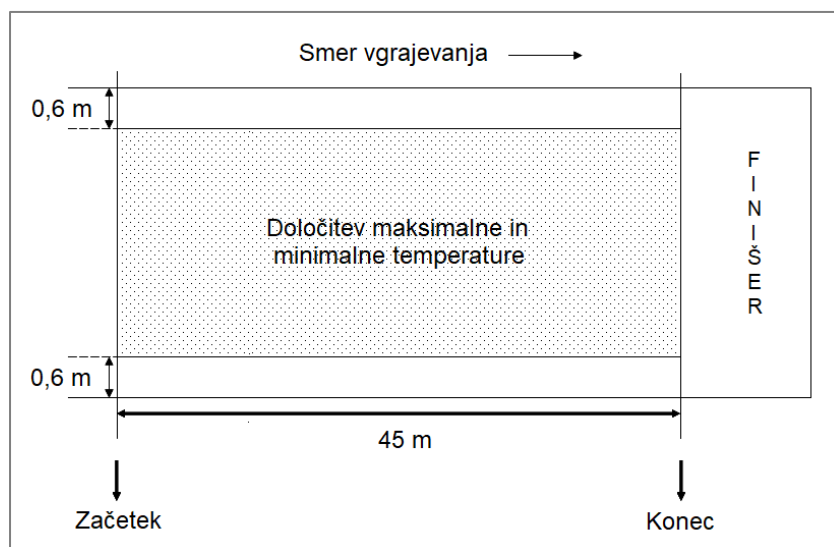
Na sliki 33 so shematično prikazane vrednosti $T_{1,0}$ in $T_{98,5}$ ter temperaturna razlika ΔT .



Slika 33: Temperaturna razlika ΔT med $T_{98,5}$ in $T_{1,0}$ (Von Quintus, Reiter, 2017: str. 32).

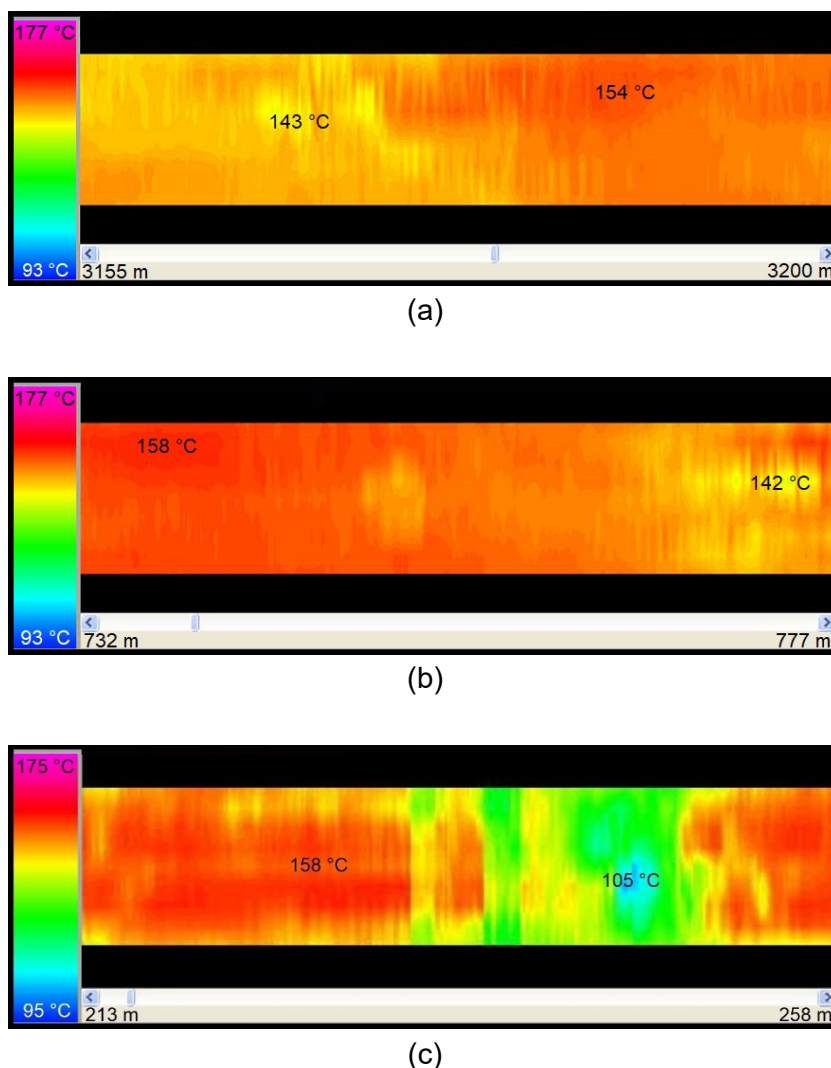
Figure 33: Temperature difference ΔT between $T_{98,5}$ and $T_{1,0}$ (Von Quintus, Reiter, 2017: p. 32).

Meritve s termoskenerjem se izvajajo za finišerjem, pri čemer se enako kot pri termovizijski kameri zunanja robova širine 0,6 m ne upoštevata (slika 34). Termoskener se namesti na finišer po navodilih proizvajalca (TxDOT, 2015). Na sliki 35 so prikazani primeri temperaturnih polj, ki imajo ničelno, zmerno in visoko segregacijo.



Slika 34: Merjenje temperature s termoskenerjem na polju dolžine 45 m (TxDOT, 2015: str. 5).

Figure 34: Temperature measurement with an IR temperature scanner on a 45 m long profile (TxDOT, 2015: p. 5).



Slika 35: Primeri temperaturnih polj za (a) ničelno segregacijo ($\Delta T = 11\text{ °C}$), (b) zmerno segregacijo ($\Delta T = 16\text{ °C}$) in (c) visoko segregacijo ($\Delta T = 53\text{ °C}$) (Rand, 2012: str. 5; Sebesta, Scullion, 2012: str. 14, 15).

Figure 35: Examples of thermal profiles for (a) no segregation ($\Delta T = 11\text{ °C}$), (b) moderate segregation ($\Delta T = 16\text{ °C}$), and (c) severe segregation ($\Delta T = 53\text{ °C}$) (Rand, 2012: p. 5; Sebesta, Scullion, 2012: p. 14–15).

Pri uporabi termoskeniranja predpisujejo specifikacije o asfaltnih zmesih, ki jih uporablja Teksaško ministrstvo za transport, nekatere spodbude, s katerimi se želi spodbuditi uporabo termoskeniranja. Profilov gostote ni treba izvajati (tako za zmerno kot tudi visoko segregacijo), izvajalec pa lahko vgrajuje asfaltno zmes pri nižji temperaturi podlage, ki lahko znaša najmanj 0 °C , sicer mora biti med 7 in 16 °C , odvisno od vrste asfaltnih zmesi. Poleg tega izvajalcu ob prevzemu ni treba meriti temperature asfaltno zmesi in beležiti stacionaže za posamezni tovornjak. Vseeno pa je treba v primeru visoke segregacije vgrajevanje ustaviti in prav tako izvesti ukrepe, ki ob nadaljevanju postopka odpravijo visoko segregacijo (Carrasco, 2016; TxDOT, 2014).

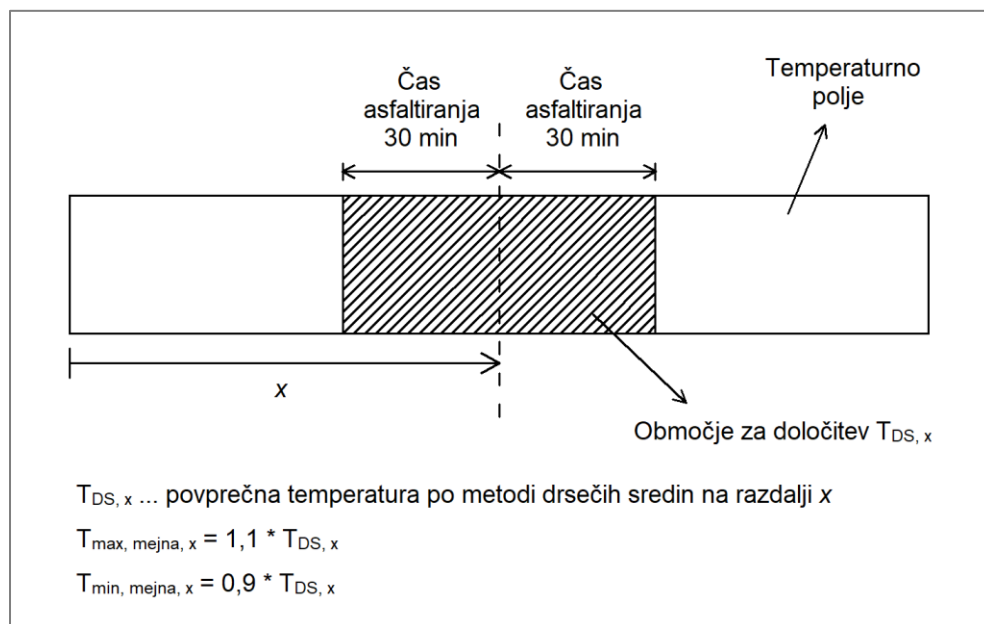
4.4 Švedska/norveška metoda – ŠNM

Metodo, ki se uporablja na Švedskem in Norveškem, smo v magistrskem delu poimenovali kot švedska/norveška metoda in zanjo vpeljali kratico ŠNM. Metoda vključuje uporabo termoskenerja, vrednotenje temperaturne segregacije pa poteka na podlagi mejne temperature, ki je karakteristično določena vzdolž temperaturnega polja.

Za določitev mejne temperature se najprej izračuna povprečna temperatura T_{DS} po metodi drsečih sredin. Na sliki 36 je prikazan postopek za določitev T_{DS} na razdalji x . T_{DS} se na določeni razdalji izračuna za območje, ki zajema čas vgrajevanja asfaltne zmesi 30 minut pred pozicijo obravnavane razdalje in 30 minut po tej poziciji. Mejna temperatura se nato določi za zgornjo in spodnjo mejno vrednost po naslednjih enačbah:

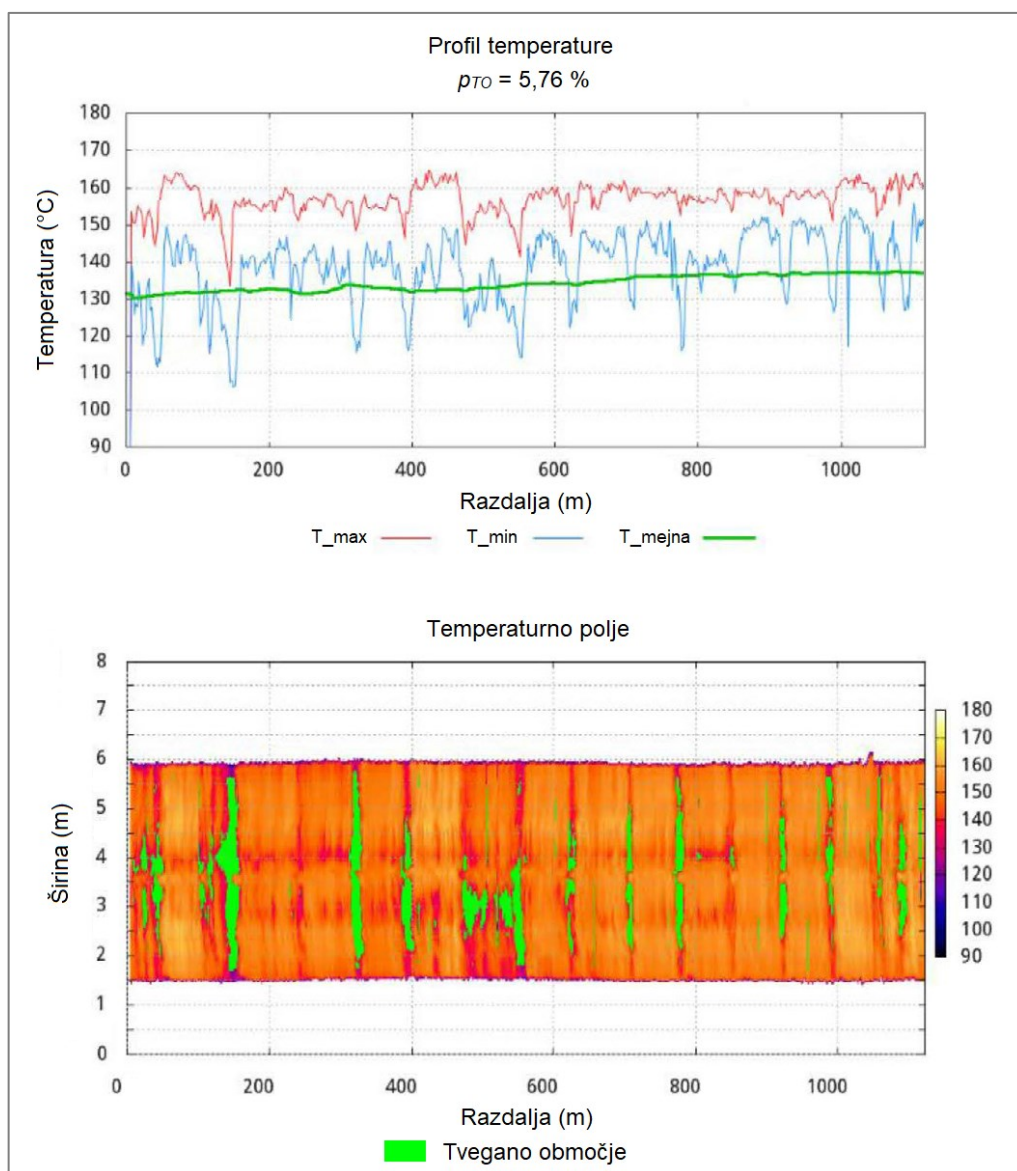
- zgornja mejna vrednost: $T_{\max, \text{mejna}} = 1,1 \cdot T_{DS}$ in
- spodnja mejna vrednost: $T_{\min, \text{mejna}} = 0,9 \cdot T_{DS}$.

Ker so pri vgrajevanju asfaltne zmesi problematična predvsem ohlajena mesta, se uporablja samo spodnja mejna vrednost $T_{\min, \text{mejna}}$, ki smo jo v nadaljevanju magistrskega dela označili z oznako T_{mejna} . Območja, ki imajo temperaturo nižjo od te vrednosti, so poimenovana kot tvegana območja, njihov delež glede na celotno površino pa je poimenovan kot delež tveganih območij (p_{TO}). Slika 37 prikazuje primer profila temperature vgrajene asfaltne zmesi, na katerem so prikazane vrednosti $T_{\max}$, $T_{\min}$ in T_{mejna} , ter pripadajočega temperaturnega polja z označenimi tveganimi območji (Andersson, 2019; Telle, 2016).



Slika 36: Način izračuna $T_{DS,x}$, $T_{\max, \text{mejna}, x}$ in $T_{\min, \text{mejna}, x}$ na razdalji x .

Figure 36: Method of calculating the $T_{DS,x}$, $T_{\max, \text{mejna}, x}$ and $T_{\min, \text{mejna}, x}$ over a distance of x .



Slika 37: Profil temperature vgrajene asfaltni zmesi in temperaturno polje s 5,76 % tveganih območij (EAPA, 2017: str. 68).

Figure 37: A temperature profile of placed asphalt mixture and a thermal profile with 5,76 % risk areas (EAPA, 2017: p. 68).

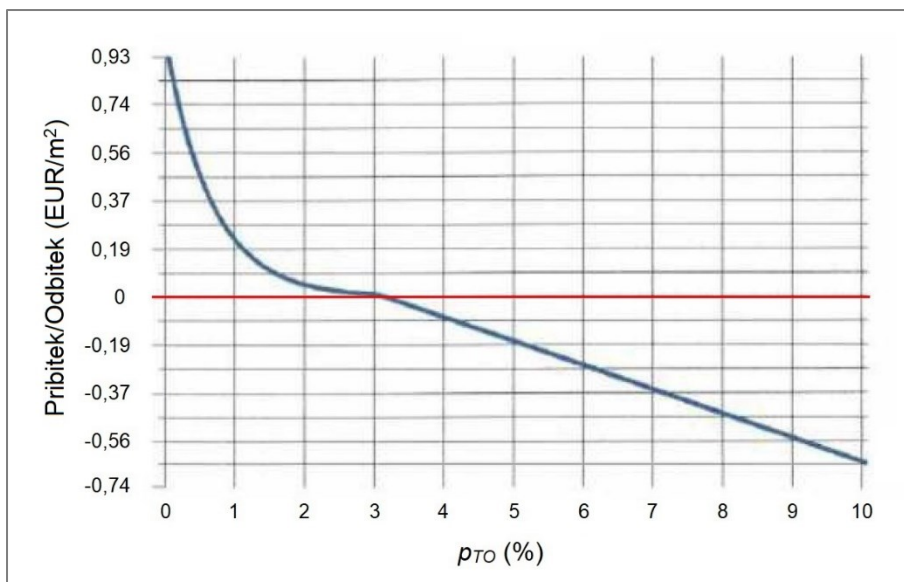
Večletne raziskave na Švedskem so pokazale, da obstaja dobra povezava med tveganimi območji in propadanjem asfaltnih zmesi (Telle, 2016). Andersson (2019) navaja ocene vgrajevanja asfaltnih zmesi za naslednje vrednosti p_{TO} :

- >11 % – zelo slabo,
- 6 % – slabo,
- 2,4 % – srednje,
- 1 % – dobro in
- 0 % – zelo dobro.

Tako na Švedskem kot na Norveškem so uvedli vnaprej določen sistem odbitkov in pribitkov glede na vrednost p_{TO} . S tem se želi spodbuditi izvajalce k uporabi takšnih tehnologij in

mehanizacij, ki omogočajo nižjo stopnjo temperaturne segregacije pri vgrajevanju asfaltnih zmesi.

Kriterij, ki se uporablja na Švedskem, je prikazan na sliki 38 in določa, da se za p_{TO} pod 3 % dodeli pribitek oziroma nad 3 % odbitek. Vrednost se določi za 1 m² in se nato pomnoži s celotno površino asfaltiranja (Olsson, 2018).



Slika 38: Kriterij za določitev pribitka/odbitka po švedskem pravilniku (Olsson, 2018: str. 8).
Figure 38: A criterion for determining a bonus/deduction according to the Swedish regulation (Olsson, 2018: p. 8).

Na Norveškem je kriterij postavljen nekoliko drugače, saj se pribitek dodeli za p_{TO} pod 3 %, med 3 % in 5 % se nič ne dodeli, nad 5 % pa se določi odbitek. Poleg tega se pri višjem p_{TO} garancijska doba podaljša (Snilsberg, Hoven, Telle, 2016).

5 TEMPERATURA IN TEMPERATURN A SEGREGACIJA PRI VGRADNJI ASFALTNE ZMESI NA IZBRANEM PROJEKTU

Meritve temperature asfaltnih zmesi smo izvajali poleti 2019 v okviru projekta odstranitve cestninske postaje (CP) Videž na avtocesti A1. Na začetku tega poglavja je najprej predstavljen projekt in merilne metode, s katerimi smo izvajali meritve. Merilne metode so zajemale uporabo različnih merilnikov, in sicer termovizijsko kamero, IR termometer, kontaktni termometer in termoskenner.

V nadaljevanju so predstavljene meritve s posameznimi merilnimi metodami in analiza ter vrednotenje rezultatov v skladu s slovensko oziroma tujo tehnično regulativo. Na ta način je ocenjena učinkovitost slovenske tehnične regulative glede zaznavanja in vrednotenja temperaturne segregacije ter narejena primerjava s tujimi specifikacijami.

Na koncu poglavja sledi diskusija, v kateri so predstavljene ugotovitve in zaključki izvedenih analiz in vrednotenj. Na podlagi tega so predstavljeni tudi predlogi za izboljšanje slovenske tehnične regulative.

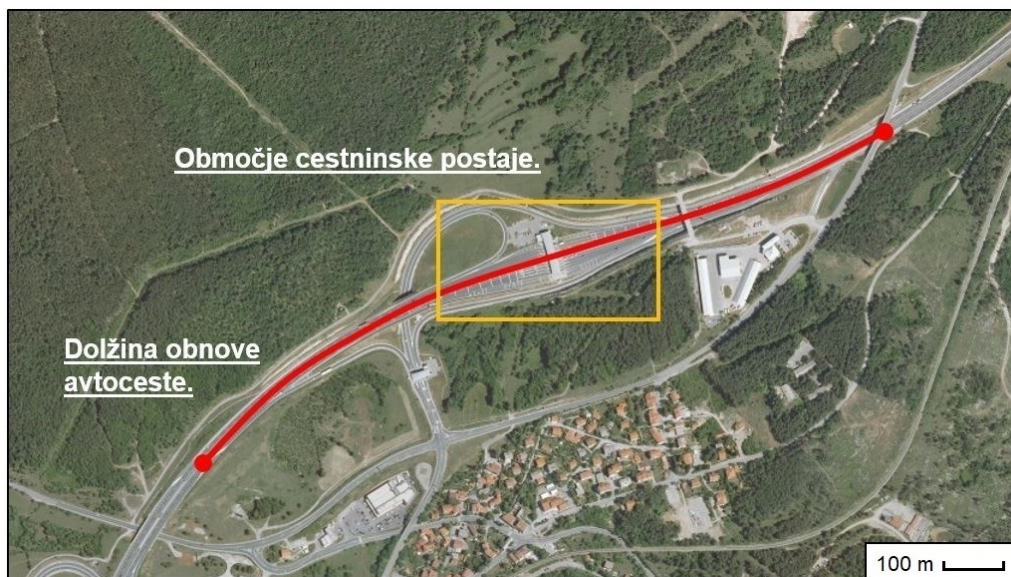
5.1 Opis projekta in merilne metode

Projekt odstranitve cestninske postaje Videž na avtocesti A1, v okviru katerega smo izvajali meritve temperature asfaltnih zmesi, je potekal poleti 2019, lokacija cestninske postaje pa je prikazana na sliki 39. Investitor projekta je bil DARS, ki je uvedel elektronsko cestninjenje tovornih vozil v prostem prometnem toku, zaradi česar se je odločil za rušitev vseh cestninskih postaj na avtocestah in hitrih cestah.



Slika 39: Lokacija cestninske postaje Videž (Monolit, TSmedia, 2019).
Figure 39: Location of the Videž toll station (Monolit, TSmedia, 2019).

Cestninska postaja Videž je bila čelna cestninska postaja, ki je bila umeščena med krake priključka Kozina. Projekt je zajemal tudi rekonstrukcijo avtoceste v skupni dolžini 1100 m (slika 40). Rekonstrukcija avtoceste se je izvedla v obliki nadgradnje voziščne konstrukcije, v začetnem in končnem delu pa se je izvedla zamenjava voziščne konstrukcije, kar je omogočilo niveletno navezavo na obstoječe stanje.



Slika 40: Prikaz območja cestninske postaje in dolžine rekonstrukcije avtoceste (Sinergise d.o.o., 2013).

Figure 40: Representation of the toll station area and the length of the highway reconstruction (Sinergise d.o.o., 2013).

Meritve smo izvajali med 16. 6. 2019 in 24. 6. 2019 med rekonstrukcijo desnega smernega vozišča avtoceste A1 Ljubljana–Koper, katere izvajalec gradbenih del je bilo podjetje Kolektor CPG, d. o. o. Rekonstrukcijo levega smernega vozišča avtoceste je izvajalo drugo podjetje. Na slikah 41 (a) in 41 (b) je prikazano stanje avtoceste pred in med rušenjem cestninske postaje.



(a)



(b)

Slika 41: (a) Avtocesta pred rušenjem cestninske postaje (Google, 2019) in (b) avtocesta med rušenjem cestninske postaje.

Figure 41: (a) The highway before the toll station demolition (Google, 2019); and (b) the highway during the toll station demolition.

Nadgradnja voziščne konstrukcije se je na desnem smernem vozišču avtoceste izvedla v vmesnem delu v dolžini 604 m. Vgradile so se naslednje asfaltne plasti (PNZ d.o.o., 2017):

- SMA 11 PmB 45/80-65 A1 4 cm in
- AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 7 cm.

Pod nadgradnjo so ostale obstoječe plasti:

- SMA 11 2,8 cm,
- AC 22 base 12,5 cm,
- cementna stabilizacija 22 cm in
- tamponski drobljenec TD 0/32 19 cm.

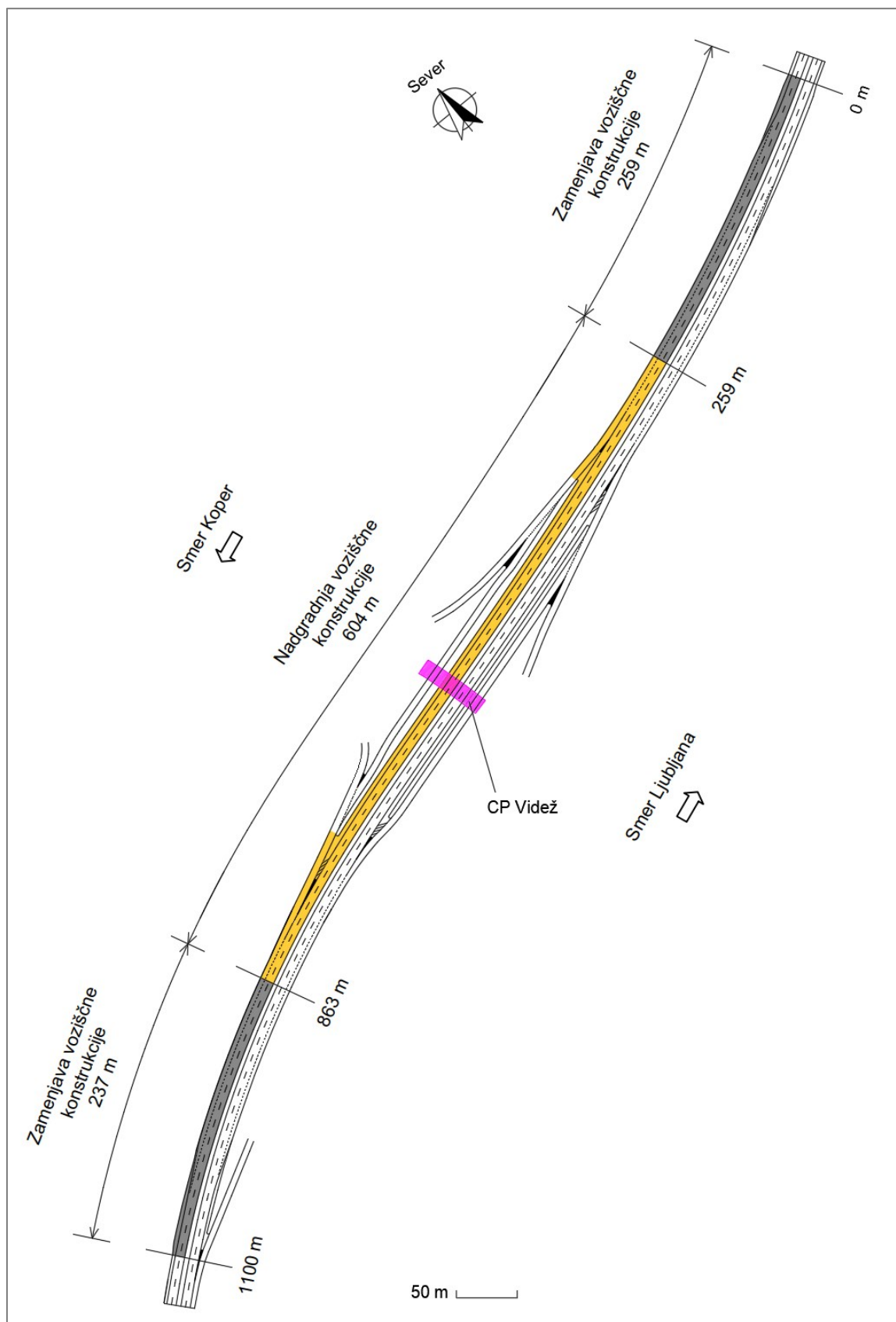
Zamenjava voziščne konstrukcije na desnem smernem vozišču avtoceste se je izvedla v začetnem delu v dolžini 259 m in v končnem delu v dolžini 237 m. Odstranile so se vse asfaltne plasti in del cementne stabilizacije, vgradile pa so se nove plasti:

- SMA 11 PmB 45/80-65 A1 4 cm,
- AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 7 cm,
- AC 32 base B 50/70 A1 8 cm in
- AC 32 base B 50/70 A1 8 cm.

Pod zamenjavo so ostale obstoječe plasti:

- cementna stabilizacija 15 cm in
- tamponski drobljenec TD 0/32 30 cm.

Rekonstrukcija desnega smernega vozišča avtoceste je prikazana na sliki 42.



Slika 42: Prikaz rekonstrukcije desnega smernega vozišča avtoceste, na katerem so potekale meritve (PNZ d.o.o., 2017: str. 47–49).

Figure 42: Reconstruction representation of the right direction highway carriageway on which measurements were taken (PNZ d.o.o., 2017: p. 47–49).

Širina prehitevalnega in voznega pasu je znašala 3,75 m ter odstavnega pasu 3,50 m, rekonstrukcija avtoceste pa je zajemala celotno vozišče. Vgrajevanje asfaltnih zmesi je potekalo z dvema zaporednima finišerjema, in sicer z večjim finišerjem na dveh pasovih in z manjšim finišerjem na enem pasu (slika 43). To je omogočilo izvedbo kakovostnejšega vzdolžnega stika, saj so se asfaltne zmesi stikovale vroče na vroče.



Slika 43: Vgrajevanje asfaltne zmesi z dvema vzporednima finišerjema.

Figure 43: Asphalt mixture placement with two parallel pavers.

Meritve temperatur asfaltnih zmesi so potekale na več načinov, saj so se uporabljali termovizijska kamera, IR termometer, kontaktni termometer in termoskener. S termovizijsko kamero smo izvajali meritve na tovornjaki, preden so se asfaltne zmesi raztovorile v finišer. Z IR termometrom je izvajalec zajemal meritve v vsebniku finišerja, s kontaktnim termometrom pa ob polžu finišerja. S termoskenerjem so se merile temperature vgrajenih asfaltnih zmesi za finišerjem.

Med izvajanjem meritev so bili pogoji za asfaltiranje zelo ugodni. Večino časa je sijalo sonce, temperature zraka pa so znašale v jutranjem času okoli 25 °C, prek dneva pa so se povzpele nad 30 °C. Podlaga je imela v jutranjem času temperaturo okoli 20 °C, prek dneva pa se je zaradi sonca segrela na 40–50 °C. Vetra večino časa ni bilo oziroma je rahlo pihal. Asfaltna baza se je nahajala v Lažah in je bila relativno blizu gradbišča, saj je znašala razdalja 21 km. Transportni čas je tako bil kratek in je znašal približno 18 minut, vsi tovornjaki pa so imeli zaščitne ponjave.

Opis meritev in rezultati so predstavljeni v nadaljevanju.

5.2 Analiza in vrednotenje rezultatov meritev z IR in kontaktnim termometrom

Meritve z IR termometrom je izvajalec opravljal ob raztovarjanju asfaltnih zmesi v vsebniku finišerja (slika 44a), meritve s kontaktnim termometrom pa ob polžu finišerja (slika 44b). Čeprav standard SIST EN 12697-13 ne predpisuje meritev ob polžu finišerja, je izvajalec vseeno zajemal meritve na tem mestu zaradi enostavne dostopnosti.



(a)



(b)

Slika 44: Pozicija meritev temperature asfaltnih zmesi: (a) v vsebniku finišerja in (b) ob polžu finišerja.

Figure 44: Measurement position of the asphalt mixture temperature: (a) in the paver hopper and (b) at the paver auger.

Meritve so potekale v okviru notranje kontrole. Čeprav TSC predpisuje pogostost meritev na 500 ton za obrabne plasti oziroma na 1000 ton za vezane zgornje nosilne plasti, je izvajalec zajemal meritve bolj pogosto. V primeru vezne in obrabne plasti je zajemal meritve z IR termometrom skoraj ob vsakem tovornjaku (na 15 do 25 ton, odvisno od vrste tovornjaka).

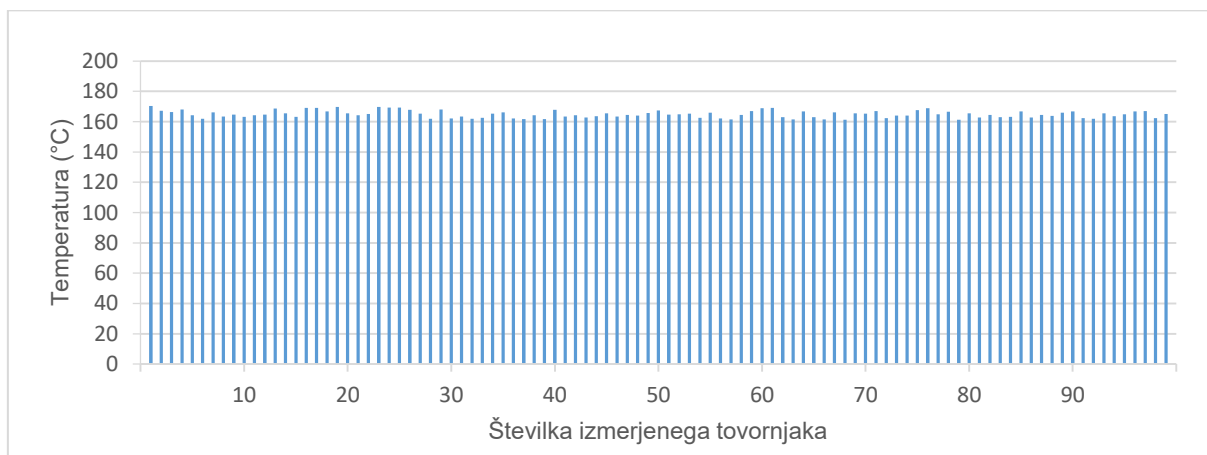
V primeru zgornje vezane nosilne plasti AC 32 base B 50/70 A1 je izvajalec opravljal meritve samo ob polžu finišerja, pri ostalih dveh asfaltnih zmesih pa je opravljal meritve tudi v vsebniku finišerja. Rezultati meritev so prikazani na grafikonih 1–5. Ker so se meritve izvajale naključno, se grafikon ne navezujejo med seboj, kar pomeni, da številka tovornjaka na posameznem grafikonu ne pomeni istega tovornjaka z enako številko na drugem grafikonu.



