

# Kontrola kvalitete ugradnje bitumenskih mješavina primjenom infracrvene termografije

---

**Komarac, Tomislava**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2025**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:705469>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Tomislava Komarac

**KONTROLA KVALITETE UGRADNJE  
BITUMENSKIH MJEŠAVINA PRIMJENOM  
INFRACRVE NE TERMOGRAFIJE**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2025.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Tomislava Komarac

**KONTROLA KVALITETE UGRADNJE  
BITUMENSKIH MJEŠAVINA PRIMJENOM  
INFRACRvene TERMOGRAFIJE**

DIPLOMSKI RAD

Izv. prof. dr. sc. Josipa Domitrović

Zagreb, 2025.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Tomislava Komarac

**QUALITY CONTROL OF ASPHALT MIX  
PAVING USING INFRARED THERMOGRAPHY**

MASTER THESIS

Izv. prof. dr. sc. Josipa Domitrović

Zagreb, 2025.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

(Ime i prezime)

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

Mentor:

Potpis mentora:

Komentor:



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

Potpis:



## OBRAZAC 6

### IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

Potpis:

Tomislava Đamarać

*Najprije se želim zahvaliti svim profesorima koji su bili dio ovog školovanja, a ponajviše mentorici izv. prof. dr. sc. Josipi Domitrović na nesebičnom dijeljenju znanja, strpljenju i stručnim savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada.*

*Posebno se zahvaljujem roditeljima, bratu i sestrama na svakom motivacijskom govoru i podršci. Hvala vam što ste uvijek vjerovali u mene, a uspjeh koji danas slavim nije samo moj već i vaš.*

*Također se zahvaljujem svojim prijateljima za svaki osmijeh i ohrabrenje kada je bilo teško, hvala vam što ste ovo putovanje učinili nezaboravnim i lakšim.*



## SAŽETAK

Kroz ovaj diplomski rad obrađena je tema primjene infracrvene termografije pri kontroli kvalitete ugradnje bitumenske mješavine u sloj kolničke konstrukcije. Na kvalitetu bitumenske mješavine utječu mehanička i volumetrijska svojstva, kao i pravilan način izvođenja građevinskih radova. Ključni proces tijekom ugradnje predstavlja zbijanje bitumenske mješavine koje se mora provesti u određenom temperaturnom rasponu. Infracrvena termografija omogućava praćenje procesa zbijanja i kvalitete njegova izvođenja mjerenjem temperatura bitumenske mješavine neposredno iza finišera. Poznavanjem temperaturnih razlika moguće je s pomoću termograma uočiti pojavu temperaturne segregacije na novopostavljenom kolniku, te pravovremeno reagirati i spriječiti daljnju degradaciju.

**Ključne riječi:** vruća bitumenska mješavina, infracrvena termografija, kontrola kvalitete, termogram, temperaturna segregacija

## SUMMARY

This thesis explores the topic of applying infrared thermography for quality control in the installation of hot mix asphalt in pavement structures. The quality of the hot mix asphalt is influenced by mechanical and volumetric properties, as well as the proper realisation of construction works. A key process during installation is the compaction of the hot mix asphalt, which must be carried out within a specific temperature range. Infrared thermography enables monitoring of the compaction process and the quality of its execution by measuring the temperature of the hot mix asphalt immediately behind the paver. By identifying temperature differences through thermograms, it is possible to detect thermal segregation on the newly laid pavement, allowing timely intervention to prevent further degradation.

**Key words:** hot mix asphalt, infrared thermography, quality control, thermogram, temperature segregation

## POPIS KRATICA

ICT – infracrvena termografija

EU – Europska Unija

HRN EN – hrvatske norme preuzete iz normizacijskog sustava CEN/CENELEC

IC - infracrveno

HMA – vruća bitumenska mješavina

TS – temperaturna segregacija

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis
$c$	brzina širenja elektromagnetskih valova
$\lambda$	valna duljina
$\nu$	frekvencija
$\varepsilon$	koeficijent emisije
$a$	koeficijent apsorpcije
$r$	koeficijent refleksije
$\tau$	koeficijent propusnosti
$W$	snaga zračenja
$W_a$	apsorbirana snaga zračenja
$W_r$	reflektirana snaga zračenja
$W_\tau$	propuštena snaga zračenja

---

## SADRŽAJ

ZAHVALA .....	i
SAŽETAK.....	ii
SUMMARY.....	iii
POPIS KRATICA.....	iv
POPIS OZNAKA.....	v
SADRŽAJ .....	vi
1 UVOD.....	1
2 METODE I TEHNIKE RADA.....	2
3 METODA INFRACRVENE TERMOGRAFIJE.....	3
3.1 Fizikalna osnova.....	3
3.2 Princip rada termografskog sustava.....	6
3.3 Podjela termografije.....	8
3.3.1 Aktivna i pasivna termografija .....	8
3.3.2 Kvalitativna i kvantitativna termografija.....	10
3.4 Primjena, prednosti i nedostaci.....	11
4 PRIMJENA INFRACRVENE TERMOGRAFIJE NA PROMETNICAMA .....	13
4.1 Primjena ICT pri kontroli kvalitete radova tijekom procesa asfaltiranja.....	13
4.2 Primjena ICT pri otkrivanju oštećenja u kolničkoj konstrukciji .....	22
5 PRIMJERI IZ PRAKSE.....	32
5.1 Termalno snimanje na Lokaciji 1 .....	34
5.2 Termalno snimanje na Lokaciji 2.....	38
6 ZAKLJUČAK .....	41
7 POPIS LITERATURE .....	43
POPIS SLIKA.....	46
POPIS TABLICA.....	48

## 1 UVOD

Infracrvena termografija (ICT) je beskontaktna, nerazorna metoda za čije provođenje nije potrebno zaustavljanje proizvodnog procesa. Primjenjuje se u gotovo svim područjima ljudske djelatnosti: medicini, biologiji, petrokemijskoj industriji, u području očuvanja energije, građevinarstvu, strojarstvu, kao i u svakodnevnom životu. Njena primjena u građevinarstvu, točnije zgradarstvu, je znatno porasla od druge polovice 90-ih godina prošlog stoljeća, dok se u posljednjih 20-ak godina sve češće primjenjuje na prometnicama prilikom kontrole kvalitete materijala i radova. Široko područje primjene i porast korištenja rezultat su velike potrošnje energije, osobito u građevinarstvu, što negativno utječe na klimatske promjene. U zemljama članicama EU, potrošnja energije u zgradarstvu iznosi oko 41% od ukupne potrošnje.

Bitumenska mješavina se pokazala kao najbolji izbor za izradu kolnika, uz zadovoljavanje zahtjeva udobnosti i sigurnosti sudionika u prometu, sposobnosti preuzimanja opterećenja od prometa, otpornosti na kolotražnje, nastanak pukotina itd. Projektirani vijek kolničke konstrukcije iznosi 15-20 godina s pretpostavkom da u tom vremenskom razdoblju neće doći do ozbiljnijih oštećenja kolnika. Bez obzira koliko je mješavina dobro projektirana, na tražene karakteristike bitumenskih mješavina najveći utjecaj ima proces zbijanja. Postizanje potrebnog stupnja zbijanja povezan je s mnogim drugim čimbenici kao što su karakteristike mješavine (agregat, krutost veziva i sl.), vanjski utjecaji (vlažnost, temperatura zraka i podloge, solarno zračenje itd.) te karakteristike izgradnje (udaljenost asfaltne baze, debljina sloja, temperatura proizvodnje itd.). Svaki korak tijekom procesa proizvodnje i izgradnje mora se odvijati unutar određenog temperaturnog raspona, a trenutno važeći propisi u Republici Hrvatskoj zahtijevaju kontrolu temperature bitumenske mješavine tijekom izgradnje u skladu s HRN EN 12697-13. U skladu s navedenom normom, temperaturu je potrebno mjeriti nakon miješanja, skladištenja, transporta i polaganja s pomoću kontaktnog ili infracrvenog termometara na nasumično odabranim lokacijama.

Ovaj rad prikazuje primjenu infracrvene termografije prilikom mjerenja temperaturnih razlika kao i za identifikaciju temperaturne segregacije tijekom različitih faza ugradnje bitumenske mješavine.

## 2 METODE I TEHNIKE RADA

Za potrebe izrade ovog diplomskog rada korišteni su vizualni podaci snimljeni od strane izvođača radova na gradilištu, STRABAG d.o.o.. Podaci su prikupljeni s pomoću termovizijske kamere FLUKE TIS45 na nasumično odabranim područjima i za različite procese polaganja i zbijanja bitumenske mješavine. Obrada i analiza podataka izvršena je u programskom softveru Fluke SmartView®. Termalna su snimanja izvršena na dvije lokacije:

- Lokacija 1: autocesta A3 Bregana – Lipovac, u smjeru Lipovca
- Lokacija 2: autocesta A2 Zagreb – Macelj, na dionici autoceste Zabok – Sv. Križ Začretje, u smjeru Macelja

Na obje su lokacije mjerene temperaturne razlike tijekom cijelog procesa ugradnje bitumenske mješavine, tj. od transporta mješavine iz asfaltne baze do završetka zbijanja.

Strojevi korišteni za polaganje bitumenske mješavine za lokaciju 1 i lokaciju 2, razlikuju se u korištenju presipača na lokaciji 1. Termalnim snimanjima pokušava se utvrditi opravdana uporaba presipača i njegov utjecaj na temperaturne razlike bitumenske mješavine.

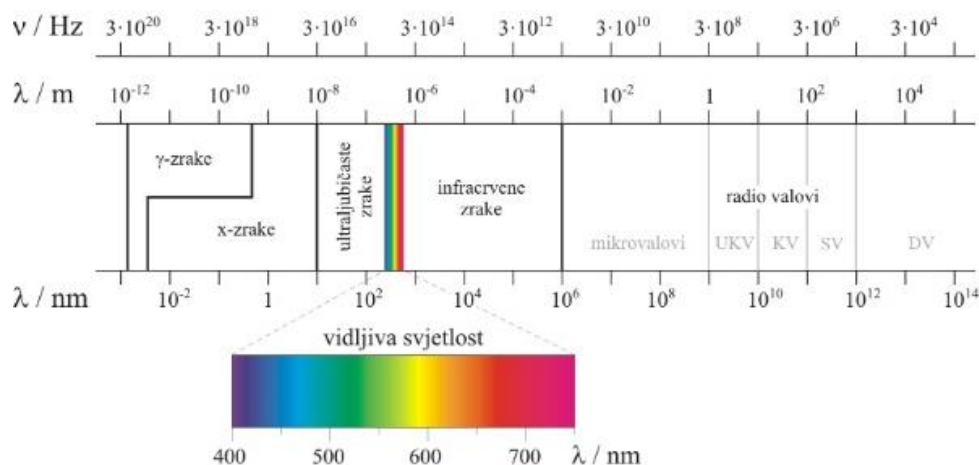
### 3 METODA INFRACRVENE TERMOGRAFIJE

Infracrvena termografija (ICT) je mjerna dijagnostička metoda koja se koristi za otkrivanje IC toplinskog zračenja koje emitira neki objekt, odnosno tijelo, kao i za prevođenje tog zračenja u vidljivu sliku, termogram [1]. Poznavanjem određenih fizikalnih karakteristika objekta, pomoću ICT, moguće je odrediti temperaturu kao i njezinu raspodjelu na površini tijela. Pomoću fizike procesa koji se zbiva u promatranom objektu, poznatih temperaturnih iznosa kao i raspodjele temperature na površini dobivamo informacije o stanju površine objekta mjerenja, a odraz su unutrašnje strukture tog objekta ispod površine [2].

#### 3.1 Fizikalna osnova

Riječ termografija dolazi od dvije latinske riječi therme – toplina i grafein – pisati što nam govori da se radi o metodi za koju je potrebna temperatura. Postojanje infracrvenog zračenja seže čak do 1800. godine, kada je engleski znanstvenik sir Williaam Herschel mjerio temperaturu u području pojedinih boja spektra vidljive svjetlosti te je primijetio kako dolazi do rasta temperature od ljubičaste prema crvenoj. Na osnovu tih mjerenja zaključio je kako zračenje mora postojati i izvan vidljivog spektra koje kasnije naziva „termometrijskim spektrom“, a zračenje „tamnom toplinom“ ili „nevidljivim zrakama“. Pojam „infracrveno“ javlja se krajem 19. stoljeća i ne može se sa sigurnošću reći tko ga je uveo [1].

Svako tijelo s temperaturom iznad apsolutne nule ( $0\text{ K} = -273,15\text{ °C}$ ) zrači elektromagnetske valove zbog kojih je moguća primjena infracrvene termografije. ICT mjeri elektromagnetska zračenja u području elektromagnetskog spektra koji se još naziva i infracrvenim (IC) spektrom (slika 1) [3].



Slika 1. Elektromagnetski spektar [4]



IC spektar se proteže u području valnih duljina od 0,7  $\mu\text{m}$  do 1000  $\mu\text{m}$ , a od praktične primjene su kratkovalna (od oko 3  $\mu\text{m}$  do 5  $\mu\text{m}$ ) i dugovalna (od oko 7  $\mu\text{m}$  do 14  $\mu\text{m}$ ) spektralna područja. Emisija elektromagnetskih valova temelji se na zakonima zračenja (Planckov, Wienov i Stefan-Boltzmannov zakon zračenja) koji se odnose na idealno tijelo, tzv. crno tijelo [3,5,6]. Glavne karakteristike crnog tijela su da apsorbira svo zračenje koje pada na njega bez obzira na valnu duljinu ili kut upada. Cjelokupno zračenje koje dolazi s površine crnog tijela predstavlja emitirano zračenje i niti jedno tijelo ne može emitirati više zračenja od crnog tijela na nekoj valnoj duljini i temperaturi. Zračenje ili radijacija je prijenos energije pomoću elektromagnetskih valova, a brzina širenja elektromagnetskih valova ( $c$ ), valna duljina ( $\lambda$ ) i frekvencija ( $\nu$ ) usko su povezani korelacijom [3]:

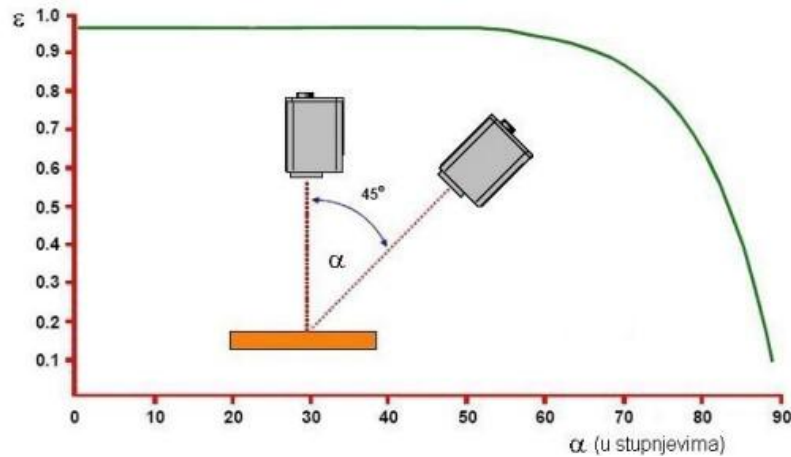
$$c = \lambda \cdot \nu \quad (1)$$

Realna tijela upadno zračenje mogu apsorbirati, reflektirati i propuštati što čini znatnu razliku u odnosu na crno tijelo. Snaga zračenja koja pada na tijelo ( $W$ ) dijeli se na apsorbiranu ( $W_a$ ), reflektiranu ( $W_r$ ) i propuštenu snagu ( $W_\tau$ ), gdje koeficijent apsorpcije ( $a$ ) predstavlja omjer između apsorbiranog i prispjelog zračenja, koeficijent refleksije ( $r$ ) je omjer između reflektiranog i prispjelog zračenja, dok se omjer između propuštenog i prispjelog zračenja naziva koeficijentom propusnosti odnosno transmisije ( $\tau$ ), a vezu između navedenih koeficijenata i snaga zračenja možemo vidjeti u niže navedenim formulama [3]:

$$W = W_a + W_r + W_\tau \quad (2)$$

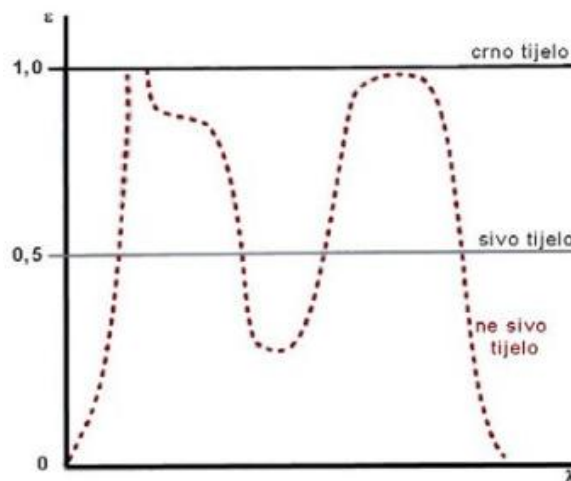
$$1 = a + r + \tau \quad (3)$$

Kada je iznos  $\tau = 0$  radi se o tijelu koje je nepropusno za infracrveno zračenje, takvo tijelo je kruto tijelo, što rezultira vrijednošću  $a + r = 1$ . U tom se slučaju prispjelo zračenje djelomično apsorbira i djelomično reflektira. Apsorpcija ovisi o stanju površine tijela pa tako glatke i polirane metalne površine jako reflektiraju energiju koja pada na njih, pod kutom jednakim upadnom kutu dozračene energije, posljedica toga je mali koeficijent apsorpcije  $a$ , kao i koeficijent emisije  $\varepsilon$ . Suprotno tomu, kod oksidiranih metalnih površina koeficijent  $a$  odnosno koeficijent  $\varepsilon$  je umjereno velik i kreće se u rasponu od  $\approx 0,8 - 0,9$  jer zbog hrapavosti površine kut refleksije nije jednak kutu upadnog zračenja. U skladu s tim možemo zaključiti da veličina zračenja koja će se apsorbirati odnosno reflektirati ovisi o materijalu i stanju površine, temperaturi te o valnoj duljini prispjelog zračenja kao i o kutu upada [3]. Slika 2. pokazuje ovisnost koeficijenta emisije o kutu mjerenja energije zračenja s površine tijela s velikim koeficijentom emisije, no takva ovisnost se javlja i kod površina s malim koeficijentima emisije. Kako bi termografska mjerenja bila što preciznija ona se vrše do kuta od  $45^\circ$  prema normali na površinu mjerenja [5].



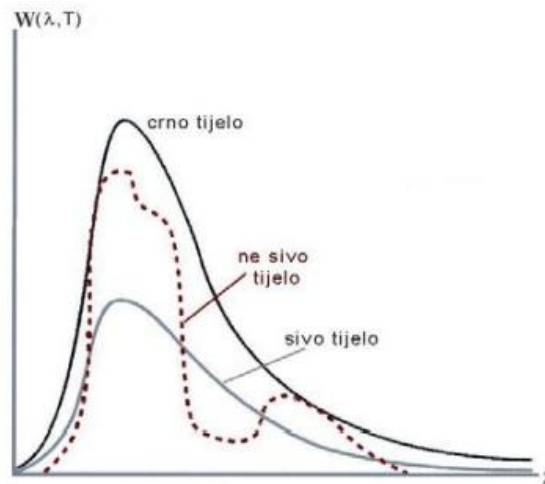
Slika 2. Koeficijent emisije ovisno o kutu mjerenja [5]

Realna tijela možemo podijeliti u dvije skupine a to su: siva tijela ( $\varepsilon = \text{konst.}$ ) i ne siva tijela (obojena tijela) ( $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$ ). Koeficijent emisije  $\varepsilon = \varepsilon(\lambda, T)$  predstavlja veličinu za koju je snaga zračenja realnog tijela manja od snage zračenja crnog tijela za neku odabranu temperaturu i valnu duljinu,  $W_{\text{realno tijelo}}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot W_c(\lambda, T)$  (slika 3) [2].



Slika 3. Koeficijent emisije crnog tijela, ne sivog i sivog tijela [2]

Određivanje vrijednosti  $\varepsilon$  eksperimentalno je vrlo jednostavno, no ipak se pojavljuju neke poteškoće s određivanjem navedene vrijednosti koje proizlaze iz činjenice da se vrijednost  $\varepsilon$  mijenja po spektru valnih duljina,  $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$ . Na slici 4 možemo vidjeti kako zračenje realnih tijela odstupa od zračenja crnog tijela te je i sama raspodjela snage zračenja po spektru valnih duljina drugačija [2].

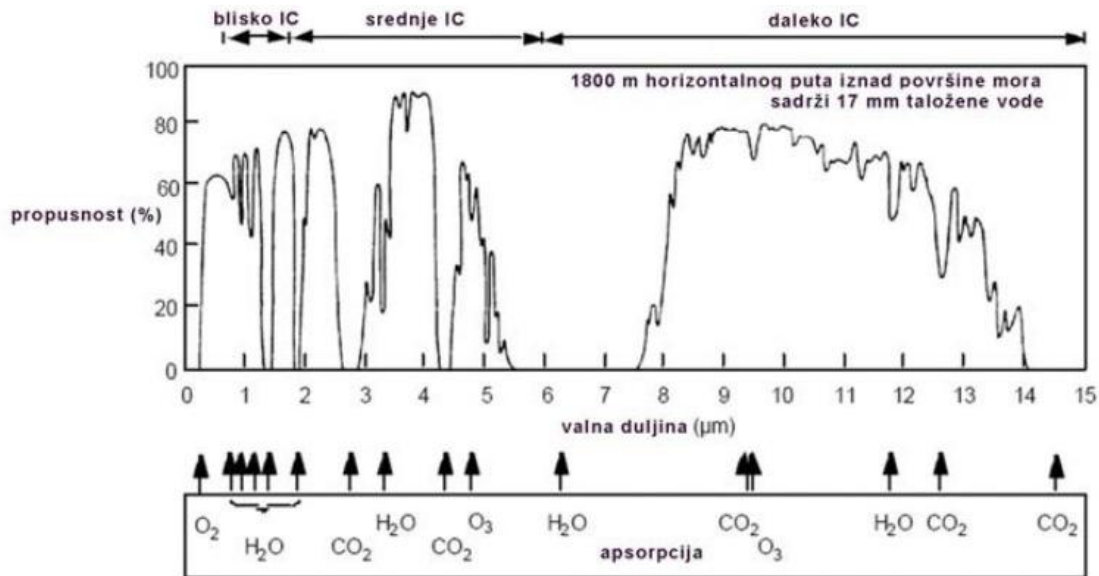


Slika 4. Raspodjela snage zračenja [2]

### 3.2 Princip rada termografskog sustava

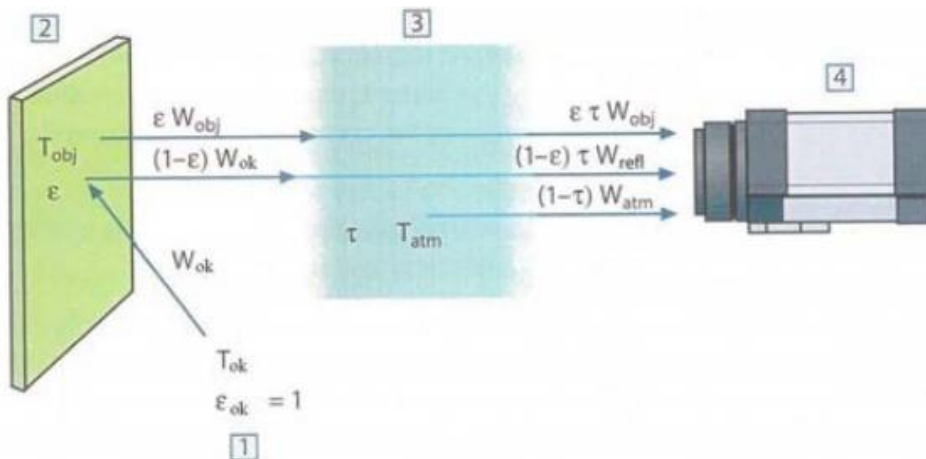
Termovizijska kamera i osobno računalo čine osnovne dijelove termografskog sustava. Računalo služi za pohranu podataka s kartice koja se nalazi u kameri i za obradu termograma, dok se termovizijska kamera koristi za bilježenje zračenja površine objekta u infracrvenom spektru. Bilježe se zračenja objekta pri temperaturama manjim od  $600^{\circ}\text{C}$  dok pri višim temperaturama tijela zrače svjetlo koje je vidljivo čovjeku. Na termogramu su vidljive različite boje koje predstavljaju emitiranje različite količine infracrvenog zračenja, dok površine koje emitiraju jednake količine topline imaju iste boje te ih nazivamo izotermalnim površinama. Kako bi se izračunala vrijednost temperature promatranog objekta pomoću termograma potrebno je prije snimanja podesiti ulazne parametre. Neki od bitnijih ulaznih parametra su temperatura okolnih objekata, udaljenost kamere od promatranog objekta, svojstva površine objekta i relativna vlažnost zraka. Osjetnik u termovizijskoj kameri mjeri količinu energije koja pada na njegovu površinu, tj. mjeri prispjelo zračenje kojeg čine energija zračenja mjernog objekta i refleksije energije zračenja drugih objekata. Važno je napomenuti da zračenje prolazi kroz različite propusnosti atmosfere i može biti umanjeno za određene iznose kao i sadržavati pridodano zračenje atmosfere poput vodene pare i ugljikovog dioksida. Nekompenzirano očitavanje pomoću termovizijske kamere se razlikuje od stvarne temperature zbog čega nastaje prividna temperatura. Vrijednosti prividnih temperatura kod površina niskih i visokih vrijednosti emisije su vrlo različite. Ukoliko je mjerni objekt na temperaturi višoj od okolišnih objekata, izgledat će hladnije nego što jest u stvarnosti, a ako se nalazi na temperaturi nižoj od okolišnih objekata izgledat će toplije nego što jest u tom trenutku. Stoga možemo zaključiti kako površine niskog emisijskog faktora prekrivaju svoju stvarnu temperaturu [1]. Emisija i apsorpcija

zračenja krutina i tekućina se promatra kao površinska pojava, jer njihovo zračenje uključuje samo molekule na tankom površinskom sloju. Suprotno tomu, kod plinova emisija i apsorpcija zračenja predstavljaju volumenske promjene. Posljedica svega toga je propuštanje infracrvenog zračenja samo u određenim spektralnim područjima koje nazivamo atmosferskim prozorima (slika 5) [6].



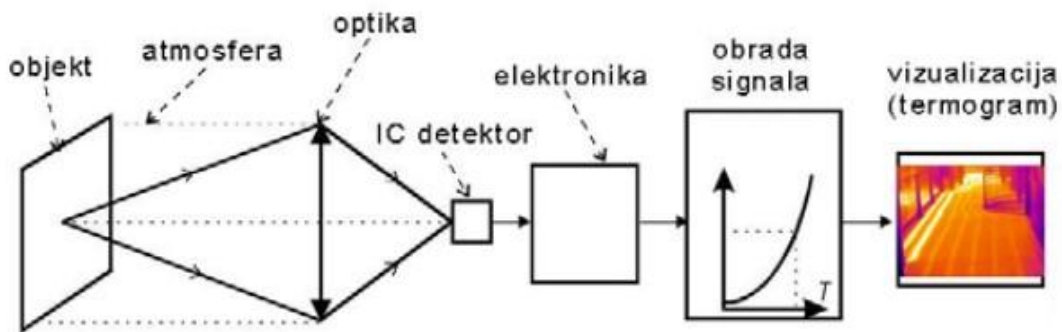
Slika 5. Ograničenja propusnosti atmosfere [5]

Danas se kao ICT uređaji najčešće upotrebljavaju termovizijske kamere koje imaju mogućnost mjerenja u dugovalnom i/ili kratkovalnom spektralnom kanalu. Na slici 6 se nalazi ilustrativni prikaz energija zračenja koje se mogu mjeriti pomoću termovizijske kamere. Oznaka  $W$  predstavlja snagu zračenja (obj. – objekt mjerenja, refl. – refleksija, atm. – atmosfera),  $T$  temperaturu u kelvinima,  $\varepsilon$  je koeficijent emisije i  $\tau$  je koeficijent propusnosti. U praksi najveću važnost ima energija zračenja objekta jer služi za izračun temperature površine mjernog objekta, a ostali doprinosi refleksije energije zračenja (drugi objekti, atmosfera) moraju se proračunati [2].



Slika 6. Ilustrativni prikaz mjerenja IC zračenja s termovizijskom kamerom [2]

Optika koja je ugrađena u ICT uređaje izrađuje se od različitih materijala zbog sposobnosti propuštanja IC zračenja. Stoga se za dugovalna IC zračenja koriste germanij, cinkov sulfid i cinkov selenid, a za srednjovalna IC zračenja se koriste silikon, safir, kvarc ili čak magnezij [1]. Zahvaljujući razvoju optike mjeri se zračenje mjernog objekta, a detektor izmjereno zračenje pretvara u električni signal. Elektronika kamere pojačava električne signale, a potom ih digitalizira. Ovisno o odabranoj funkciji programa ugrađenog u kameru, digitalizirani signali se obrađuju, a na zaslonu se pojavljuje vizualni prikaz raspodjele temperature na površini objekta, termogram (slika 7) [2].



Slika 7. Princip rada termografskog sustava [5]

Slijedom navedenoga možemo reći kako je termografija beskontaktna, nerazorna, brza i učinkovita metoda kojom se mjeri i bilježi energija zračenja bilo kojeg tijela [1].

### 3.3 Podjela termografije

Ovisno o načinu na koji je objekt doveden u stanje pogodno za termalno snimanje razlikujemo aktivnu i pasivnu termografiju, a prema načinu obrade rezultata termografija se dijeli na kvalitativnu i kvantitativnu [1].

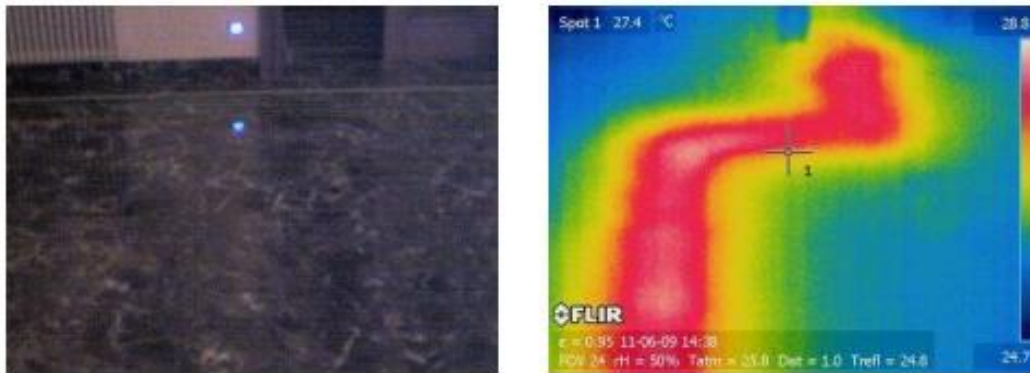
#### 3.3.1 Aktivna i pasivna termografija

Aktivna termografija je metoda koja se temelji na promatranju dinamičkog ponašanja površine objekta izloženog toplinskoj pobudi, dovođenjem ili odvođenjem topline. Toplinska pobuda se postiže na različite načine, a najčešće se koriste impulsna, periodička, vibracijska, „lock-in“ kao i mnoge druge metode pobude. Osnovni cilj toplinske pobude je izazivanje reakcije promatranog objekta i praćenje temperaturne raspodjele na površini objekta slanjem određene količine energije u objekt mjerenja [1].