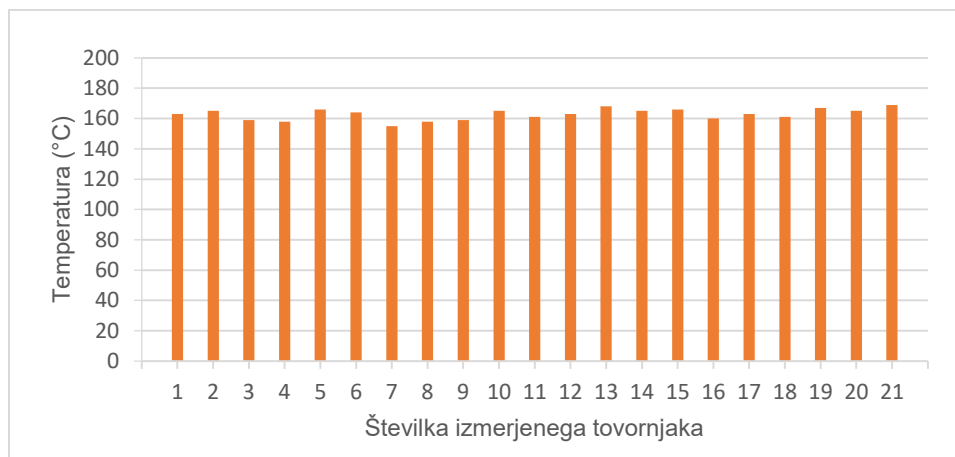
Grafikon 1: Temperatura asfaltne zmesi AC 32 base B 50/70 A1 ob polžu finiŕerja.
Graph 1: The temperature of the asphalt mixture AC 32 base B 50/70 A1 at the paver auger.



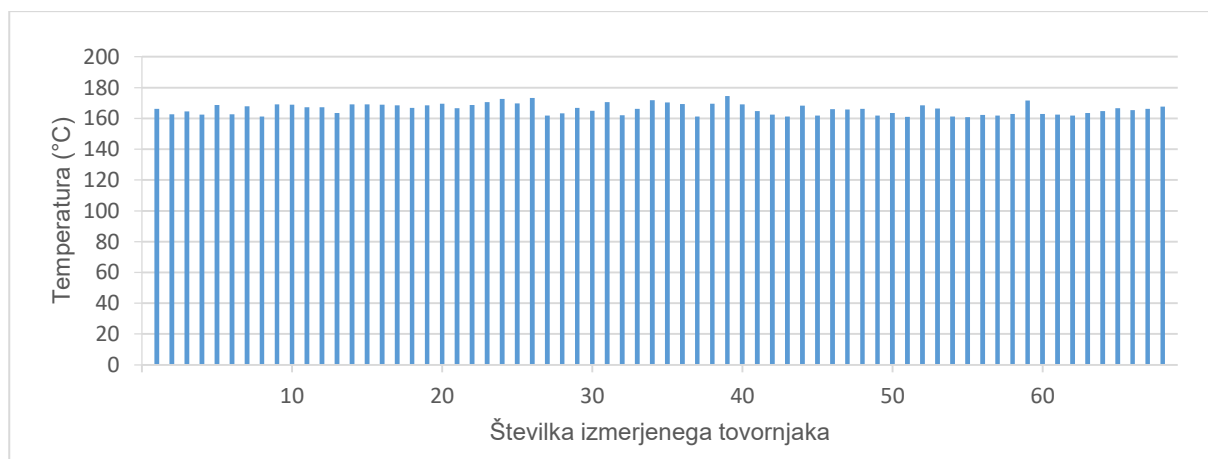
Grafikon 2: Temperatura asfaltne zmesi AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 ob polžu finiŕerja.
Graph 2: The temperature of the asphalt mixture AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 at the paver auger.



Grafikon 3: Temperatura asfaltne zmesi AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 v vsebniku finiŕerja.
Graph 3: The temperature of the asphalt mixture AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 in the paver hopper.



Grafikon 4: Temperatura asfaltne zmesi SMA 11 PmB 45/80-65 A1 ob polžu finiŝerja.
Graph 4: The temperature of the asphalt mixture SMA 11 PmB 45/80-65 A1 at the paver auger.



Grafikon 5: Temperatura asfaltne zmesi SMA 11 PmB 45/80-65 A1 v vsebniku finiŝerja.
Graph 5: The temperature of the asphalt mixture SMA 11 PmB 45/80-65 A1 in the paver hopper.

Z grafikonov je razvidno, da so temperature asfaltnih zmesi v povprečju znašale med 160 in 170 °C. Za asfaltno zmes AC 32 base B 50/70 A1 predpisuje TSC referenčno temperaturo 155 °C, najnižjo 130 °C in najvišjo 175 °C, kar pomeni, da so bile temperature te zmesi ustrezne.

Za asfaltne zmesi, ki vsebujejo s polimeri modificirane bitumne, predpisuje TSC, da se temperatura vgrajevanja določi po navodilih proizvajalca PmB. Za informacije smo se pozanimali pri izvajalcu, ki nam je sporočil, da proizvajalec, od katerega dobavlja PmB, predpisuje samo temperaturo asfaltne zmesi pri proizvodnji, ne pa tudi temperature pri vgrajevanju. Za asfaltne zmesi, ki so se uporabile v našem primeru, proizvajalec predpisuje temperaturo proizvodnje 160–180 °C.

Ker nismo dobili informacij o tem, kakšna mora biti temperatura vgrajevanja uporabljenih asfaltnih zmesi, smo to preverili v literaturi. Henigman in sod. (2016) navajajo, da se v ustaljeni praksi za asfaltne zmesi s PmB uporablja referenčna temperatura 165 °C, najnižja 140 °C in

najvišja 185 °C, vendar dodajajo, da je treba te vrednosti preveriti z navodili proizvajalca. Ker teh navodil ni bilo, smo vseeno upoštevali omenjene vrednosti, da smo imeli izhodišče za vrednotenje meritev. To pomeni, da so bile temperature obeh zmesi AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 in SMA 11 PmB 45/80-65 A1 tako v vsebniku kot ob polžu finišerja znotraj mejnih vrednosti. Ob tem je treba dodati, da bi lahko prišlo do drugačnih ugotovitev, če bi se izkazalo, da so mejne vrednosti drugačne.

5.3 Analiza in vrednotenje rezultatov meritev s termovizijsko kamero

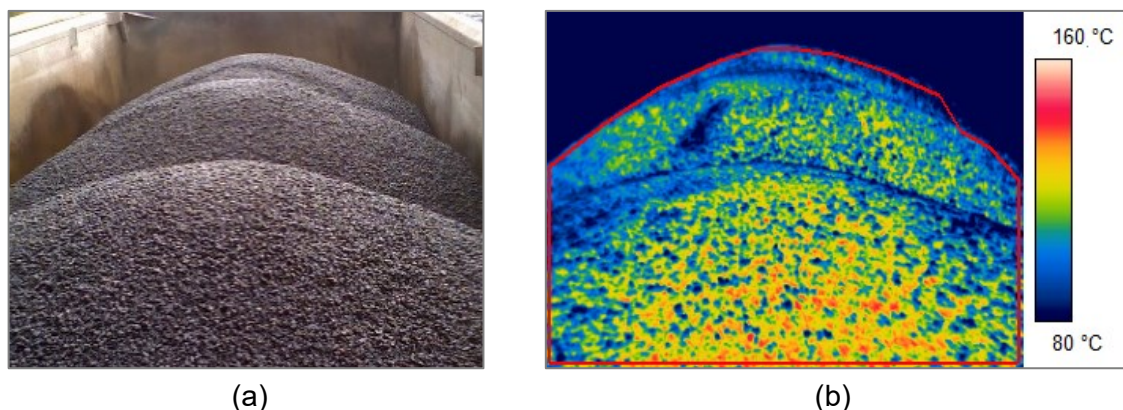
Meritve smo opravljali s termovizijsko kamero znamke Flir model E60bx, ki nam jo je priskrbela Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani (slika 45). Standard SIST EN 12697-13 sicer predpisuje meritve z IR termometrom, vendar dobimo s termovizijsko kamero natančnejše rezultate, saj lahko z njo zajamemo večjo površino merjenja.



Slika 45: Termovizijska kamera.

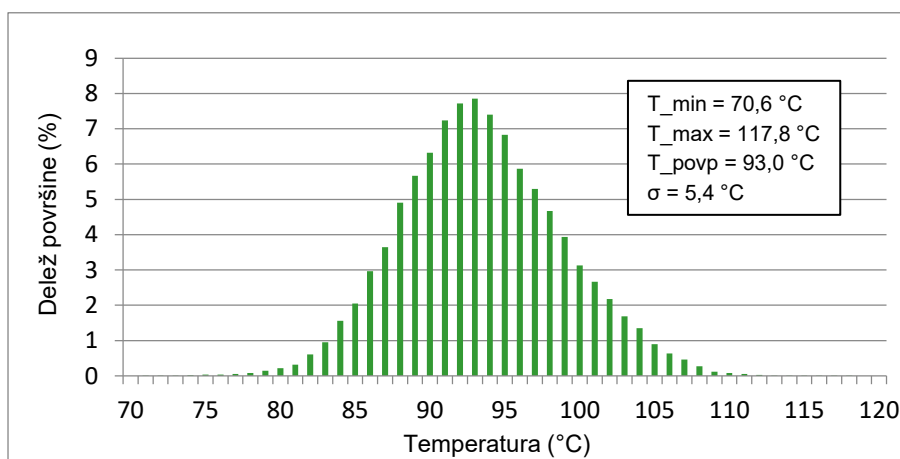
Figure 45: Thermal camera.

Na slikah 46 (a) in 46 (b) je prikazan primer asfaltne zmesi na tovornjaku in njene površinske temperature. Namesto minimalno štirih meritev, ki jih moramo izmeriti z IR termometrom, lahko z eno meritvijo s termovizijsko kamero zajamemo temperaturo po celotni površini asfaltne zmesi. Temperatura je tako izmerjena v množici točk in v primeru, ki je prikazan na sliki 46 (b), znaša to število točk preko 58.000. Distribucija te temperature je prikazana na grafikonu 6, na katerem so napisane tudi minimalna, maksimalna in povprečna temperatura ter standardna deviacija.



Slika 46: Asfaltna zmes SMA 11 PmB 45/80-65 A1 na tovornjaku, prikazana z (a) navadno sliko in (b) s termografsko sliko.

Figure 46: SMA 11 PmB 45/80-65 A1 asphalt mixture on a truck shown by (a) a regular picture and (b) a thermal picture.



Grafikon 6: Primer grafikona porazdelitvene funkcije površinske temperature asfaltna zmesi SMA 11 PmB 45/80-65 A1 na tovornjaku.

Graph 6: An example graph of the distribution function for the surface temperature of the asphalt mixture SMA 11 PmB 45/80-65 A1 on a truck.

Meritve, ki smo jih izvajali v okviru projekta odstranitve CP Videž, so prikazane na grafikonih 7, 8 in 9, na katerih je za posamezni tovornjak prikazana povprečna površinska temperatura asfaltna zmesi (T_{povp}).



Grafikon 7: Površinske temperature asfaltne zmesi AC 32 base B 50/70 A1 na tovornjaki.
Graph 7: Surface temperatures of the AC 32 base B 50/70 A1 asphalt mixture on trucks.



Grafikon 8: Površinske temperature asfaltne zmesi AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 na tovornjaki.
Graph 8: Surface temperatures of the AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 asphalt mixture on trucks.



Grafikon 9: Površinske temperature asfaltne zmesi SMA 11 PmB 45/80-65 A1 na tovornjaki.
Graph 9: Surface temperatures of the SMA 11 PmB 45/80-65 A1 asphalt mixture on trucks.

Meritve so pokazale, da so bile površinske temperature na tovornjakih precej nižje od tistih, ki so bile izmerjene v vsebniku in ob polžu finišeja. Povprečne vrednosti za posamezno asfaltno zmes so prikazane v preglednici 9, iz katere je razvidno, da so bile površinske temperature za 50 do 70 °C nižje od tistih v vsebniku in ob polžu finišeja.

Preglednica 9: Povprečje površinskih temperatur na tovornjakih za posamezno asfaltno zmes.
Table 9: The average of surface temperatures on trucks for each asphalt mixture.

Vrsta asfaltne zmesi	Povprečje površinskih temperatur (°C)
AC 32 base B 50/70 A1	96
AC 22 bin PmB 45/80-65 A1	108
SMA 11 PmB 45/80-65 A1	104

Iz meritev je razvidno, da so se asfaltne zmesi na površini ohladile v tolikšni meri, da so bile vse temperature nižje od predpisane minimalne vrednosti. To pomeni, da so bile po tem postopku izvajanja meritev vse asfaltne zmesi neustrezne in se jih zato ne bi smelo vgraditi. Ker temu ni bilo tako, saj so bile nizke temperature samo na površini, v notranjosti pa so bile dovolj visoke, je ustreznost takšnega postopka vprašljiva.

5.4 Analiza in vrednotenje rezultatov meritev s termoskennerjem

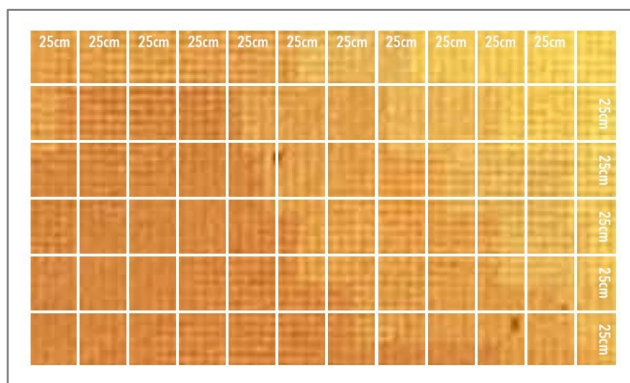
Termoskenner, s katerim smo opravljali meritve, je priskrbel izvajalec in je prikazan na sliki 47. Komercialno ime uporabljenega termoskennerja je Vögele Roadscan, razvilo pa ga je podjetje Vögele, ki se ukvarja s proizvodnjo finišejev in podajalnikov. Poleg termoskennerja je merilna oprema vključevala GNSS sprejemnik in vremensko postajo.



Slika 47: Termoskenner Vögele Roadscan.

Figure 47: The Vögele Roadscan IR temperature scanner.

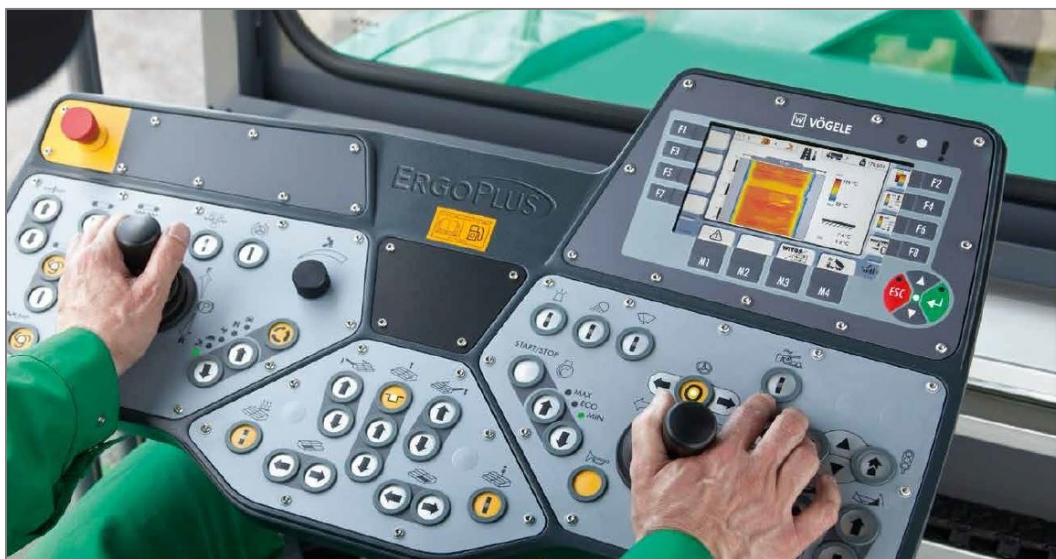
Termoskenner Vögele Roadscan z zajemanjem meritev ustvarja mrežo, ki je sestavljena iz kvadratov dimenzij 25 x 25 cm (slika 48). V vsakem posameznem kvadratu se izmeri temperatura v 16 točkah, na podlagi katerih se izračuna povprečna temperatura. Temperaturno območje znaša med 0 in 250 °C, natančnost meritev pa je ± 2 °C (Joseph Vögele AG, 2019a).



Slika 48: Mreža temperaturnih točk, izmerjenih s termoskennerjem Vögele Roadscan (Joseph Vögele AG, 2019a: str. 7).

Figure 48: A grid of temperature points measured with the Vögele Roadscan IR temperature scanner (Joseph Vögele AG, 2019a: p. 7).

Podjetje Vögele je v nadzorno ploščo finišejev vgradilo prikazovalnik, ki prikazuje temperature vgrajenih asfaltnih zmesi v realnem času (slika 49). Izvajalcem to omogoča sprotno spremljanje temperature in izvajanje ukrepov v primeru nepravilnosti.

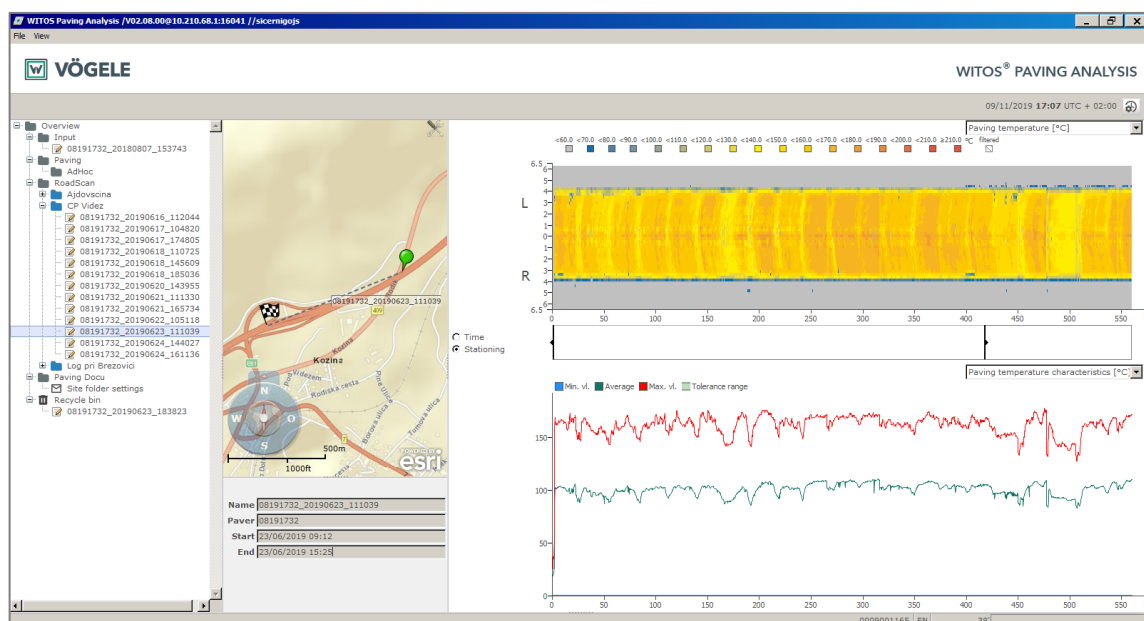


Slika 49: Nadzorna plošča, ki omogoča sprotno spremljanje temperature asfaltnih zmesi (Joseph Vögele AG, 2019a: str. 8–9).

Figure 49: The control panel that allows the asphalt mixture temperature to be monitored in real-time (Joseph Vögele AG, 2019a: p. 8-9).

Podjetje Vögele je prav tako razvilo računalniški program Witos Paving Analysis, ki omogoča analizo podatkov in je prikazan na sliki 50. Podatki, ki jih obravnava program, so naslednji:

- temperatura vgrajenih asfaltnih zmesi,
- pozicija in trajanje ustavitve finiŕerja,
- lokacija, datum in čas vgrajevanja,
- lokacija meritev na podlagi koordinat globalnega navigacijskega satelitskega sistema–GNSS,
- temperatura podlage,
- temperatura, pritisk in vlaŕnost zunanjega zraka ter
- hitrost in smer vetra.



Slika 50: Program Witos Paving Analysis za analizo podatkov.
Figure 50: The Witos Paving Analysis program for data analysis.

Meritve s termoskenerjem so potekale na finišerju, ki je vgrajeval asfaltno zmes na dveh pasovih. Skupno je bilo narejenih 8 temperaturnih polj, ki so prikazana in opisana v preglednici 10. Ker so bila temperaturna polja 1a, 1b, 1c in 1d relativno kratka in so se nanašala na isto asfaltno zmes (AC 32 base B 50/70 A1), smo jih v analizah zaradi preglednosti združili v eno temperaturno polje.

Preglednica 10: Opis temperaturnih polj.

Table 10: A description of thermal profiles.

Št. temp. polja	Vrsta asfaltno zmesi	Asfaltna plast	Pozicija vgrajevanja-pas	Začetna stacionaža (m)	Končna stacionaža (m)	Dolžina (m)
1a	AC 32 base B 50/70 A1	zgornja vezana nosilna plast	vozni + odstavni	0	259	259
1b	AC 32 base B 50/70 A1	zgornja vezana nosilna plast	vozni + odstavni	0	259	259
1c	AC 32 base B 50/70 A1	zgornja vezana nosilna plast	vozni + odstavni	863	1100	237
1d	AC 32 base B 50/70 A1	zgornja vezana nosilna plast	vozni + odstavni	1100	863	237
2	AC 22 bin PmB 45/80-65 A1	vezna plast	vozni + odstavni	0	435	435
3	AC 22 bin PmB 45/80-65 A1	vezna plast	vozni + prehitevalni	435	1100	665
4	SMA 11 PmB 45/80-65 A1	obrabna plast	vozni + prehitevalni	0	570	570
5	SMA 11 PmB 45/80-65 A1	obrabna plast	vozni + prehitevalni	744	1100 + 121*	477

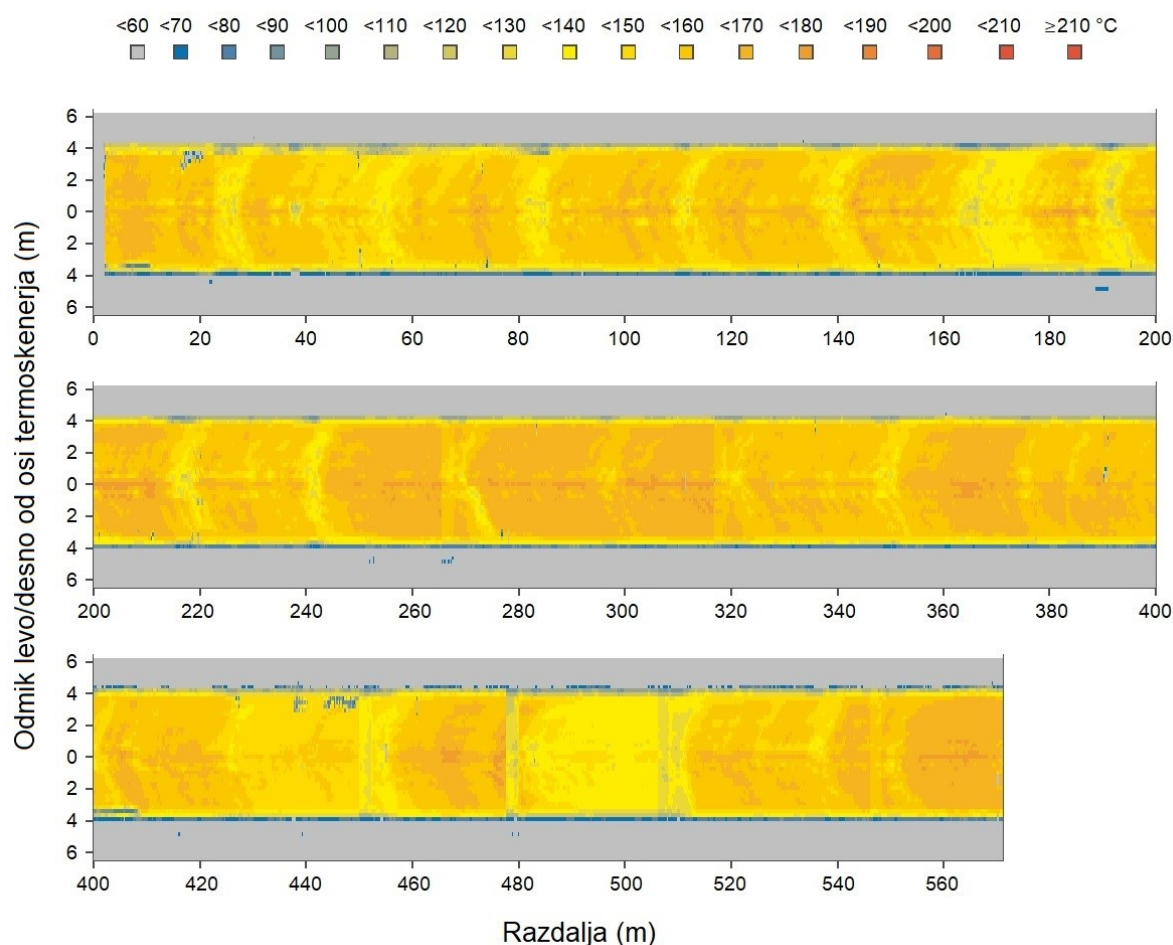
*Opomba: Asfaltna zmes SMA 11 PmB 45/80-65 A1 se je vgradila na dodatnih 121 m od končne stacionaže.

V nadaljevanju so predstavljeni rezultati analiz, ki smo jih izvedli v skladu s TSC, specifikacijo Tex-244-F in ŠNM. V vsakem poglavju je najprej podrobneje obravnavano temperaturno polje 4, na katerem se je vgradila obrabna plast SMA 11 PmB 45/80-65 A1, nato pa so povzeti rezultati vseh temperaturnih polj.

5.4.1 Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s TSC

Kot je bilo omenjeno v poglavju 4.1 *Slovenska tehnična regulativa*, TSC ne predpisuje postopkov za obravnavanje temperaturne segregacije, ampak določa minimalne vrednosti temperature, pri katerih se asfaltna zmes še lahko vgradi. Za asfaltno zmes AC 32 base B 50/70 A1 znaša minimalna temperatura 130 °C, za asfaltni zmesi AC 22 bin PmB 45/80-65 A1 in SMA 11 PmB 45/80-65 A1 pa smo predpostavili minimalno temperaturo 140 °C, kot je navedeno po Henigmanu in sod. (2016).

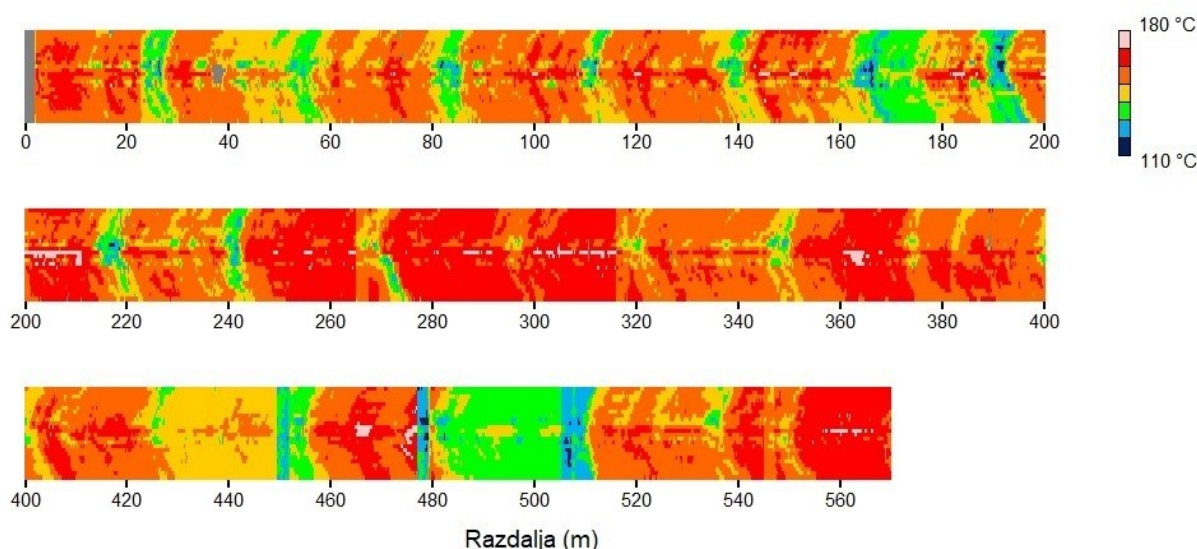
Na podlagi meritev s termoskeniranjem smo preverili, ali so temperature vgrajenih asfaltnih zmesi ustrezale predpisanim merilom. Na sliki 51 je prikazano temperaturno polje 4 iz programa Witos Paving Analysis.



Slika 51: Temperaturno polje 4 iz programa Witos Paving Analysis.
Figure 51: A thermal profile 4 from the Witos Paving Analysis program.

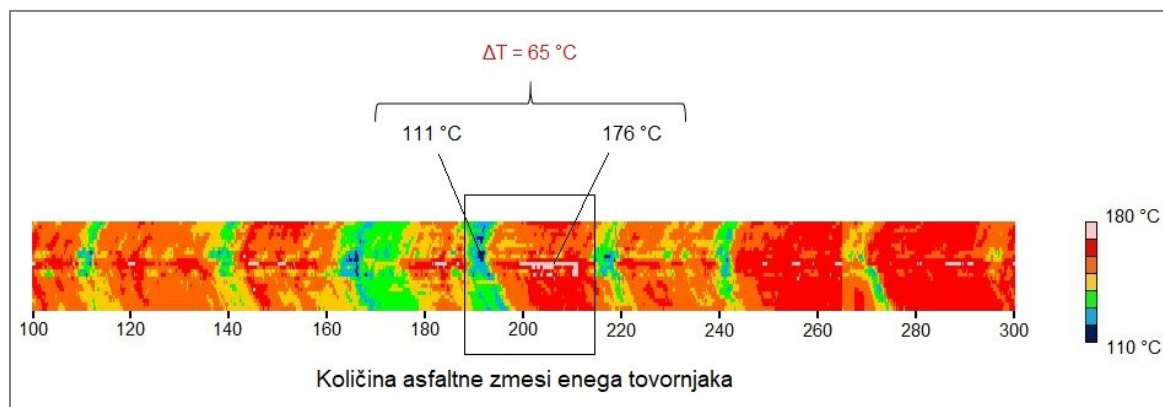
Meritve s termoskenerjem so pokazale, da so se pri vgrajevanju asfaltnih zmesi pojavila temperaturno segregirana območja, saj so se pojavila ohlajena mesta. Vendar pa so bila ta mesta na temperaturnih poljih iz programa Witos Paving Analysis slabo vidna, saj je imela barvna lestvica podobne barvne odtenke. Asfaltna zmes, ki se je nahajala v temperaturnem območju med 110 in 180 °C, je bila prikazana v barvah od sivo rumene do oranžno rumene, kar pomeni, da je bilo celotno temperaturno polje obarvano bolj ali manj rumeno.

Ker program ni omogočal spreminjanja temperaturne in barvne lestvice, smo podatke izvozili v program Excel, v katerem smo temperaturna polja grafično obdelali. Na sliki 52 je prikazano temperaturno polje 4, ostala polja pa so prikazana v prilogi A. S spremembo barvne lestvice so ohlajena mesta postala jasno vidna, saj so se obarvala modro in zeleno. Poleg tega smo pri obdelavi temperaturnih polj odstranili zunanje robove (0,75 m pri voznem in prehitevalnem pasu ter 0,50 m pri odstavnem pasu), s čimer smo odpravili motnje, ki so se pojavljale ob robovih. Širina temperaturnih polj je tako znašala 6,00 m. V nekaterih točkah je prihajalo do motenj, ker so valjarji in delavci prišli v merilno območje termoskenerja. V teh točkah je bila izmerjena temperatura nižja, zato smo takšne motnje obarvali s sivo barvo.



Slika 52: Grafično obdelano temperaturno polje 4 iz programa Excel.
Figure 52: A graphically processed thermal profile 4 from the Excel program.

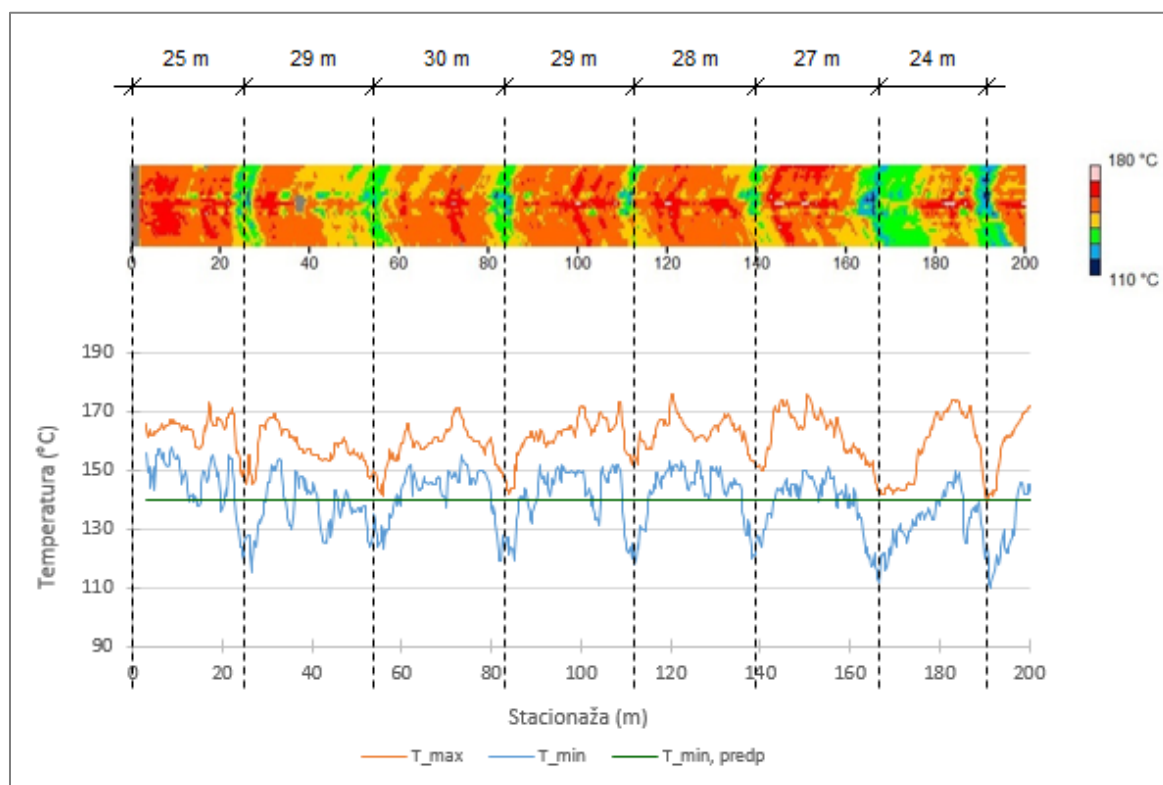
Meritve so pokazale, da so imela segregirana območja nižje temperature, ki so lahko znašale tudi pod 120 °C. Dober primer temperaturne segregacije je prikazan na sliki 53 na območju stacionaže 200 m. Asfaltna zmes enega tovornjaka, ki je bila vgrajena v dolžini približno 30 m, je imela minimalno temperaturo 111 °C (na začetku segmenta), maksimalno temperaturo pa 176 °C (v sredini segmenta). Temperaturna razlika je tako znašala 65 °C, medtem ko je povprečna temperatura kljub segregaciji znašala 153 °C in je bila nad predpisano minimalno vrednostjo.



Slika 53: Visoka temperaturna razlika na razdalji enega tovornjaka asfaltne zmesi.

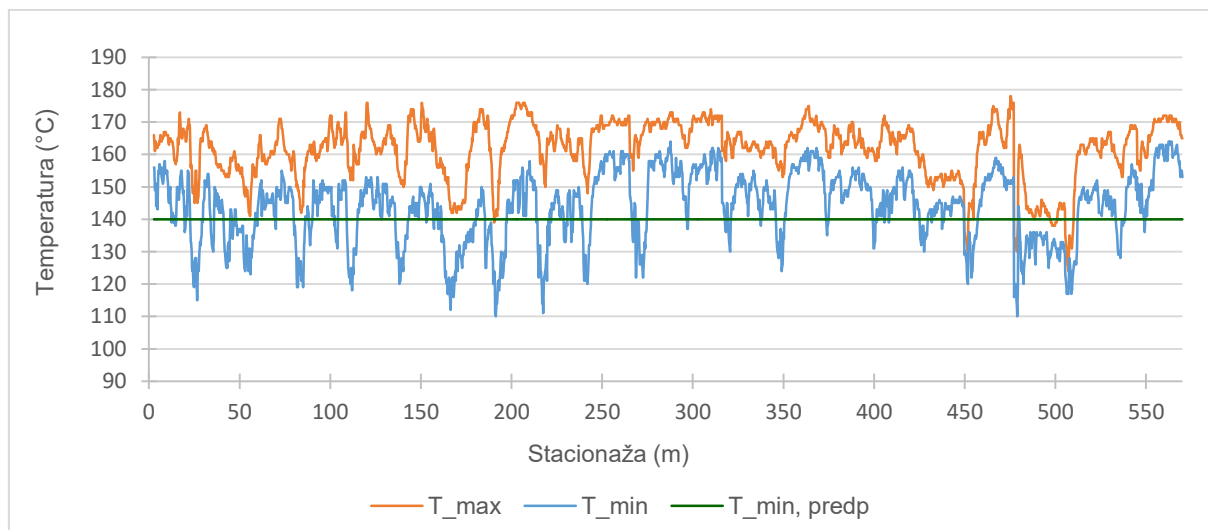
Figure 53: A high temperature difference over a distance of one truck asphalt mixture.

Temperaturno segregirana območja so se pojavljala ob menjavah tovornjakov na medsebojni razdalji 20–30 m. Na sliki 54 je prikazanih prvih 200 m temperaturnega polja 4 in grafikon s pripadajočimi temperaturami. Grafikon prikazuje, da so bile temperature $T_{\min}$ na segregiranih območjih nižje od predpisane minimalne vrednosti 140 °C, medtem ko so bile v vmesnih območjih ustrezno visoke. Enako velja za celotno temperaturno polje, katerega temperature so prikazane na grafikonu 10. Maksimalna predpisana temperatura 185 °C ni bila presežena, kar kaže na to, da je visoke temperature lažje obvladovati, saj jih lahko kontroliramo pri proizvodnji v asfaltni bazi.



Slika 54: Temperaturno polje in grafikon s pripadajočimi temperaturami za prvih 200 m polja 4.

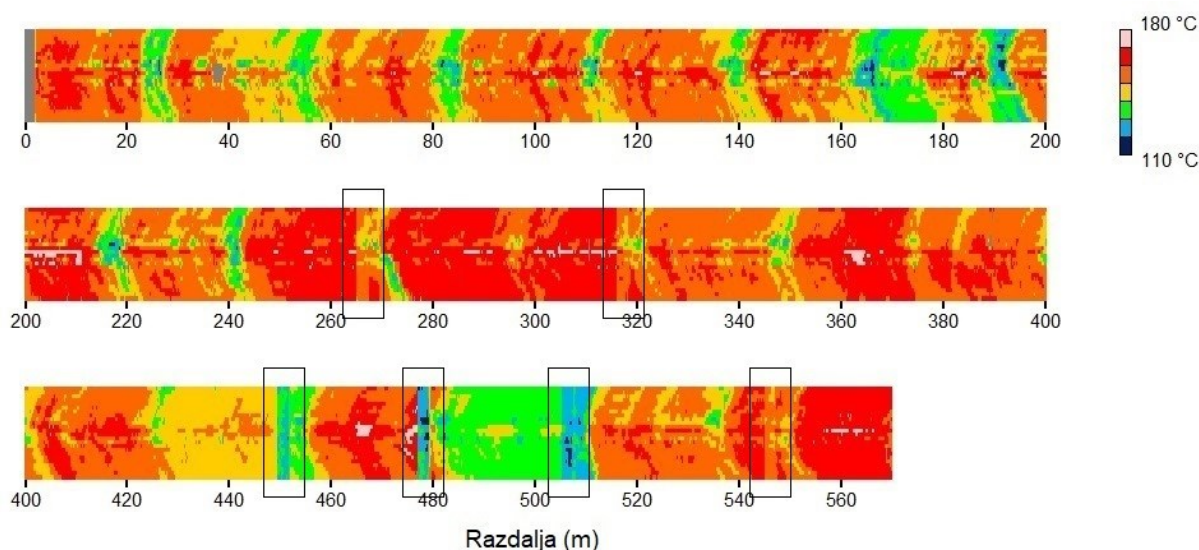
Figure 54: A thermal profile and a graph with associated temperatures for the first 200 m of profile 4.



Grafikon 10: Maksimalna in minimalna temperatura polja 4 ter minimalna predpisana temperatura.

Graph 10: The maximum and minimum temperature of profile 4 and the minimum prescribed temperature.

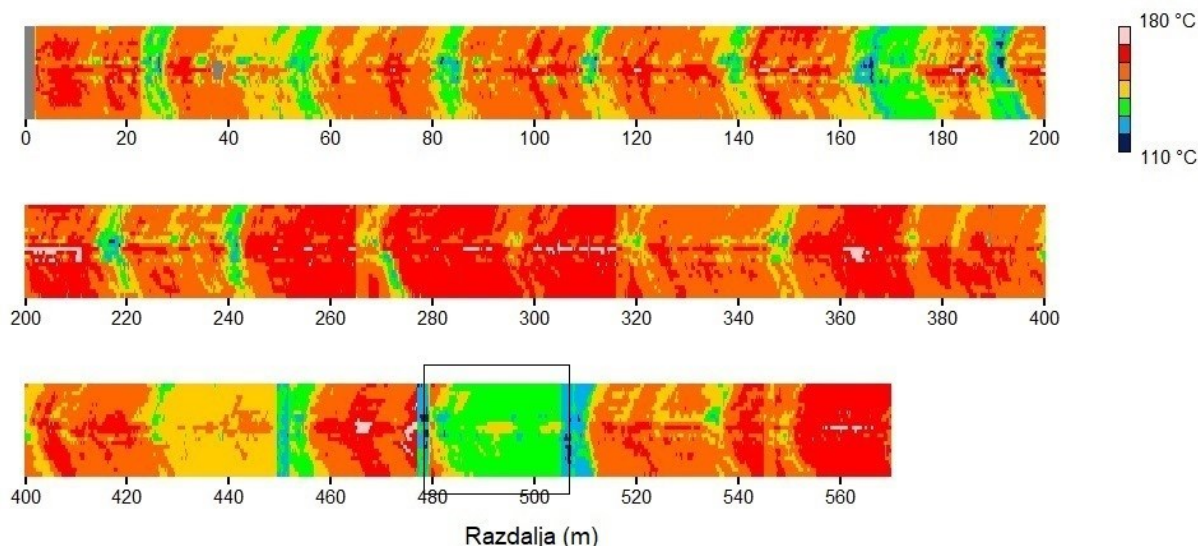
Poleg segregiranih območij, ki so se pojavila ob menjavah tovornjakov, smo lahko s termoskenerjem odkrili segregirana območja zaradi ustavitve finiŝerja. Ustavitve finiŝerja na temperaturnem polju 4 so označene na sliki 55. Običajno je do ustavitve prišlo zaradi menjav tovornjakov in v teh primerih so bile ustavitve kratke, saj so večinoma trajale do 2 minuti. Takšne ustavitve so se pojavile na stacionažah 266 m, 317 m, 506 m in 546 m, znižanje temperatur pa ni bilo veliko, saj je znašalo okoli 10 °C. Drugače je bilo pri daljših ustavitvah, do katerih je prišlo zaradi čakanja na dostavo asfaltna zmesi ali drugih razlogov in je bilo znižanje temperatur večje. Primera takšnih ustavitve sta bila na stacionažah 450 m (čas ustavitve = 3 min 55 s, znižanje temperature = 15 °C) in 478 m (čas ustavitve = 11 min 8 s, znižanje temperature = 37,6 °C).



Slika 55: Temperaturno polje 4 z označenimi ustavitvami finiŝerja.

Figure 55: The thermal profile 4 with paver stops marked.

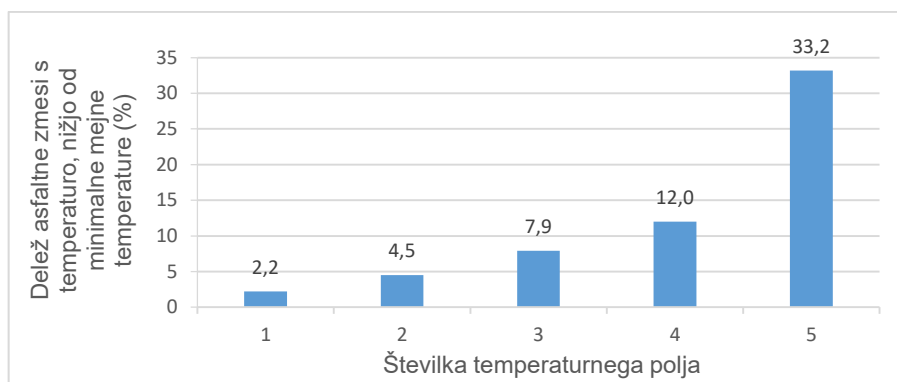
S termoskenerjem je bila odkrita tudi asfaltna zmes, ki je imela na celotnem tovornjaku nižjo temperaturo in se je vgradila na stacionaži med 480 in 505 m. Odsek je označen na sliki 56, povprečna temperatura na njem pa je znašala 138 °C. Vzrok za nižjo temperaturo je lahko bila nižja temperatura proizvodnje v asfaltni bazi ali pa je bila asfaltna zmes predolgo časa naložena na tovornjaku.



Slika 56: Temperaturno polje 4 z označenim odsekom ohlajene asfaltni zmesi celotnega tovornjaka.

Figure 56: The thermal profile 4 with a marked section of the cooled asphalt mixture of the entire truck.

Delež asfaltni zmesi, ki je na temperaturnem polju 4 imela temperaturo nižjo od minimalne vrednosti, je znašal 12,0 %, na grafikonu 11 pa so prikazani deleži vseh temperaturnih polj. Najnižji delež ohlajenih mest je imelo temperaturno polje 1 (AC 32 base B 50/70 A1), nekoliko večji delež sta imeli temperaturni polji 2 in 3 (AC 22 bin PmB 45/80-65 A1), najvišji delež pa sta imeli temperaturni polji 4 in 5 (SMA 11 PmB 45/80-65 A1), pri čemer je delež temperaturnega polja 5 znašal kar eno tretjino celotne površine (33,2 %). Najslabši rezultati so tako bili ravno pri obrabni plasti, ki je najbolj izpostavljena vremenskim vplivom in so zato segregirana območja še posebej podvržena hitrejšemu propadanju.



Grafikon 11: Delež vgrajene asfaltne zmesi s temperaturo, nižjo od minimalne mejne temperature.

Graph 11: A share of the placed asphalt mixture with a temperature lower than the minimum limit temperature.

Meritve s termoskeniranjem so pokazale, da je prišlo do temperaturne segregacije, ki pa je s trenutno TSC ni možno ovrednotiti. Edini kriterij, ki ga TSC predpisuje, so namreč minimalne in maksimalne temperature, medtem ko postopkov za vrednotenje temperaturne segregacije ne vsebuje. Poleg tega je zaznavanje omenjenega problema po TSC zaradi metod meritev omejeno. Površinske temperature na tovornjaku so sicer pokazale nižje temperature, vendar na ta način nismo poznali dejanskih temperatur za finišeje, ko se je asfaltna zmes vgradila. Meritve v vsebniku in ob polžu finišeja so pokazale ustrezno visoke temperature, na podlagi česar pa bi lahko sklepali, da med vgrajevanjem ni prišlo do temperaturne segregacije.

Za odkrivanje temperaturne segregacije bi tako bilo potrebno izvajanje meritev s kontaktnim termometrom za finišeje, kjer se sonda termometra vstavi v sredino asfaltne zmesi. Problem, ki se tukaj pojavi, je v tem, da se s kontaktnim termometrom izvajajo točkovne meritve, s čimer bi lahko spregledali segregirana območja. Poleg tega TSC predpisuje v okviru notranje kontrole za obrabne plasti 1 meritev na 500 ton in za vezane zgornje nosilne plasti 1 meritev na 1000 ton. Za projekt, pri katerem smo izvajali meritve, bi to pomenilo 1 meritev na približno 670 m za obrabno plast oziroma 1 meritev na približno 680 m za vezano zgornjo nosilno plast. Ker se lahko temperaturna segregacija pojavi kjerkoli, je tudi pogostost meritev premajhna.

Poleg tega TSC v primeru neustreznih temperatur ne predpisuje zahtev za izboljšanje kakovosti vgrajene asfaltne zmesi (npr. zamenjava oziroma sanacija asfaltne zmesi), kot tudi ne finančnih odbitkov. Na ta način se stroški, ki nastanejo zaradi predčasnega propadanja segregiranih območij, prenesejo na investitorja.

Iz opisanega lahko zaključimo, da obstoječa slovenska tehnična regulativa ne omogoča učinkovitega zaznavanja temperaturne segregacije v celotnem obsegu, kot tudi ne njenega vrednotenja. S tem lahko potrdimo postavljeno hipotezo.

5.4.2 Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s specifikacijo Tex-244-F

Kot predpisuje specifikacija Tex-244-F, smo temperaturna polja razdelili na pododseke 45 m in za vsakega izmed njih izračunali temperaturno razliko med T_{98,5} in T_{1,0}. V preglednici 11 je prikazana opredelitev segregacije glede na temperaturne razlike, ki je bila opisana že v poglavju 4.3 *Specifikacija Tex-244-F*. V nadaljevanju so v preglednici 12 in na grafikonih 12 in 13 prikazane vrednosti T_{98,5} in T_{1,0} oziroma ΔT po posameznih pododsekih temperaturnega polja 4.

Preglednica 11: Stopnje temperaturne segregacije, določene po AASHTO (Von Quintus, Reiter, 2017: str. 33).

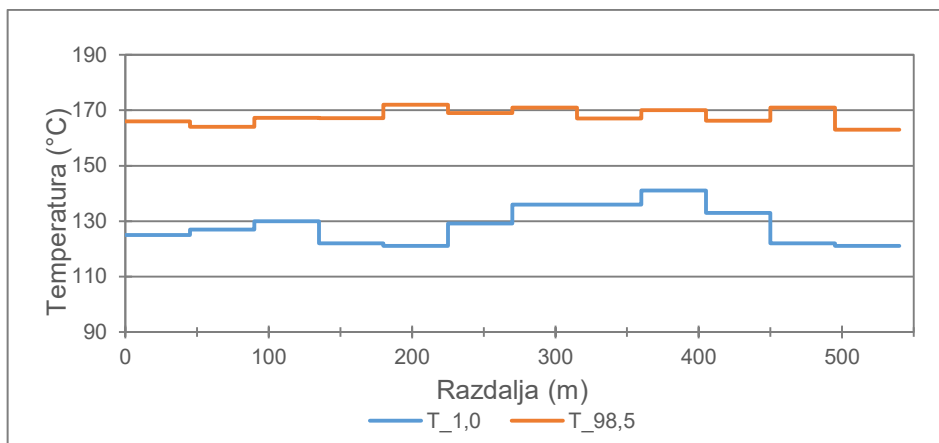
Table 11: Temperature segregation levels determined by AASHTO (Von Quintus, Reiter, 2017: p. 33).

Stopnja temperaturne segregacije	ΔT (°C)
Ničelna/nizka	≤ 14
Zmerna	14–28
Visoka	> 28

Preglednica 12: Vrednosti T_{1,0}, T_{98,5} in ΔT po posameznih pododsekih temperaturnega polja 4.

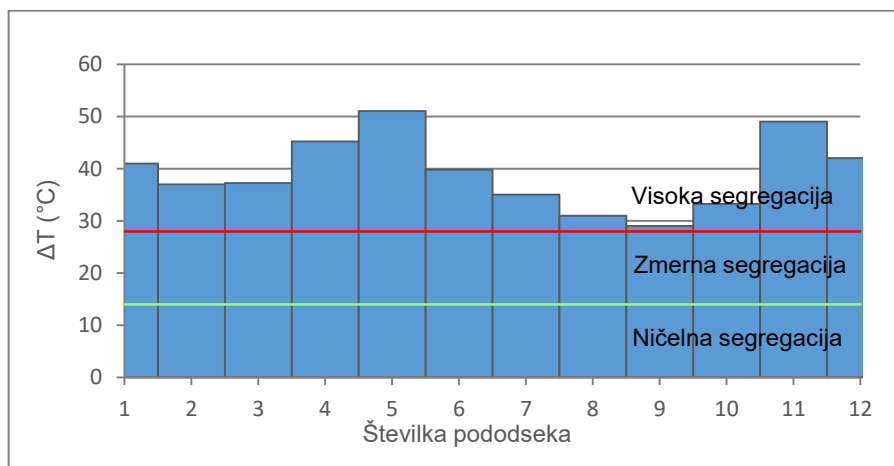
Table 12: Values of T_{1,0}, T_{98,5} and ΔT by each subsection of the thermal profile 4.

Št. pododseka	Stacionaža (m)	T _{1,0} (°C)	T _{98,5} (°C)	ΔT (°C)
1	0–45	125	166	41
2	45–90	127	164	37
3	90–135	130	167	37
4	135–180	122	167	45
5	180–225	121	172	51
6	225–270	129	169	40
7	270–315	136	171	35
8	315–360	136	167	31
9	360–405	141	170	29
10	405–450	133	166	33
11	450–495	122	171	49
12	495–540	121	163	42



Grafikon 12: Vrednosti $T_{1,0}$ in $T_{98,5}$ temperaturnega polja 4.

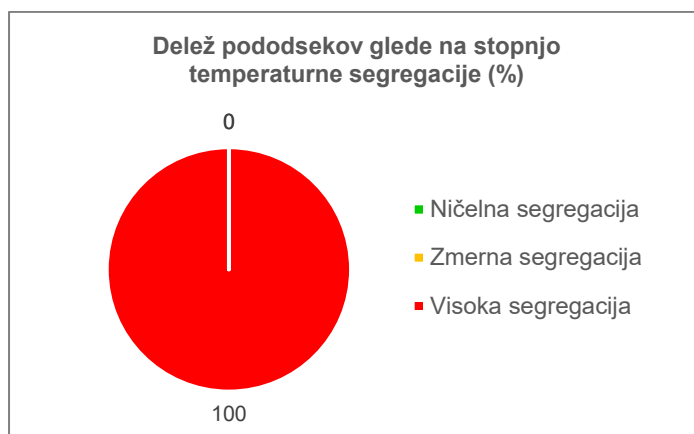
Graph 12: $T_{1,0}$ and $T_{98,5}$ values of the thermal profile 4.



Grafikon 13: Vrednosti ΔT po posameznih pododsekih temperaturnega polja 4.

Graph 13: ΔT values by each subsection of the thermal profile 4.

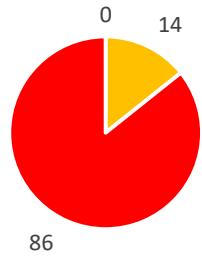
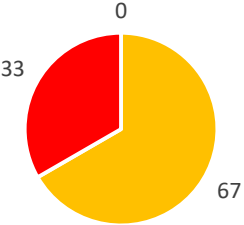
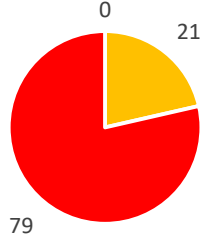
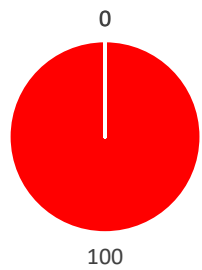
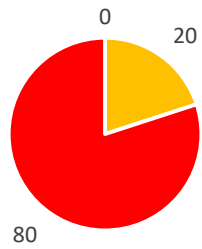
Rezultati meritev so pokazali, da je bilo temperaturno polje 4 zelo segregirano, saj so imeli vsi pododseki temperaturno razliko večjo od 28 °C, kar pomeni, da se je pri vseh pododsekih razvila visoka stopnja temperaturne segregacije. Delež pododsekov z visoko stopnjo temperaturne segregacije je tako znašal 100 % in je prikazan na grafikonu 14, v preglednici 13 pa so povzeti rezultati vseh temperaturnih polj.



Grafikon 14: Delež pododsekov glede na stopnjo temperaturne segregacije temperaturnega polja 4.

Graph 14: A percentage of subsections according to the temperature segregation level of the thermal profile 4.

Preglednica 13: Rezultati temperaturne segregacije po posameznih temperaturnih poljih.
Table 13: Temperature segregation results of the each thermal profile.

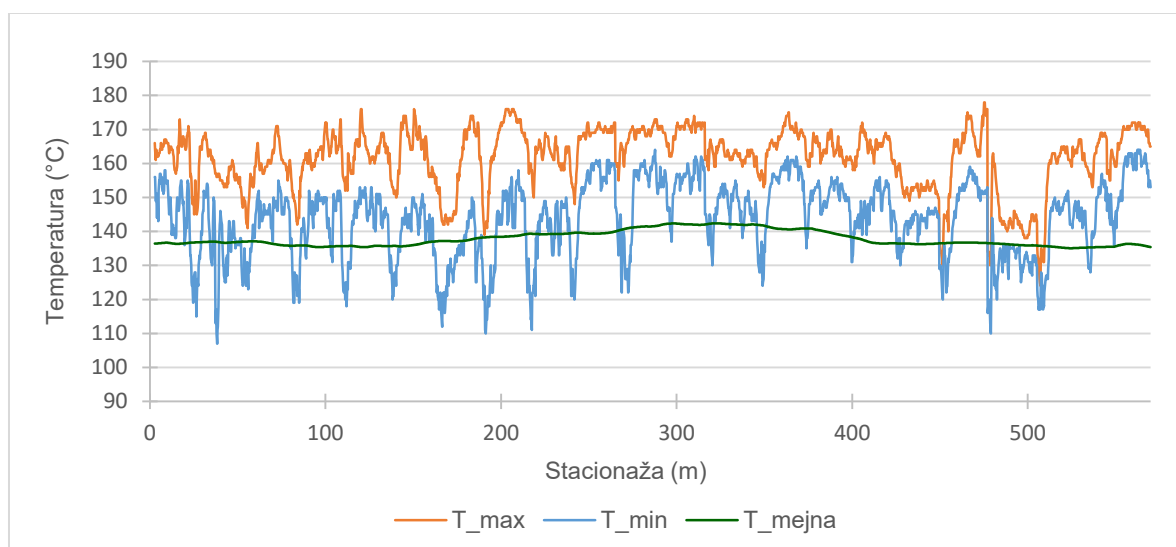
Številka temp. polja	Število pododsekov glede na stopnjo temperaturne segregacije			Skupno št. pododsekov	Delež pododsekov glede na stopnjo temperaturne segregacije (%)
	Niželna	Zmerna	Visoka		
1	0	3	18	21	
2	0	6	3	9	
3	0	3	11	14	
4	0	0	12	12	
5	0	2	8	10	

■ Niželna segregacija ■ Zmerna segregacija ■ Visoka segregacija

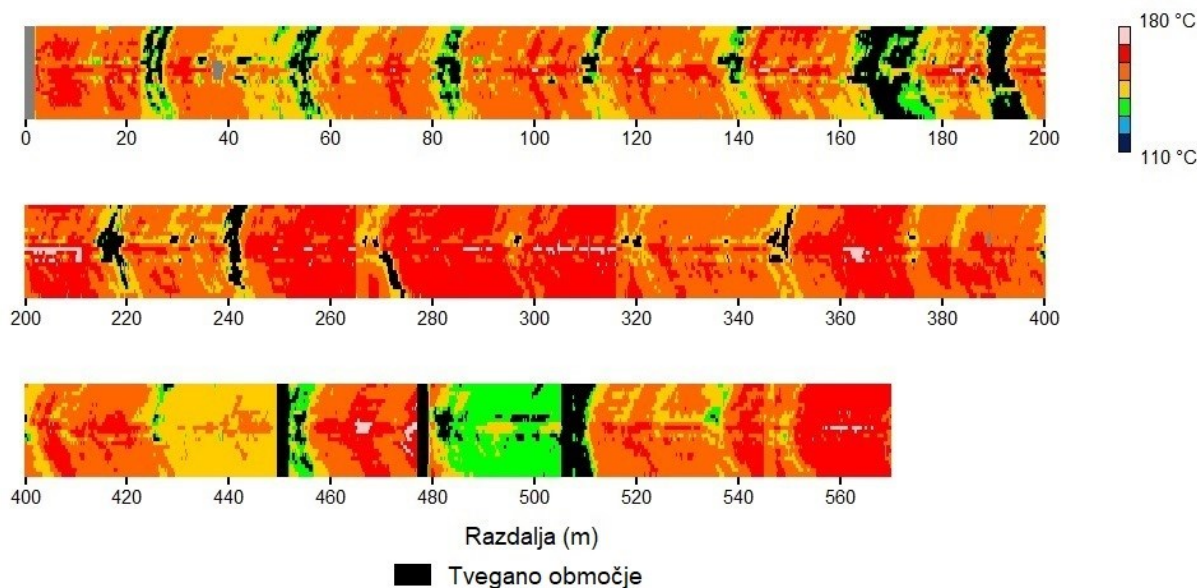
Iz preglednice 13 je razvidno, da je velik delež temperaturnih polj vseboval visoko segregacijo, medtem ko ničelne segregacije ni vsebovalo nobeno temperaturno polje. Najboljši rezultat je bil dosežen pri temperaturnem polju 2, ki pa je še vedno vsebovalo 33 % visoke segregacije. Pri ostalih temperaturnih poljih je bil delež visoke segregacije 79 % ali več, pri temperaturnem polju 4 pa, kot omenjeno, celo 100 %. Kot predpisujejo specifikacije o asfaltnih zmesih, ki jih v ZDA uporablja Teksaško ministrstvo za transport, bi bilo treba v primeru visoke segregacije vgrajevanje ustaviti in izvesti ukrepe, ki bi ob nadaljevanju postopka odpravili visoko segregacijo.

5.4.3 Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s ŠNM

Meritve smo obdelali v skladu s ŠNM, ki predpisuje postopek za izračun deleža segregiranih območij. Ta območja so poimenovana kot tvegana območja in predstavljajo tisti del asfaltnih zmesi, ki imajo temperaturo nižjo od izračunane mejne temperature. Postopek za izračun mejne temperature je opisan v poglavju 4.4 Švedska/norveška metoda – ŠNM. Na grafikonu 15 je prikazana maksimalna, minimalna in mejna temperatura polja 4, na sliki 57 pa je prikazano temperaturno polje 4 z označenimi tveganimi območji.



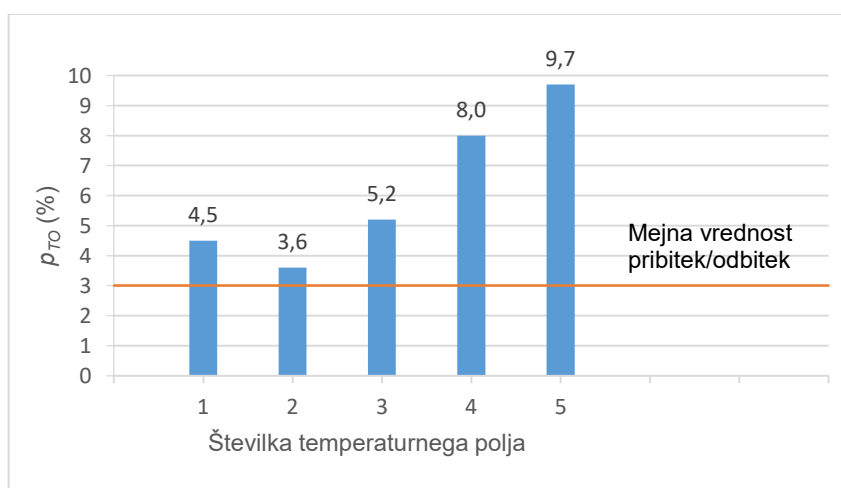
Grafikon 15: Maksimalna, minimalna in mejna temperatura polja 4.
Graph 15: The maximum, minimum and limit temperature of the profile 4.



Slika 57: Tvegana območja temperaturnega polja 4, označena s črno barvo.

Figure 57: Risk areas of the thermal profile 4 marked with black colour.

Vrednost p_{TO} temperaturnega polja 4 je znašala 8,0 %, vrednosti vseh temperaturnih polj pa so prikazane na grafikonu 16. Rezultati so pokazali, da so vrednosti p_{TO} znašale več kot 3 %, ki je mejna vrednost za dodelitev pribitkov ali odbitkov. Najboljši rezultat je znašal pri temperaturnem polju 2 s p_{TO} 3,6 %, medtem ko je bil najslabši rezultat dosežen pri temperaturnem polju 5 s p_{TO} 9,7 %. Pri vseh temperaturnih poljih bi tako po švedskem kriteriju prišlo do odbitkov, katerih vrednosti so prikazane v preglednici 14, skupna vrednost odbitkov pa bi znašala 5157,8 evra.



Grafikon 16: Vrednosti p_{TO} posameznih temperaturnih polj.

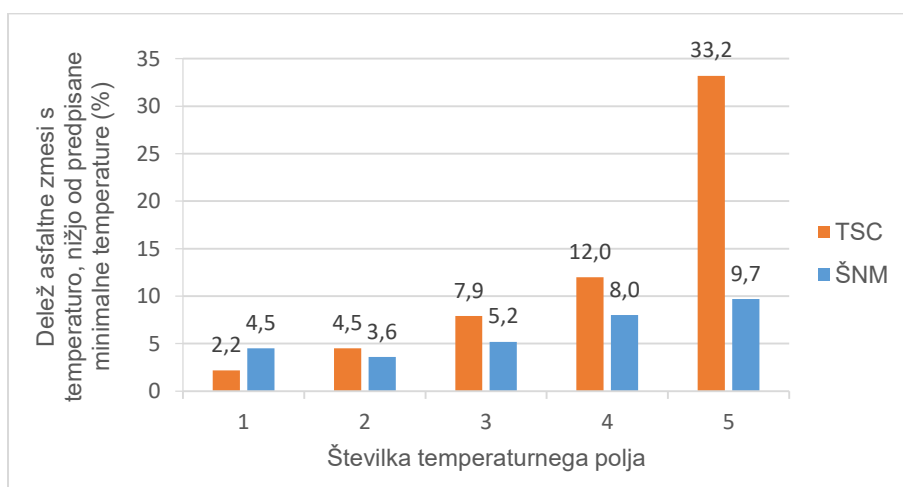
Graph 16: p_{TO} values of the each thermal profile.