Preporuka za obavljanje aktivnih termalnih snimanja je noću za vrijeme minimalnih brzina vjetra, ukoliko se mjerenja obavljaju danju potrebno je uzeti u obzir utjecaj promjena stanja

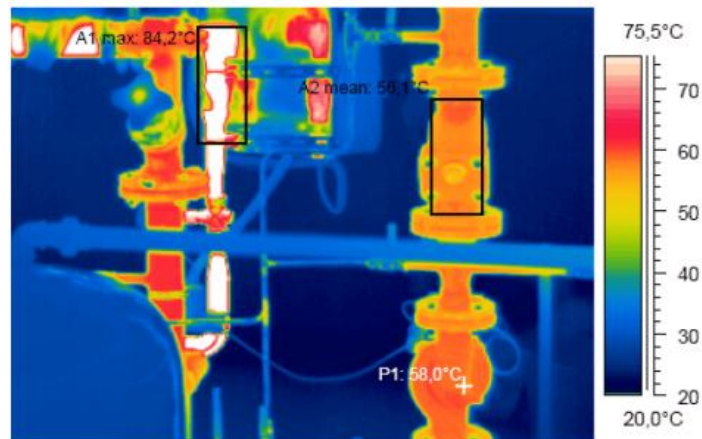
okoliša, oblake, sunčevo zračenje čak i godišnja doba kao i mnoge druge utjecajne promjene. Za objekte na otvorenom pobuda se postiže sunčevim zračenjem dok se za objekte u zatvorenom prostoru upotrebljava periodička, vibracijska ili neka druga stimulacija pobude. Važni parametri koji utječu na rezultate aktivne termografije su dobici i gubici topline, tj. koeficijenti apsorpcije i koeficijenti emisije. Materijali s visokim koeficijentom apsorpcije će se bolje zagrijavati dok će njihovi gubici ovisiti o koeficijentu emisije u infracrvenom području. Što je veća vrijednost odnosa koeficijenta apsorpcije i koeficijenta emisije to će se objekti jače zagrijavati, dok će pri niskim vrijednostima zagrijavanje biti slabije, idealan primjer su svijetle i tamne površine [1].

Najčešće se primjenjuje za pronalaženje mogućih pukotina i nepravilnostima u materijalima i za određivanje njihovog položaja, primjenjuje se također u laboratorijskim ispitivanjima i istraživačkim procesima. Važna je primjena pri pronalaženju ukopanih objekata, a u građevinarstvu se koristi za analizu građevina, krovova i drugo (slika 8) [1].



Slika 8. Prikaz položaja instalacija u objektu - aktivna termografija [7]

Pasivna termografija je termografska metoda koja promatra objekte u stacionarnom stanju, takvo stanje se postiže boravljenjem u okolini nepromjenjive temperature. Primjenjuje se na aktivnim objektima i strukturama čije su temperature različite u odnosu na temperature okoline te su iz tog razloga takvi objekti vidljivi na termogramu (slika 9). Aktivni objekti su objekti koji sami generiraju toplinu izgaranjem, trenjem, kemijskim reakcijama ili gubicima pri prijenosu električne energije, a ovisno o intenzitetu generiranja topline mijenjat će se temperaturna raspodjela na objektu. Najveću primjenu je postigla u praćenju tijeka proizvodnih i drugih procesa, analizi toplinske izolacije, održavanju sustava i slično gdje mjesto diskontinuiteta u temperaturnom polju ukazuje na nepravilnosti [1].

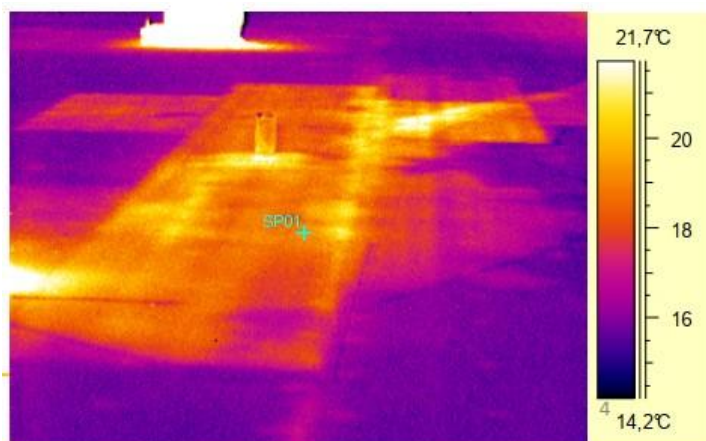


Slika 9. Primjena ICT prilikom održavanja sustava - pasivna termografija [7]

Za kvantitativnu analizu problema upotrebljavamo aktivnu termografiju, dok se pasivna termografija može koristiti i za kvantitativnu i za kvalitativnu analizu problema, no u većini slučajeva se primjenjuje kvalitativna analiza [1].

### 3.3.2 Kvalitativna i kvantitativna termografija

Obrada snimljenih podataka zračenja obavlja se pomoću odgovarajućeg programskog paketa i dobivanjem ograničenog broja informacija, takva obrada predstavlja kvalitativnu termografiju. Termogram služi za usporedbu temperaturnih razlika, a temeljem toga je moguće uočiti mjesta različitosti i donijeti zaključke o daljnjim potrebnim intervencijama. Važno je napomenuti da kod ovakve vrste termografije točna vrijednost temperature nije presudna iz tog razloga kvalitativna termografija je svoju primjenu pronašla u mjerenjima u svrhu zaštite okoliša, geološkim promatranjima, provjerama krovova i fasada, za pronalaženje lokacija ukopanih objekata i slično. Često se primjenjuje i pri održavanju što je prikazano na slici 10 gdje se stvarno stanje uspoređuje s referentnim i temeljem toga se donose zaključci o stanju objekta [1].



Slika 10. Prisutnost vlage na ravnom krovu [7]

Kvantitativnom termografijom se dobivaju točni podaci o temperaturi, no potrebno je poznavanje emisijskih svojstava mjernog objekta, stanje atmosfere između objekta i kamere te stanje okoline. Podatke dobivene termogramom je potrebno preračunati u ispravne vrijednosti što zahtijeva utrošak određenog vremena. Kako bi se vrijeme obrade podataka skratilo potrebno je odgovarajuće podešavanje utjecajnih parametara tijekom snimanja koje je moguće primijeniti samo na termovizijskim kamerama više kategorije [1].

Kvantitativna termografija svoju primjenu je pronašla u mjerenjima za različita istraživanja i razvoj, također je važna za određivanje stanja objekta pri preventivnom održavanju. Iz točnih vrijednosti temperature moguće je zaključiti o ispravnom odnosno neispravnom radu promatranog uređaja, o procjeni rada pod određenim uvjetima i slično. Primjer primjene kvantitativne termografije dan je na slici 11 gdje su prikazani elementi električnih instalacija, a temperaturna raspodjela upućuje na moguće otkazivanje rada srednjeg elementa [1].



Slika 11. Temperaturna raspodjela elemenata električnih instalacija - kvantitativna termografija [1]

### 3.4 Primjena, prednosti i nedostaci

Termografija je svoju primjenu pronašla u mnogim područjima, od medicine tj. zdravstva sve do tehničke struke. Najčešće se upotrebljava u svrhu nadzora i održavanja u građevinarstvu, petrokemiji, strojarstvu, elektrotehnici i sl. U elektrotehnici, termografija služi za nadzor i održavanje sustava za proizvodnju i distribuciju električne energije, gdje porast temperature ukazuje na nepravilnosti u radu sustava te može doći do oštećenja i pada sustava. Osim za pregled proizvodnih i distribucijskih sustava električne energije služi za kontrolu dalekovoda, transformatorskih stanica i podstanica kao i za razvod energije do potrošača. Kod industrijskih postrojenja važnu ulogu ima za otkrivanje određenih nepravilnosti kako bi se omogućio neprekidan rad postrojenja. Posebnu važnost primjećujemo u medicinskoj kao i veterinarskoj dijagnostici gdje pothlađena ili pregrijana mjesta na koži mogu biti posljedica



različitih upalnih procesa, tumora, oboljenja i slično. Daljnjim razvojem termografskih metoda dolazi do primjene u posebnim područjima, primjerice za vojne svrhe, u vatrogastvu za nadziranje i otkrivanje potencijalnih požarišta i za detekciju propuštanja plinova na instalacijama. Za potrebe građevinarstva termografija se primjenjuje u zgradarstvu i na prometnicama. U zgradarstvu se primjenjuje za kontrolu toplinske izolacije, detekciju oštećenja nastala prodorom vlage u zidovima ili na krovovima, kontrolu sustava hidroizolacije na mostovima i vijaduktima i mnoge druge primjene. Na prometnicama posebnu važnost ima pri gradnji i održavanju, kao i za kontrolu kvalitete tijekom izgradnje kolničkih konstrukcija i otkrivanje nedostataka ili oštećenja na kolniku i objektima [1].

Infracrvena termografija je beskontaktna metoda što je osnovna prednosti u odnosu na ostale načine mjerenja temperature. Beskontaktno mjerenje omogućuje mjerenje na daljinu, tj. moguće je izmjeriti temperaturu čak i na nedostupnim objektima, a posebnu važnost ima kod mjerenja temperature na objektima gdje je opasno dodirivati mjerni objekt, kao što su visokonaponske instalacije. Za razliku od kontaktnog mjerenja, gdje se pri dodiru mjernog objekta može znatno promijeniti temperatura, beskontaktno mjerenje temperature ne remeti toplinsku sliku mjernog objekta. Također jedna od važnijih prednosti je i dvodimenzionalna slika raspodjele intenziteta zračenja, termogram, iz kojeg je lako očitati i dobiti vrijednosti temperature u proizvoljnim točkama i površinama mjernog objekta. Treće ne manje bitno svojstvo infracrvenog mjerenja je brzina rada termografskog sustava i dobivanje rezultata u realnom vremenu. Time se omogućava dobivanje rezultata mjerenja gotovo odmah i praćenje dinamičke pojave promjene temperature. Sami rezultat mjerenja nije pojedinačni termogram već niz termograma koje se može promatrati i analizirati na mjestu [3].

Termalnim snimanjem se dobiva uvid samo u temperaturu površine mjernog objekta, dok se temperatura u unutrašnjosti objekta može odrediti pomoću računskih metoda na temelju dinamičkog ponašanja površinske temperature i poznavanjem svojstava materijala objekta, što predstavlja jedan od nedostataka termalnog snimanja. Na rezultate mjerenja bitno utječu emisijski faktori poput atmosfere, udaljenosti, geometrije objekta i druga svojstva tijela, koji u većoj ili manjoj mjeri zadržavaju jedan dio infracrvenog zračenja i time mijenjaju dobivenu toplinsku sliku. Stoga je prilikom mjerenja potrebno uzeti u obzir navedena ograničenja kako bi se dobili točni i kvalitetni rezultati. Isto tako kod kvalitativnog mjerenja kvalitativna slika se može dobiti vrlo brzo bez mnogo preduvjeta, dok je za kvantitativne rezultate mjerenja potrebno poznavanje svih navedenih parametara i dosta vremena i računanja [3].

## 4 PRIMJENA INFRACRVENE TERMOGRAFIJE NA PROMETNICAMA

Infracrvena termografija se na prometnicama primarno primjenjuje za kontrolu kvalitete tijekom asfaltiranja kolničke konstrukcije i za otkrivanje oštećenja ili nedostataka u kolniku, što znači da se primjenjuje u svim postupcima koji zahtijevaju sudjelovanje toplinske energije koja utječe na kvalitetu konačnih rezultata. Osim što se koristi pri gradnji novih kolnika također se može primijeniti i za održavanje postojećih prometnica, a u novije vrijeme primjenu pokušava pronaći i pri detekciji pukotina u asfaltnom kolniku [1].

### 4.1 Primjena ICT pri kontroli kvalitete radova tijekom procesa asfaltiranja

Projektirani vijek trajanja asfaltnih kolnika je između 10 i 20 godina, a oštećenja nastala kao posljedica temperaturne segregacije, uz oštećenja uslijed zamora materijala i stvaranje kolotraga, su jedno od glavnih oštećenja kolnika. Vruća bitumenska mješavina (eng. hot mix asphalt, HMA) jedna je od najčešće korištenih bitumenskih mješavina pri izgradnji prometnica zbog visoke izdržljivosti, otpornosti na vlagu kao i brzog puštanja u promet nakon izgradnje. Sastoji se od bitumena, agregata određene granulacije, punila (sitnih čestica) i zraka [8,9]. Visoka uporaba HMA ima nekoliko nedostataka kao što su visoka potrošnja energije, povećanje emisije ugljikovog dioksida, otežano postavljanje tijekom hladnijeg i kišovitog vremena, ograničeno razdoblje ugradnje tijekom godine, opasnost za zdravlje i sigurnost radnika i mnogi drugi. Bitumen u odnosu na agregat ima višu cijenu, iz tog razloga izvođači će nastojati projektirati bitumenske mješavine s najnižim mogućim sadržajem bitumena koji pravilnici dopuštaju [10].

Sredinom 1990-ih godina termalno snimanje dobiva važnu ulogu pri otkrivanju područja segregacije u vrućim bitumenskim mješavinama. Nadalje, 2000. godine u Teksasu, razvila se ideja o procjeni korištenja i točnosti dobivenih informacija infracrvenog snimanja za prepoznavanje segregacije [11]. Nakon niza obavljenih terenskih ispitivanja i istraživanja utvrđeno je da su hladna područja HMA s temperaturnom razlikom većom od 14 °C i asfaltni kolnici hladniji od 79,4 °C, kruti i otporni na zbijanje te imaju nižu gustoću u odnosu na okolna „toplija“ područja s višim temperaturama nakon zbijanja. Takvi kolnici su skloniji prijevremenom oštećenju [12].

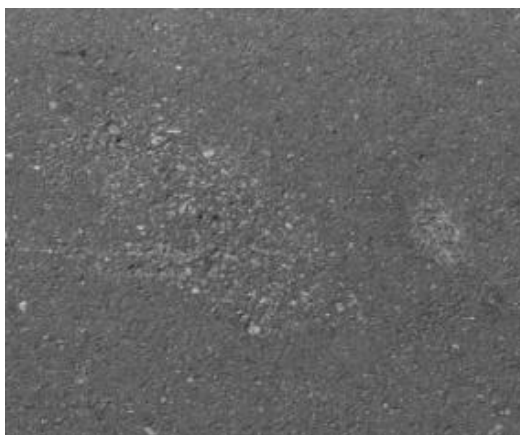
Segregacija vruće bitumenske mješavine ima negativan utjecaj na ponašanje kolnika tijekom njegovog životnog vijeka, a jedan je od najčešćih problema kolnika prilikom asfaltiranja, neovisno o kategoriji ceste. U projektima asfaltiranja mogu se uočiti dva tipa

segregacije: segregacija agregata i temperaturna segregacija, a termalno se prikazuju kao lokalizirana područja hladnije mješavine.

Segregacija agregata (slika 12) je okom vidljiva pojava u ugrađenom kolniku jer je količina krupnijeg agregat veća u odnosu na sitniji agregat [12]. Segregaciju agregata možemo podijeliti u dvije skupine:

- 1) Segregacija krupnijeg agregata nastaje kada je dominantan udio krupnijeg agregata u odnosu na sitniji agregat. Karakterizira je nizak udio asfalta, niska gustoća, veći udio šupljina ispunjenih zrakom, hrapava tekstura površine te ubrzana pojava kolotruga i pukotina zbog zamora. Ova vrsta segregacije se smatra najčešćom i najštetnijom vrstom segregacije.
- 2) Segregacija sitnijeg agregata definirana je visokim udjelom sitnijeg agregata u odnosu na krupniji agregat. Visok udio asfalta, manji udio šupljina ispunjenih zrakom, glatka površinska tekstura, ubrzana pojava kolotruga i bolja otpornost na zamor su neke od karakteristika ove vrste segregacije [13].

Bez obzira na vrstu segregacije, segregirana mješavina ima grubu površinsku teksturu u odnosu na površinu uobičajene bitumenske mješavine [1]. Zbog smanjenog sadržaja veziva dolazi do slabljenja kolnika na tom mjestu što za vrijeme ciklusa smrzavanja i odmrzavanja dovodi do pucanja i ispiranja krupnijeg agregata uzrokujući pojavu preranog oštećenja kolnika u obliku ispadanja agregata [12].