Preglednica 14: Izračun pribitkov/odbitkov temperaturnih polj.

Table 14: A calculation of thermal profile bonuses/deductions.

Št. temp. polja	Površina temp. polja (m ²)	Tvegana območja (m ²)	p_{70} (%)	Pribitek/odbitek (EUR/m ²)	Pribitek/odbitek (EUR)
1	6078,0	272,3	4,5	-0,140	-850,9
2	2587,5	115,3	3,6	-0,056	-144,9
3	3927,0	205,8	5,2	-0,205	-805,0
4	3405,0	272,1	8,0	-0,465	-1583,3
5	2847,0	277,3	9,7	-0,623	-1773,7
Skupaj					-5157,8

Rezultate po ŠNM smo primerjali z rezultati po TSC, kjer je bila minimalna mejna temperatura določena s konstantno vrednostjo. Deleži območij s temperaturo, nižjo od minimalne mejne temperature, so prikazani na grafikonu 17, s katerega je razvidno, da so bili deleži po TSC višji, razen pri prvem temperaturnem polju, kjer je bil delež nižji. Vendar pa sta to dva različna kriterija, saj je po TSC minimalna mejna temperatura določena s konstantno vrednostjo, po ŠNM pa z relativno vrednostjo. Teh kriterijev zato ne moremo enačiti, ampak ju moramo ločeno obravnavati vsakega posebej.



Grafikon 17: Deleži asfaltnih zmesi s temperaturo, nižjo od predpisane minimalne temperature, po TSC in ŠNM.

Graph 17: Shears of asphalt mixtures with a temperature lower than the prescribed minimum temperature according to the TSC and the Swedish/Norwegian method.

5.5 Diskusija in predlogi za izboljšanje slovenske tehnične regulative

Analiza in vrednotenje meritev sta pokazala, da obstoječa slovenska tehnična regulativa s predpisanimi postopki kontrole ne omogoča učinkovitega zaznavanja kot tudi ne vrednotenja temperaturne segregacije. Ob tem velja spomniti, da je prišlo do temperaturne segregacije, kljub temu da so bili pogoji vgrajevanja zelo dobri, kar potrjuje ugotovitve iz literature, da je to zelo pogost problem. Ta problem je lahko še toliko večji v primerih, ko so pogoji asfaltiranja slabi, kot na primer nižje temperature zraka in podlage, oblačno in vetrovno vreme ter dolge transportne razdalje. Ker traja sezona asfaltiranja do pozne jeseni, ko se vreme ohladi, je lahko povsem običajno, da so takšni pogoji tudi prisotni.

Po drugi strani smo s specifikacijo Tex-244-F in ŠNM temperaturno segregacijo uspešno odkrili in ovrednotili. Specifikacija Tex-244-F zahteva ob odkritju visoke stopnje temperaturne segregacije ustavitev vgrajevanja in uvedbo ukrepov, s katerimi se segregacija zmanjša, medtem ko ŠNM določa finančne odbitke.

Ker je temperatura asfaltne zmesi eden ključnih kazalnikov kakovosti pri vgrajevanju, je pomembno, da se ta dejavnik med vgrajevanjem spremlja in se v čim večji meri prepreči temperaturna segregacija. Kot je bilo ugotovljeno z meritvami, je predpisana kontrola temperature po trenutni slovenski tehnični regulativi pomanjkljiva. Čeprav obstajajo postopki za kontrolo kakovosti na podlagi meritev gostote, ki se jih lahko izvede z izotopskim merilnikom, elektromagnetnim merilnikom ali z odvzemom jeder, so tudi te meritve točkovne. Z njimi tako ne moremo v celoti preveriti temperaturno segregiranih mest, ki so lahko slabo zgoščena in se lahko pojavljajo kjerkoli vzdolž asfaltirane površine.

Glede na omenjene ugotovitve bi bilo smiselno, da bi se definirali postopki, ki bi kontrolo temperature po slovenski tehnični regulativi izboljšali, in kot možna rešitev je uvedba termoskenerja. Ta merilnik se je izkazal za zelo učinkovitega, saj je omogočil merjenje temperature po celotni površini vgrajevanja asfaltnih zmesi in odkrivanje neustreznih temperatur, ki so se pri tem pojavile. Merjenje je potekalo avtomatsko, poleg tega so se meritve izvajale nekontaktno, kar predstavlja neporušni način merjenja, ki ne poslabša lastnosti vgrajenih asfaltnih zmesi. Tehnologija je tudi dovolj razvita za splošno uporabo in je dostopna na trgu.

Za uvedbo kontrole s termoskenerjem bi bilo treba postopek standardizirati in predpisati merila za vrednotenje temperaturne segregacije, pri čemer bi lahko izhodišče predstavljale tuje specifikacije. Postopek, za katerega menimo, da bi bil ustrezen in bi se ga lahko privzelo oziroma bi iz njega izhajala izdelava slovenskih specifikacij, je postopek po ŠNM. Postopek po tej metodi temelji na izračunu deleža segregiranih območij (delež tveganih območij), za katerega menimo, da bi se lahko uporabljal tudi v Sloveniji. Po drugi strani ameriška specifikacija Tex-244-F temelji na izračunu temperaturnih razlik, ki se nanašajo na zahteve o enakomernosti gostote, kar je opisano v poglavju 4.3 *Specifikacija Tex-244-F (ZDA)*. Ker v Sloveniji nimamo predpisanih zahtev glede enakomernosti gostote, bi bila za slovensko tehnično regulativo takšna specifikacija manj primerna, razen če bi se tudi v Sloveniji izdelale podobne zahteve.

Ob uvedbi termoskeniranja bi bilo treba odgovoriti še na ostala vprašanja, kot je npr. umerjanje merilnika in vzpostavitev akreditiranega laboratorija za izvajanje umerjanja. Poleg tega bi bilo treba določiti relacijo med notranjo in zunanjo kontrolo in opredeliti postopke izvajanja vsake izmed omenjenih kontrol.

Poleg uvedbe kontrole s termoskeniranjem predlagamo določitev kriterijev in zahtev glede doseganja oziroma nedoseganja temperaturne homogenosti vgrajene asfaltne zmesi. Za nizko stopnjo temperaturne segregacije je možno dodeliti finančne pribitke, medtem ko je za visoko stopnjo temperaturne segregacije možno določiti finančne odbitke ali druge možnosti, kot je podaljšanje garancijske dobe ali zamenjava oziroma sanacija asfaltne zmesi. Tudi tukaj lahko izhodišče predstavljajo tuje prakse, kot je npr. švedski pravilnik, ki ima že vzpostavljen sistem pribitkov in odbitkov. Na ta način bi se motiviralo izvajalce k uporabi postopkov in tehnologij za zmanjšanje temperaturne segregacije. Obenem je smiselno razmišljati v smeri, kako motivirati tudi investitorje k pripravi razpisov, ki bi prav tako spodbujali uporabo rešitev za zmanjšanje temperaturne segregacije.

Podobno kot kažejo prakse v tujini, menimo, da bi vpeljava kontrole temperaturne segregacije tudi v Sloveniji prispevala k boljšemu poznavanju temperaturne segregacije in spodbudila uporabo rešitev za njeno preprečevanje. Na ta način bi se kakovost vgrajevanja asfaltnih zmesi dvignila, kar bi pomenilo večjo trajnost vozišč in manjše stroške vzdrževanja.

6 ANALIZA UKREPOV OB POJAVU TEMPERATURNE SEGREGACIJE IN UKREPOV ZA NJENO PREPREČEVANJE NA IZBRANEM PROJEKTU

V prvem delu poglavja je predstavljen pregled ukrepov, ki zajema domače in tuje izkušnje. Proučili smo ukrepe, ki jih lahko izvajamo v primeru, če do temperaturne segregacije pride, in ukrepe za njeno preprečevanje. Za primer, ko se temperaturna segregacija med vgrajevanjem asfaltnih zmesi že pojavi, smo kot ukrep za preprečevanje njenih negativnih posledic obravnavali povečanje energije zgoščevanja. Ukrep smo proučili na primeru pridobljenih meritev iz projekta rušitve cestninske postaje Videž, ki so predstavljene v poglavju 5 *TEMPERATURA IN TEMPERATURN A SEGREGACIJA PRI VGRADNJI ASFALTNE ZMESI NA IZBRANEM PROJEKTU*.

Pregled ukrepov nadalje zajema ukrepe za preprečevanje nastanka temperaturne segregacije. Obravnavali smo naslednje možnosti:

- uporaba toplotnih zabojnikov in tovornjakov z izoliranimi kesoni,
- uporaba tovornjakov s tehnologijo potiskanja in
- uporaba podajalnikov asfaltne zmesi.

Posamezne ukrepe smo na podlagi navedb iz literature ovrednotili glede učinkovitosti preprečevanja temperaturne segregacije in njenih negativnih posledic.

V drugem delu poglavja smo na izbranem projektu analizirali vpliv uporabe podajalnika asfaltne zmesi na temperaturno segregacijo. Izvedene so bile meritve temperature pri vgradnji asfaltnih zmesi, ki smo jih analizirali in ovrednotili v skladu s slovensko in tujo tehnično regulativo. Na podlagi pridobljenih rezultatov smo podali ugotovitve in zaključke o obravnavanem ukrepu.

6.1 Pregled ukrepov – domače in tuje izkušnje

6.1.1 Povečanje energije zgoščevanja

Proučili smo, kakšne so možnosti preprečevanja negativnih posledic temperaturne segregacije, če povečamo energijo zgoščevanja. Z ohlajanjem se namreč asfaltnim zmesem povečuje trdnost, kar pomeni, da je potrebna večja energija zgoščevanja za doseganje ustrezne gostote. Energijo zgoščevanja je mogoče povečati na več načinov (TxDOT, 2019; AASHTO, 2013):

- uporaba težjih valjarjev,
- povečanje števila prehodov valjarjev,
- zmanjšanje hitrosti valjanja, s čimer se zaradi podaljšane delovanja poveča učinek zgoščevanja in
- povečanje amplitude in frekvence vibriranja v primeru uporabe vibracijskih valjarjev.

Ker se temperaturna segregacija lahko pojavlja vzdolž celotne trase vgrajevanja na različnih mestih, je treba energijo zgoščevanja spreminjati med procesom zgoščevanja. Iz tega razloga

uporaba težjih valjarjev ni primeren ukrep, saj z njim ne moremo prilagajati energije zgoščevanja, medtem ko je z ostalimi ukrepi to mogoče.

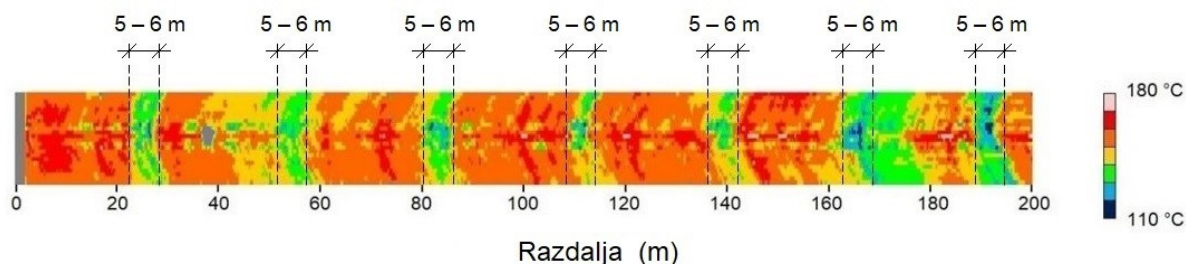
Pogoj za ustrezno izvajanje omenjenih ukrepov je natančno poznavanje lokacij segregiranih območij. Merilna oprema s termoskenerjem in GNSS sprejemnikom to omogoča, saj se lahko sproti izvajajo meritve temperature in beleženje lokacije. Prav tako trenutna tehnologija omogoča prenos rezultatov in komunikacijo med operaterji strojne mehanizacije, kar je prikazano na sliki 58. Operaterji valjarjev tako lahko prek računalnikov sproti spremljajo temperaturo vgrajenih asfaltnih zmesi, prek lastnega GNSS sprejemnika pa lahko spremljajo pozicijo, kjer se nahajajo. S tem jim je omogočeno odkrivanje temperaturne segregacije in izvajanje ukrepov na teh območjih (Raczon, 2019).



Slika 58: Komunikacija med operaterji strojne mehanizacije pri vgrajevanju asfaltnih zmesi (Raczon, 2019).

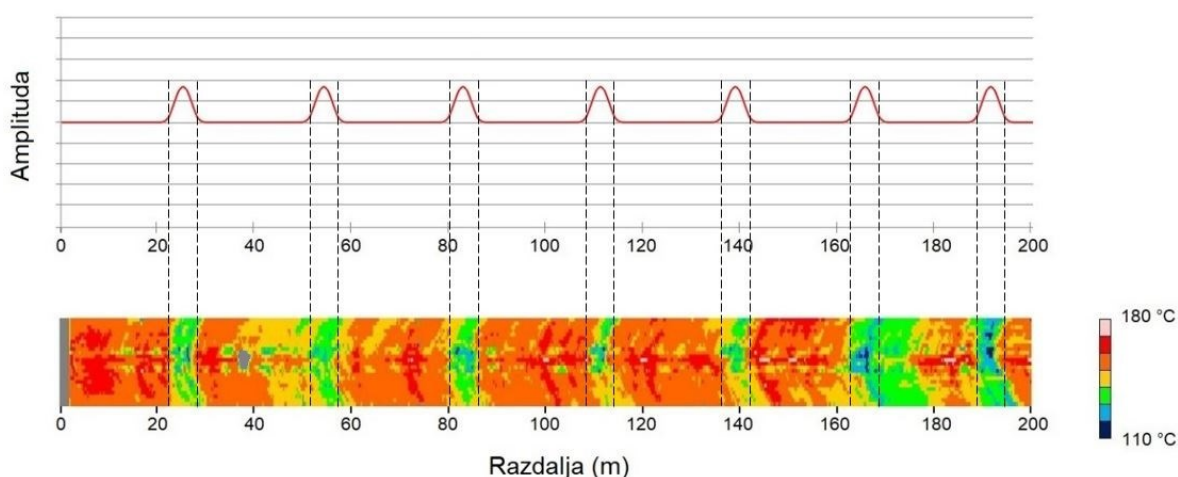
Figure 58: Communication between machine operators in asphalt mixture placement (Raczon, 2019).

Problem, ki se pojavi v primeru povečanega števila prehodov valjarjev, so kratke razdalje segregiranih območij. Na sliki 59 je prikazano temperaturno polje 4 na odseku 0–200 m, na katerem so označene razdalje segregiranih območij, ki znašajo okvirno med 5 in 6 m. Ker potrebujejo valjarji prostor, da lahko izvedejo manever za pomik v prečni smeri, bi morali iti preko teh območij. S tem bi prišlo na določenih mestih, ki niso temperaturno segregirana, do prekomernega zgoščanja tople asfaltne zmesi, zaradi česar bi se lahko njene lastnosti poslabšale. S takšnim ukrepom tako ne rešimo problema, saj so segregirana območja prekratka, da bi se lahko izvedli dodatni prehodi valjarjev samo na teh območjih.



Slika 59: Dolžina segregiranih območij na odseku 0–200 m temperaturnega polja 4.
Figure 59: Length of the segregated areas in section 0–200 m of the thermal profile 4.

Povečanje energije zgoščevanja le na segregiranih območjih je mogoče doseči z zmanjšanjem hitrosti valjarjev in s povečanjem amplitude ter frekvence vibriranja z uporabo vibracijskih valjarjev. Na sliki 60 je shematično prikazano povečanje amplitude vibriranja na segregiranih območjih polja 4 na odseku 0–200 m.



Slika 60: Povečanje amplitude vibriranja na segregiranih območjih pri uporabi vibracijskih valjarjev.
Figure 60: An increased vibration amplitude in segregated areas when using vibratory rollers.

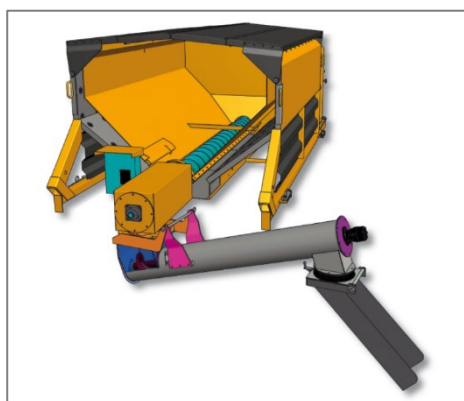
Vendar pa imajo omenjeni ukrepi učinek le do določene mere. Če se namreč temperatura preveč zniža, postane asfaltna zmes odporna proti zgoščevanju, zaradi česar je ne uspemo več dovolj zgostiti. V skrajnem primeru lahko zaradi prekomernega zgoščevanja pride do drobljenja kamnitih zrn v asfaltni zmesi, s čimer se njene lastnosti le še poslabšajo, še posebej ravnost (TxDOT, 2019; AASHTO, 2013).

V primeru visoke segregacije, ko je asfaltna zmes preveč ohlajena, povečanje energije zgoščevanja ne predstavlja rešitve za doseganje ustrezne gostote. Iz tega sledi, da je bolje iskati načine, s katerimi lahko zmanjšamo ali celo odpravimo nastanek ohlajenih mest in s tem omogočimo ustrezno zgoščevanje asfaltnih zmesi.

6.1.2 Uporaba toplotnih zabojnikov in tovornjakov z izoliranimi kesoni

Na trgu so na voljo posebni toplotni zabojniki, ki med transportom omogočajo ohranjanje temperature asfaltne zmesi. Zabojniki so izolirani z izolacijskim materialom, kot je na primer mineralna volna, in na vrhni strani zaprti z loputami. Lahko so opremljeni z ogrevalnim sistemom (npr. na osnovi propana), ki omogoča dodatno ogrevanje asfaltne zmesi. V takšnih zabojnikih je mogoče potrebno temperaturo asfaltne zmesi (običajno med 140 in 170 °C) vzdrževati dlje časa, tudi do 15 ur.

Raztovarjanje asfaltne zmesi poteka z dozirnim polžem, ki je nameščen na dnu zabojnika, dodatno pa se lahko uporablja zunanji transportni polž za lažje vgrajevanje na bolj odmaknjenih površinah. Notranjost zabojnika je prikazana na sliki 61 (a). Zabojnik je lahko vgrajen neposredno na šasijo tovornjaka, lahko pa se uporabljajo mobilni zabojniki, ki se namestijo na tovornjake prekucnike ali pa se transportirajo s prikolico. Različne izvedbe zabojnikov so prikazane na slikah 61 (b), 61 (c) in 61 (d) (Guangdong ESUN Heavy Industry Co., Ltd., 2020; ATC A. Richter GmbH, 2011a).



(a)



(b)



(c)



(d)

Slika 61: (a) Notranjost toplotnega zabojnika, (b) toplotni zabojnik, vgrajen neposredno na šasijo tovornjaka, (c) mobilni toplotni zabojnik, nameščen na tovornjak prekucnik, in (d) mobilni toplotni zabojnik, nameščen na prikolico (ATC A. Richter GmbH, 2013; ATC A. Richter GmbH, 2011a; ATC A. Richter GmbH, 2011b; ATC A. Richter GmbH, 2011c).

Figure 61: (a) The inside of the thermal container, (b) the thermal container mounted directly on a truck chassis, (c) the mobile thermal container mounted on a tipper truck and (d) the

mobile thermal container mounted on a trailer (ATC A. Richter GmbH, 2013; ATC A. Richter GmbH, 2011a; ATC A. Richter GmbH, 2011b; ATC A. Richter GmbH, 2011c).

Toplotni zabojniki omogočajo transport asfaltnih zmesi z malo toplotnih izgub, vendar pa so namenjeni predvsem manjšemu obsegu del, kot so razna popravila, prekopi in ostala dela, kjer se porabijo manjše količine asfaltne zmesi. Zlasti so koristni v primerih, kjer zaradi delovnih okoliščin (na primer ročno vgrajevanje) traja vgrajevanje asfaltne zmesi dlje časa. Zaradi ohranjanja ustrezne temperature je mogoče celotno asfaltno zmes kakovostno vgraditi, poleg tega se prepreči nastanek odpadne asfaltne zmesi, do katere pride v primeru ohladike (Eastern Farm Machinery, 2019; ATC A. Richter GmbH, 2011a).

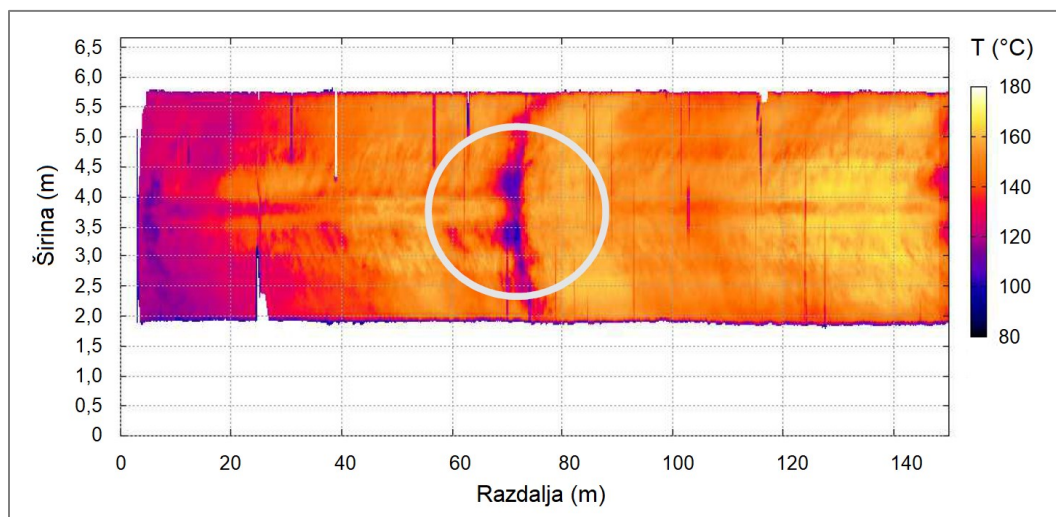
Za večji obseg del tako toplotni zabojniki niso primerni, saj vgrajevanje ne bi bilo časovno in ekonomsko učinkovito. V ta namen se lahko uporabljajo tovornjaki z izoliranimi kesoni, ki imajo izolirane stranice, na vrhu pa so pokriti z zaščitno ponjavo. Na Norveškem in Švedskem se uporabljajo tovornjaki z izoliranimi kesoni, katerih dno je okrogle oblike, primer takšnega tovornjaka pa je prikazan na sliki 62. Okroglo dno kesona služi za zmanjšanje zrnastostne segregacije, do katere lahko pride v primeru pravokotne oblike kesona med nalaganjem asfaltne zmesi. Med nalaganjem se namreč večji delci asfaltne zmesi zbirajo ob daljši stranici in v vogalih kesona, zaradi česar lahko pri vgrajevanju nastanejo območja z zrnastostno segregacijo (Strokirk, 2019; Olsson, 2018; Telle, 2015).



Slika 62: Tovornjak z izoliranim kesonom z okroglim dnom (Asfaltskolan, 2020).

Figure 62: A truck with an insulated round bottom bed (Asfaltskolan, 2020).

Čeprav tovornjaki z izoliranimi kesoni omogočajo manjše toplotne izgube med transportom, s tem ne preprečijo temperaturne segregacije. Na površini se asfaltna zmes še vedno ohladi v tolikšni meri, da pride pri vgrajevanju do segregiranih območij ob menjavah tovornjakov, primer takšnega območja pa je prikazan na sliki 63 (Olsson, 2018). Ob pregledu literature ni bilo zaslediti študij, ki bi obravnavale, kolikšen je vpliv izoliranosti kesona na temperaturno segregacijo v primerjavi z navadnim kesonom, kar ostaja odprto vprašanje za raziskovanje.

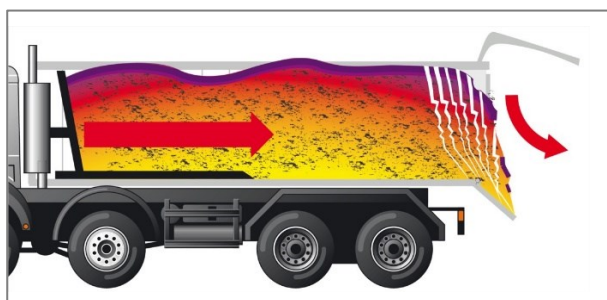


Slika 63: Nastanek segregiranega območja ob menjavi tovornjakov z izoliranim kesonom (Olsson, 2018: str. 13).

Figure 63: A segregated area formation at the exchange of trucks with an insulated bed (Olsson, 2018: p. 13).

6.1.3 Uporaba tovornjakov s tehnologijo potiskanja

Eden od ukrepov, ki lahko zmanjša temperaturno segregacijo, je uporaba tovornjakov, ki asfaltno zmes raztovarjajo v horizontalni smeri s tehnologijo potiskanja, prikazano na sliki 64. Ohlajena asfaltna zmes na površini se na ta način enakomerno razporedi z ostalim vročim delom med raztovarjanjem, s čimer se prepreči zdrs večje količine ohlajenega dela, kot se to zgodi pri raztovarjanju s tovornjaki prekucniki (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019; Olsson, 2018).



Slika 64: Raztovarjanje asfaltna zmesi s tehnologijo potiskanja (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: str. 38; LECTURA Press, 2017).

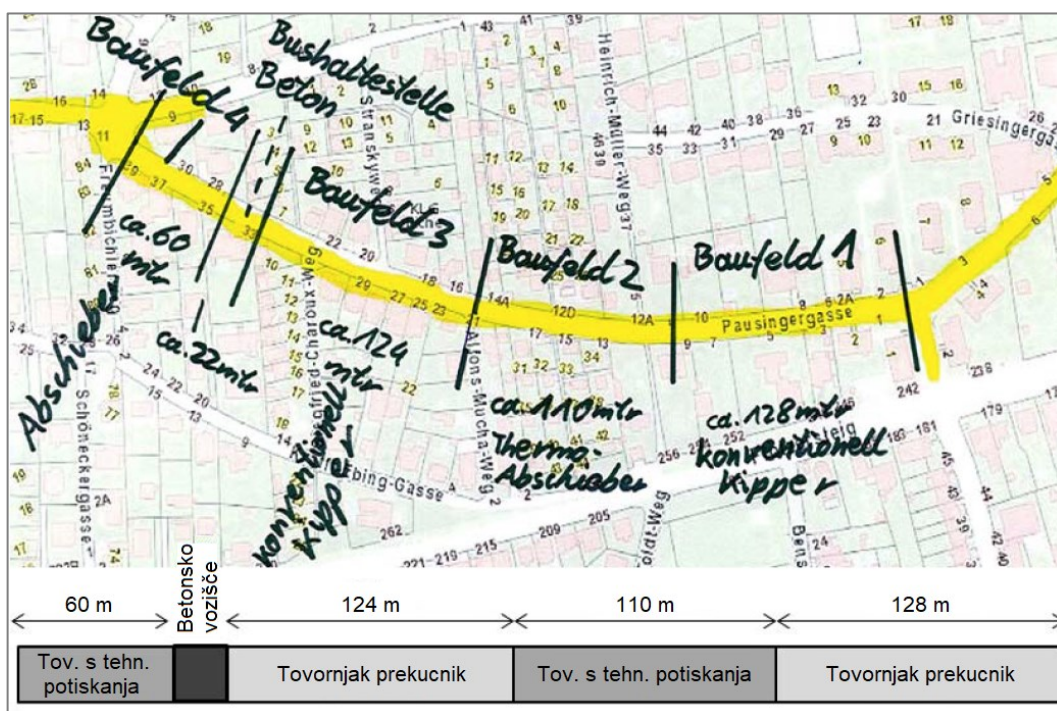
Figure 64: Unloading the asphalt mixture by a push-off technology (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: p. 38; LECTURA Press, 2017).

Študija, ki je navedena v Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH (2019), primerja vpliv uporabe konvencionalnih tovornjakov prekucnikov in tovornjakov s tehnologijo potiskanja na temperaturno segregacijo asfaltna zmesi. Študija zajema meritve temperature asfaltnih zmesi,

ki so se vgradile na cesti Pausingergasse na Dunaju v marcu in aprilu 2015. Dolžina asfaltiranja je znašala 465 m, vgradile pa so se naslednje asfaltne zmesi:

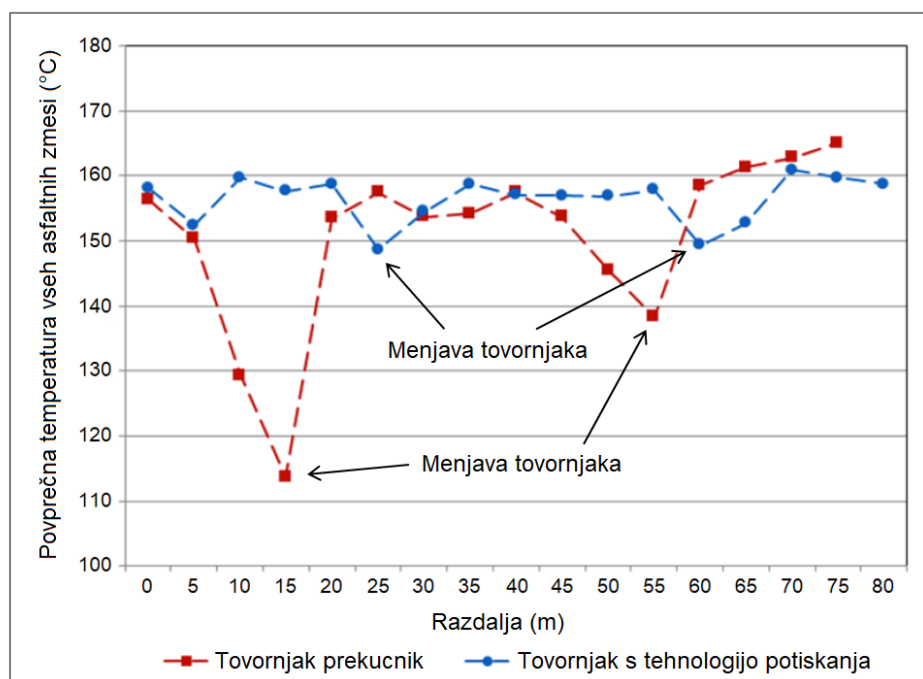
- 3 cm AC 11 surface, PmB 45/80-65, A2, G1,
- 8 cm AC 22 binder agent, PmB 25/55-65, H1, G4 in
- 9 cm AC 32 base, 50/70, T1, G4.

Trasa asfaltiranja je bila razdeljena na štiri odseke, na katerih se je uporabljal posamezen tip tovornjakov, kot je prikazano na sliki 65. Meritve temperature so se izvajale s termovizijsko kamero in so se zajemale za finišejem na vsakih 5 m. Na grafikonu 18 je za oba tipa tovornjakov prikazan temperaturni profil izvedenih meritev, na katerem prikazane temperature predstavljajo povprečne vrednosti temperatur vseh treh asfaltnih zmesi.



Slika 65: Uporaba tovornjakov prekucnikov in tovornjakov s tehnologijo potiskanja po posameznih odsekih asfaltiranja (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: str. 50).

Figure 65: The use of tipper trucks and trucks with a push-off technology by each paving section (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: p. 50).



Grafikon 18: Povprečna temperatura vseh asfaltnih zmesi, vgrajenih s tovrnjaki prekucniki in tovrnjaki s tehnologijo potiskanja (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: str. 55).

Graph 18: An average temperature of all asphalt mixtures placed by tipper trucks and trucks with a push-off technology (Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH, 2019: p. 55).

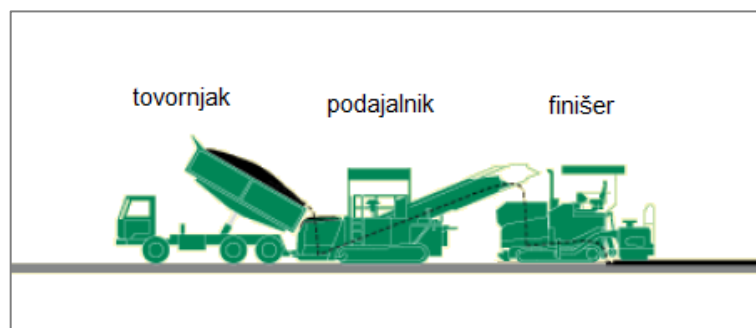
Rezultati so pokazali, da je bil padec temperature asfaltnih zmesi ob menjavah tovrnjakov s tehnologijo potiskanja manjši kot ob menjavah tovrnjakov prekucnikov. Na ta način se je izkazalo, da tovrnjaki s tehnologijo potiskanja prispevajo k zmanjšanju temperaturne segregacije.

Za natančnejšo opredelitev vpliva omenjenih tovrnjakov bi bilo priporočljivo izvesti meritve temperatur asfaltnih zmesi s termoskenerjem. Ta merilnik omogoča izvajanje natančnejših meritev, poleg tega so že izdelani postopki za vrednotenje temperaturne segregacije, kot sta specifikacija Tex-244-F in ŠNM. Ker takšnih študij ob pregledu literature ni bilo zaslediti, ostaja to odprto vprašanje za nadaljnje raziskovanje.

Poleg zmanjšanja temperaturne segregacije imajo tovrnjaki s tehnologijo potiskanja to prednost, da se lahko uporabljajo za transport vseh materialov, s čimer se jim poveča njihova uporabnost, medtem ko so tovrnjaki z izoliranimi kesoni, opisani v prejšnjem poglavju, namenjeni samo za transport asfaltnih zmesi. Tovrnjaki s tehnologijo potiskanja se lahko uporabljajo tudi v primerih nizke višine (predori, daljnovodi, nadvozi itd.) in na terenih z večjimi nagibi (Olsson, 2019; Olsson, 2018).

6.1.4 Uporaba podajalnikov asfaltne zmesi

Podajalnik je stroj, ki se uporablja za prenos asfaltne zmesi med tovornjakom in finišerjem ter je prikazan na sliki 66. Prvenstveno je namenjen izboljšanju ravnosti vozišča, saj je z njim omogočeno brezkontaktno raztovarjanje asfaltne zmesi v vsebnik finišerja. Pri vgrajevanju asfaltnih zmesi brez podajalnika pride namreč do kontakta med tovornjakom in finišerjem, saj se mora tovornjak opreti na finišerja, da lahko raztovori asfaltno zmes. S tem ovira gibanje finišerja, zaradi česar se lahko ravnost vgrajenih asfaltnih zmesi poslabša. Podajalnik omogoča z dodatno zalogo asfaltne zmesi tudi kontinuirno delovanje finišerja brez ustavljanja, do katerega prihaja običajno med menjavo tovornjakov ali zaradi čakanja na dostavo asfaltne zmesi, kar prav tako ugodno vpliva na ravnost in kakovost vgrajenih asfaltnih zmesi (TxDOT, 2019; Černigoj, Balkovec, 2018).



Slika 66: Vgrajevanje asfaltne zmesi s podajalnikom (Jöseph Vögele AG, 2007: str. 5).

Figure 66: An asphalt mixture placement with a feeder (Jöseph Vögele AG, 2007: p. 5).

Uporaba podajalnika poleg omenjenega omogoča tudi zmanjšanje temperaturne segregacije, saj se asfaltna zmes nekoliko premeša med transportom prek tega stroja (TxDOT, 2019). V poglavju 6.2 *Analiza vpliva uporabe podajalnika Vögele na temperaturno segregacijo na izbranem projektu* smo podrobno obravnavali vpliv podajalnika znamke Vögele na temperaturno segregacijo pri vgradnji asfaltne zmesi na izbranem projektu.

Izmed podajalnikov na trgu velja posebej izpostaviti podajalnik, ki ga proizvaja ameriško podjetje Roadtec in je poimenovan s komercialnim imenom Shuttle Buggy (slika 67). Ta podajalnik ima v osrednjem delu posebej oblikovan dozirni polž, ki ga je podjetje razvilo in patentiralo ravno z namenom, da se asfaltna zmes pred vgradnjo premeša in se s tem zmanjša temperaturna segregacija (slika 68) (Roadtec, Inc., 2019).

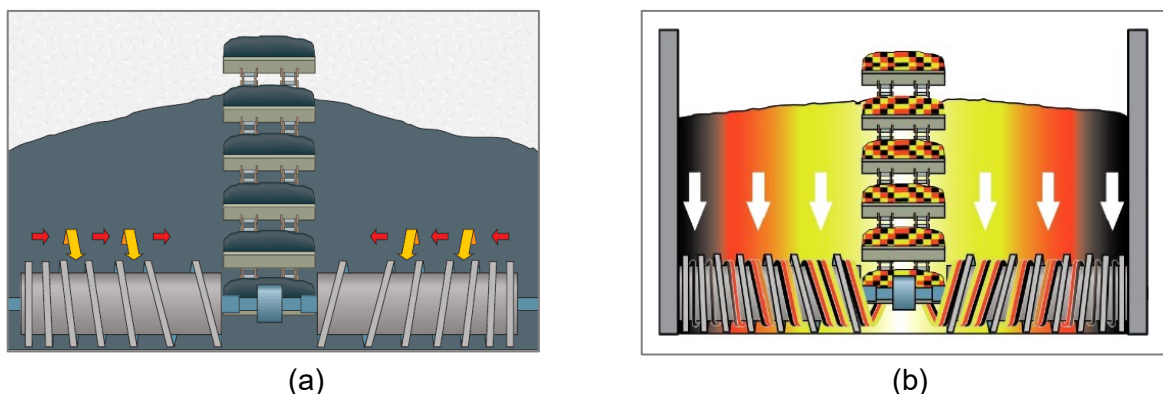


Slika 67: Podajalnik Shuttle Buggy (ASTEC MOBILE MACHINERY GmbH, 2019).
Figure 67: The Shuttle Buggy feeder (ASTEC MOBILE MACHINERY GmbH, 2019).



Slika 68: Transport in mešanje asfaltne zmesi prek podajalnika Shuttle Buggy (Phillips, Willoughby, Mahoney, 2003: str. 8).
Figure 68: An asphalt mixture transport and mixing over the Shuttle Buggy feeder (Phillips, Willoughby, Mahoney, 2003: p. 8).

Dozirni polž v podajalniku Shuttle Buggy se nahaja v osrednjem zabojniku in ima vijačne elemente s spremenljivim razmikom. Razmik je najmanjši na zunanjih straneh pri stranicah zabojnika in se povečuje proti notranjosti zabojnika. Na ta način dozirni polž postopoma zajema asfaltno zmes iz zunanosti proti notranosti, s čimer se ohlajena asfaltna zmes, ki se nahaja ob stranicah zabojnika, premeša z vročo asfaltno zmesjo v notranjosti. Premešana asfaltna zmes se nato prek transportnega traku prenese do finiŝerja. Na sliki 69 sta prikazana oblika dozirnega polža in način meŝanja ohlajene in vroče asfaltne zmesi (Roadtec, Inc., 2019).

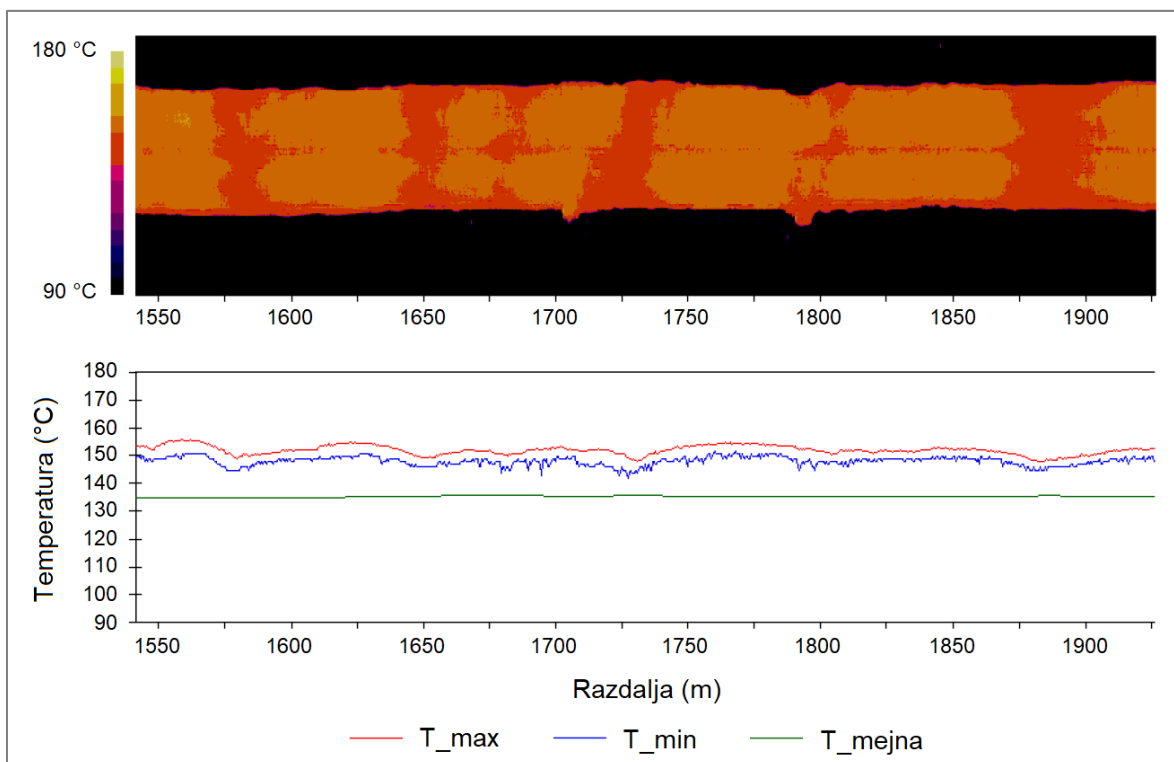


Slika 69: (a) Oblika dozirnega polža in (b) način mešanja ohlajene in vroče asfaltne zmesi
(Brock, Renegar, 2011: str. 20; Roadtec WMS, 2006: str. 5).

Figure 69: (a) A dosing auger shape and (b) the mixing method of the cooled and hot asphalt mixture (Brock, Renegar, 2011: p. 20; Roadtec WMS, 2006: p. 5).

Mešanje asfaltne zmesi omogoča doseganje izjemno dobrih rezultatov, saj so temperaturne razlike pri vgrajevanju asfaltnih zmesi majhne. Primer uporabe tega podajalnika je prikazan na sliki 70, ki prikazuje temperaturno polje asfaltne zmesi, vgrajene na Norveškem. Poleg temperaturnega polja je na sliki prikazan temperaturni profil, iz katerega je razvidno, da je bila dosežena visoka homogenost asfaltne zmesi, saj so bila temperaturna nihanja majhna.

Dolžina temperaturnega polja je bila 383 m, temperaturne razlike med maksimalno in minimalno temperaturo pa so vzdolž celotne dolžine znašale 10 °C ali manj. Glede na ameriško specifikacijo Tex-244-F so tako vsi pododseki dolžine 45 m, ki jih je bilo v tem primeru 8, dosegali ničelno segregacijo. Glede na ŠNM je bila minimalna temperatura vzdolž celotnega temperaturnega polja nad mejno temperaturo, kar pomeni, da je p_{TO} znašal 0 % (Telle, 2016).



Slika 70: Temperaturno polje in temperaturni profil asfaltni zmesi, vgrajene s podajalnikom Shuttle Buggy (Telle, 2016: str. 3).

Figure 70: A thermal profile and a temperature profile of the asphalt mixture placed with the Shuttle Buggy feeder (Telle, 2016: p. 3).

Na Norveškem so bile leta 2016 pri vgrajevanju asfaltnih zmesi izvedene meritve temperatur s termoskeniranjem v okviru Norveške uprave za javne ceste. Meritve so se izvajale na projektih z različnimi postopki transporta in vgrajevanja, med drugim je bil vključen tudi transport z ladjo, prikazan na sliki 71. Meritve so bile opravljene na 85 projektih, ki so bili izvedeni z naslednjimi postopki (Telle, 2016):

- uporaba podajalnika Shuttle Buggy (11 projektov),
- uporaba drugih vrst podajalnikov (21 projektov),
- transport z ladjo in uporaba drugih vrst podajalnikov (3 projekti),
- transport s tovornjakom in raztovarjanje neposredno v finiŝer (30 projektov) in
- transport z ladjo in raztovarjanje neposredno v finiŝer (20 projektov).



(a)



(b)

Slika 71: (a) Natovarjanje asfaltne zmesi na ladjo in (b) raztovarjanje asfaltne zmesi z ladje na tovornjak (Snilsberg, Hoven, Telle, 2016: str. 9, 12).

Figure 71: (a) Loading of asphalt mixture on a ship and (b) unloading of asphalt mixture from a ship to a truck (Snilsberg, Hoven, Telle, 2016: p. 9, 12).

Meritve so bile ovrednotene po ŠNM, vrednosti p_{TO} pa so za vse projekte prikazane v preglednici 15. Na grafikonih 19–23 so vrednosti p_{TO} prikazane za vsak postopek posebej, na grafikonu 24 pa so prikazane povprečne vrednosti p_{TO} po posameznih postopkih. Najboljši rezultati so bili doseženi s podajalnikom Shuttle Buggy, saj je p_{TO} znašal med 0,01 in 0,39 %, kar potrjuje učinkovitost tega podajalnika.

Nekoliko slabši rezultati so bili pri drugih vrstah podajalnikov, vendar še vedno nižji od 3 % pri večini projektov (19 od 21). Pri transportu z ladjo, vključno z uporabo drugih vrst podajalnikov, sta 2 od 3 projektov imela p_{TO} pod 3 %. Pri transportu s tovornjakom in raztovarjanju neposredno v finišer je imelo polovico projektov p_{TO} nad 3 % (15 od 30).

Najslabši rezultati so bili pri transportu z ladjo in raztovarjanju neposredno v finišer, saj so vsi projekti imeli p_{TO} nad 3 %. Razlog za slab rezultat je bil dolg transportni čas, saj se transport z ladjo na Norveškem uporablja pri dolгих razdaljah. Transportni čas lahko tako znaša 15 ur ali več, zaradi česar lahko pride do precejšnje ohladitve asfaltne zmesi in posledično do visoke temperaturne segregacije pri vgrajevanju (Snilsberg, Hoven, Telle, 2016; Telle, 2016).

Preglednica 15: Rezultati projektov v okviru Norveške uprave za javne ceste (Telle, 2016: str. 7–8).

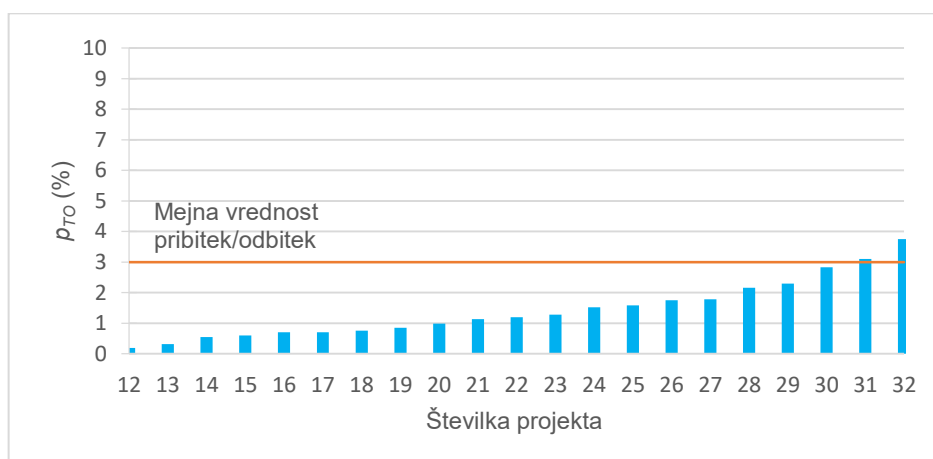
Table 15: Results of projects under the Norwegian Public Roads Administration (Telle, 2016: p. 7–8).

Način vgrajevanja	Številka projekta	p_{TO} (%)	Način vgrajevanja	Številka projekta	p_{TO} (%)
Podajalnik Shuttle Buggy	1	0,01	Tovornjak	36	0,37
	2	0,05		37	0,54
	3	0,06		38	0,79
	4	0,07		39	0,92
	5	0,09		40	1,39
	6	0,09		41	1,49
	7	0,13		42	1,59
	8	0,14		43	1,71
	9	0,18		44	1,79
	10	0,21		45	2,30
	11	0,39		46	2,50
Podajalnik (ostale vrste)	12	0,19		47	2,52
	13	0,32		48	2,60
	14	0,55		49	2,63
	15	0,60		50	2,72
	16	0,71		51	3,15
	17	0,71		52	3,43
	18	0,76		53	3,65
	19	0,85		54	3,69
	20	0,99		55	3,77
	21	1,14		56	3,78
	22	1,20		57	3,87
	23	1,28		58	3,89
	24	1,52		59	4,06
	25	1,59		60	4,32
	26	1,75		61	4,34
	27	1,78		62	5,10
	28	2,16		63	5,23
	29	2,30		64	6,41
	30	2,83	Ladja	65	3,13
	31	3,10		66	4,01
	32	3,75		67	4,79
Ladja + podajalnik (ostale vrste)	33	1,70		68	4,84
	34	2,80		69	4,93
	35	3,77		70	5,07
				71	5,10
				72	5,48
				73	6,32
				74	6,51
				75	6,63
				76	6,72
				77	6,97
				78	7,10
				79	7,66
				80	8,01
				81	8,10
				82	8,49
				83	8,97



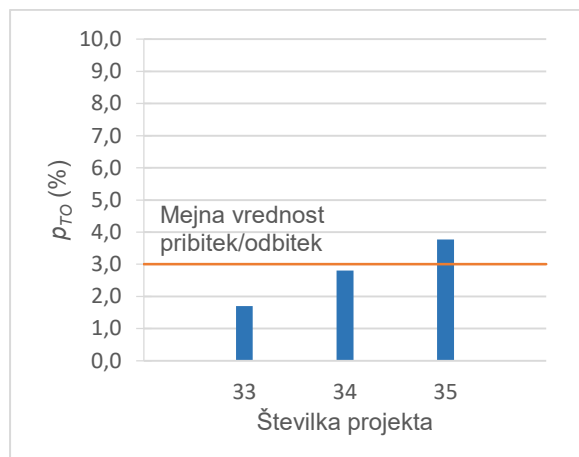
Grafikon 19: Vrednosti p_{TO} asfaltnih zmesi, vgrajenih s podajalnikom Shuttle Buggy (Telle, 2016: str. 7–8).

Graph 19: p_{TO} values of asphalt mixtures placed with the Shuttle Buggy feeder (Telle, 2016: p. 7–8).



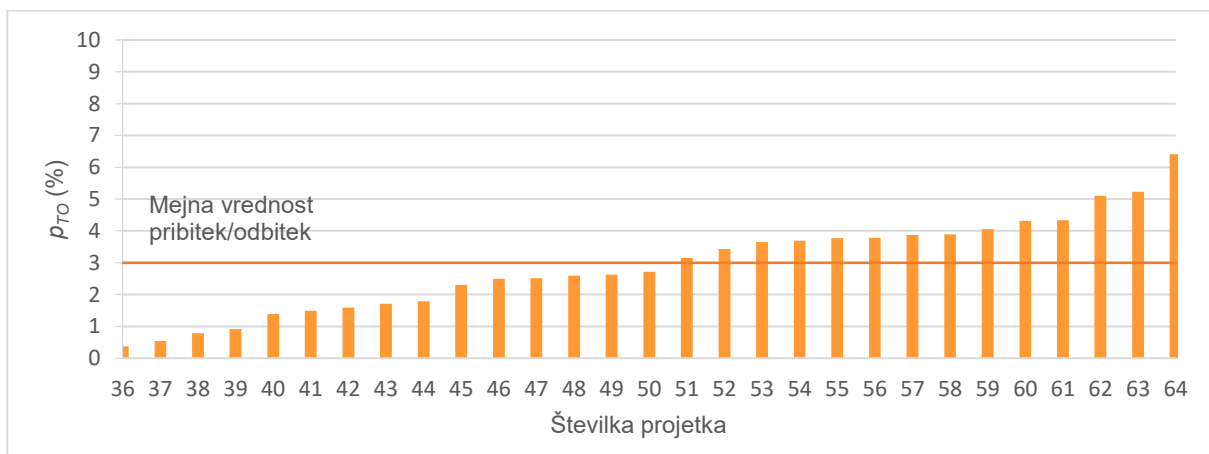
Grafikon 20: Vrednosti p_{TO} asfaltnih zmesi, vgrajenih z drugimi vrstami podajalnikov (Telle, 2016: str. 7–8).

Graph 20: p_{TO} values of asphalt mixtures placed with other types of feeders (Telle, 2016: p. 7–8).



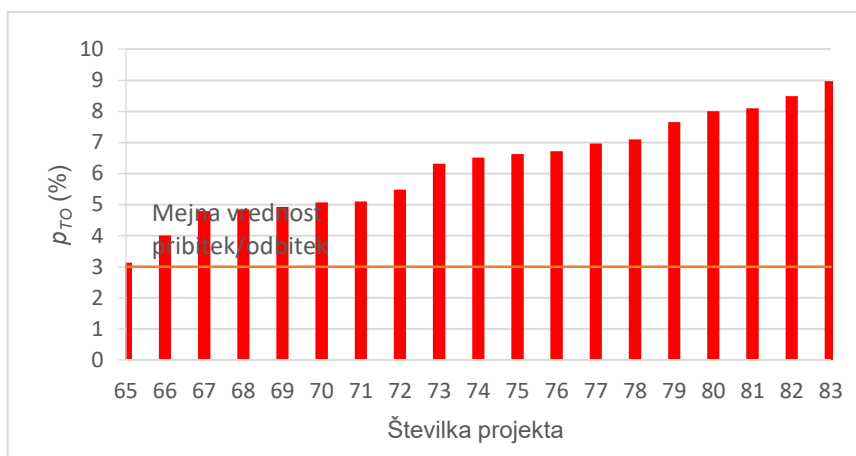
Grafikon 21: Vrednosti p_{TO} asfaltnih zmesi, prepeljanih z ladjo in vgrajenih z drugimi vrstami podajalnikov (Telle, 2016: str. 7–8).

Graph 21: p_{TO} values of asphalt mixtures transported by a ship and placed with other types of feeders (Telle, 2016: p. 7–8).



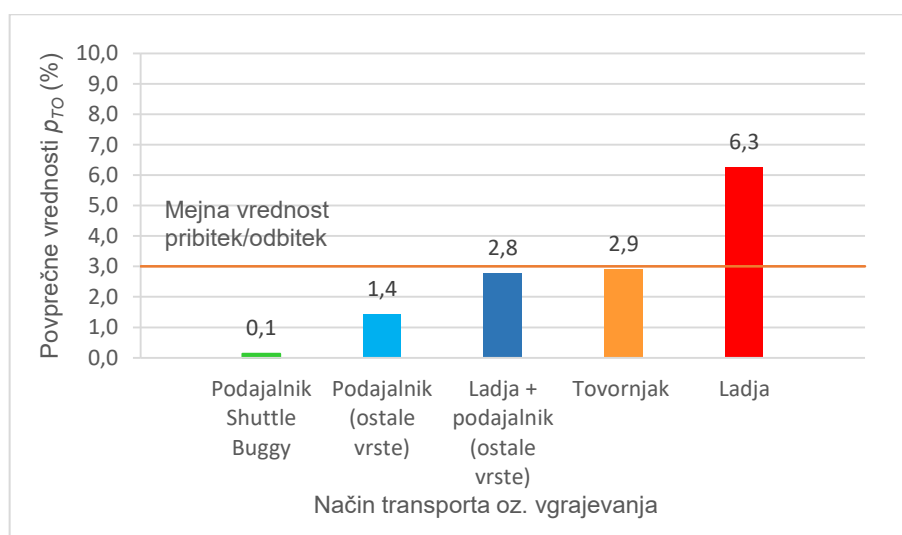
Grafikon 22: Vrednosti p_{TO} asfaltnih zmesi, prepeljanih s tovornjaki in raztovorjenih neposredno v finiŝer (Telle, 2016: str. 7–8).

Graph 22: p_{TO} values of asphalt mixtures transported by trucks and unloaded directly into the paver (Telle, 2016: p. 7–8).



Grafikon 23: Vrednosti p_{TO} asfaltnih zmesi, prepeljanih z ladjo in raztovorjenih neposredno v finiŝer (Telle, 2016: str. 7–8).

Graph 23: p_{TO} values of asphalt mixtures transported by a ship and unloaded directly into the paver (Telle, 2016: p. 7–8).



Grafikon 24: Povprečne vrednosti p_{TO} za posamezni način transporta oziroma vgrajevanja (Telle, 2016: str. 7–8).

Graph 24: Average p_{TO} values for the each type of transport and placement, respectively (Telle, 2016: p. 7–8).

Vgrajevanje s podajalnikom Shuttle Buggy se je izkazalo kot zelo inkovita metoda za preprečevanje temperaturne segregacije. Dozirni polŝ, prek katerega poteka meŝanje, precej zmanjŝa temperaturne razlike, s čimer se homogenost asfaltnih zmesi zelo izboljŝa.

6.2 Analiza vpliva uporabe podajalnika Vögele na temperaturno segregacijo na izbranem projektu

V magistrskem delu smo obravnavali vpliv podajalnika proizvajalca Vögele na temperaturno segregacijo na podlagi meritev temperature, ki so bile izvedene v okviru rekonstrukcije hitre ceste H4 v Vipavski dolini. Rekonstrukcija je potekala na relaciji Vipava–Ajdovščina–Selo med 29. 3. 2018 in 15. 8. 2018 in je zajemala 8,1 km hitre ceste v obeh smereh ter vse štiri krake priključka Ajdovščina.

Rekonstrukcija je obsegala odstranitev obstoječega asfalta v debelini 10 cm in vgraditev novih asfaltnih plasti v skupni debelini do 25 cm. Izvajalec gradbenih del je bilo podjetje Kolektor CPG, d. o. o., vgrajevanje asfaltnih zmesi s podajalnikom Vögele pa je prikazano na sliki 72.



Slika 72: Uporaba podajalnika Vögele pri vgrajevanju asfaltne zmesi (avtor: Sebastjan Černigoj).

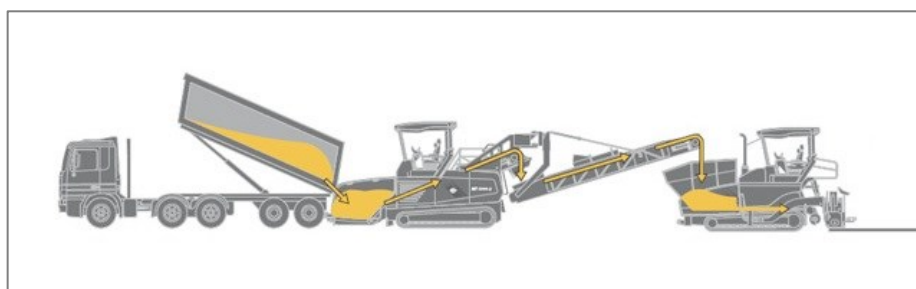
Figure 72: The use of the Vögele feeder for an asphalt mixture placement (author: Sebastjan Černigoj).

Slika 73 prikazuje sprejemni vsebnik podajalnika Vögele, v katerega tovornjaki raztovarjajo asfaltno zmes. V njem se nahajata dva dozirna polža, prek katerih se asfaltna zmes prenaša proti sredini vsebnika in nato prek tekočega traku naprej do finišerja. Na sliki 74 je prikazan transport asfaltne zmesi prek podajalnika Vögele.



Slika 73: Sprejemni vsebnik podajalnika Vögele z dozirnima polžema (Joseph Vögele AG, 2019b: str. 1).

Figure 73: A receiving hopper of a Vögele feeder with dosing augers (Joseph Vögele AG, 2019b: p. 1).



Slika 74: Transport asfaltne zmesi prek podajalnika Vögele (Joseph Vögele AG, 2010: str. 10).

Figure 74: An asphalt mixture transport over the feeder Vögele (Joseph Vögele AG, 2010: p. 10).

Meritve so potekale od 30. 7. 2018 do 2. 8. 2018 z merilno opremo, ki je vključevala termoskenner Vögele Roadscan, GNSS sprejemnik in vremensko postajo. Merilno opremo je priskrbel izvajalec. Izvedena so bila štiri temperaturna polja, ki so prikazana v preglednici 16.

Preglednica 16: Opis temperaturnih polj, izvedenih v okviru rekonstrukcije hitre ceste H4 v Vipavski dolini.

Table 16: A description of thermal profiles performed during the reconstruction of the H4 expressway in the Vipava Valley.

Številka temperaturnega polja*	Vrsta asfaltne zmesi	Debelina asfaltne plasti (cm)	Dolžina (m)
I	AC 22 bin PmB 45/80-65 A2	7	542 m
II	SMA 11 PmB 45/80-65 A2	4	1220 m
III	SMA 11 PmB 45/80-65 A2	4	751 m
IV	SMA 11 PmB 45/80-65 A2	4	1311 m

*Opomba: Temperaturna polja so označena z rimskimi števkami zaradi lažje preglednosti v magistrskem delu, saj se je na teh poljih uporabljal podajalnik.

Med izvajanjem meritev so bili pogoji za asfaltiranje zelo ugodni, podobno kot pri rušenju cestninske postaje Videž v poglavju 5 TEMPERATURA IN TEMPERATURNI SEGREGACIJA

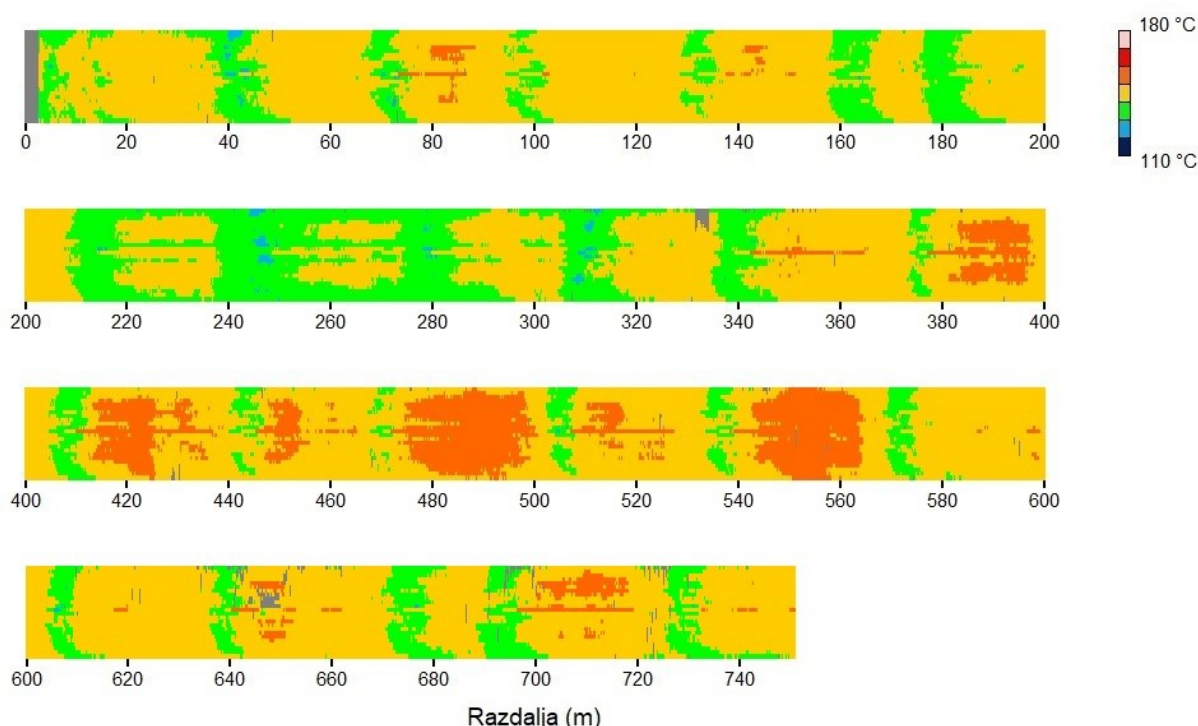
PRI VGRADNJI ASFALTNE ZMESI NA IZBRANEM PROJEKTU. Vreme je bilo večinoma sončno s temperaturami okoli 25 °C v jutranjem času in nad 30 °C prek dneva. Podlaga je bila topla, saj je v jutranjem času imela temperaturo okoli 25 °C, prek dneva pa se je zaradi sonca segrela na 40–50 °C. Vetra ni bilo ali pa je rahlo pihal. Asfaltna baza se je nahajala v Lažah, kar pomeni, da je bila relativno blizu gradbišča, saj je bila od njega oddaljena 24 km. Transportni čas je tako bil kratek in je znašal približno 19 minut, vsi tovornjaki pa so imeli zaščitne ponjave. Podobni pogoji asfaltiranja so omogočili dobro primerjavo rezultatov z uporabo podajalnika in brez njega.

Meritve z uporabo podajalnika smo analizirali v skladu s TSC, specifikacijo Tex-244-F in ŠNM. Rezultati so predstavljeni v nadaljevanju in v vsakem poglavju je najprej podrobneje obravnavano temperaturno polje III, nato pa so povzeti rezultati vseh temperaturnih polj.