Slika 12. Segregacija agregata [12]

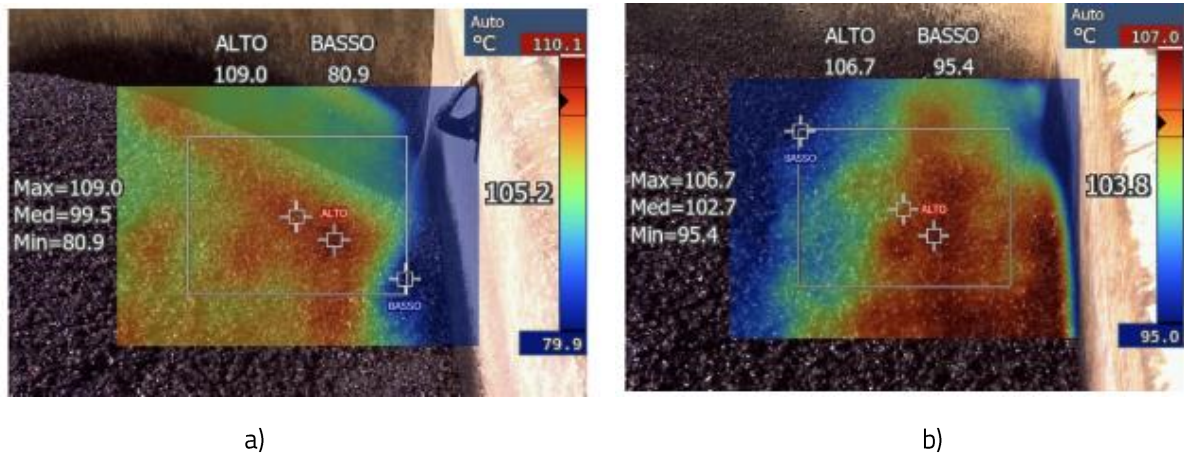
U počecima razvoja i primjene HMA znalo se samo za segregaciju agregata tj. segregaciju prema granulaciji, no 1998. godine asfaltna struka se počinje zanimati i baviti istraživanjem novootkrivene pojave, temperaturnom segregacijom (TS). Unutar bitumenske mješavine dolazi do velikih temperaturnih razlika uzrokujući hladnija područja koja se za vrijeme ugradnje i valjanja zbog neujednačenosti i niskih razina konzistencije teže zbijaju. Do promjene temperature bitumenske mješavine može doći u bilo kojem trenutku tijekom

skladištenja, transporta, pretovara, pa čak i ugradnje. Takva anomalija uzrokovana temperaturnim razlikama predstavlja temperaturnu segregaciju [1]. Pojava temperaturne segregacije najviše utječe na gustoću bitumenske mješavine čime dolazi do bržeg trošenja asfaltnih kolnika i nastanka pukotina. Tijekom transporta može doći do bržeg hlađenja pojedinih dijelova mješavine koji se ne miješaju temeljito te se kao takvi ugrade. Navedena hladnija područja su tvrđa i otpornija na zbijanje, a pojavljuju se iznova i iznova tijekom ugradnje čime dolazi do pojave cikličke segregacije [12]. Kako bi se spriječila segregacija potrebno je ponovno miješanje vruće bitumenske mješavine prije ugradnje u kolnik. Najčešće primjenjivana metoda ponovnog miješanja je korištenja spremnika ili tzv. presipača [12].

Ovisno o obliku segregacije i njenom mjestu nastanka određuje se uzrok i pristupa se rješavanju problema na odgovarajući način, a razlikujemo:

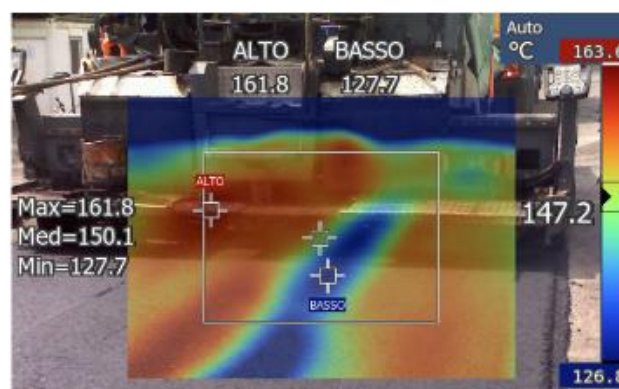
- segregaciju „kraja pretovara“;
- segregaciju uzrokovanu rasklapanjem bočnih stranica sanduka finišera,
- hladni spojevi;
- hladne točke i
- hladni tokovi.

Vrijeme između proizvodnje vruće bitumenske mješavine i ugradnje se može produljiti na nekoliko sati uzrokujući time pojavu temperaturne segregacije kao i starenje bitumena zbog izloženosti visokim temperaturama. Postupak proizvodnje, tehnike ugradnje i uvjeti okoline za vrijeme prijevoza i ugradnje utječu na mehanička i volumetrijska svojstva bitumenskih slojeva, a samim time i na vijek trajanja prometnice. Starenje bitumena može biti kratkoročno i dugoročno, kratkoročno se događa tijekom proizvodnje i procesa zbijanja HMA dok se dugoročno starenje događa postupno tijekom životnog vijeka kolnika. Temperatura ima glavnu ulogu u starenju bitumena te je iznimno važno održavati temperaturu u silosu za skladištenje bitumena i izbjegavati pregrijavanje bitumena tijekom proizvodnje HMA. Kao što se treba izbjegavati hlađenje bitumena, također je potrebno izbjeći izlaganje bitumena visokim temperaturama tijekom dužeg vremena jer se može odraziti na ozbiljno kratkoročno starenje. Tijekom prijevoza vruće bitumenske mješavine koriste se dvije vrste kamiona, s običnim ili izoliranim sanducima. Kamioni s običnim sanducima koriste se prilikom prijevoza na manje udaljenosti jer dolazi do gubitka topline i bržeg hlađenja HMA. Kod izoliranih kamiona obloga sanduka je zaštićena materijalima koji sprječavaju gubitak topline i koriste se za transport vruće bitumenske mješavine na udaljena gradilišta. Kao izolacijski materijal najčešće se koristi kamena vuna, šperploča ili neka druga vrsta drva. Slika 13 prikazuje iznos temperaturne segregacije tijekom transporta koristeći obični (a) i izolirani kamion (b) [14].



Slika 13. Temperaturna segregacija izmjerena u kutu sanduka a) običnog i b) izoliranog kamiona [14]

Od proizvodnog pogona pa do gradilišta, vruća bitumenska mješavina koja se nalazi uz rubove kamiona brže se hladi u odnosu na ostatak mješavine. Na vrhu rastresene mješavine također dolazi do brzog hlađenja čime se formira hladniji sloj stvarajući koru koja djeluje kao izolator. Hladnija kora sprječava gubitak temperature vruće bitumenske mješavine u unutrašnjosti, uzrokujući time višu temperaturu materijala u sredini sanduka kamiona u odnosu na temperaturu kore. Debljina kore raste proporcionalno s vremenom transporta te se iz tog razloga vrijeme transporta ograničava na dva sata odnosno duljina transporta ne smije biti veća od 120 km. Neovisno o vremenskim uvjetima, sanduk kamiona je potrebno pokriti vodonepropusnim i termostabilnim ceradama ili koristiti termo-kontejnere kako bi se spriječilo hlađenje mješavine pri prijevozu [1, 15, 16]. Hladniji materijal koji se nalazi uz rubove sanduka kamiona, pri pretovaru u finišer, pada na bočna krila sanduka finišera. Mješavina koja se nalazi u rasklopljenim bočnim stranicama sanduka finišera izlaže se temperaturi okoline mnogo dulje od ostatka mješavine, a njenom ugradnjom nastaju lokalna hladnija područja ugrađenog sloja u odnosu na ostatak površine kako je prikazano i na slici 14 [1].

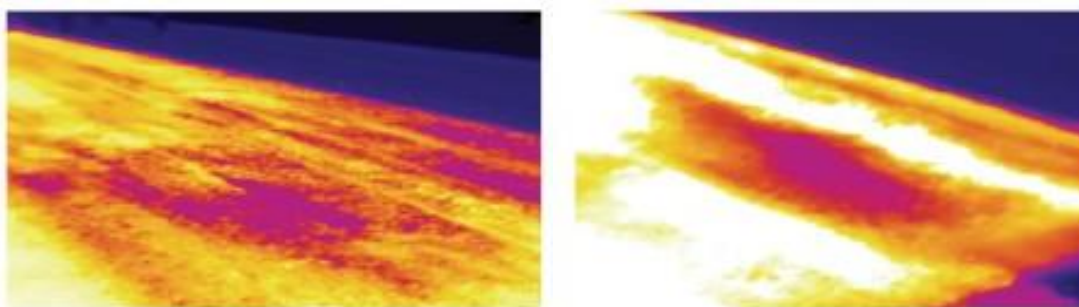


Slika 14. Hladna područja ugrađene bitumenske mješavine [14]

Glavna karakteristika takvih područja su niske gustoće u odnosu na okolna područja. Njihov nastanak se može smanjiti na način da se izbjegne rasklapanje bočnih stranica sanduka

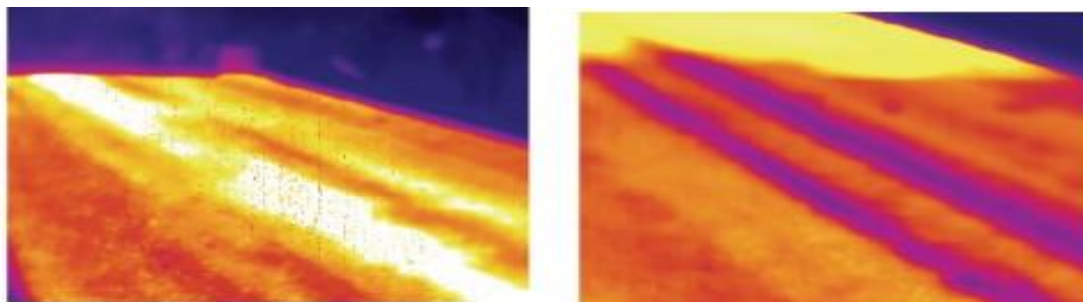
finišera između utovara ili korištenjem vozila za pretovar bitumenske mješavine u finišer. Razlog pojave temperaturnih razlika je višestruk te se tako mogu pojaviti uslijed stanja finišera pri čekanju na utovar nove bitumenske mješavine, pri samom radu finišera ili pak na radnim spojevima. Tijekom procesa polaganja HMA može doći do nepredvidljivih radnji kao što je kvar na radnoj opremi, kašnjenje dolaska kamiona s HMA i slično. Sve te radnje uzrokuju pojavu nastanka hladnih spojeva, jer se novodopremljena bitumenska mješavina polaže neposredno uz prethodno postavljenu hladnu mješavinu. Na takvim je mjestima temperaturna razlika najvidljivija i dolazi do manje povezanosti prethodno položenog i novopoloženog sloja koji čini potencijalno mjesto za nastanak poprečnih pukotina u kolniku. Nastanak hladnih spojeva može se smanjiti osiguravanjem kontinuiranog procesa polaganja, pravilnog rada opreme za ugradnju i praćenjem isporuke bitumenske mješavine iz proizvodnih pogona [1, 14].

Miješanjem novodopremljene bitumenske mješavine s hladnijom mješavinom u sanduku finišera ne može se dobiti temperaturno homogena mješavina, a ugradnjom takve vrste mješavine javljaju se dva oblika temperaturne segregacije, hladni tokovi i hladne točke. Za postizanje temperaturno homogene mješavine potrebno je puno više vremena za izjednačavanje temperaturnih razlika hladnijeg i toplijeg materijala u odnosu na vrijeme koje provedu zajedno u sanduku finišera. Jedan od uzroka nastanka hladnih točaka je nedovoljno miješanje materijala „kore“, nastalog tijekom transporta ili stajanja, s ostatkom vruće mješavine. Hladne točke (slika 15) su tipičan oblik temperaturne segregacije, a javljaju se kao lokalna hladnija područja ugrađenog bitumena. Drugi mogući uzrok je ugradnja mješavine, koja može zaostati u sanduku finišera od prethodno ugrađenog sloja, s novodopremljenom bitumenskom mješavinom i ugraditi se s njom u novi sloj. Također može doći do odvajanja mješavine od oplata finišera koja pada na tlo i ugrađuje se zajedno s novom mješavinom u sloj. Shodno navedenom važno je održavati površinu ceste ispred finišera čistom kako bi se spriječilo svako moguće lijepljenje materijala za kamion, potrebno je upotrebljavati odgovarajuće cerade na sanducima kamiona za sprječavanje pojave nastanka „kore“ kao i osigurati pravilan rad finišera [1].



Slika 15. Hladnija lokalna područja - hladne točke [1]

Hladni tokovi (slika 16) predstavljaju drugi oblik temperaturne segregacije. Pojavljuju se kao duge i uske trake hladnog materijala koje se pružaju paralelno s kolnikom, zbog toga se često nazivaju i hladnim prugama. Uzrok nastanka hladnih tokova je usko povezan s načinom rada finišera to jest s grednom ravnalicom. Gredna ravnalica predstavlja grijani dio finišera pomoću koje se određuje profil kolnika tj. ravnost sloja i debljina ugrađenog sloja bitumenske mješavine. Vrlo je važno osigurati pravilan rad letve kako bi se održala jednolika temperatura na cijeloj površini gredne ravnalice i time smanjila pojava hladnih tokova [1].



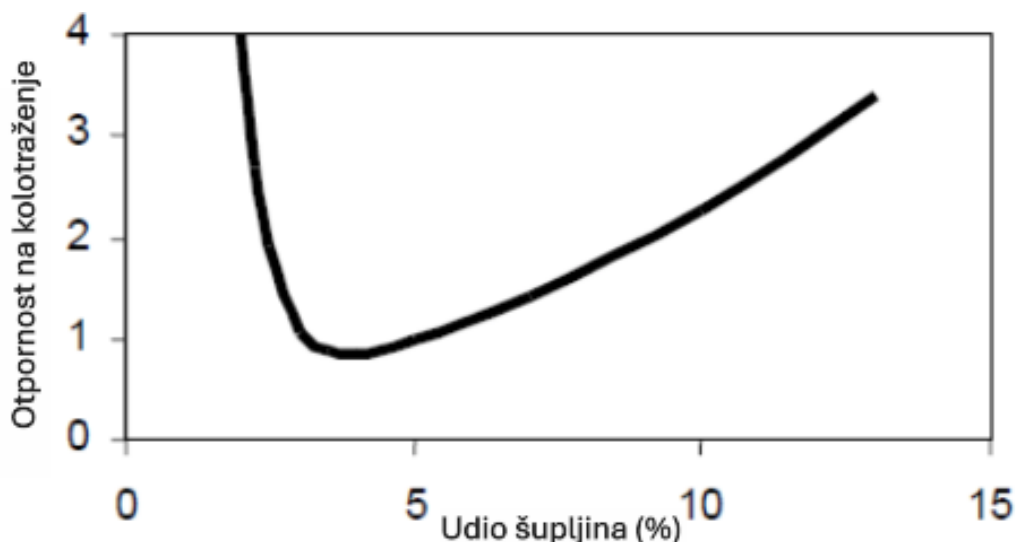
Slika 16. Hladnija lokalna područja - hladni tokovi [1]

Temperaturnu segregaciju je ponekad vrlo teško vizualno uočiti za vrijeme ugradnje bitumenske mješavine, no nakon određenog vremena uporabe prometnice dolazi do prvih problema nastalih temperaturnom segregacijom. Pojavi termalne segregacije su najsklonija područja kolnika gdje se javlja segregacija kraja pretovara, tj. područja na kojima se vrši dovoz i pretovar bitumenske mješavine. Kako bi se izbjegli problemi nastali temperaturnom segregacijom potrebno je pronaći odgovarajući način njene identifikacije tijekom procesa ugradnje, a najučinkovitijom metodom se pokazala infracrvena termografija, to jest uporaba termovizijskih kamera. Pomoću termovizijskih kamera moguće je pratiti temperaturne vrijednosti HMA od početka utovara u transportna sredstva, tijekom prijevoza, pri pretovaru sanduk finišera, u finišeru, iza gredne ravnalice prije zbijanja kao i tijekom procesa zbijanja, kraće rečeno tijekom cijelog procesa izgradnje asfaltnog kolnika. Najučinkovitiji način sprječavanja i izbjegavanja posljedica nastalih temperaturnom segregacijom je praćenje temperaturnih razlika ugrađene asfaltne mješavine neposredno iza finišera, a prije samog početka zbijanja bitumena. Proces provjere temperaturnih razlika se mjeri točkasto po čitavoj širini asfaltnog kolnika, a primjena termovizijskih kamera ubrzala je i olakšala analizu. Na termogramu se vrlo lako uočavaju dijelovi zahvaćeni temperaturnom segregacijom jer su temperature na tim mjestima niže od okolnog područja [1]. Na temelju temperaturnih razlika definirane su četiri razine segregacije:

- 1) Bez segregacije s maksimalnom temperaturnom razlikom od 10°C ili manje
- 2) Niska razina segregacije s temperaturnom razlikom od 11 do 16°C
- 3) Srednja razina segregacije s temperaturnom razlikom između 17 i 21°C i
- 4) Visoka razina segregacije s temperaturnom razlikom od 21°C ili više [17].