6.2.1 Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s TSC

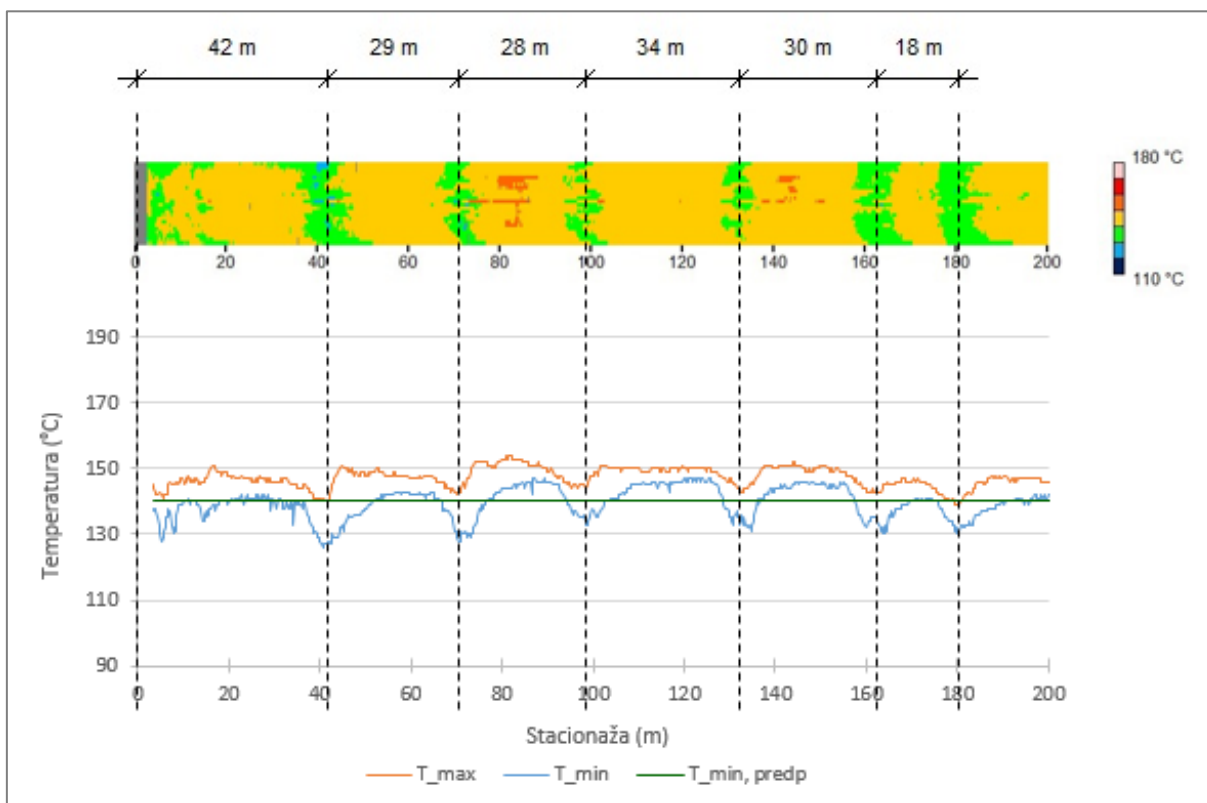
Asfaltni zmesi AC 22 bin PmB 45/80-65 A2 in SMA 11 PmB 45/80-65 A2 sta vsebovali s polimeri modificiran bitumen, za katerega TSC predpisuje, da se minimalna temperatura določi po navodilih proizvajalca. Ker je v našem primeru proizvajalec predpisoval le temperaturo proizvodnje (160–180 °C), ne pa tudi temperature vgrajevanja, smo enako kot v primeru rušitve cestninske postaje Videž upoštevali navedbe Henigmana in sod. (2016). Tako smo predpostavili najnižjo temperaturo 140 °C, referenčno 165 °C, najvišjo pa 185 °C.

Temperaturna polja, pridobljena s termoskeniranjem, smo grafično obdelali v programu Excel. Na sliki 75 je prikazano temperaturno polje III, ostala polja pa so prikazana v prilogi B.



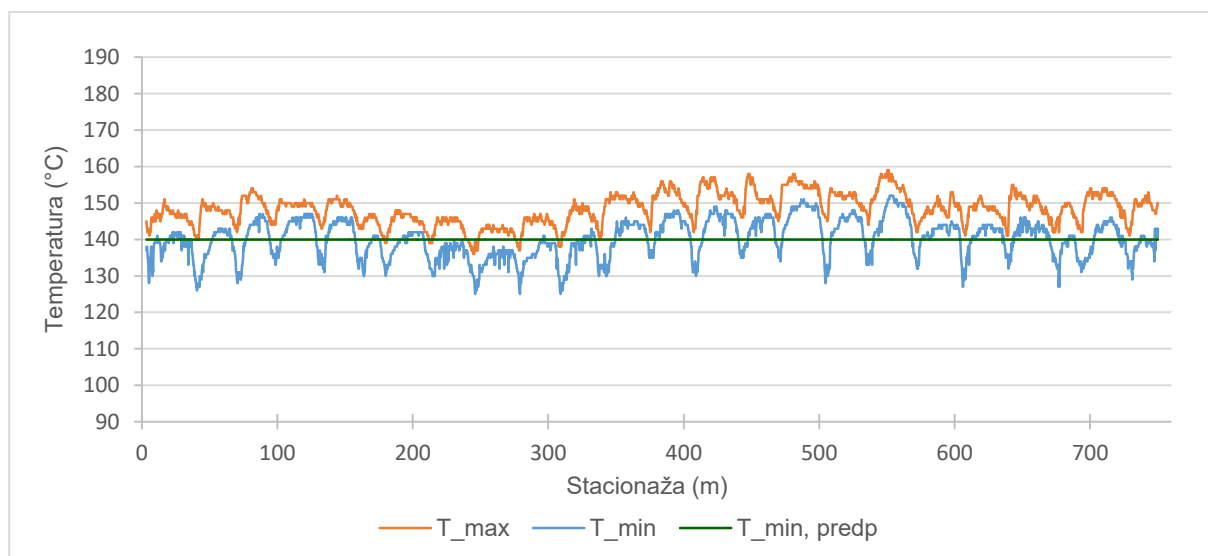
Slika 75: Temperaturno polje III.
Figure 75: A thermal profile III.

Meritve so pokazale, da so se rezultati ob uporabi podajalnika izboljšali, saj se niso več pojavljala izrazito segregirana območja. Še vedno pa je bilo mogoče zaznati padec temperature ob menjavah tovornjakov, saj je na teh mestih temperatura $T_{\min}$ znašala okoli 130 °C, kar je manj od minimalne predpisane temperature. V vmesnih območjih je bila temperatura ustrezno visoka, saj se je gibala med 140 in 160 °C (slika 76). Na grafikonu 25 so prikazane temperature za celotno temperaturno polje III.



Slika 76: Temperaturno polje in grafikon s pripadajočimi temperaturami za prvih 200 m polja III.

Figure 76: A thermal profile and a graph with associated temperatures for the first 200 m of the profile III.

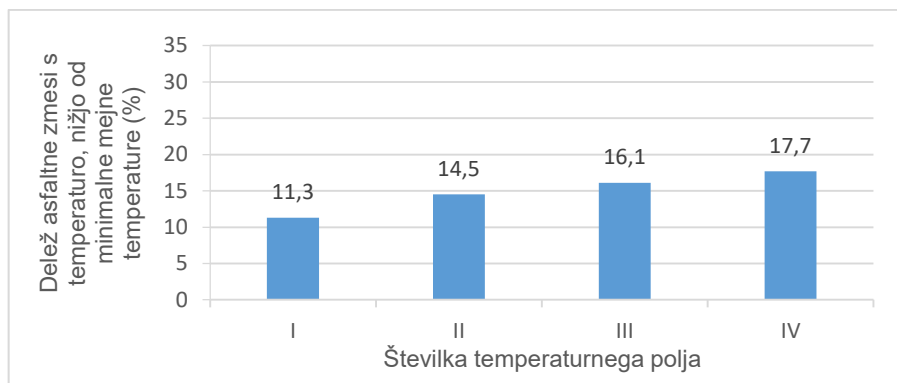


Grafikon 25: Maksimalna in minimalna temperatura polja III ter minimalna predpisana temperatura.

Graph 25: The maximum and minimum temperature of the profile III and the minimum prescribed temperature.

Če primerjamo meritve brez uporabe podajalnika in z njegovo uporabo, se je izkazalo, da se je zmanjšal temperaturni razpon, saj so se zmanjšala temperaturna nihanja. Minimalna temperatura se je dvignila okvirno s 120 na 130 °C, spremenila pa se je tudi maksimalna temperatura, saj se je znižala s 170 °C na okvirno 150–160 °C. Razlog za padec maksimalne temperature je v tem, da sta se vroča in hladna asfaltna zmes nekoliko premešali, poleg tega je bila asfaltna zmes med prenosom prek podajalnika dlje časa izpostavljena zraku. Z zmanjšanjem temperaturnih nihanj je tako bila izboljšana homogenost vgrajene asfaltne zmesi.

Kljub izboljšanju homogenosti pa je delež asfaltne zmesi, ki je imela temperaturo nižjo od minimalne vrednosti, znašal 16,1 %. Deleži vseh asfaltnih zmesi so prikazani na grafikonu 26 in so znašali med 11,3 in 17,7 %. Znatne vrednosti deležev kažejo na to, da so bile asfaltne zmesi premalo segrete. Za odpravo napak bi morale biti asfaltne zmesi segrete za približno 10 °C več, s čimer bi se temperaturni razpon dvignil na 140–170 °C in bi temperature znašale znotraj mejnih vrednosti.



Grafikon 26: Delež vgrajene asfaltne zmesi s temperaturo, nižjo od minimalne mejne temperature.

Graph 26: A share of the placed asphalt mixture with a temperature lower than the minimum limit temperature.

Ob vrednotenju teh meritev je treba spomniti, da so bile mejne temperature določene po Henigmanu in sod. (2016), ki navajajo, da se te vrednosti uporabljajo v ustaljeni praksi, vendar jih je treba preveriti po navodilih proizvajalca. Čeprav teh navodil ni bilo na voljo, smo vseeno uporabili omenjene vrednosti, da smo imeli izhodišče za vrednotenje meritev. V primeru, da so dejanske mejne vrednosti drugačne, bi se rezultati lahko razlikovali.

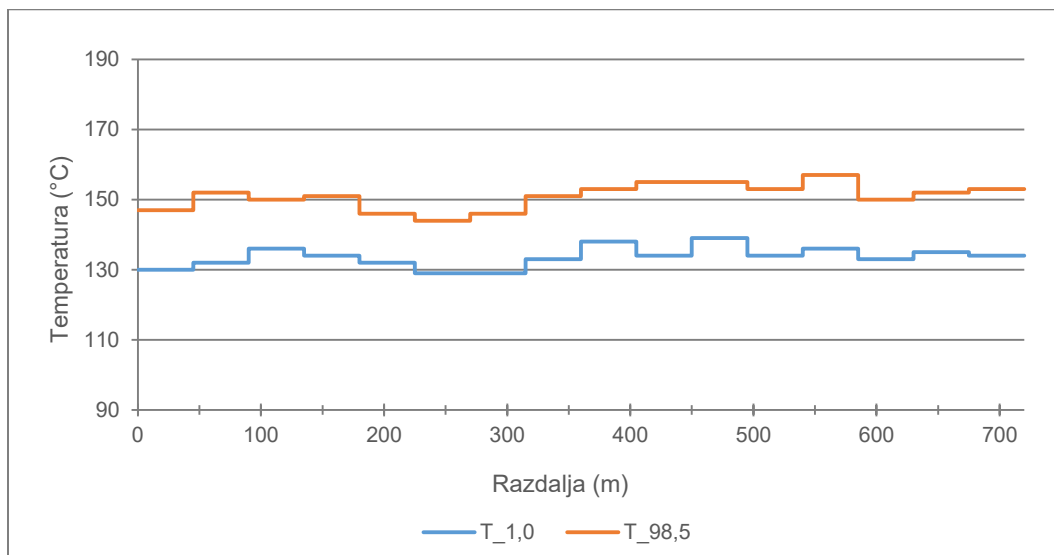
6.2.2 Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s specifikacijo Tex-244-F

Rezultati, dobljeni po specifikaciji Tex-244-F, so pokazali, da so se temperaturne razlike ob uporabi podajalnika precej zmanjšale. V temperaturnem polju III so znašale 21 °C ali manj, kar pomeni, da v tem polju ni bilo pododsekov z visoko segregacijo. V nadaljevanju so v preglednici 17 in na grafikonih 27 in 28 prikazane vrednosti T98,5 in T1,0 oziroma ΔT po posameznih pododsekih temperaturnega polja III.

Preglednica 17: Vrednosti $T_{1,0}$, $T_{98,5}$ in ΔT po posameznih pododsekih temperaturnega polja III.

Table 17: Values of $T_{1,0}$, $T_{98,5}$ and ΔT by each subsection of the thermal profile III.

Št. pododseka	Stacionaža (m)	$T_{1,0}$ (°C)	$T_{98,5}$ (°C)	ΔT (°C)
1	0–45	130	147	17
2	45–90	132	152	20
3	90–135	136	150	14
4	135–180	134	151	17
5	180–225	132	146	14
6	225–270	129	144	15
7	270–315	129	146	17
8	315–360	133	151	18
9	360–405	138	153	15
10	405–450	134	155	21
11	450–495	139	155	16
12	495–540	134	153	19
13	540–585	136	157	21
14	585–630	133	150	17
15	630–675	135	152	17
16	675–720	134	153	19



Grafikon 27: Vrednosti $T_{1,0}$ in $T_{98,5}$ temperaturnega polja III.

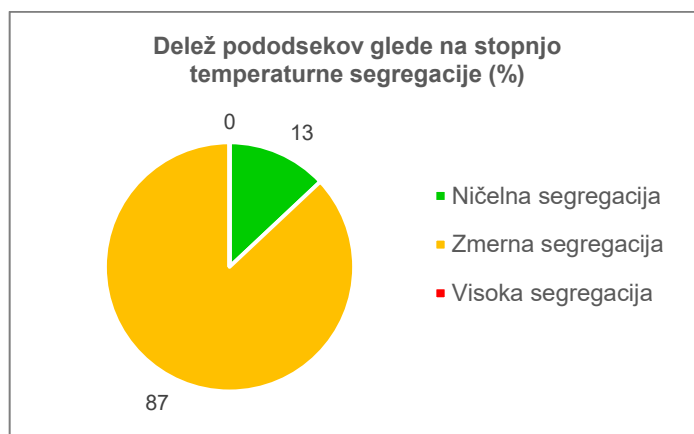
Graph 27: $T_{1,0}$ and $T_{98,5}$ values of the thermal profile III.



Grafikon 28: Vrednosti ΔT po posameznih pododsekih temperaturnega polja III.

Graph 28: ΔT values by each subsection of the thermal profile III.

Kot že omenjeno, v temperaturnem polju III ni bilo pododsekov z visoko segregacijo, sta pa 2 pododseka dosegala ničelno segregacijo ($\Delta T = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Ker je bilo vseh pododsekov 16, je delež pododsekov z ničelno segregacijo znašal 13 %. Na grafikonu 29 so prikazani rezultati temperaturnega polja III, v preglednici 18 pa so povzeti rezultati vseh temperaturnih polj.

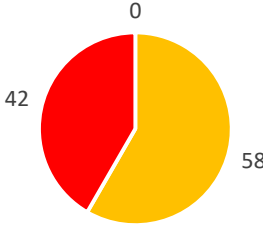
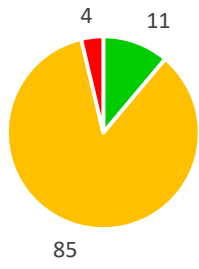
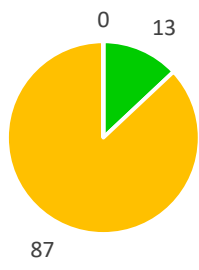
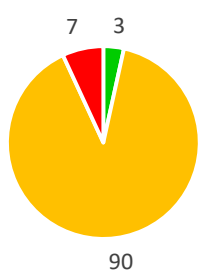


Grafikon 29: Delež pododsekov glede na stopnjo temperaturne segregacije temperaturnega polja III.

Graph 29: A percentage of subsections according to the temperature segregation level of the thermal profile III.

Preglednica 18: Rezultati temperaturne segregacije po posameznih temperaturnih poljih z uporabo podajalnika.

Table 18: Temperature segregation results of each thermal profile using the feeder.

Številka temp. polja	Število pododsekov glede na stopnjo temperaturne segregacije			Skupno št. pododsekov	Delež pododsekov glede na stopnjo temperaturne segregacije (%)
	Niželna	Zmerna	Visoka		
I	0	7	5	12	
II	3	23	1	27	
III	2	14	0	16	
IV	1	26	2	29	

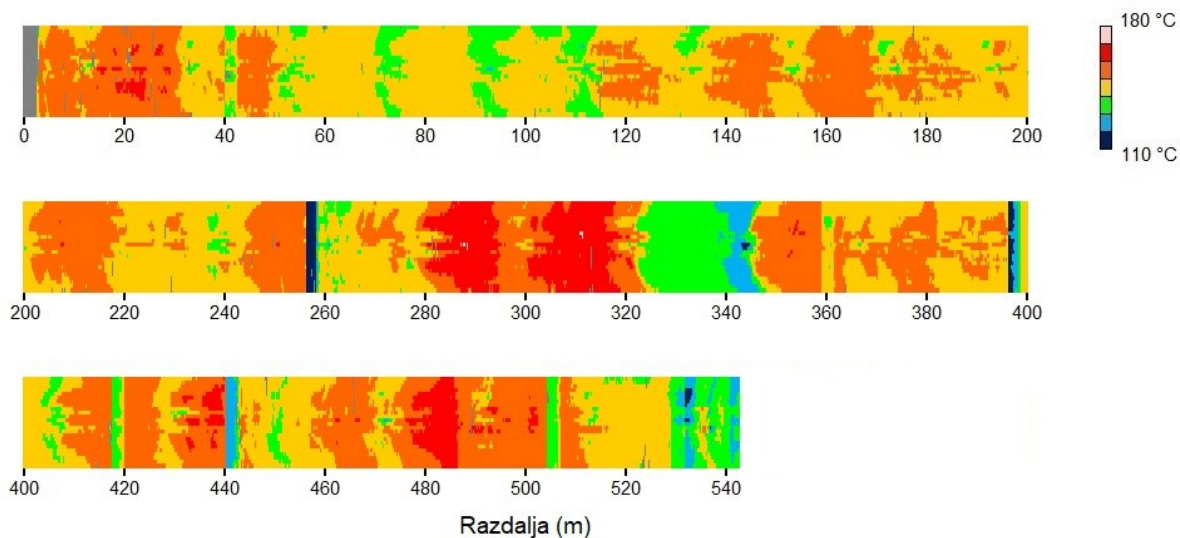
■ Niželna segregacija

■ Zmerna segregacija

■ Visoka segregacija

Tudi ostala temperaturna polja so pokazala precejšnje izboljšanje rezultatov, saj so imela majhen delež visoke segregacije, dosežena pa je bila tudi ničelna segregacija. Izjema je bilo temperaturno polje I z 42 % visoke segregacije, ki je prikazano na sliki 77. Razlog za tolikšen delež so bile ustavitve finišeja, ki so povzročile visoko segregacijo na 4 izmed 5 pododsekov, 1 pododsek pa je imel visoko segregacijo, ker je bila celotna asfaltna zmes enega tovarnjaka ohlajena (na stacionaži od 320 do 350 m). Možen razlog za ohlajeno asfaltno zmes je lahko

bila prenizka temperatura proizvodnje v asfaltnem obratu ali pa je bila asfaltna zmes na tovarnjaku predolgo časa natovorjena. Če bi izvzeli ustavitve finišerja in prekomerno ohlajeno asfaltno zmes, temperaturno polje I ne bi imelo pododsekov z visoko segregacijo.



Slika 77: Temperaturno polje I.

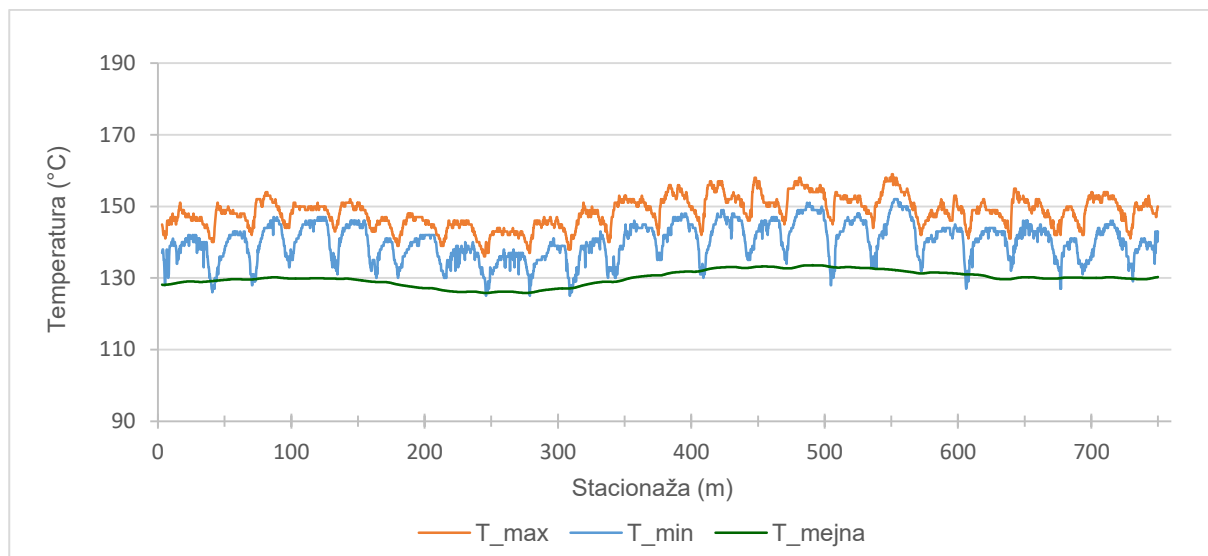
Figure 77: A thermal profile I.

Do podobnih napak je prišlo pri temperaturnih poljih II in IV, vendar v manjšem obsegu. Temperaturno polje II je imelo 1 pododsek z visoko segregacijo zaradi ustavitve finišerja, temperaturno polje IV pa je imelo 2 takšna pododseka zaradi prekomerne ohladitve asfaltna zmesi. Temperaturno polje III teh napak ni imelo, zato tudi ni imelo pododsekov z visoko segregacijo.

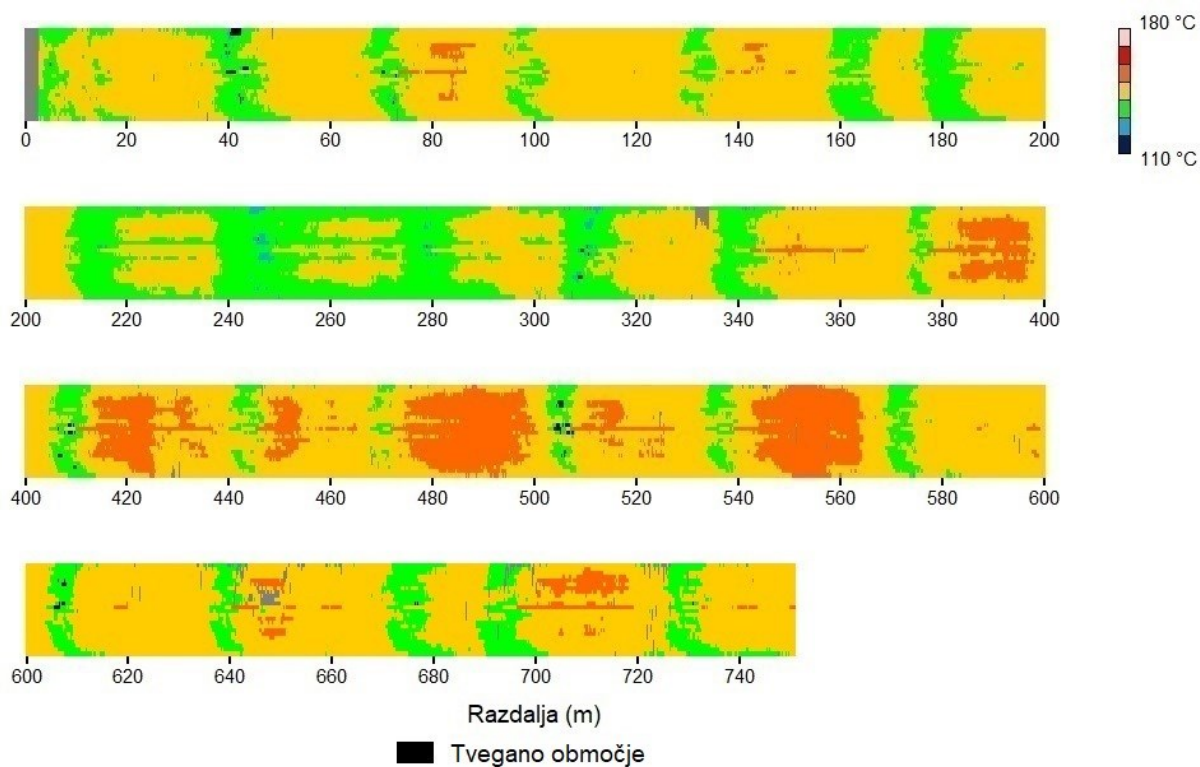
Meritve so tako pokazale, da je uporaba podajalnika učinkovit način za zmanjšanje temperaturne segregacije. Z njim je mogoče doseči ničelno segregacijo, vendar pa lahko ob nepravilnem vgrajevanju asfaltnih zmesi še vedno pride do visoke segregacije kljub uporabi podajalnika.

6.2.3 Analiza in vrednotenje rezultatov v skladu s ŠNM

Tudi ŠNM je pokazala, da so bili rezultati ob uporabi podajalnika boljši. Na grafikonu 30 je prikazana maksimalna, minimalna in mejna temperatura polja III, na sliki 78 pa je prikazano temperaturno polje III z označenimi tveganimi območji. Vrednost p_{TO} je bila zelo majhna, saj je znašala le 0,2 %, kar dokazuje dobro temperaturno homogenost vgrajene asfaltna zmesi.

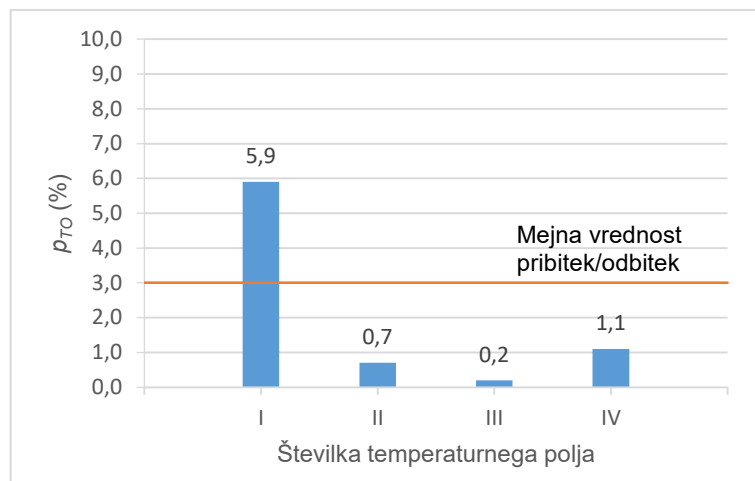


Grafikon 30: Maksimalna, minimalna in mejna temperatura polja III.
Graph 30: The maximum, minimum and limit temperature of the profile III.



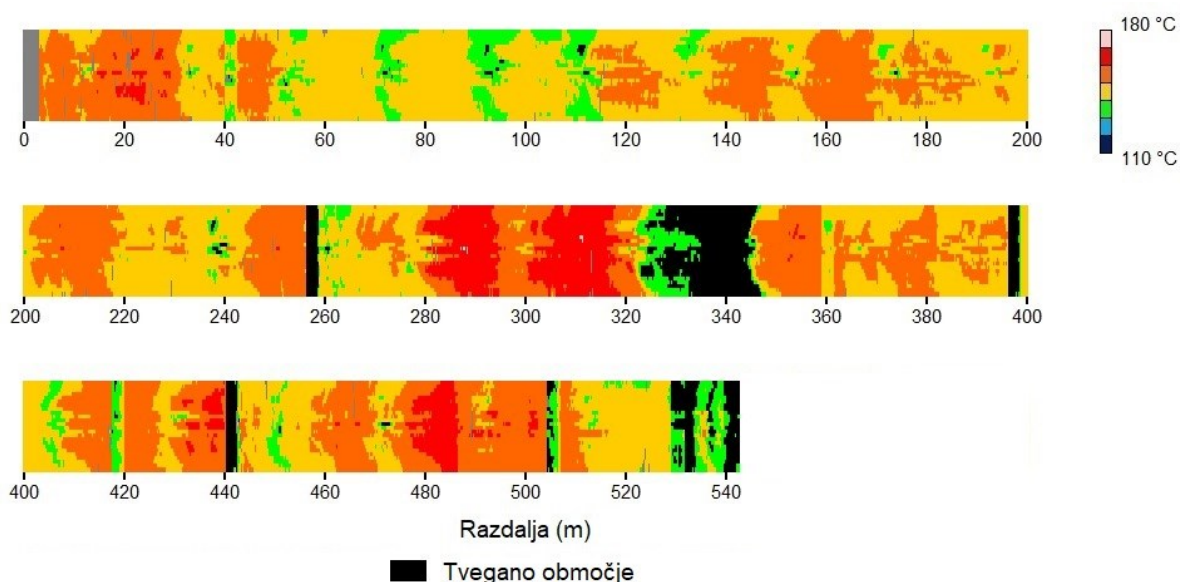
Slika 78: Tvegana območja temperaturnega polja III.
Figure 78: Risk areas of the thermal profile III.

Na grafikonu 31 so prikazane vrednosti p_{TO} vseh temperaturnih polj. Podobno kot po specifikaciji Tex-244-F tudi tukaj izkazujejo temperaturna polja II, III in IV dobre rezultate, saj imajo nizke vrednosti p_{TO} . Izjema je temperaturno polje I, ki ima višji p_{TO} (5,9 %) in je prikazano na sliki 79. Razlog za višji p_{TO} so ustavitve finiŝerja in prekomerno ohlajena asfaltna zmes (na stacionaŝi od 320 do 350 m), kar je na sliki obarvano s črno barvo.



Grafikon 31: Vrednosti p_{TO} posameznih temperaturnih polj z uporabo podajalnika.

Graph 31: p_{TO} values of thermal profiles using a feeder.



Slika 79: Tvegana območja temperaturnega polja I.

Figure 79: Risk areas of the thermal profile I.

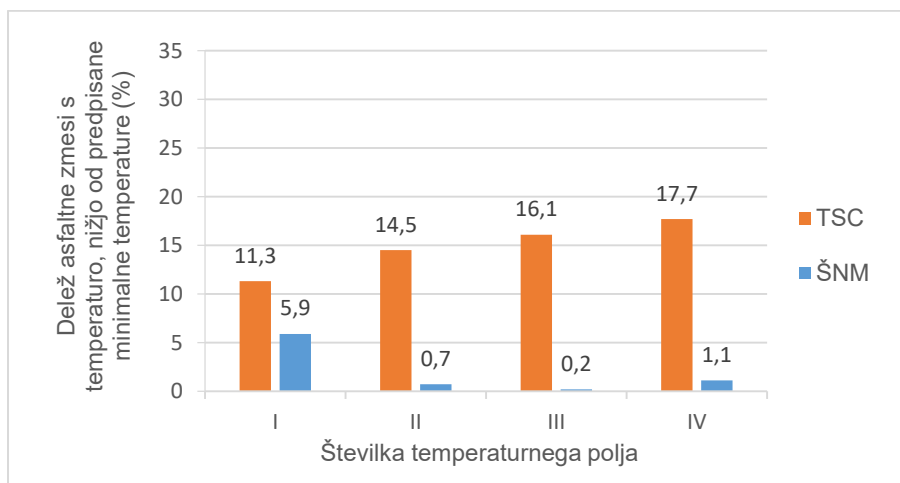
Po švedskem kriteriju bi tako prišlo pri temperaturnem polju I do odbitka, pri ostalih temperaturnih poljih pa bi bili doseženi pribitki. Vrednosti odbitkov oziroma pribitkov so prikazane v preglednici 19, v skupni vsoti pa bi bil dosežen pribitek 6263,7 evra. Razlika v doseganju boljših rezultatov s podajalnikom je očitna, saj bi v primeru rušenja cestninske postaje Videž, kjer se ni uporabljal podajalnik, prišlo do odbitka 5157,8 evra, kar je predstavljeno v poglavju 5 *TEMPERATURA IN TEMPERATURNA SEGREGACIJA PRI VGRADNJI ASFALTNE ZMESI NA IZBRANEM PROJEKTU*.

Preglednica 19: Izračun pribitkov/odbitkov temperaturnih polj (uporaba podajalnika).

Table 19: A calculation of thermal profile bonuses/deductions (feeder use).

Št. temp. polja	Površina temp. polja (m ²)	Tvegana območja (m ²)	$p_{\tau 0}$ (%)	Pribitek/odbitek (EUR/m ²)	Pribitek/odbitek (EUR)
I	3237,0	192,3	5,9	-0,270	-874,0
II	7324,5	49,3	0,7	+0,333	+2439,1
III	4486,5	7,8	0,2	+0,715	+3207,8
IV	7846,5	87,3	1,1	+0,190	+1490,8
Skupaj					+6263,7

Tudi v tem primeru smo primerjali rezultate, dobljene po ŠNM, z rezultati po TSC, ki so prikazani na grafikonu 32. Deleži asfaltnih zmesi s temperaturo, nižjo od minimalne vrednosti po TSC, so bili precej višji od deležev, dobljenih po ŠNM. Rezultati so tako pokazali, da sta absolutna temperatura in temperaturna segregacija izključujoča se kazalnika kakovosti vgrajene asfaltne zmesi. Ob nizki temperaturni segregaciji namreč ni nujno, da je tudi absolutna temperatura ustrezna, saj je lahko asfaltna zmes ohlajena in jo je kljub temu možno vgraditi s homogeno temperaturo. V takšnem primeru pride do poslabšanja lastnosti asfaltne zmesi po celotni površini, podobno kot pri temperaturni segregaciji, le da pri segregiranih območjih pride do poslabšanja samo na lokalno ohlajenih mestih. Iz tega sledi, da temperaturna segregacija ni edini pogoj ustreznosti vgrajene asfaltne zmesi in je poleg nje še vedno treba kontrolirati absolutno temperaturo.



Grafikon 32: Deleži asfaltnih zmesi s temperaturo, nižjo od predpisane minimalne temperature po TSC in ŠNM (uporaba podajalnika).