Zbijanje je jedan od najkritičnijih procesa tijekom ugradnje vruće bitumenske mješavine jer ima značajan utjecaj na svojstva i kvalitetu kolnika. Tijekom procesa zbijanja smanjuje se udio šupljina, a izvodi se pomoću vibracijskih valjaka primjenom statičkih i dinamičkih sila. Šupljine predstavljaju male zračne prostore ili džepove zraka koji se nalaze između čestica agregata u bitumenskoj mješavini. Udio šupljina je nužan u bitumenskim mješavinama jer omogućava zbijanje mješavine pod djelovanjem prometnog opterećenja i stvaranjem prostora kroz koje male količine bitumena mogu teći tijekom zbijanja, u suprotnom bi došlo do deformacije kolnika. Ukoliko je udio bitumena značajno viši zbijanje se odvija suviše lako, a rezultat toga je manji udio šupljina ispunjenih zrakom. Suprotno tomu, kada je udio bitumena nizak, zbijanje mješavine je kruto i teško je postići odgovarajuću gustoću. Početna vrijednost postotka šupljina kreće se od oko 3, 3,50 - 6%, a procesom zbijanja se očekuje smanjenje tog udjela čime materijal postaje čvršći i otporniji na stvaranje pukotina. Nepravilno valjanje tj. zbijanje kolnika je vodeći uzrok preuranjenog oštećenja kolnika, jer ostaje visoki udio šupljina čineći prometnicu osjetljivom na prodiranje vlage i nastanak pukotina. Površinski habajući sloj je najosjetljiviji jer je u izravnom doticaju s okolinom i prometom, te se kao takav mora pažljivo projektirati ispunjavajući zahtjeve za stabilnost i trajnost. Stabilnost se definira kao otpornost asfaltnog kolnika na deformacije pod djelovanjem prometnog opterećenja, a kao takav zadržava svoj oblik pod stalnim ponavljanjem opterećenja. Općenito vrijedi da povećanjem gustoće dolazi do porasta stabilnosti, uz smanjenje šupljina. Fleksibilnost je jedna od bitnijih karakteristika zbog sposobnosti prilagođavanja dugoročnim promjenama, no ponekad dolazi do sukoba s zahtjevima za stabilnost. Sljedeća važna osobina asfaltnog kolnika je trajnost čija je glavna karakteristika otpornost na abrazivno djelovanje prometa i vremenske uvjete. Ukoliko je volumen i povezanost šupljina takva da voda može doći do nosivog sloja dolazi do preuranjenog propadanja kolnika zbog gubitka čvrstoće u osnovnom materijalu. Slika 17 prikazuje kako pri niskom udjelu šupljina (manje od 2%) dolazi do potpunog ispunjavanja šupljina između agregata vezivom zbog čega se bitumenska mješavina ponaša kao tekućina. Kao takva ima manju otpornost na kolotražnje tijekom izlaganja teškom prometu [9]. Prema laboratorijskim istraživanjima došlo se do zaključka da svakim povećanjem udjela šupljina za 1% iznad projektirane razine od 7% dolazi do smanjenja životnog vijeka asfaltnih kolnika od približno 10% s dvostrukim povećanjem propusnosti, što predstavlja otprilike jednu godinu [9, 18].





Slika 17. Odnos otpornosti na kolotražnje i udjela šupljina [9]

Visok udio šupljina može uzrokovati prekomjerno starenje mješavine i probleme s ljuštenjem, što za posljedicu ima preuranjeno oštećenje asfaltnog kolnika prije nego se dosegne planirani projektirani vijek uporabe. U tablici 1. prikazane su vrijednosti udjela projektiranih šupljina za različite vrste bitumenskih mješavina.

Tablica 1. Udio šupljina ovisno o vrsti bitumenske mješavine [16]

Vrsta bitumenske mješavine	Udio šupljina (vol, %)
AC <sub>base</sub>	4 - 10
AC <sub>surf</sub>	3 - 8 (M4 1,5 - 6)
SMA	2,5 - 8

Shodno tomu, bitumeni s visokim udjelom projektiranih šupljina koriste se na mjestima gdje se očekuje veliko prometno opterećenje, odnosno gdje postoji mogućnost za daljnje zbijanje bitumenske mješavine nakon postavljanja. Bitumenska mješavina s najvišim iznosom projektiranih šupljina koristi se za prometna raskrižja gdje postoje značajne mogućnosti za daljnje zbijanje nakon postavljanja kao rezultat visokog udjela šupljina. Bitumen s najnižim udjelom šupljina koristi se na mjestima s malim prometnim opterećenjem, gdje skoro pa ne postoji daljnje zbijanje bitumenske mješavine nakon ugradnje. Ovakav tip bitumenske mješavine ima duži životni vijek, visoke razine izdržljivosti i otpornosti na zamor kao rezultat niskih razina šupljina. Istraživanja su pokazala da udio šupljina u bitumenskoj mješavini ne bi trebala prijeći 8%, niti spustiti se ispod 3% [9]. Kada udio šupljina padne ispod 3% postoji vjerojatnost nastanka kolotruga i smicanja kolničke konstrukcije, a ukoliko se prijeđe gornja

granica od 8% kolnik postaje propustan za zrak i vodu, što uzrokuje oštećenja uslijed djelovanja vode, oksidaciju, pukotine ili ispadanje agregata [18].

Temperature proizvodnje vruće bitumenske mješavine iznose između 150 i 180°C, dok su temperature polaganja nešto niže s obzirom na razne utjecaje koji pospješuju hlađenje mješavine za vrijeme transporta. Tako se nemodificirani bitumeni polažu pri temperaturama 135°C do 150°C, a polimerom modificirani bitumeni pri temperaturama od 140°C do 160°C. Prvo zbijanje izvodi se pomoću finišera, ovisno o vrsti finišera gustoća mješavine nakon polaganja može biti između 75% i 85% [18]. Temperatura zbijanja je jedan od važnijih uvjeta koje je potrebno zadovoljiti prilikom proces proizvodnje visokokvalitetne bitumenske mješavine, a označava temperaturu pri kojoj je potrebno zagrijati bitumen kako bi se postigla odgovarajuća viskoznost. Viskoznost predstavlja sposobnost bitumena da u potpunosti obavije agregat kako bi se omogućilo pravilno zbijanje pri ugradnji [8]. Odgovarajuća razina zbijanja je važna kako bi se postigli traženi rezultati kao što su glatke površine, povećana krutost kolnika i otpornost na zamor [19]. Na zbijanje bitumenske mješavine utječu i građevinske radnje u vidu temperature zbijanja, snage i tipova valjaka kao i vremena potrebnog za zbijanje. Glavni cilj postupka zbijanja je postizanje određene gustoće i glatke površine. Temperatura zraka, brzina vjetrova, vlažnost, razne solarne radijacije su samo neki od vanjskih čimbenika koji pospješuju brže hlađenje HMA, a time djeluju i na vrijeme potrebno za zbijanje bitumenske mješavine i postizanje tražene gustoće. Vlažnost se može uzeti u obzir, ali i ne mora jer ima relativno mali utjecaj na gustoću HMA. Debljina kolnika također utječe na zbijanje asfaltnih kolnika, što je debljina sloja veća povećava se obradivost i zbijanje mješavine, a smanjuje se brzina hlađenja jer se toplina duže zadržava. Preporuka za polaganje HMA je u poslijepodnevnim satima kako bi se postigla viša temperatura okoline i postojeće površine radi zadržavanja topline [20]. Proces ugradnje bitumenske mješavine, to jest zbijanja, potrebno je dovršiti prije nego što temperatura HMA padne ispod određene temperaturne granice (80°C) u suprotnom se tražena gustoća HMA neće moći postići bez obzira na broj prolaza valjaka [14]. Postupak zbijanja HMA za vrijeme hladnog vremena potrebno je izvršiti unutar četiri minute kako bi se izbjegla temperaturna segregacija [17].

Zaključak je da gustoća i sadržaj zračnih šupljina uveliko ovise o temperaturi HMA, a manje o temperaturnoj razlici [17]. Kada se otkrije prisutnost temperaturne segregacije, a novopoloženi sloj ima gustoću veću od 93% ili više očekuju se zadovoljavajuće karakteristike kolnika [16, 22].

## 4.2 Primjena ICT pri otkrivanju oštećenja u kolničkoj konstrukciji

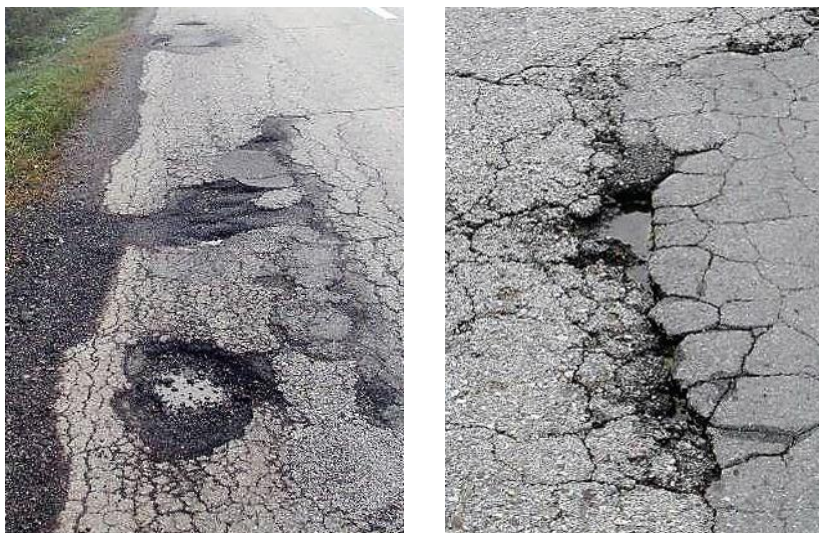
Svaka kolnička konstrukcija propada različitom brzinom, a očuvanje postojeće cestovne mreže predstavlja značajnu kapitalnu investiciju. Napredovanjem procesa degradacije kolnika vrijednost prometnice se postupno smanjuje, a troškovi održavanja su sve viši. Metode utvrđivanja i ocjene stanja kolnika koje pomažu pri donošenju odluka o načinu i vremenu strategije održavanja imaju važnu ulogu prilikom odabira načina ulaganja. Poduzimanjem različitih pravovremenih mjera moguće je usporiti ili zaustaviti proces degradacije uz minimalni utrošak financijskih sredstava. Također, raspolaganjem podataka o kolniku od trenutka njegove uporabe pa do danas moguće je ocijeniti stanje kolnika i predvidjeti ponašanje pod djelovanjem prometnog opterećenja te na vrijeme reagirati i spriječiti moguća oštećenja. Pokazatelji stupnja degradacije površine kolnika su poprečna i uzdužna ravnost, otpornost na klizanje (hvatljivost) i nosivost. Navedeni pokazatelji se odnose na stanje površinskog sloja kolnika, dok neki od njih mogu opisivati i strukturalno stanje kolničke konstrukcije [1, 23].

Održavanje kolnika se provodi kako bi se ispravili nedostaci uzrokovani oštećenjem i omogućili krajnjem korisniku sigurnu i udobnu vožnju. Na oštećenje vozne površine asfaltnog kolnika utječe prometno opterećenje, dubina slojeva, kvaliteta izvođenja, materijali, vremenske prilike i učinkovitost prethodno primijenjenih mjera održavanja. Brzina propadanja, oštećenja kolnika raste proporcionalno s intenzitetom uporabe i starošću kolnika. Približavanjem kraju projektiranog vijeka kolnika normalna je pojava nastanka oštećenja uslijed prometnog opterećenja i okoline, no ukoliko oštećenje nastane na početku uporabe kolnika to predstavlja veliki problem [23].

Kolnička konstrukcija je uslojeni sustav koji se sastoji od različitih materijala ugrađenih mehaniziranim postupkom u više kompaktnih međusobno spojenih slojeva. Svaki sloj ima različita mehanička i toplinska svojstva, a povezanost slojeva izravno utječe na naprezanja u kolničkoj konstrukciji. Najviša vlačna naprezanja se događaju na donjoj strani pojedinog sloja, bez obzira na potpunu povezanost ili nepovezanost slojeva [1].

Prikupljanje podataka o stanju površinskog sloja kolničke konstrukcije može se vršiti na dva načina. Prvi način uključuje nerazorno ispitivanje kojim se procjenjuje ravnost, хватljivost, nosivost i tekstura kolnika. Ova metoda omogućuje ocjenu stanja kolnika bez ikakvog oštećenja površinskog sloja kolničke konstrukcije. Drugi način ispitivanja su razorna ispitivanja koja uzrokuju oštećenja površine kolnika. Takva ispitivanja nastoje se svesti na minimum i zamijeniti odgovarajućim nerazornim metodama [23].

Oštećenja površine kolnika nastaju kao posljedica trošenja i starenja materijala, utjecaja vremenskih uvjeta, mogu biti posljedica nepravilnog načina ugradnje i slično. Način sanacije ovisi o veličini oštećenja, pa tako imamo oštećenja lokalnih razmjera, izdužene površine i strukturalna oštećenja. Navedena oštećenja mogu se otkriti primjenom infracrvene termografije. Oštećenja nastala ispod površine kolnika dijelimo u dvije kategorije. Prvu kategoriju čine oštećenja koja uzrokuju promjene na površini kolnika najčešće u obliku izbočenja površine, mjehura. Lokalne izbočine i zakrivljenosti utječu na udobnost i sigurnost sudionika u prometu, nastaju kao posljedica zagrijavanja hermetički zatvorenog zraka, vode, ulja ili otapala. Pojava izbočenja je znak za nepovezanost slojeva uslijed loše obavljenog zbijanja ili nehomogene raspodjele temperature za vrijeme asfaltiranja. Oštećenja koja ne izazivaju vidljive promjene na površini kolnika pripadaju drugoj kategoriji. Veličine ovakve vrste oštećenja iznose svega nekoliko centimetara i u potpunosti su skrivena, a javljaju se u obliku mjehurića, šupljina i odvajanja. Odvajanje ukazuje na neispravnost povezivanja slojeva, skriveno je u potpunosti i nevidljivo na površini asfaltnog kolnika. Trajne posmične deformacije uzrokuju oštećenja povezanosti slojeva, a posljedica su horizontalnih opterećenja. Uslijed smicanja dolazi do pojave pukotina kroz koje voda prodire u konstrukciju prometnice. Prodiranje vode u unutrašnjost kolničke konstrukcije najčešće se javlja kod starijih kolnika gdje je došlo do stvrdnjavanja veziva zbog starenja, a uzrokuje odvajanje površinskog sloja i nastanka udarnih rupa (slika 18) [1].