Graph 32: Shares of asphalt mixtures with a temperature lower than the prescribed minimum temperature according to the TSC and the Swedish/Norwegian method (feeder use).

7 ZAKLJUČEK

V magistrskem delu smo obravnavali problem temperaturne segregacije pri vgradnji asfaltnih zmesi. Jedro tega dela je bilo vrednotenje učinkovitosti slovenske tehnične regulative glede kontrole temperaturne segregacije. V ta namen smo postavili naslednjo hipotezo, ki smo jo želeli skozi magistrsko delo potrditi ali ovreči:

Obstoječa tehnična regulativa v Sloveniji ne omogoča učinkovitega zaznavanja temperaturne segregacije v celotnem obsegu pri vgrajevanju asfaltnih zmesi.

Ob pregledu literature je bilo ugotovljeno, da je temperaturna segregacija zelo pogost problem, ki se pojavlja pri vgrajevanju asfaltnih zmesi. Pri tem so problematične nižje temperature vgrajenih asfaltnih zmesi, ki povzročajo nezadostno zgoščena mesta. Posledično se lastnosti asfaltnih zmesi poslabšajo, zaradi česar se lahko življenjska doba asfaltnih vozišč skrajša tudi za 50 % in več (Bode, 2012). Vse to vodi v povečanje stroškov, saj je treba asfaltno vozišče predčasno sanirati.

Učinkovita metoda za odkrivanje temperaturne segregacije predstavlja uporaba IR termografije. Osnovni merilnik te metode je IR termometer, ki je namenjen točkovnemu merjenju temperature. Zmogljivejša naprava je termovizijska kamera, ki omogoča merjenje temperature na večji površini. Kot inovativna rešitev pa je bil razvit IR temperaturni čitalnik ali termoskener, ki se namesti na finiše in za njim zajema meritve med samim vgrajevanjem. Na ta način so temperature izmerjene po celotni asfaltirani površini in so prikazane v obliki temperaturnega polja.

Slovenska tehnična regulativa za meritve in kontrolo temperature pri vgrajevanju asfaltnih zmesi predpisuje uporabo kontaktnega termometra in IR termometra. Kriterij, ki ga ob tem določa, so minimalne in maksimalne temperature, medtem ko postopkov za vrednotenje temperaturne segregacije ne vsebuje. Po drugi strani so postopke za kontrolo in vrednotenje temperaturne segregacije izdelali v tujini, in sicer v ZDA, na Švedskem in Norveškem. Specifikacija iz ZDA Tex-244-F predpisuje uporabo termovizijske kamere in termoskenerja, na Švedskem in Norveškem pa je predpisana samo uporaba termoskenerja.

Tako slovensko tehnično regulativo kot specifikacije iz ZDA, Švedske in Norveške smo upoštevali pri izvajanju meritev, ki smo jih izvedli na izbranem projektu. Za merjenje temperature asfaltnih zmesi smo uporabljali IR termometer, kontaktni termometer, termovizijsko kamero in termoskener. Meritve s termoskenerjem so pokazale, da je med vgrajevanjem prišlo do temperaturne segregacije, ki pa je kontrola, predpisana s slovensko tehnično regulativo, ni uspela v celoti zaznati. Površinske meritve asfaltnih zmesi na tovarnjakih, kot jih določa slovenska regulativa z uporabo IR termometra, so sicer pokazale nižje temperature, vendar na ta način nismo poznali dejanskih temperatur za finiše, ko so se asfaltne zmesi vgradile. Meritve z IR termometrom v vsebniku finiše in s kontaktnim termometrom ob polžu finiše so pokazale ustrezno visoke temperature, na podlagi česar pa bi lahko sklepali, da med vgrajevanjem ni prišlo do temperaturne segregacije.

Če bi želeli odkriti temperaturno segregacijo z meritvami, kot jih predvideva slovenska tehnična regulativa, bi bilo potrebno izvajanje meritev s kontaktnim termometrom za finišejem, kjer se sonda termometra vstavi v sredino asfaltne plasti. Problem, ki se tukaj pojavi, je v tem, da se na ta način izvajajo točkovne meritve, s čimer bi lahko spregledali segregirana območja. Kot je bilo ugotovljeno v magistrskem delu, je predpisana pogostost meritev premajhna, saj se lahko temperaturna segregacija pojavi kjerkoli vzdolž asfaltirane površine. Prav tako je bilo ugotovljeno, da s trenutno slovensko tehnično regulativo ni možno ovrednotiti temperaturne segregacije, saj so edini kriterij, ki ga regulativa predpisuje, minimalne in maksimalne temperature, medtem ko postopkov za vrednotenje omenjenega problema ne vsebuje. Iz opisanega smo zaključili, da obstoječa slovenska tehnična regulativa ne omogoča učinkovitega zaznavanja temperaturne segregacije v celotnem obsegu, kot tudi ne njenega vrednotenja. S tem smo potrdili postavljeno hipotezo.

Po drugi strani smo temperaturno segregacijo uspešno odkrili s termoskenerjem, katerega uporabo predpisujeta specifikacija Tex-244-F in švedska/norveška metoda (ŠNM), in jo z omenjenima specifikacijama tudi ovrednotili. Izkazalo se je, da je po obeh specifikacijah prihajalo do visoke stopnje temperaturne segregacije med vgrajevanjem asfaltnih zmesi. Specifikacija Tex-244-F v takšnih primerih zahteva ustavitve vgrajevanja in izvedbo ukrepov, s katerimi se segregacija zmanjša, medtem ko ŠNM določa finančne odbitke.

Meritve so pokazale, da je med vgrajevanjem prišlo do temperaturne segregacije, kljub temu da so bili pogoji vgrajevanja zelo dobri, kar potrjuje ugotovitve iz literature, da je temperaturna segregacija zelo pogost problem. Ta problem je lahko še toliko večji v primerih, ko so pogoji asfaltiranja slabi, kot na primer nizke temperature zraka in podlage, oblačno in vetrovno vreme ter dolge transportne razdalje. Ker traja sezona asfaltiranja do pozne jeseni, ko se vreme ohladi, je lahko povsem običajno, da so takšni pogoji tudi prisotni.

Ker je temperatura asfaltnih zmesi eden ključnih kazalnikov kakovosti pri vgrajevanju, je pomembno, da se ta dejavnik med vgrajevanjem spremlja in se v čim večji meri prepreči temperaturna segregacija. Kot je bilo ugotovljeno z meritvami, pa je predpisana kontrola temperature po trenutni slovenski tehnični regulativi pomanjkljiva. Obstajajo tudi drugačni postopki za kontrolo kakovosti, ki temeljijo na podlagi meritev gostote in ostalih lastnosti vgrajene asfaltne zmesi, s katerimi označujemo nosilnost vozišča, kot so npr. meritve z izotopskim in elektromagnetnim merilnikom in odvzem jeder. Vendar so te meritve prav tako točkovne, kar pomeni, da z njimi ne moremo v celoti preveriti segregiranih mest, ki so lahko slabo zgoščena in se lahko pojavljajo kjerkoli vzdolž asfaltirane površine.

Glede na omenjene ugotovitve bi bilo smiselno, da bi se definirali postopki, ki bi izboljšali kontrolo temperature in kot možna rešitev je uvedba termoskenerja. Ta merilnik se je izkazal za zelo učinkovitega, saj omogoča merjenje temperature po celotni površini vgrajevanja asfaltne zmesi. Poleg tega poteka merjenje avtomatsko, meritve pa se izvajajo nekontaktno, kar predstavlja neporušni način merjenja, ki ne poslabša lastnosti vgrajenih asfaltnih zmesi. Rezultati meritev so dosegljivi takoj, kar omogoča izvajalcem in nadzornikom sprotno spremljanje vgrajevanja in izvajanje ukrepov ob pojavu morebitnih nepravilnosti. Vključno z uporabo GNSS sprejemnika je mogoče natančno določiti lokacijo meritev, s čimer je mogoče

naknadno preveriti potencialno šibka mesta. Tehnologija je tudi dovolj razvita za splošno uporabo in je dostopna na trgu.

Za uvedbo kontrole s termoskenerjem bi bilo treba postopek standardizirati in predpisati merila za vrednotenje temperaturne segregacije, pri čemer bi lahko izhodišče predstavljale tuje specifikacije. Postopek, za katerega menimo, da bi bil ustrezen in bi se ga lahko privzelo oziroma bi iz njega izhajala izdelava slovenskih specifikacij, je postopek po ŠNM. Ta metoda temelji na izračunu deleža segregiranih območij (delež tveganih območij), za katero menimo, da bi se lahko uporabljala tudi v Sloveniji. Po drugi strani ameriška specifikacija Tex-244-F temelji na izračunu temperaturnih razlik, ki se nanašajo na zahteve o enakomernosti gostote. Ker v Sloveniji takšnih zahtev ni predpisanih, bi bil za slovensko tehnično regulativo postopek po specifikaciji Tex-244-F manj primeren, razen če bi se tudi v Sloveniji izdelale podobne zahteve.

Predlagamo, da bi se kontrola s termoskenerjem v začetni fazi vpeljala na avtocestah in hitrih cestah, kasneje pa tudi na cestah nižje kategorije, saj bi bila s postopnim sprejemanjem predpisov vpeljava kontrole lažja. Ob tem bi bilo smiselno predpisati določila, kdaj izvajati takšno kontrolo, kot npr. asfaltiranje odsekov z določeno dolžino, vrednost investicije asfaltiranja, ki preseže določen prag, ali prometni tok, ki bi bil zaradi naknadnih sanacij močno oviran. Ob uvedbi kontrole s termoskenerjem bi bilo treba odgovoriti na ostala vprašanja, kot je umerjanje merilnika, vzpostavitev akreditiranega laboratorija za izvajanje umerjanja in določitev relacije med notranjo in zunanjo kontrolo kakovosti, ki bi opredelila postopke izvajanja vsake izmed omenjenih kontrol.

Poleg uvedbe kontrole s termoskenerjem predlagamo določitev kriterijev in zahtev glede doseganja oziroma nedoseganja temperaturne homogenosti vgrajene asfaltna zmesi. Za nizko stopnjo temperaturne segregacije je možno dodeliti finančne pribitke, medtem ko je za visoko stopnjo temperaturne segregacije možno določiti finančne odbitke ali druge možnosti, kot je podaljšanje garancijske dobe ali zamenjava oziroma sanacija asfaltna zmesi. Tudi tukaj lahko izhodišče predstavljajo tuje prakse, kot je npr. švedski pravilnik, ki ima že vzpostavljen sistem pribitkov in odbitkov. Na ta način bi se motiviralo izvajalce k uporabi postopkov in tehnologij za zmanjšanje temperaturne segregacije. Obenem je smiselno razmišljati v smeri, kako motivirati tudi investitorje k pripravi razpisov, ki bi prav tako spodbujali uporabo rešitev za zmanjšanje temperaturne segregacije.

Možne ukrepe za zmanjševanje posledic in preprečevanje temperaturne segregacije smo proučili v zadnjem poglavju magistrskega dela. Kot najboljša ukrepa sta se pokazala uporaba tovornjakov s tehnologijo potiskanja in uporaba podajalnikov asfaltna zmesi, s katerima je možno učinkovito preprečiti oziroma zmanjšati temperaturno segregacijo.

Podobno kot kažejo prakse v tujini, menimo, da bi vpeljava kontrole temperaturne segregacije tudi v Sloveniji prispevala k boljšemu poznavanju temperaturne segregacije in spodbudila uporabo rešitev za njeno preprečevanje. Na ta način bi se kakovost vgrajevanja asfaltnih zmesi dvignila, kar bi pomenilo večjo trajnost vozišč in manjše stroške vzdrževanja.

8 CONCLUSION

The master's thesis addressed the temperature segregation problem in asphalt mixture placement. The core of the thesis was the evaluation of the effectiveness of the Slovenian technical legislation in controlling the temperature segregation. For this purpose, we formulated the following hypothesis, which we wanted to confirm or refute through the master's thesis:

The existing technical legislation in Slovenia does not allow efficient detection of temperature segregation at the asphalt mixture placement.

A literature review has shown that the temperature segregation is a very common problem that occurs during asphalt mixture placement. The problem are lower temperatures of placed asphalt mixtures, which cause insufficient compacted spots. As a result the properties of asphalt mixtures deteriorate, causing the lifetime of asphalt pavements to be reduced by as much as 50% or more (Bode, 2012). All this leads to an increase in costs, as asphalt pavement needs to be repaired prematurely.

An effective method for detecting temperature segregation is the use of the IR thermography. The basic measuring instrument of this method is the IR thermometer, which is intended for the point temperature measurement. A more sophisticated device is a thermal camera that enables temperature measurement on a larger surface. An IR temperature scanner has been developed as an innovative solution, which is mounted on the paver and takes measurements behind it during the placement. In this way, temperatures are measured over the entire paved surface and displayed in the form of a thermal profile.

The Slovenian technical legislation prescribes the use of a contact thermometer and an IR thermometer for measuring and controlling temperature during asphalt mixture placement. The criterion it defines are minimum and maximum temperatures, while it does not define procedures for evaluating the temperature segregation. On the other hand, procedures for controlling and evaluating the temperature segregation have been developed abroad, namely in the USA, Sweden and Norway. The USA specification Tex-244-F prescribes the use of a thermal camera and an IR temperature scanner, while Sweden and Norway only require the use of an IR temperature scanner.

Both the Slovenian technical legislation and the specifications from the USA, Sweden and Norway were taken into account when carrying out the measurements that were made on the selected project. An IR thermometer, a contact thermometer, a thermal camera and an IR temperature scanner were used to measure the temperature of asphalt mixtures. Measurements with the IR temperature scanner showed that the temperature segregation occurred during the placement, which the control prescribed by the Slovenian technical legislation failed to fully detect. Surface measurements of asphalt mixtures taken with the IR thermometer on trucks as prescribed by the Slovenian legislation showed lower temperatures, but in this way we did not know the actual temperatures behind the paver when the asphalt mixtures were placed. Measurements with the IR thermometer in the paver hopper and with

the contact thermometer at the paver auger showed adequately high temperatures, which leads to the assumption that there was no temperature segregation during the placement.

To detect temperature segregation with measurements as prescribed by the Slovenian technical legislation, measurements with the contact thermometer behind the paver, where the thermometer probe is inserted into the middle of the asphalt layer, would be needed. The problem that arises here is that point measurements are made with the contact thermometer, which makes it possible to overlook segregated areas. As noted in the master's thesis, the prescribed frequency of measurements is too small according to the occurrence possibility of the temperature segregation, which can occur anywhere along the paved surface. It was also found that the temperature segregation cannot be evaluated with the current Slovenian technical legislation, since the only criterion prescribed by the legislation are minimum and maximum temperatures, while it does not contain procedures for evaluating the temperature segregation. From this we have concluded that the existing Slovenian technical legislation does not allow efficient detection and evaluation of the temperature segregation in the whole range. With this we have confirmed the formulated hypothesis.

On the other hand, we successfully detected temperature segregation with the IR temperature scanner, the use of which is prescribed by the Tex-244-F specification and the Swedish/Norwegian method, and also evaluated it with these specifications. It turned out, that a high level of segregation during the placement of asphalt mixtures developed according to both specifications. In such cases the Tex-244-F specification requires the suspension of the placement and the implementation of measures to reduce segregation, while the Swedish/Norwegian method determines financial deductions.

Measurements showed that the temperature segregation occurred during the placement, despite very good paving conditions, which confirms findings from the literature that the temperature segregation is a very common problem. This problem can be even greater in cases of poor paving conditions, such as low air and ground temperature, cloudy and windy weather and long transport distances. As the paving season lasts until the late autumn, when the weather cools down, it may be quite usual for such conditions to be present.

Since the temperature of asphalt mixture is one of the key quality indicators during the placement, it is important that this factor is monitored during placement and that the temperature segregation is prevented as much as possible. However, as determined by measurements, the prescribed temperature control, prescribed by the current Slovenian technical legislation, is insufficient. There are also different quality control procedures based on measurements of density and other properties of the placed asphalt mixture, with which we characterize the bearing capacity of the pavement, such as measurements with a nuclear and electromagnetic density gauge and core taking. But these are also point measurements, which means that they do not enable a full check of segregated areas, which may be poorly compacted and may occur anywhere along the paved surface.

In view of aforementioned findings, it would be reasonable to define procedures that would improve the temperature control. The implementation of the IR temperature scanner is a possible solution. This measuring instrument has proven to be very efficient as it allows the

temperature measurement of the entire paving surface. In addition, the procedure is automatic and measurements are taken non-contact, which is a non-destructive method of measurement that does not impair the properties of placed asphalt mixtures. The measuring results are available immediately, enabling contractors and supervisors to monitor the placement in real-time and to take action in case of irregularities. Including the use of a GNSS antenna also makes it possible to accurately determine the location of measurements, thereby potential weak spots can be checked subsequently. The technology is also sufficiently developed for general use and is commercially available.

To implement control with the IR temperature scanner the procedure would need to be standardized and criteria for evaluating temperature segregation would need to be prescribed, where foreign specifications could be the basis. The procedure we believe would be appropriate and could be adopted or could be the basis for making the Slovenian legislation, is a procedure defined by the Swedish/Norwegian method. This method is based on a calculation of a share of segregated areas (a share of the risk areas) that we believe could be used also in Slovenia. On the other hand, the Tex-244-F specification is based on a calculation of temperature differences that relate to density uniformity requirements. Since no such requirements are prescribed in Slovenia, the procedure defined by the Tex-244-F specification would be less appropriate for the Slovenian technical legislation, unless similar requirements would also be made in Slovenia.

We propose that a control with the IR temperature scanner would be implemented in the initial phase on highways and expressways, and later on lower category roads, since the gradual adoption of regulations would make it easier to implement the control. It would be reasonable to determine the definitions for when such control should be carried out, such as paving sections of a certain length, the value of a paving investment exceeding a certain threshold or a traffic flow that would be severely impeded by subsequent remediations. With the implementation of the IR temperature scanner it would be necessary to answer other questions, such as a calibration of the measuring instrument, an establishment of an accredited calibration laboratory and determining the relationship between the internal and external quality control, which would define the procedures for performing each of these controls.

Besides the implementation of control with the IR temperature scanner, we propose setting criteria and requirements for achieving or not achieving the temperature homogeneity of a placed asphalt mixture. For low level temperature segregation financial bonuses may be granted, while for high level temperature segregation financial deductions or other options, such as extending the warranty period or asphalt mixture replacement or remediation may be determined. Foreign practices can also be a starting point here such as the Swedish regulation, which already has a system of financial bonuses and deductions. This would motivate contractors to use procedures and technologies, which reduce temperature segregation. It is also reasonable to consider how to motivate investors to prepare tenders in a way that would encourage the use of solutions that reduce temperature segregation.

Possible measures for reducing the consequences and preventing the temperature segregation are examined in the last chapter of the master's thesis. The use of trucks with a

push-off technology and the use of asphalt mixture feeders proved to be the best measures, since they can effectively prevent or reduce temperature segregation.

Similar to the practice abroad, we believe that the implementation of the temperature segregation control would also contribute to a better knowledge of the temperature segregation in Slovenia and encourage the use of solutions for its prevention. In this way, the quality of the asphalt mixture placement would be improved, which would result in increased pavement durability and lower maintenance costs.

9 VIRI

AASHTO. 2019. SHRP2 Technologies to Enhance Quality Control on Asphalt Pavements. Infrared (IR) Paver Mounted Thermal Profiler: 133 str.

<https://www.arasphalt.com/wp-content/uploads/2019/01/Reiter.Page-SHRP2-Workshop.pdf>

(Pridobljeno 20. 8. 2019.)

AASHTO, Federal Aviation Administration, Federal Highway Administration, National Asphalt Pavement Association, U.S. Army Corps of Engineers, American Public Works Association, National Association of County Engineers. 2013. Hot-Mix Asphalt Paving Handbook 2000. Združene države Amerike, U.S. Army Corps of Engineers: 219 str.
https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory Circular/150_5370_14b_app1_part III.pdf (Pridobljeno 29. 12. 2019.)

Amebis d.o.o. 2017. Termania.

<https://www.termania.net/slovarji/inzenirsko-seizmoloski-terminoloski-slovar/8279195/duktilnost?query=lastnost#> (Pridobljeno 16. 2. 2020.)

Andersson, C. 2019. Information about thermal imaging of asphalt paving.

<https://www.adelo.se/experience/> (Pridobljeno 19.10.2019.)

Asfaltskolan. 2020. PIC11 – 03.

<http://www.asfaltboken.se/transport/pic11-03/> (Pridobljeno 4. 1. 2020.)

ASTEC MOBILE MACHINERY Gmbh. 2019. SB-2500 SHUTTLE BUGGY.

<https://www.astec-europa.com/products/material-transfer-vehicles/sb-2500.htm> (Pridobljeno 30. 8. 2019.)

ATC A. Richter GmbH. 2013. Tandem Trailer.

http://www.atc-container.de/english/Tandem_Trailer.html (Pridobljeno 3. 1. 2020.)

ATC A. Richter GmbH. 2011a. Asphaltcontainer.

http://www.atc-container.de/english/Heated_container.html (Pridobljeno 3. 1. 2020.)

ATC A. Richter GmbH. 2011b. ATC 50 / ATC 60 Model Range.

<http://www.atc-container.de/english/atc-50-atc-60-model-range.html> (Pridobljeno 3. 1. 2020.)

ATC A. Richter GmbH. 2011c. ATC 75 Model Range.

<http://www.atc-container.de/english/atc-75-model-range.html> (Pridobljeno 3. 1. 2020.)

BauNetz. 2019. Bitumenprüfverfahren.

<https://www.baunetzwissen.de/flachdach/fachwissen/bitumendachbahnen/bitumenpruefverfahren-1304343> (Pridobljeno 12. 5. 2019.)

Bijleveld, F., Miller, S., De Bondt, A., Dorée, A. 2012. Too Hot To Handle, Too Cold To Control - Influence Of Compaction Temperature On The Mechanical Properties Of Asphalt: 11 str.

https://www.researchgate.net/publication/265542520_TOO_HOT_TO_HANDLE_TOO_COLD_TO_CONTROL_-_INFLUENCE_OF_COMPACTION_TEMPERATURE_ON_THE_MECHANICAL_PROPERTIES_OF ASPHALT (Pridobljeno 21. 5. 2019.)

Bode, T. A. 2012. An Analysis of the Impacts of Temperature Segregation on Hot Mix Asphalt. Magistrsko delo. Lincoln, Nebraska, University of Nebraska-Lincoln, Faculty of The Graduate College: 90 str.
<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1009&context=constructiondiss> (Pridobljeno 21. 3. 2020.)

Brock, J. D., Jakob, H. 2019. Technical Paper T-134. Temperature Segregation/Temperature Differential Damage: 25 str.
https://www.roadtec.com/images/uploads/productdocs/t134_techpaper_temperaturesegregation.pdf (Pridobljeno 12. 3. 2019.)

Brock, J. D., Renegar, G. 2011. Technical Paper T-117. Segregation: Causes and Cures: 26 str.
https://www.roadtec.com/images/uploads/productdocs/t117_techpaper_segregation.pdf (Pridobljeno 5. 12. 2019.)

Carrasco, G. 2016. Thermal Imaging Systems: 26 str.
http://shrp2.transportation.org/documents/renewal/SHRP2_R06C_TxDOT_FINAL.pdf (Pridobljeno 21. 8. 2019.)

Chouhan, K. 2018. What is penetration test and softening point test for bitumen?
<https://www.quora.com/What-is-penetration-test-and-softening-point-test-for-bitumen> (Pridobljeno 12. 5. 2019.)

Černigoj, S., Balkovec, M. 2018. Obnova hitre ceste Vipava - Ajdovščina - Selo z opremo Wirtgen.
<https://www.mineral-revija.si/2019> (Pridobljeno 5. 12. 2019.)

Distrimesure. 2019. FLUKE 561 - Digital Thermometer contact and infrared.
<https://www.distrimesure.com/en/infrared-thermometers/1929-fluke-561---digital-thermometer-contact-and-infraredfluke-561---digital-thermometer-contact-and-infraredfluke-561---digital-ther.html> (Pridobljeno 21. 8. 2019.)

EAPA. 2017. The Ideal Project: 85 str.
<https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/The-Ideal-Project.pdf> (Pridobljeno 8. 10. 2019.)

Eastern Farm Machinery. 2019. Oletto Asphalt hot box.
<http://www.easternfarmmachinery.com/scripts/catalog.pl?F=D&K=VC508HOTBOX&V=Brief&R=H%2FCatalog%3AIndustrial%3AAsphalt%20hot%20box&ID=0208> (Pridobljeno 4. 1. 2020.)

Farlex, Inc. 2020. Viscosity.

<https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/viscosity> (Pridobljeno 16. 2. 2020.)

Fliegl Bau- und Kommunaltechnik GmbH. 2019. Asphalt construction surveys. Avoid premature road damage with modern technology right from the asphalt installation stage: 108 str.

<https://www.fliegl-baukom.de/files/smfiledata/1/3/0/9/5/0/2018AsphaltprofiDokuGBweb.pdf>

(Pridobljeno 14. 8. 2019.)

Flir Systems, Inc. 2019. PROFESSIONAL THERMAL CAMERA FLIR T540.

<https://www.flir.eu/products/t540/> (Pridobljeno 21. 8. 2019.)

ForConstructionPros. 2015. Remixing Delivers Uniform Temperatures.

<https://www.forconstructionpros.com/asphalt/pavers/article/12036796/remixing-during-asphalt-paving-delivers-uniform-temperatures> (Pridobljeno 21. 8. 2019.)

Frost, J. 2020. Percentiles: Interpretations and Calculations.

<https://statisticsbyjim.com/basics/percentiles> (Pridobljeno 16. 2. 2020.)

Google. 2019. Google Zemljevidi.

https://www.google.si/maps/@45.6134757,13.9390783,3a,75y,259.13h,81.45t/data=!3m6!1e1!3m4!1sSXvvPvAJnspXsSY_N7_YLQ!2e0!7i13312!8i6656 (Pridobljeno 25. 10. 2019.)

Guangdong ESUN Heavy Industry Co., Ltd. 2020. CLYB-5000 Asphalt Hotbox.

<http://www.esungd.com/asphalt-hotbox-p23.html> (Pridobljeno 3. 1. 2020.)

Gunter, C. B. 2012. Field Evaluation of Temperature Differential in HMA Mixtures. Columbia, South Carolina Department of Transportation: 72 str.

<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/25116> (Pridobljeno 10. 9. 2019.)

Hedderich, J. 2014. Pave IR Update: 45 str.

<https://www.njapa.com/wp-content/uploads/2016/10/NJAPA-2014Conference-Hedderich-InfraredBar.pdf> (Pridobljeno 24. 8. 2019.)

Henigman, S., Bašelj, R., Birk, I., Britovšek, Z., Cezar, J., Cotič, Z., Čibej, K., Čotar, M., Donko, D., Fortuna, I., Hribar, D., Ipavec, A., Jamnik, J., Jurgele, M., Kerstein, A., Kokot, D., Kugler, R., Lamut, T., Lavrenčič, A., Ljubič, A., Lukač, B., Markelj, A., Marolt, M., Naglič, O., Natlačen Penko, S., Pavšič, P., Prešeren, M., Prosen, J., Ramšak, M., Ravnikar Turk, M., Šuštar, J., Tatalovič, G., Tušar, M., Willenpart, B., Zupan, J., Žmavc, J. 2016. Asfalt. 3. izdaja. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije, Uradni list Republike Slovenije: 404 str.

Henigman, S., Bašelj, R., Bradeško, S., Britovšek, Z., Cezar, J., Cotič, Z., Čotar, M., Donko, D., Kerstein, A., Lamut, T., Ljubič, A., Lukač, B., Marolt, M., Naglič, O., Planinc, J., Podgoršek, F., Prešeren, M., Prosen, J., Šuštar, J., Tušar, M., Willenpart, B., Zupan, J., Žmavc, J. 2006. Asfalt. Ljubljana, Združenje asfalterjev Slovenije: 285 str.

http://www.zdruzenje-zas.si/Material/Pdf/Knjiga_Asfalt_ZAS.pdf (Pridobljeno 10. 8. 2019.)

Hribar, D. 2008. Odkrivanje temperaturnih razlik pri vgrajevanju asfaltnih zmesi: 3 str.
http://www.gi-zrmk.si/media/uploads/public/document/67-ceste_2008_zrmk_sl.PDF
(Pridobljeno 7. 3. 2019.)

Joseph Vögele AG. 2019a. Applications Technology: Vögele RoadScan. Temperature Measurement System: 12 str.
https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o16082v89_RoadScan_EN_2521018_oPW_0318.pdf (Pridobljeno 23. 2. 2020.)

Joseph Vögele AG. 2019b. Special Class: MT 3000-2 Offset. Powerfeeder: 36 str.
https://www.wirtgen-group.com/binary/full/o5374v89_MT30002iOffset_EN_2636791_mPW_0218.pdf (Pridobljeno 23. 2. 2020.)

Joseph Vögele AG. 2010. RoadNews for new roads. High-performance feeder empties mix lorry in 60 seconds: 14 str.
http://www.roadnews.info/en/rn19_article03.aspx (Pridobljeno 30. 1. 2020.)

Jöseph Vögele AG. 2007. RoadNews for new roads. Vögele develop new machine technology for "hot on hot" paving: 16 str.
http://www.roadnews.info/en/EN_rn09_article01.pdf (Pridobljeno 16. 12. 2019.)

LECTURA Press. 2017. City of Heidelberg relies on thermo-insulated push-off trailer in road construction.
<https://lectura.press/en/article/city-of-heidelberg-relies-on-thermo-insulated-push-off-trailer-in-road-construction/40393> (Pridobljeno 31. 8. 2019.)

Milanović, B., Domitrović, J., Rukavina, T. 2012. Application of Infrared Camera for Quality Control during Paving: 8 str.
https://www.researchgate.net/publication/266000585_Application_of_Infrared_Camera_for_Quality_Control_during_Paving (Pridobljeno 14. 5. 2019.)

MzP, DRSC. 2009. TSC 06.300 / 06.410 : 2009. Smernice in tehnični pogoji za graditev asfaltnih plasti. Ljubljana, DRSC: 56 str.
https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/DRSI/Dokumenti-DRSI/Tehnicne-specifikacije/TSC_06_300_410_2009_Smernice_in_tehnicni_pogoji_za_graditev_asfaltnih_plasti.pdf (Pridobljeno 24. 2. 2020.)

MzP, DRSC. 2001. TSC 06.711:2001. Meritev gostote in vlage. Postopek z izotopskim merilnikom. Ljubljana, DRSC: 11 str.
https://www.gov.si/assets/organi-v-sestavi/DRSI/Dokumenti-DRSI/Tehnicne-specifikacije/TSC_06_711_2001_Meritev_gostote_in_vlage_Postopek_z_izotopskim_merilnikom.pdf (Pridobljeno 24. 2. 2020.)

MOBA Mobile Automation AG. 2020. PAVE-IR: The Innovative System For Process Optimization And Documentation In Road Construction.

<https://moba-automation.uk/machine-applications/asphalt-pavers/pave-ir/> (Pridobljeno 24. 2. 2020.)

Monolit, TSmedia. 2019. Najdi.si zemljevid.

<https://zemljevid.najdi.si> (Pridobljeno 25. 10. 2019.)

Olsson, K. 2019. SBUF informerar nr 19:23. Utvärdering av Push-Off flak för asfalt: 2 str.

<https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/InfoSheets/PublishedInfoSheet/d0ca4876-aa95-4d90-81b9-6e6190df31b4/%2019-23%20Utv%C3%A4rdering%20av%20Push-Off%20flak%20f%C3%B6r%20asfalt.pdf> (Pridobljeno 20. 10. 2019.)

Olsson, K. 2018. Utvärdering av push-off flak för asfalt: 24 str.

<https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/049e94af-d1a5-4b37-b833-2c2d375c05c8/FinalReport/SBUF%2013544%20Slutrapport%20Utvärdering%20av%20push-off%20flak%20för%20asfalt.pdf> (Pridobljeno 20. 10. 2019.)

Pavement Interactive. 2019. Temperature Differentials.

<https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/construction/compaction/temperature-differentials/> (Pridobljeno 22. 8. 2019.)

Phillips, L., Willoughby, K., Mahoney, J. 2003. Infrared Thermography Revolutionizes Hot-Mix Asphalt Paving: 8 str.

https://www.researchgate.net/publication/242212096_Infrared_Thermography_Revolutionizes_Hot-Mix_Ashphalt_Paving (Pridobljeno 26. 5. 2019.)

PNZ d.o.o. 2017. Načrt ureditve AC in platoja CP. CP Videž. Ljubljana, PNZ d.o.o.: 85 str.

Priggen, W. 2019. Therma 3, Industrial Thermometer, Special with Type K Penetration Probe.

<https://www.priggen.com/Therma-3-Industrial-Thermometer-Special-with-Type-K-Penetration-Probe> (Pridobljeno 22. 10. 2019.)

Raczon, F. 2019. Telematics Start Roadbuilding Machines Talking.

<https://www.constructionequipment.com/telematics-start-roadbuilding-machines-talking> (Pridobljeno 30. 12. 2019.)

Rand, D. A. 2012. Measuring Pavement Segregation: 31 str.

<http://www.flexiblepavements.org/sites/www.flexiblepavements.org/files/events/conferences/Measuring%20Pavement%20Segregation.pdf> (Pridobljeno 16. 10. 2019.)

Rand, D. A. 2010. Thermal Segregation: 28 str.

http://www.seaupg.org/PDF/2010/Wednesday/5%20Thermal%20Segregation_DRand_TxDO_T.pdf (Pridobljeno 24. 2. 2020.)