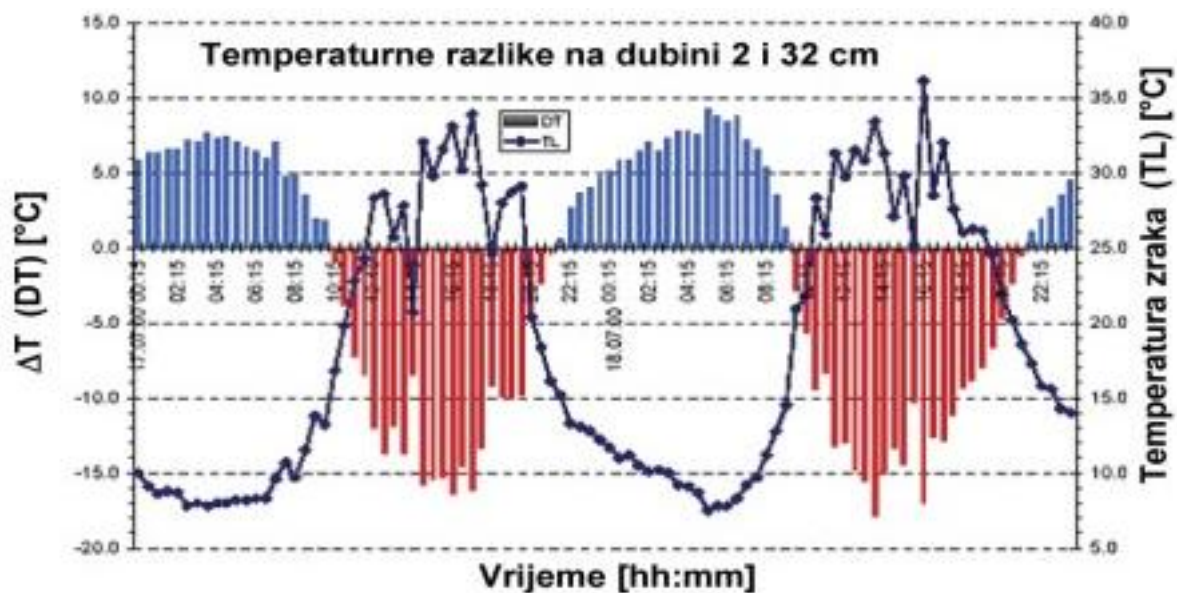
Slika 18. Udarne rupe na površini kolnika [1]

U tablici 2. dan je prikaz klasifikacije oštećenja na osnovu veličine i oblika oštećenja, kao i pristup stanju procesa oštećenja i potencijalnom uzročniku [1].

Tablica 2. Detekcija skrivenih oštećenja IC termografijom [1]

Oštećenje	Pokazatelji na površini	Dimenzije u horizontalnoj ravnini	Stanje procesa oštećivanja	Vjerojatni uzrok
Mali mjehuri	ne postoji	mm do cm	još uvijek u tijeku	vodene pare ili plin (+)
Šupljine	ne postoji	mm do cm	nije moguće odrediti	nakupljanje vlage; plinovi
Mjehuri	postoji	cm	može biti dovršen	vodene pare ili plin (+)
Odvajanja	ne postoji	cm ili više	nije moguće odrediti	Problem povezanosti slojeva (+)
(+) loša zbijenost ili nehomogena raspodjela temperature tijekom asfaltiranja				

Pasivna termografija se koristi kao nerazorna metoda otkrivanja skrivenih nedostatak i/ili oštećenja kolničke konstrukcije prometnice. No, pomoću nje nije moguće locirati pukotine s donje strane sloja, to jest one pukotine koje nisu došle do površine, niti izmjeriti dubinu na kojoj se pojavljuju oštećenja. Oštećenja koja uzrokuju anomalije u raspodjeli temperature asfaltnih kolnika, odnosno dovode do prekida toplinskog toka, moguće je identificirati pomoću termovizijskih kamera. Kako bi informacije dobivene termalnim snimanjem bile točne, u obzir se moraju uzeti strana tijela (mrlje od boja ili ulja, mase za brtvljenje spojeva, zakrpe) koja se nalaze na površini kolnika jer daju lažnu temperaturnu sliku kolnika. Tijekom interpretacije rezultata, termogrami se uspoređuju s fotografijama mjerne površine kolnika. Na kolniku se pojavljuju uobičajene pojave poput zakrpa, sjena stabala, horizontalne signalizacije, šahtova i drugi koji također uzrokuju anomalije na termogramima. Temperatura kolnika ovisi o nizu parametara koje je potrebno uzeti u obzir prilikom mjerenja, neki od njih su položaj Sunca, geografski položaj, optička svojstva kolnika itd. Zbog nemogućnosti osiguranja usklađenog grijanja i hlađenja kolničkih konstrukcija potrebno je odrediti efektivnu temperaturu kolnika koja služi za određivanje optimalnog vremena mjerenja kolnika. Na niže navedenom grafikonu (slika 19) prikazane su periodične promjene smjera s obzirom na temperaturni gradijent [1].



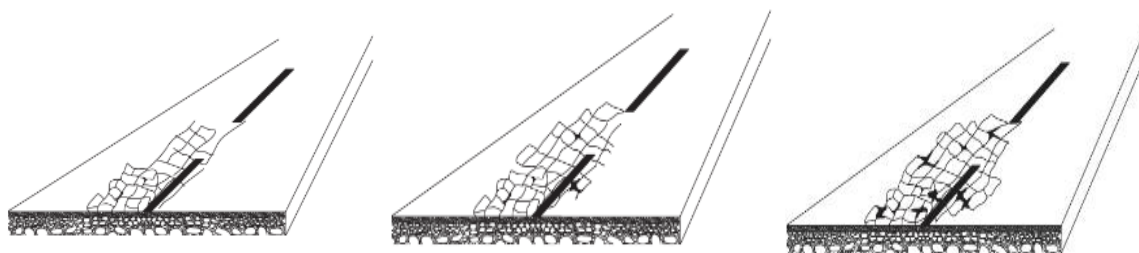
Slika 19. Temperaturni gradijent temperature zraka i razlike temperature [1]

Plava boja, u smjeru od najnižeg sloja prema površini kolnika, označava negativan temperaturni gradijent koji se javlja tijekom noći do prvih jutarnjih sati. Ostali dio dana javlja se pozitivni temperaturni gradijent označen crvenom bojom, a smjer je od površine kolnika prema dubljim slojevima. Na osnovu takve raspodjele temperature daju se preporuke za odgovarajuće vrijeme provedbe termalnih snimanja. Postoje različita razmišljanja oko optimalnog vremena provedbe termalnog snimanja s ciljem otkrivanja oštećenja kolničke konstrukcije, pa tako jedni tvrde da je optimalno vrijeme između 11:00 i 18:00 sati kada temperaturna razlika u području diskontinuiteta i u području neoštećenog materijala doseže maksimalnu vrijednost. Drugi tvrde da je optimalno vrijeme između 8:00 i 15:00 sati i 20:00 i 4:00 poslije ponoći. Većina daje prednost mjerenju u poslijepodnevnim satima kada dolazi do hlađenja površine kolnika. Provođenje mjerenja tijekom zimskog razdoblja nije efikasno jer je razina solarnog zračenja niska, a temperaturne razlike između oštećenih i neoštećenih dijelova su minimalne te ih je teško uočiti na termogramu. Termalno snimanje je poželjno provoditi tijekom ljetnog razdoblja kada temperaturne razlike između zraka i kolnika dosežu i do 20°C. Infracrvena termografija se upotrebljava za preventivno održavanje kolničkih konstrukcija, odnosno prije nego mali mjehuri prerastu u veće uzrokujući zakrivljenost površine [1].

Pukotine na površini kolnika mogu nastati od naprezanja osovinskih opterećenja, promjene temperatura u asfaltnom sloju i uslijed promjene temperature i vlage u podlozi. Pri odabiru odgovarajućih mjera sanacije potrebno je poznavati vrstu pukotine, a razlikujemo sedam vrsta pukotina koje se pojavljuju u asfaltnim kolnicima [1, 23].

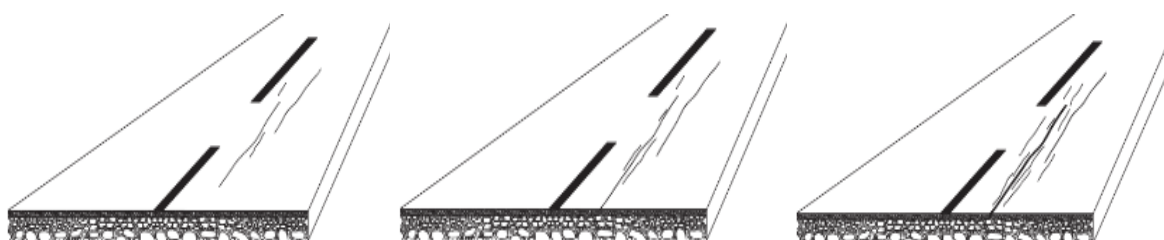
Mrežaste pukotine, ili poznatije kao aligatorsko pucanje (slika 20), predstavljaju isprepletene, međusobno povezane pukotine koje površinu kolnika razdjeljuju u niz malih

poligona, tvoreći tako uzorak sličan mreži. Ova vrsta pukotina može se podijeliti na tri stupnja oštećenja; S1 predstavlja uske pukotine koje površinu dijele u poligone, stupanj S2 čine uznapredovale pukotine tj. šire mrežaste pukotine sa započetim lomljenjem vrhova i na kraju stupanj S3 kod kojeg su poligonalni komadi djelomično slobodni, labavi i razlomljeni. Pojava mrežastih pukotina je učestalija u području tragova kotača vozila, no nerijetko zahvaćaju i čitavu površinu kolnika. Nastaju iz više razloga, a neki od njih su: premala debljina slojeva kolničke konstrukcije, loša odvodnja, uporaba materijala slabije kvalitete, niska razina otpornosti na smrzavanje nosivih slojeva i mnogi drugi [24].



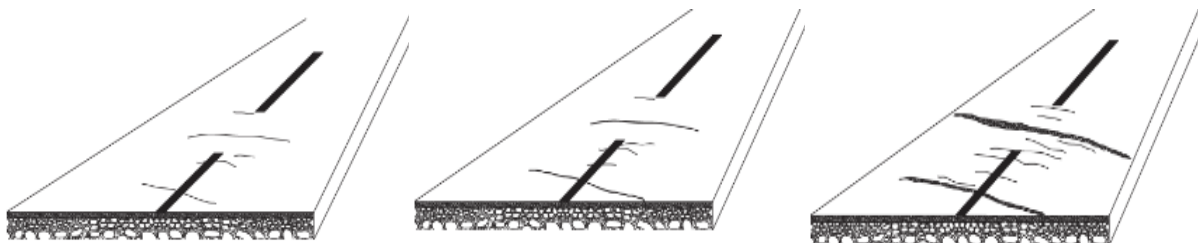
Slika 20. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja mrežastih pukotina [24]

Uzdužne se pukotine pružaju paralelno s osi ceste, kako je i prikazano na slici 21. Mogu se pojaviti kao duge pojedinačne pukotine ili kao niz kraćih međusobno paralelnih pukotina. Nastaju uslijed djelovanja teških prometnih vozila u periodu najmanje nosivosti kolnika, zbog nejednolike nosivosti slojeva, neujednačene zbijenosti materijala i diferencijalnog slijeganja posteljice i nosivog sloja, te neodgovarajuće temperature bitumenske mješavine pri zbijanju kao i korištenjem neadekvatnih sredstava za zbijanje. Uzdužne pukotine nakon nekog vremena mogu uzrokovati pojavu sekundarnih paralelnih pukotina, mrežastih pukotina i nastanka udarnih rupa uslijed djelovanja mraza, vode i soli za posipanje u zimskim uvjetima. Kao i kod mrežastih pukotina, postoje tri stupnja oštećenja gdje S1 predstavlja glavnu pukotinu širine  $< 2$  mm, S2 je uznapredovali stupanj oštećenja, a širina glavne pukotine iznosi od 2 do 10 mm, te je moguća pojava manjih sekundarnih paralelnih pukotina. S3 predstavlja najteži oblik oštećenja, pojavljuje se veći broj sekundarnih paralelnih pukotina, započinje mrvljenje rubova glavne pukotine čija širina iznosi  $> 10$  mm [24].



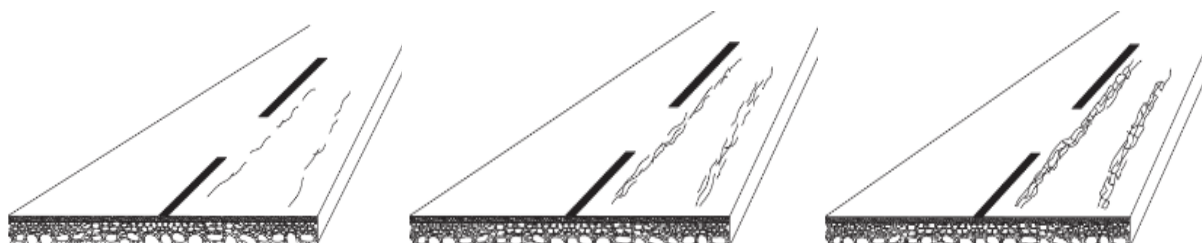
Slika 21. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja uzdužnih pukotina [24]

Poprečne pukotine se pružaju poprečno na os ceste (slika 22), nastaju pod utjecajem niskih temperatura, promjene volumena tla zbog gubitka vlage u posteljici koja sadrži visok udio glinovitih čestica, zbog gubitka kontinuiteta u nosivosti posteljice npr. na mjestima prijelaza ili propusta uslijed nedovoljne visine nadsloja, oštećenja od raznih instalacija ispod površine kolnika i slično. Uslijed uznapredovali poprečnih pukotina dolazi do grananja glavne pukotine tvoreći mrežaste pukotine, stvaranja paralelne sekundarne pukotine ili nastanka udarnih rupa. Karakteristike sva tri stupnja oštećenja su jednake kao i kod uzdužnih pukotina [24].



Slika 22. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja poprečnih pukotina [24]

Pukotine u tragovima kotača (slika 23), kako im i ime kaže, najčešće se javljaju u tragovima kotača a nastaju uslijed zamora materijala kolnika. Osim zamora materijala mogu nastati zbog neodgovarajuće debljine slojeva kolničke konstrukcije, loše odvodnje kolnika i posteljice te niske razine otpornosti na smrzavanje. Pukotine u tragovima kotača dovode do nastanka udarnih rupa, raspadanja asfaltnog zastora u tragu kotača i širenja na površine zahvaćene mrežastim pukotinama. Stupanj S1 čini jedna ili više uzdužnih međusobno paralelnih nepovezanih pukotina, formiranjem mrežastih pukotina i mrvljenjem vrhova poligona nastupa stupanj oštećenja S2, a S3 karakteriziraju gusto formirane mrežaste pukotine s djelomično labavim, slobodnim i razlomljenim poligonalnim komadima [24].