Roadtec, Inc. 2019. Material Transfer Vehicle. SB-2500: 24 str.

<https://www.roadtec.com/images/uploads/productdocs/SB-25002.2500.01.pdf> (Pridobljeno 5. 12. 2019.)

Roadtec WMS. 2006. Material Transfer Vehicles: 16 str.

<https://www.yumpu.com/en/document/read/7678091/material-transfer-vehicles-from-roadtec/7> (Pridobljeno 5. 12. 2019.)

Sebesta, S., Scullion, T., Saarenketo, T. 2013. Using Infrared and High-Speed Ground-Penetrating Radar for Uniformity Measurements on New HMA Layers. Washington, Transportation Research Board: 80 str.

<https://www.nap.edu/catalog/22769/using-infrared-and-high-speed-ground-penetrating-radar-for-uniformity-measurements-on-new-hma-layers> (Pridobljeno 28. 3. 2019.)

Sebesta, S., Scullion, T. 2012. Statewide Implementation Of Pave-Ir In The Texas Department Of Transportation. College Station, Texas, Texas Transportation Institute: 122 str.

<https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/5-4577-05-1.pdf> (Pridobljeno 26. 8. 2019.)

Sebesta, S., Wang, F., Scullion, T., Liu, W. 2006. New Infrared And Radar Systems For Detecting Segregation In Hot-Mix Asphalt Construction. College Station, Texas, Texas Transportation Institute: 78 str.

<https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-4577-2.pdf> (Pridobljeno 12. 3. 2019.)

Sebesta, S., Scullion, T. 2002. Using Infrared Imaging And Ground-Penetrating Radar To Detect Segregation In Hot-Mix Overlays. College Station, Texas, Texas Transportation Institute: 176 str.

<https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/4126-1.pdf> (Pridobljeno 16. 10. 2019.)

Sinergise, d.o.o. 2013. Geopedia - interaktivni spletni atlas in zemljevid Slovenije.

http://www.geopedia.si/#T105_x417409.5_y52584.75_s16_b2 (Pridobljeno 25. 10. 2019.)

SIST EN 12697-13:2018. Bitumenske zmesi – Preskusne metode – 13. del: Merjenje temperature.

Snilsberg, B., Hoven, B., Telle, R. 2016. Boat transport and quality of hot mix asphalt: 14 str.

https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/forskning+og+utvikling/Avsluttede+FoU-program/Varige+veger/publikasjoner/attachment/2081850?ts=15fedde5988&fast_title=Boat+transport+and+quality+of+hot+mix+asphalt (Pridobljeno 20. 10. 2019.)

Soenen, H., Lu, X., Laukkanen, O. V. 2016. Oxidation of bitumen: molecular characterization and influence on rheological properties: 12 str.

https://www.researchgate.net/publication/296336122_Oxidation_of_bitumen_molecular_characterization_and_influence_on_rheological_properties (Pridobljeno 16. 2. 2020.)

Strokirk, B. 2019. Bergmaterialanvändning i praktik och teori. Hantering av bergmaterialprodukter: 14 str.

https://sverigesbergmaterialindustri.se/images/pdf/om_sbmi/For_hogskolor/Bergmaterialanvandning.pdf (Pridobljeno 4. 1. 2020.)

Stroup-Gardiner, M. 2015. Methods and Practices on Reduction and Elimination of Asphalt Mix Segregation. A Synthesis of Highway Practice. Washington, Transportation Research Board: 108 str.

http://www.odot.org/materials/asphaltinfo/NCHRP_SYN_477.pdf (Pridobljeno 14. 6. 2019.)

Stroup-Gardiner, M., Brown, E. R. 2000. Segregation in Hot-Mix Asphalt Pavements. Washington, National Academy Press: 96 str.

http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_441.pdf (Pridobljeno 26. 3. 2019.)

Telle, R. 2016. BÅTTRANSPORT AV ASFALT 2016. Rapport fra varmfotografering for Statens vegvesen: 25 str.

<https://www.vegvesen.no/fag/fokusomrader/forskning+og+utvikling/Avsluttede+FoU-program/Varige+veger/nytteverdi/attachment/1692423?ts=159b69a4a50&fast=title=Båttransport+av+asfalt+2016+%28Veiteknisk+Institutt+2016%29> (Pridobljeno 20. 10. 2019.)

Telle, R. 2015. Riktig utførelse av asfaltdekker. Varige vegger 2011 – 2014: 60 str.

<https://www.vegvesen.no/attachment/775964/binary/1012133?fast=title=SVV+rapport+352+Riktig+utførelse+av+asfaltdekker.pdf> (Pridobljeno 12. 10. 2019.)

Ter Huerne, H. L., Dorée, A. G., Miller, S. R. 2009. Monitoring hot mix asphalt temperature to improve homogeneity and pavement quality: 10 str.

https://www.researchgate.net/publication/268520989_Monitoring_hot_mix_asphalt_temperature_to_improve_homogeneity_and_pavement_quality (Pridobljeno, 13. 9. 2019.)

TransTech Systems, Inc. 2020. Pavement Quality Indicator Model 301. Operators Handbook: 35 str.

https://www.atlanticsupply.com/pictures/%7BE92F7CFD-1209-4F0B-9650-5C54A5212F4B%7D_PQI301%20Manual%202012.pdf (Pridobljeno 15. 2. 2020.)

TXAPA. 2019. Battling Segregation Using Pave IR System: 27 str.

https://www.virginiadot.org/VDOT/Business/asset_upload_file906_3638.pdf (Pridobljeno 12. 3. 2019.)

TxDOT. 2019. Pavement Manual: 468 str.

<http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/pdm/index.htm> (Pridobljeno 21. 8. 2019.)

TxDOT. 2015. Test Procedure for THERMAL PROFILE OF HOT MIX ASPHALT. TxDOT Designation: Tex-244-F: 6 str.

https://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/cst/TMS/200-F_series/pdfs/bit244.pdf (Pridobljeno 25. 5. 2019.)

TxDOT. 2014. Standard Specifications for Construction and Maintenance of Highways, Streets and Bridges: str. 230–257.

<https://ftp.txdot.gov/pub/txdot-info/cmd/cserve/specs/2014/standard/specbook-2014.pdf>

(Pridobljeno 18. 10. 2019.)

Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., Bulnes, F. G. 2014. Infrared Thermography for Temperature Measurement and Non-Destructive Testing: 44 str.

https://www.researchgate.net/publication/263862713_Infrared_Thermography_for_Temperature_Measurement_and_Non-Destructive_Testing (Pridobljeno 28. 4. 2019.)

Von Quintus, H. L., Reiter, J. 2018. SHRP2 Case Study: Infrared Thermal Profiler Use for Improving Mat Uniformity and Long-Term Performance. Champaign, Illinois, Applied Research Associates, Inc.: 31 str.

http://shrp2.transportation.org/Documents/Case_Study_Long_Term_Performance_Version1_20March2018_V4.pdf (Pridobljeno 24. 8. 2019.)

Von Quintus, H. L., Reiter, J. 2017. Case Study on Infrared Deployment. Champaign, Illinois, Applied Research Associates, Inc.: 56 str.

http://shrp2.transportation.org/Documents/Case_Study_IR_Depolyment_Version1_July2017_compressed7_8_19.pdf (Pridobljeno 24. 8. 2019.)

Wikimedia Foundation, Inc. 2020a. Wikipedia, the free encyclopedia. Elastic modulus.

https://en.wikipedia.org/wiki/Elastic_modulus#cite_note-1 (Pridobljeno 16. 2. 2020.)

Wikimedia Foundation, Inc. 2020b. Wikipedia, the free encyclopedia. Moving average.

https://en.wikipedia.org/wiki/Moving_average (Pridobljeno 16. 2. 2020.)

Wikimedia Foundation, Inc. 2019a. Wikipedia, the free encyclopedia. Dynamic modulus.

https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_modulus (Pridobljeno 16. 2. 2020.)

Wikimedia Foundation, Inc. 2019b. Wikipedija, prosta enciklopedija. Polimer.

<https://sl.wikipedia.org/wiki/Polimer> (Pridobljeno 16. 2. 2020.)

Willoughby, K. A., Mahoney, J. P., Pierce, L. M., Uhlmeyer, J. S., Anderson, K. W., Read, S. A., Muench, S. T., Thompson, T. R., Moore, R. 2001. Construction-Related Asphalt Concrete Pavement Temperature Differentials and the Corresponding Density Differentials. Seattle, Washington, Washington State Transportation Center (TRAC): 154 str.

<https://www.wsdot.wa.gov/research/reports/fullreports/476.1.pdf> (Pridobljeno 7. 3. 2019.)

ZAS. 2010. Priročnik za asfaltna dela: 91 str.

http://www.zdruzenje-zas.si/Material/Pdf/Priro%C4%8Dnik_za_izvajanje_asfaltnih_del-december_2010.pdf (Pridobljeno 2. 8. 2019.)

Žmavc, J. 2007. Gradnja cest: Voziščne konstrukcije. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 357 str.

PRILOGE

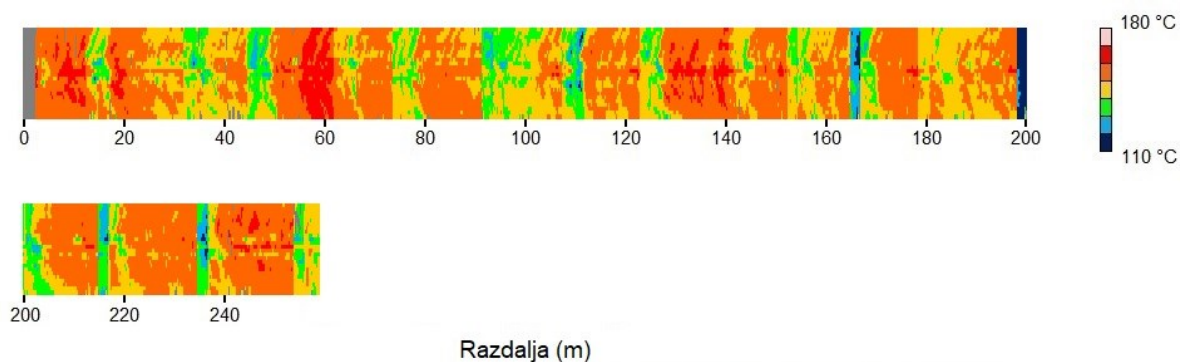
PRILOGA A: TEMPERATURNNA POLJA – REKONSTRUKCIJA AVTOCESTE A1 V OKVIRU
RUŠITVE CESTNINSKE POSTAJE VIDEŽ

PRILOGA B: TEMPERATURNNA POLJA – REKONSTRUKCIJA HITRE CESTE H4 Z
UPORABO PODAJALNIKA

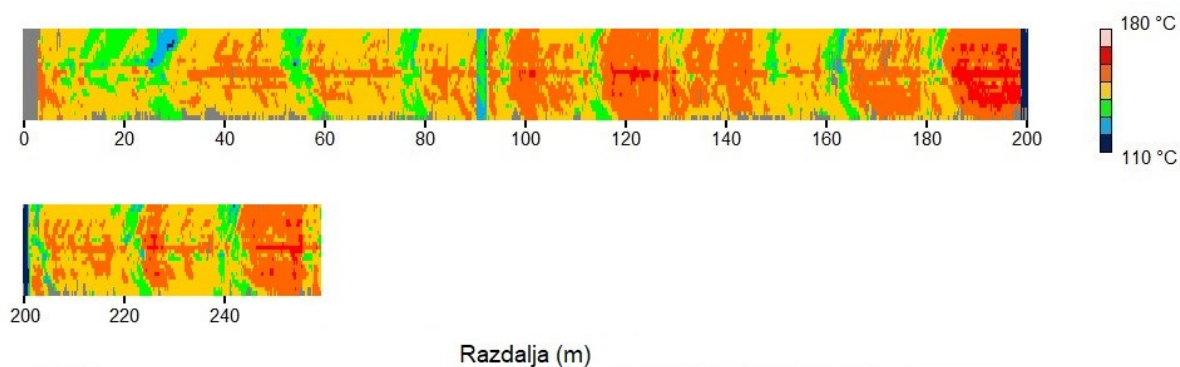
PRILOGA A: TEMPERATURNI POLJA – REKONSTRUKCIJA AVTOCESTE A1 V OKVIRU RUŠITVE CESTNINSKE POSTAJE VIDEŽ

APPENDIX A: TEMPERATURE PROFILES – A1 HIGHWAY RECONSTRUCTION IN THE PROJECT OF THE VIDEŽ TOLL STATION REMOVAL

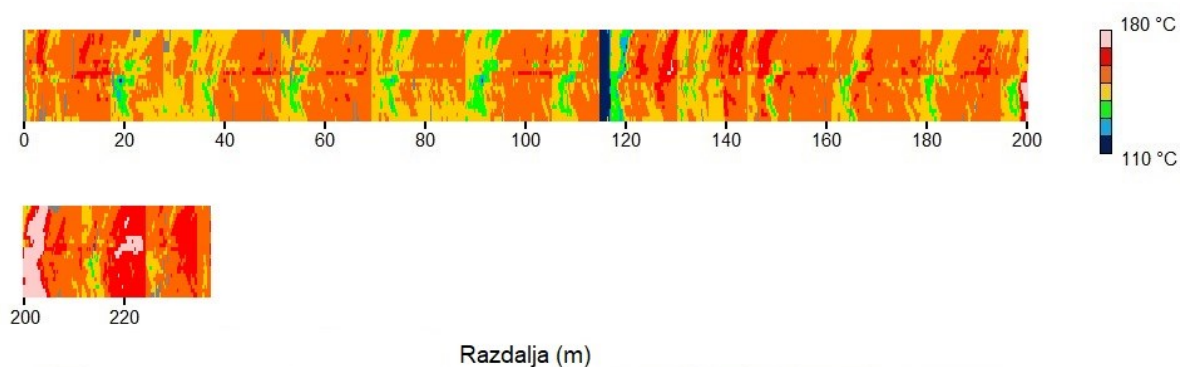
- Temperaturno polje 1a



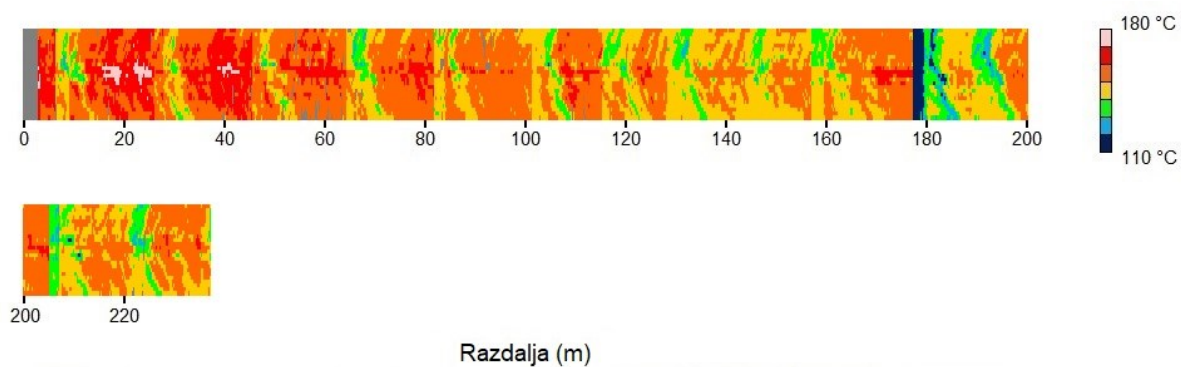
- Temperaturno polje 1b



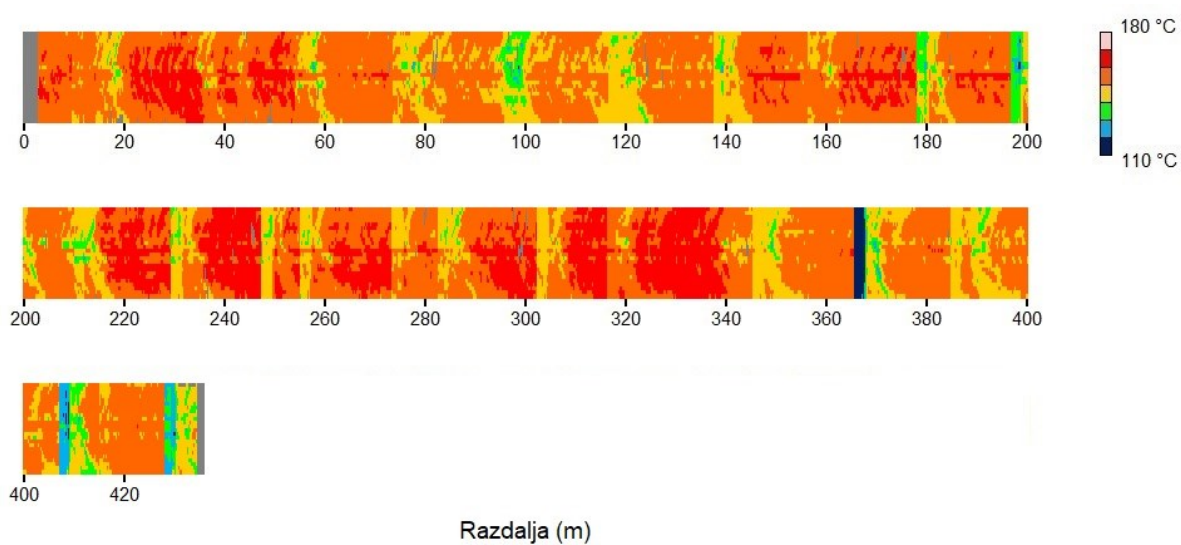
- Temperaturno polje 1c



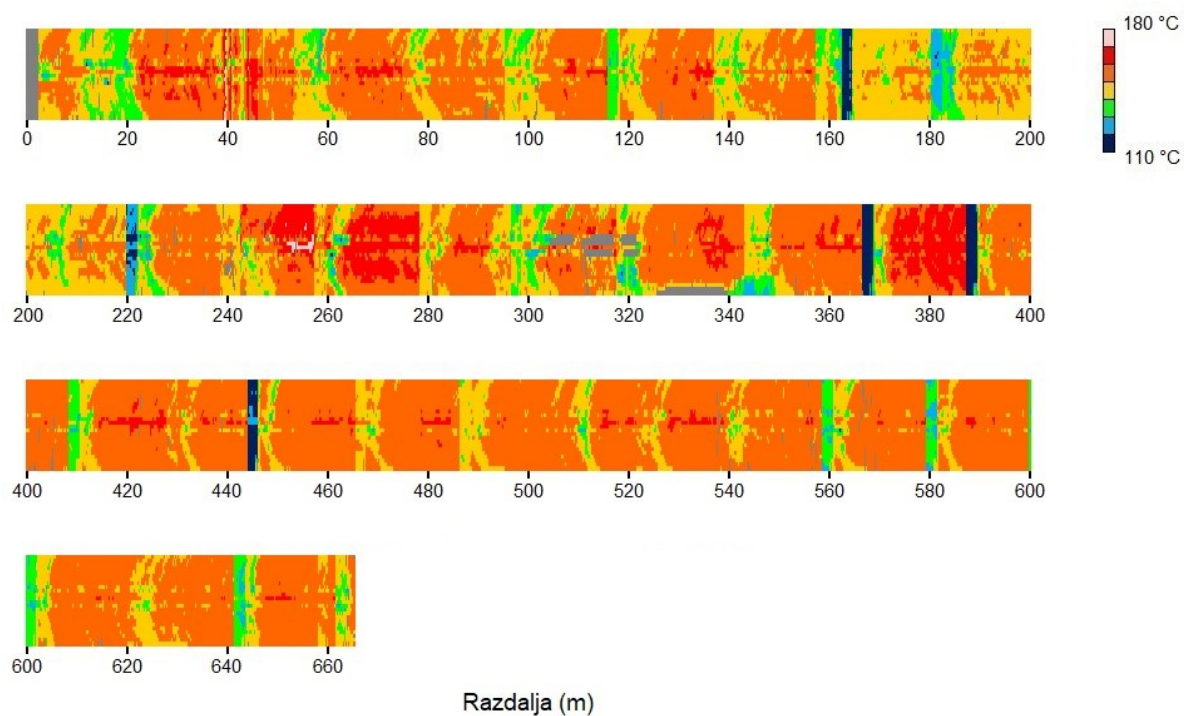
- Temperaturno polje 1d



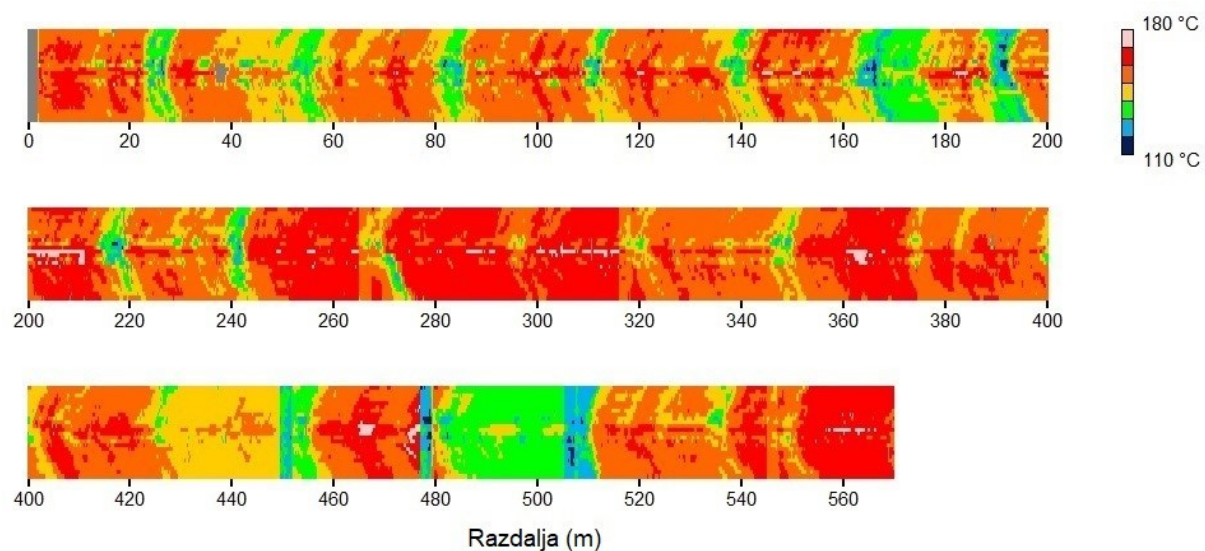
- Temperaturno polje 2



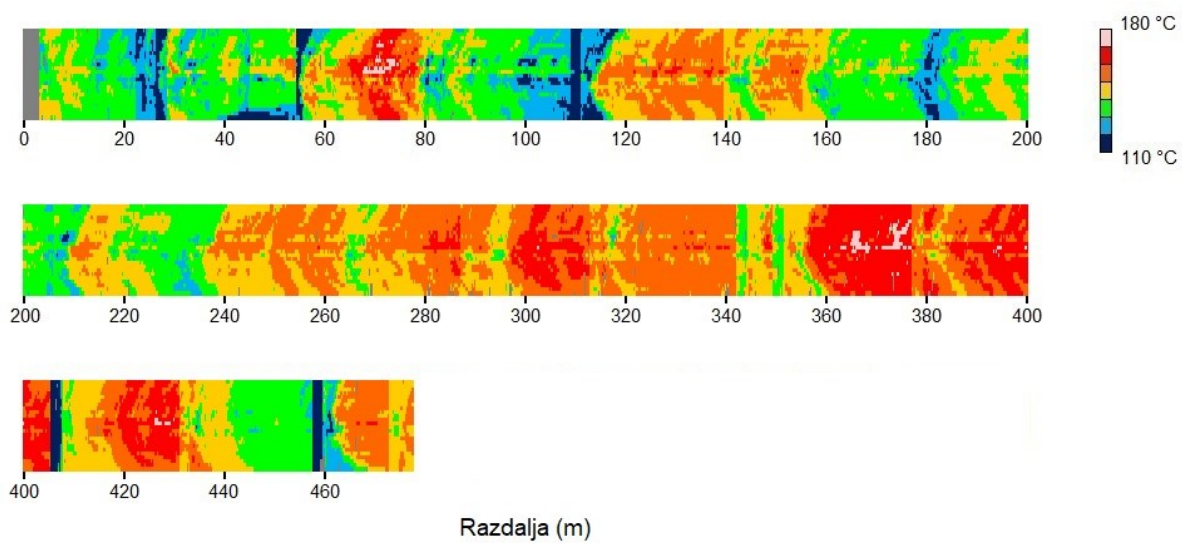
- Temperaturno polje 3



- Temperaturno polje 4



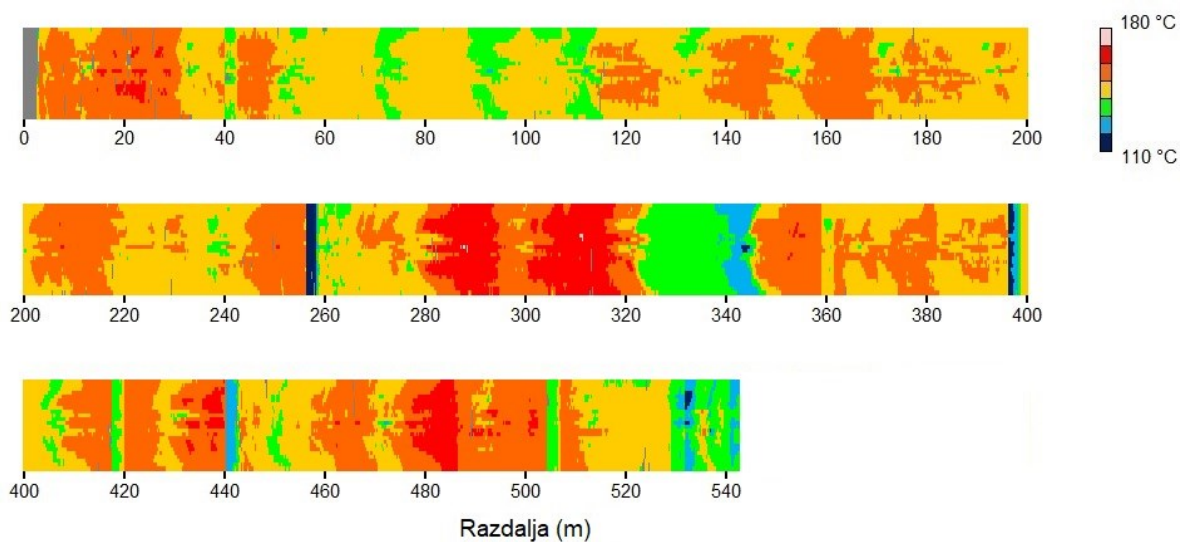
- Temperaturno polje 5



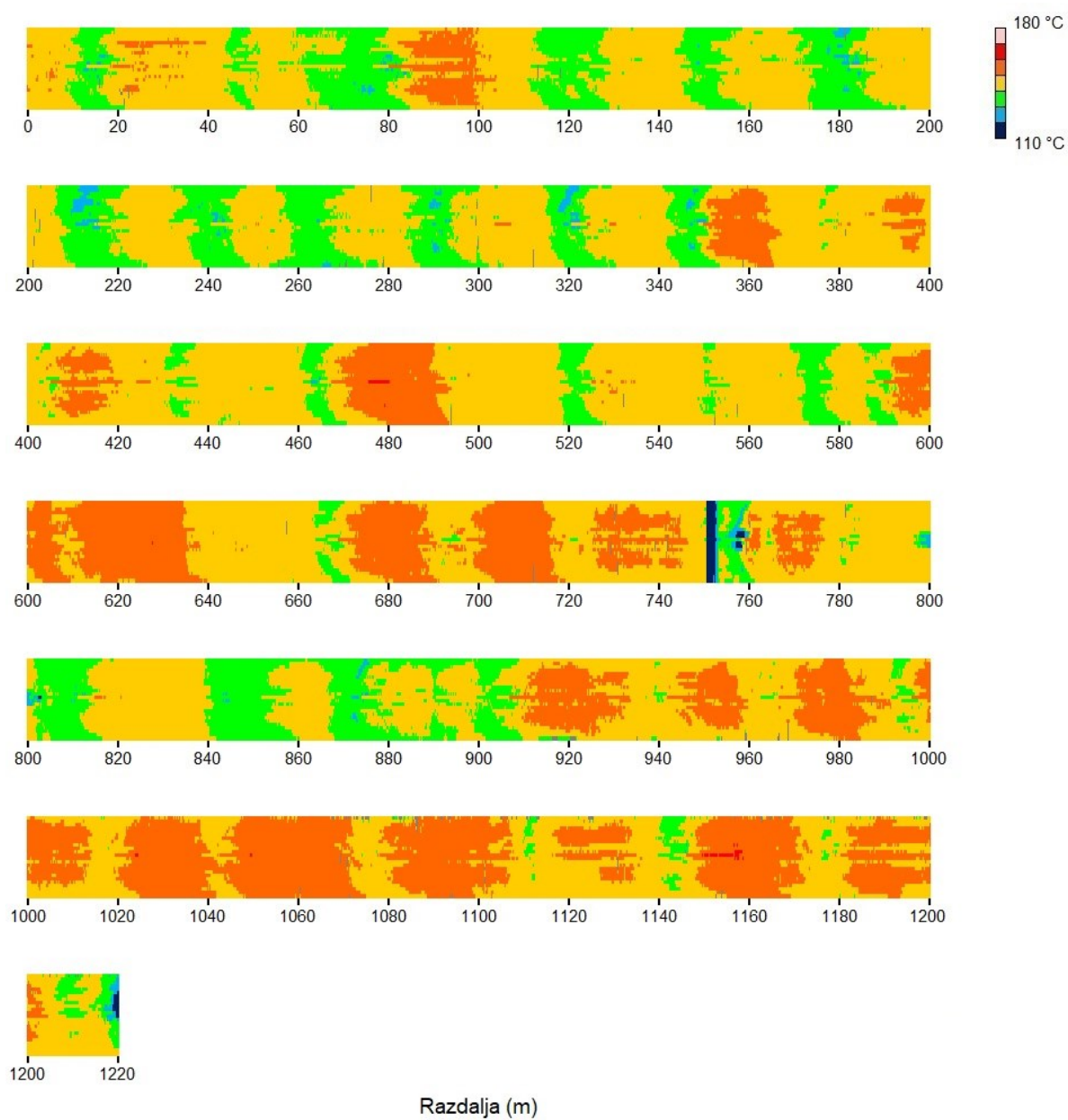
PRILOGA B: TEMPERATURNNA POLJA – REKONSTRUKCIJA HITRE CESTE H4 Z UPORABO PODAJALNIKA

APPENDIX B: TEMPERATURE PROFILES – H4 EXPRESSWAY RECONSTRUCTION WITH THE FEEDER USE

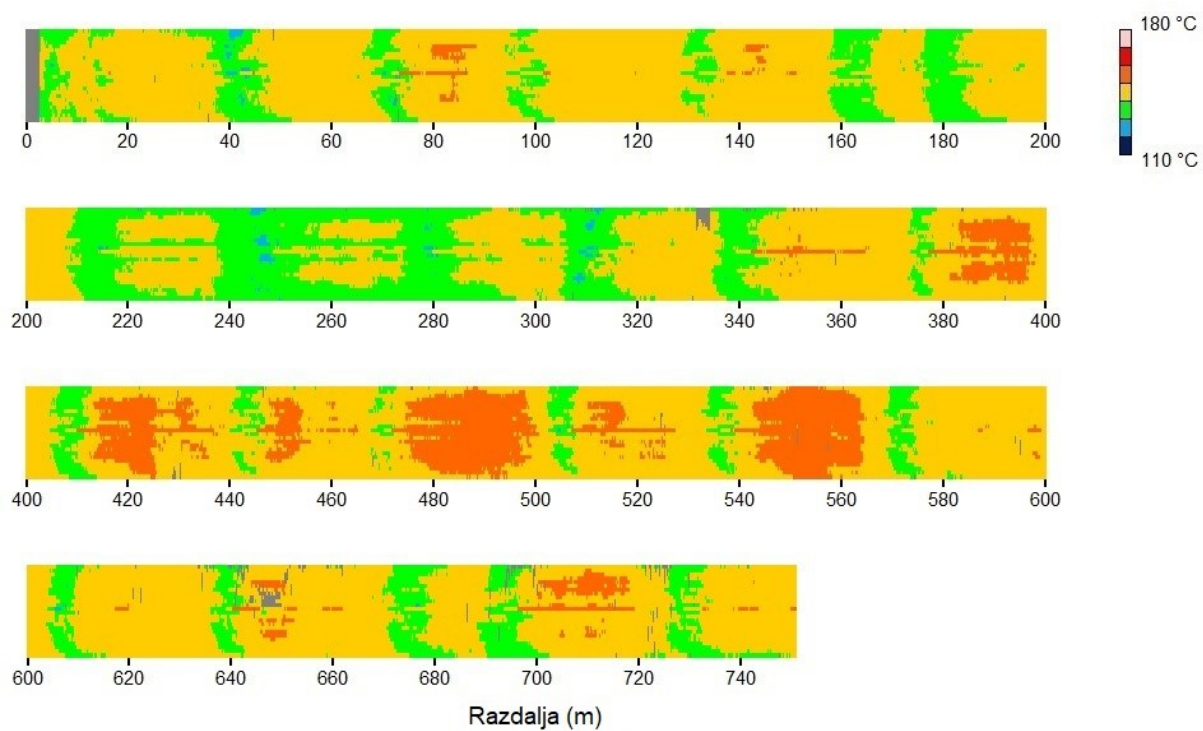
- Temperaturno polje I



- Temperaturno polje II



- Temperaturno polje III



- Temperaturno polje IV