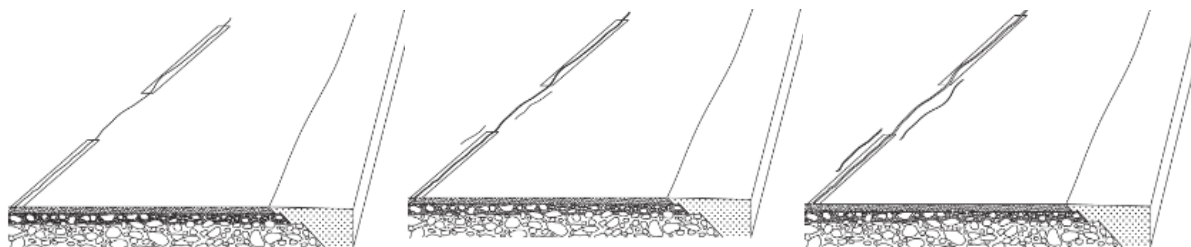


Slika 23. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja pukotina u tragovima kotača [24]

Slika 24 prikazuje otvorene radne spojeve koji nastaju otvaranjem habajućeg spoja u obliku pravolinijske pukotine, jasnih rubova na uzdužnim i/ili poprečnim radnim spojevima. Također mogu nastati pri lošem brtvljenju spojeva, lošoj obradi radnih spojeva prilikom popravaka kolnika te djelovanju segregacije asfaltne mješavine. Pukotine mogu uznapredovati uslijed prodora površinske vode, djelovanja mraza i prometa, a uzrokuju pojavu sekundarnih pukotina duž radnog spoja, dolazi do mrvljenja rubova radnih spojeva i nastanka udarnih rupa. Pukotine na radnim spojevima su u pravilu pravolinijske s jasnim rubovima, dok su



uzdužne i poprečne pukotine vijugave s zupčastom strukturom rubova. Ukoliko je širina radnog spoja <5 mm radi se od stupnju oštećenja S1, S2 karakterizira širina radnog spoja od 5 do 10 mm s nastajanjem početnih sekundarnih pukotina i mrvljenja rubova, dok širina radnog spoja > 10 mm čini stupanj oštećenja S3 s uznapredovanim sekundarnim pukotinama te dolazi do otkidanja rubova radnih spojeva [24].



Slika 24. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja u otvorenim radnim spojevima [24]

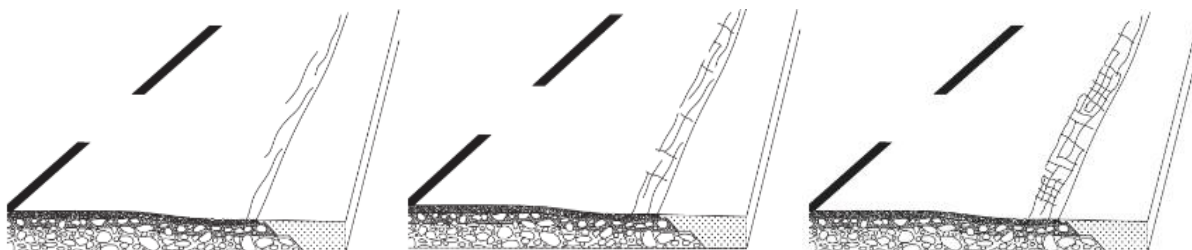
Pukotine uslijed slijeganja mogu biti pojedinačne ili niz koncentrično razmještenih lučnih pukotina koje nastaju zbog velike količine prometa u različitim smjerovima i pojavljuju se po rubu klizne plohe, uz vidljivu denivelaciju površine kolnika (slika 25). Također se njihov nastanak povezuje s loše projektiranom odvodnjom i prestrmih nagiba pokosa nasipa. Nastankom ove vrste pukotina može se očekivati prodiranje vode u pukotine i formiranje klizne plohe, a samim povećanjem klizne plohe, i do pojave klizanja. Lučne pukotine bez denivelacije kolnika su karakteristične za stupanj oštećenja S1, uočljive lučne pukotine s stepenasto deniveliranom površinom kolnikom čine stupanj oštećenja S2, a stupanj oštećenja S3 nastupa kod značajnih lučnih pukotina s stepenasto deniveliranom površinom kolnika uz vidljivi pomak formirane klizne plohe [24].



Slika 25. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja za pukotine uslijed slijeganja [24]

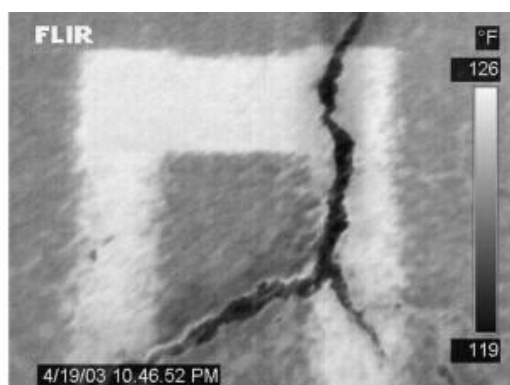
Rubne se pukotine pružaju paralelno s rubom kolnika i pojavljuju se unutar 50 cm od ruba kolnika (slika 26) zbog nepravilne izvedbe i neodržavanja bankina. Djelovanje smrzavanja i odmrzavanja, preuzak kolnik, slaba odvodnja i nekvalitetna izvedba ruba kolnika su samo još neki od mogućih uzroka nastanka rubnih pukotina. Pri pojavi uzdužnih pukotina nastaje stupanj oštećenja S1, njihovim napredovanjem uz pojavu i poprečnih pukotina nastupa stupanj oštećenja S2, a formiranjem mreže pukotina na rubu kolnika dolazi do stupnja oštećenja S3. Napredovanjem rubnih pukotina dolazi do njihovog širenja prema sredini

kolnika, nastanka udarnih rupa i komadanjem asfaltnog zastora uslijed slijeganja ruba kolnika [24].



Slika 26. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja rubnih pukotina [24]

Za uspješnu primjenu infracrvene termografije pri detekciji asfaltnih pukotina razvijen je postupak snimanja u koji su uključeni neki od bitnijih parametara. Parametri koji su korišteni za potrebe ovog istraživanja su sljedeći: infracrveno snimanje tijekom dana i noći, snimanje u vlažnim i suhim uvjetima, snimanje asfaltnih spojeva, betonskih kolnika u odnosu na asfaltne, snimanje čistih pukotina u odnosu na ispunjene i automatizirana detekcija pukotina. Infracrveno snimanje tijekom dana i noći pokazalo je kako snimke snimljene tijekom noći i prije izlaska sunca daju odlične rezultate (slika 27) u odnosu na slike snimljene tijekom dana [25].



Slika 27. Termalno snimanje tijekom noći [25]

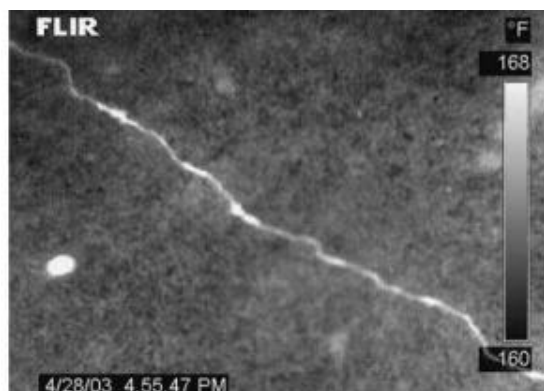
Za vrijeme snimanja temperatura je varirala između  $18^{\circ}\text{C}$  i  $37^{\circ}\text{C}$ , a promjene u hladu za vrijeme dana uzrokovale su hlađenje u nekim dijelovima što je utjecalo na kvalitetu detekcije pukotina. Temperatura pukotina bila je niža za oko  $6^{\circ}\text{C}$  u odnosu na temperaturu sloja. Ukoliko se snimanje mora obaviti za vrijeme dana preporučuje se stvaranje hlada na području snimanja kolnika kako bi se izbjegli problemi prilikom detekcije pukotina. Za vrijeme snimanja kolnik mora biti u potpunosti suh, vlažna mjesta dovode do netočne detekcije pukotina posebice kada se koristi softver za automatsku detekciju pukotina. Kiša, odnosno mokra mjesta uzrokuju potpuni gubitak temperaturnih razlika i razlika u emitiranju što dovodi do mutnih fotografija. Diskontinuiteti u asfaltu poput spojeva uzrokuju promjene toplinskih svojstava koja se mogu uspješno detektirati pomoću termovizijskih kamera. Na

slici 28 a) prikazana je površina kolnika 2 tjedna nakon izgradnje, a slika 38 b) prikazuje termogram iste površine kolnika na kojoj je jasno prikazano mjesto spoja. Ovakav pristup snimanju bi se mogao u budućnosti iskoristiti za detekciju spojeva prilikom ugradnje bitumenske mješavine i potencijalnog mjesta nastanka pukotina na tim mjestima tijekom uporabnog vijeka prometnice [25].



Slika 28. Prikaz spoja a) digitalnom kamerom i b) termalnom kamerom [25]

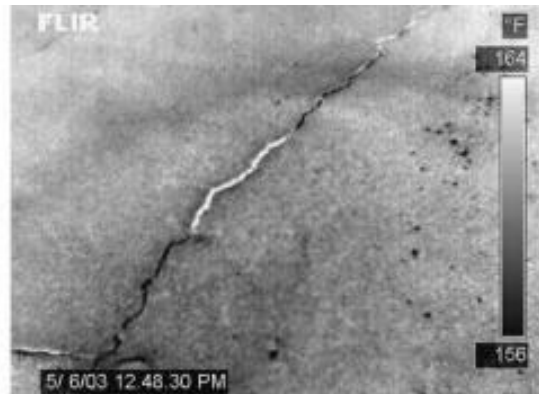
Također postoje razlike ukoliko se termalno snimanje obavlja na betonskom ili asfaltnom kolniku. Betonski (kruti) kolnik je pokazao jasnije pukotine (slika 29) pod određenim dnevnim zagrijavanjem u odnosu na asfaltni (fleksibilni) kolnik. Zaključeno je kako se zbog homogenosti betonskih kolnika i razlika u temperaturi i emisivnosti uzrokovanih pukotinama postiže veći utjecaj na termalno snimanje [25].



Slika 29. Termogram pukotina na betonskom (krutom) kolniku [25]

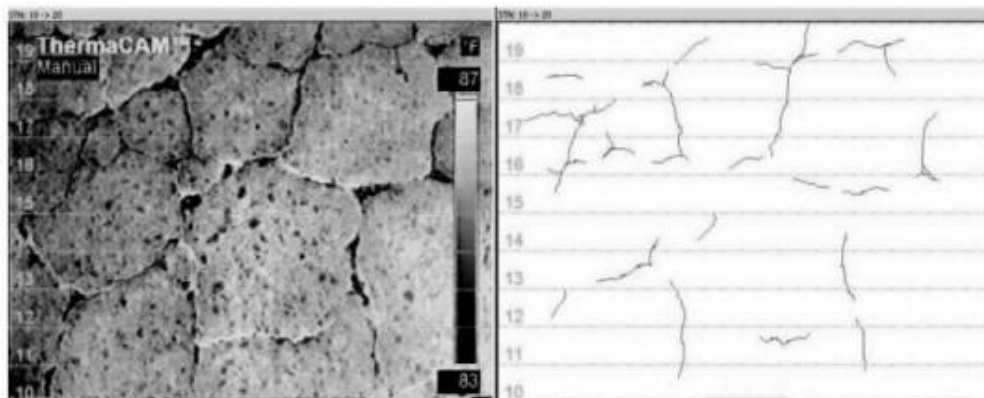
Pukotine ispunjene prašinom i krhotinama su slabije uočljive na termogramu u odnosu na pukotine bez ispune. Ovakvo saznanje je olakšalo snimanje pukotina jer kako je prikazano na slici 30 središnji dio pukotine je očišćen prije termalnog snimanja te se jasno vidi kao svjetliji, topliji dio. Neka od objašnjenja su ta da materijal koji ispunjava pukotinu djeluje kao izolator te je temperatura površine u okolini pukotine bliža temperaturi zraka. Suprotno

tome, temperatura očišćene pukotine je bliža ukupnoj temperaturi kolnika koja je i nešto viša od temperature njegove površine [25].



Slika 30. Termogram pukotine s očišćenim središnjim dijelom [25]

Prilikom istraživanja korišten je WiseCrax, programski paket za otkrivanje pukotina i za obradu termogram prikazan na slici 31. Primjena ovakvog računalnog programa omogućuje jednostavniju detekciju pukotina u odnosu na detekciju pukotina fotografijama snimljenih digitalnim fotoaparatom visoke rezolucije. Moguće je detektirati pukotine širine manje od 1 mm, a razlog je u tome što termogram prikazuju promjene temperature i emisivnosti, dok tradicionalne slike prikazuju promjene u boji. Prikupljanje podataka snimanjem s zadovoljavajućom rezolucijom termograma moguće je provoditi s brzinom do 40 km/h [25].



Slika 31. Termogram pukotina detektiranih WiseCrax softverom [25]

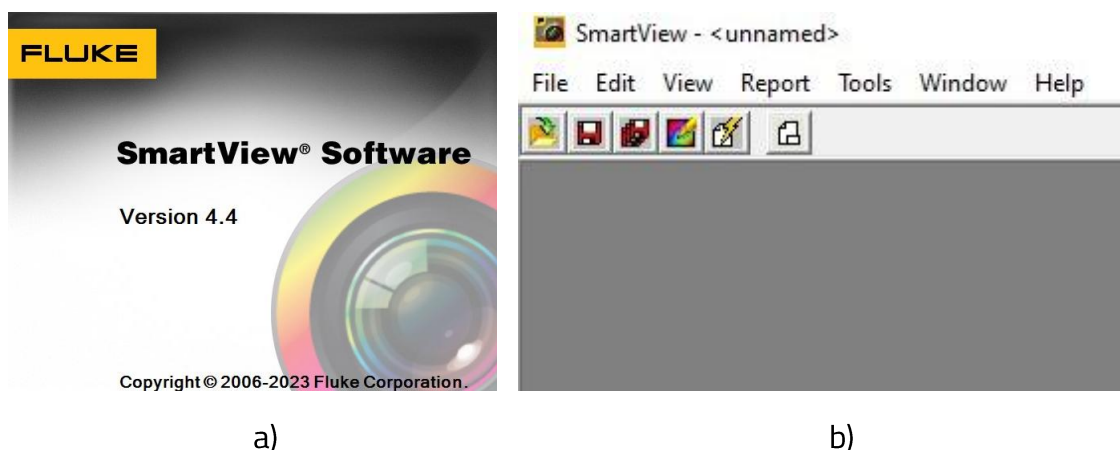
## 5 PRIMJERI IZ PRAKSE

Za izradu ovog diplomskog rada obavljena su termovizijska mjerenja na autocesti A2 i A3, s pomoću termovizijske kamere FLUKE TiS45. S rezolucijom 160x120 piksela i kutom gledanja 35,7° x 26,8°, moguće je snimiti slike visoke kvalitete i pohraniti ih na internu memoriju kamere ili memorijsku karticu. Fluke TiS45 omogućava dijeljenje slika u stvarnom vremenu čime se značajno može uštedjeti vrijeme stvaranjem i slanjem izvještaja s terena. Također, način rada slike u slici omogućava postavljanje infracrvenog prozora na digitalnu sliku čime se olakšava naglašavanje točke interesa, s minimalnom udaljenošću od objekta u iznosu od 15 cm. Opseg mjernih temperatura iznosi od -20°C do +350°C, s termalnom osjetljivošću od  $\leq 0,09^\circ\text{C}$  pri temperaturi cilja od 30°C (90 mK). Sastavni dijelovi navedene termovizijske kamere prikazani su u tablici 3 [26].

Tablica 3. Sastavni dijelovi termovizijske kamere FLUKE TiS45 [26]

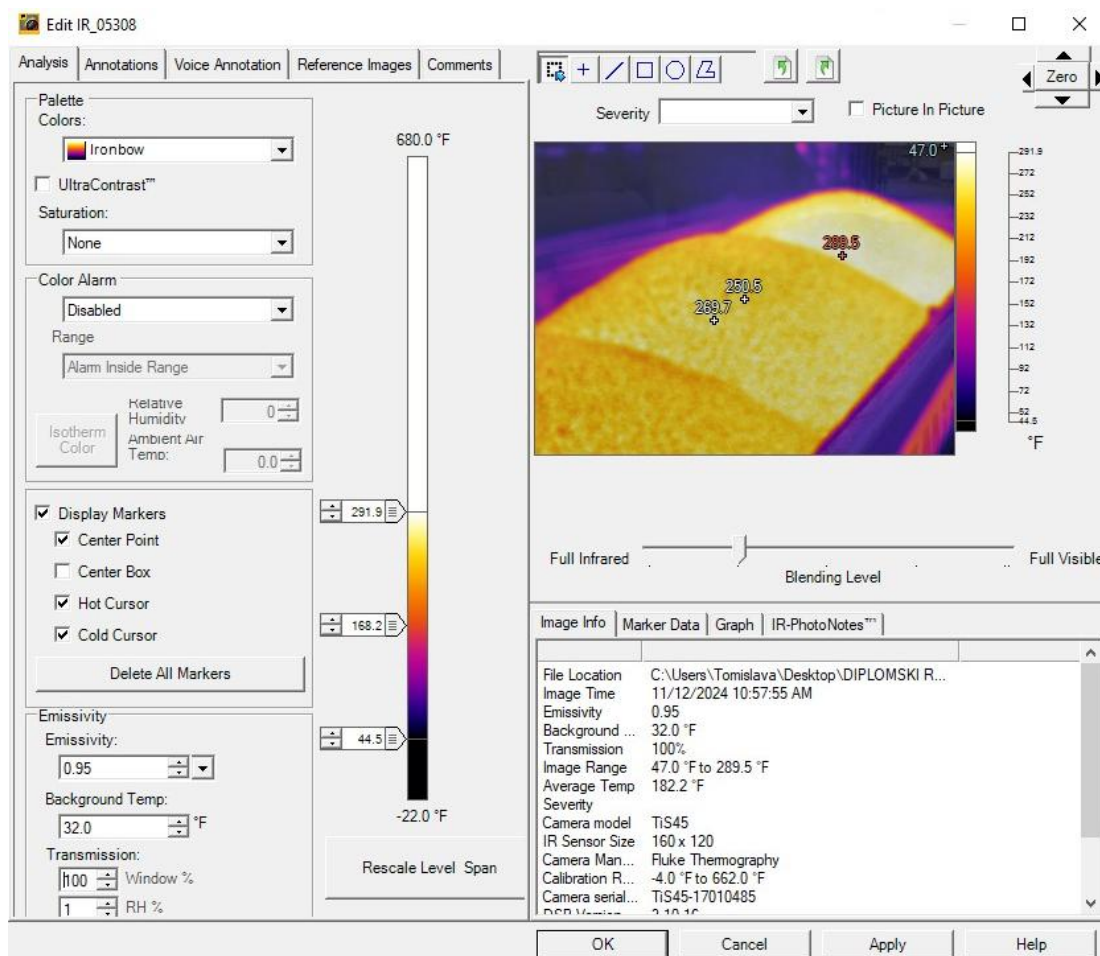
točka	opis
1	Tipke sa strelicama
2	Tipke funkcija (F1, F2 i F3)
3	Zaslon
4	Gumb za prikaz memorije
5	Uključivanje/isključivanje i kalibriranje
6	Sidro za traku za ruku
7	USB priključak
8	Utor za memorijsku karticu
9	AC adapter/vanjska naponska utičnica
10	Otvoreni lećasti pokrov
11	Objektiv infracrvene kamere
12	Objektiv fotoaparata s vizualnim svjetlom
13	Laserski pokazivač
14	Sekundarni okidač
15	Primarni okidač
16	Ručno upravljanje fokusom
17	Litij-ionska pametna baterija
18	AC napajanje sa mrežnim adapterima
19	Dvostruko postolje za punjenje baterije

Za obradu podataka snimljenih na terenu koristio se programski softver Fluke SmartView®, Version 4.4 (slika 32 a)). Fluke SmartView je napredni softver koji služi za obradu i analizu termograma snimljenih termovizijskom kamerom Fluke. Softver je vrlo jednostavan za korištenje, a korisnicima omogućava preuzimanje, analiziranje, uređivanje i kreiranje izvještaja važnijih podataka s termograma . Pri pokretanju programa otvara se glavni izbornik koji sadrži traku naslova i izbornik (slika 32 b)). U programu istovremeno može biti otvoreno na desete termograma, a na trenutno aktivnom termogramu se primjenjuju željene radnje.



Slika 32. Programski softver FLUKE za obradu podataka

Osnovne mogućnosti (slika 33) uključuju preuzimanje i analizu termograma, uključujući promjenu boja, temperaturnih paleta i mjerenja, moguće je dodavati tekstualne i zvučne bilješke i kategorije oznaka poput lokacije, datuma ili bilo kojih drugih podataka relevantnih za analizu. Softver omogućuje unos emisivnosti materijala za što preciznija mjerenja, nudi alate za uređivanje slika u vidu prilagodbe kontrasta, svjetline, oštine i boja kako bi se poboljšala vidljivost i analiza slike. Postoje i napredni alati za analizu, kao što su grafikoni temperaturnih profila, analiza temperaturnih raspona ili područja s nižim/višim temperaturama.



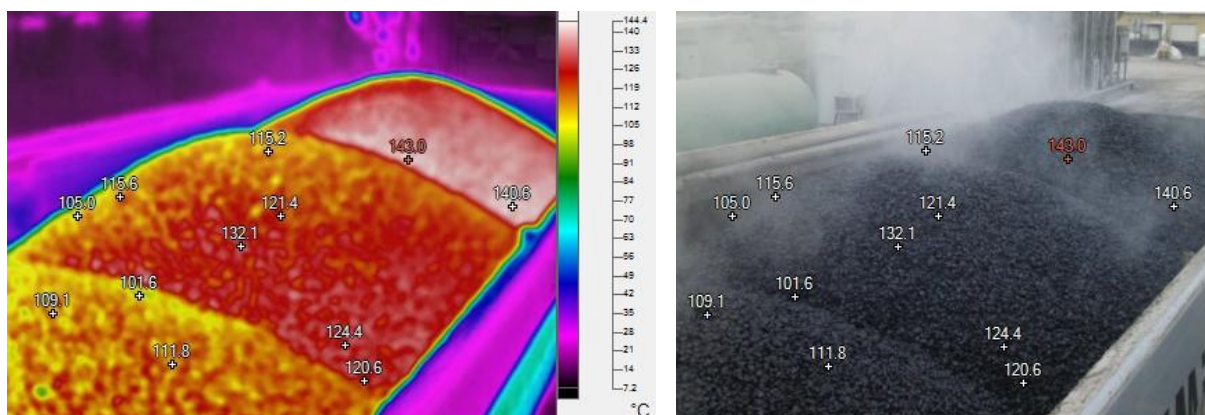
Slika 33. Prozor za konfiguraciju podataka termograma

## 5.1 Termalno snimanje na Lokaciji 1

Prva termovizijska mjerenja na terenu obavila su se dana 12. studenoga 2024. godine, na autocesti A3 Bregana - Lipovac. Temperatura zraka iznosila je 5°C, a vrijeme je bilo oblačno bez vjetera. Ugradnja bitumenske mješavine je bila na 183 km u smjeru Lipovca. Temperatura podloge je iznosila 8°C, a asfaltiranje se izvodilo u punoj širini gdje su se vozni i pretjecajni trak izvodili pomoću finišera i presipača, dok se za ugradnju bitumenske mješavine na zaustavnom traku koristio samo finišer. Mješavina SMA16 45/80-65 AG1 M1 se ugrađivala u vozni i pretjecajni trak, a u zaustavni trak ugrađivala se mješavina AC16 surf 50/70 AG4 M4 RA10. Termovizijska mjerenja na terenu su započela u 10:53 sati.

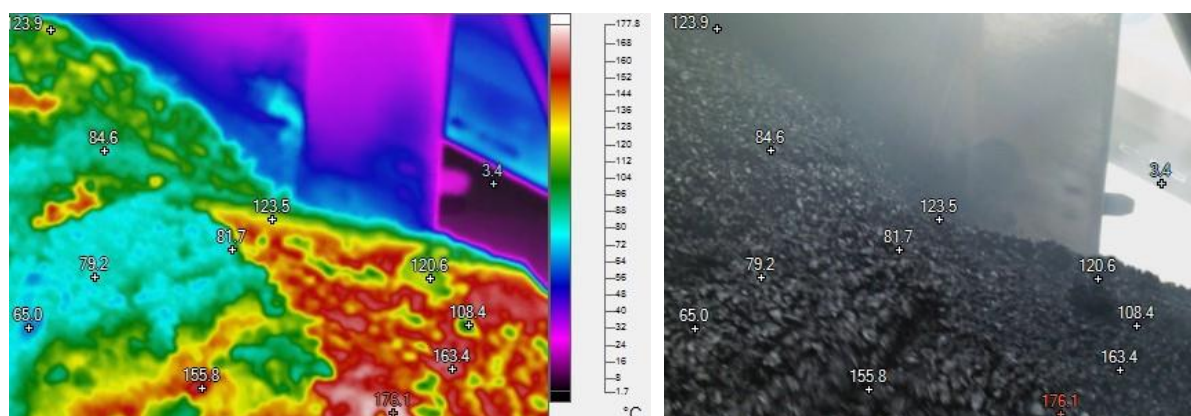
Asfaltna baza se nalazila u Kutini, gdje je temperatura zraka u 10:00 sati iznosila 5°C, a vrijeme je bilo oblačno bez vjetera. Na slici 34 prikazan je utovar bitumenske mješavine na asfaltnoj bazi, te se odmah može primijetiti nejednolika raspodjela temperature. Pravilan utovar u prijevozno sredstvo se vrši tako da krajnje šarže budu utovarene prve, a središnja šarža posljednja. Prema ovoj raspodjeli temperature možemo primijetiti kako je središnja

šarža utovarena „kao druga“, a šarža najbliža kipi kamiona je utovarena posljednja i postiže temperature i do 143°C u unutrašnjosti, dok su temperature na površini i uz rubove sanduka kamiona imale vrijednosti između 101,6°C do 132,1°C.



Slika 34. Temperaturna raspodjela na asfaltnoj bazi

Za vrijeme transporta od proizvodnog pogona do gradilišta bitumenska mješavina može doživjeti velike promjene, poput smanjenja temperature mješavine i nastanka hladne kore. Na slici 35 vidljiv je veliki temperaturni raspon bitumenske mješavine, od oko 65°C do oko 176,1°C, uzrokovan djelovanjem nižih temperatura okoliša.

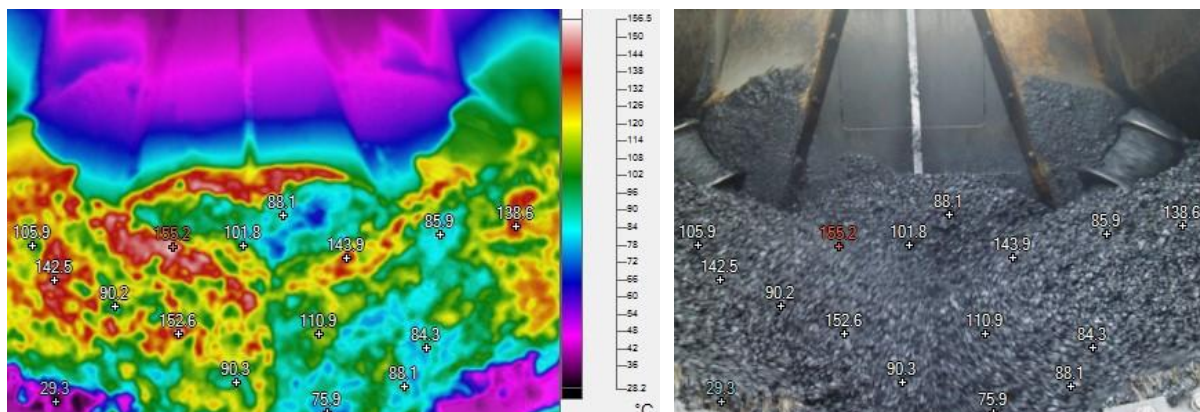


Slika 35. Temperaturna raspodjela pri pretovaru iz kamiona u presipač

Presipač na gradilištu u ovakvim situacijama ima vrlo važnu ulogu jer osigurava potrebnu kvalitetu bitumenske mješavine prije same ugradnje. Osim što služi za ujednačavanje temperatura, presipač ima i druge važne funkcije prilikom ugradnje, a neke od njih su kontrola vlažnosti i konzistencije, gdje je moguće, u slučaju previše suhe ili vlažne bitumenske mješavine, na presipaču dodati potrebne količine bitumena ili vode za dobivanje željene konzistencije. Također uslijed odvajanja agregata od bitumena, ponovnim miješanjem moguće je dobiti homogenu mješavinu. Miješanjem toplije i hladnije mješavine (slika 36) pokušava se postići optimalna temperatura za ugradnju mješavine, koja iznosi između 140°C i 160°C za polimerno modificirani HMA, koristeći grijače i druge sustave kontrole temperature u presipaču. Trenutne temperature bitumenske mješavine su znatno

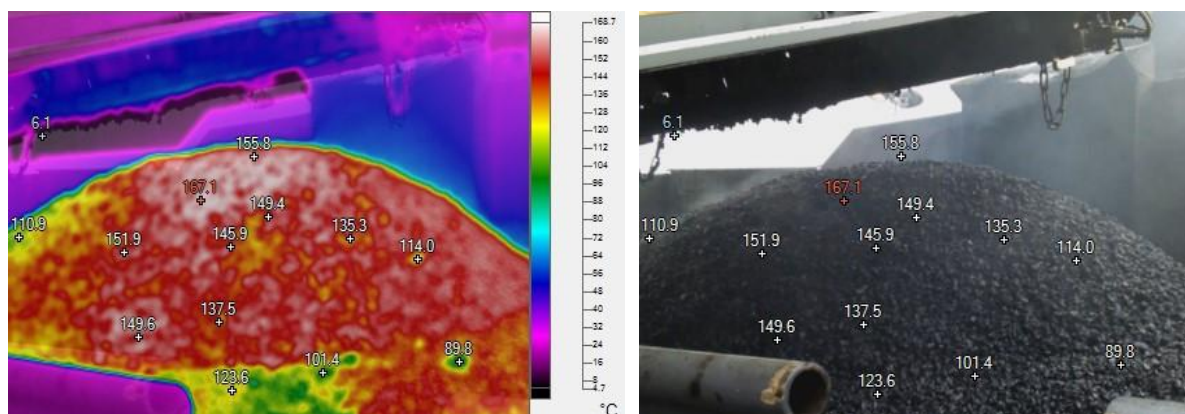


niže od zahtijevane temperature, te u ovom trenutku najniža temperatura iznosi 75,9°C dok najviša temperatura iznosi 155,2°C.



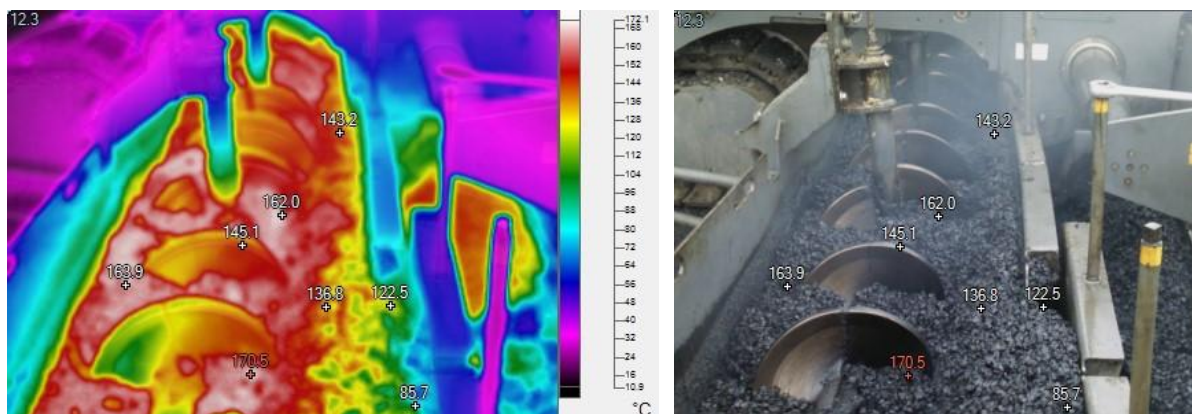
Slika 36. Temperaturna raspodjela u sanduku presipača

Na slici 37 imamo relativno ujednačenje temperatura u sanduku finišera zahvaljujući ponovnom miješanju bitumsene mješavine u presipaču, no i dalje se pojavljuju niže temperature (89,8°C, 101,4°C i 114,0°C) te daljnjim procesom prolaza mješavine kroz finišer možemo očekivati dodatno ujednačavanje temperature bitumsene mješavine.



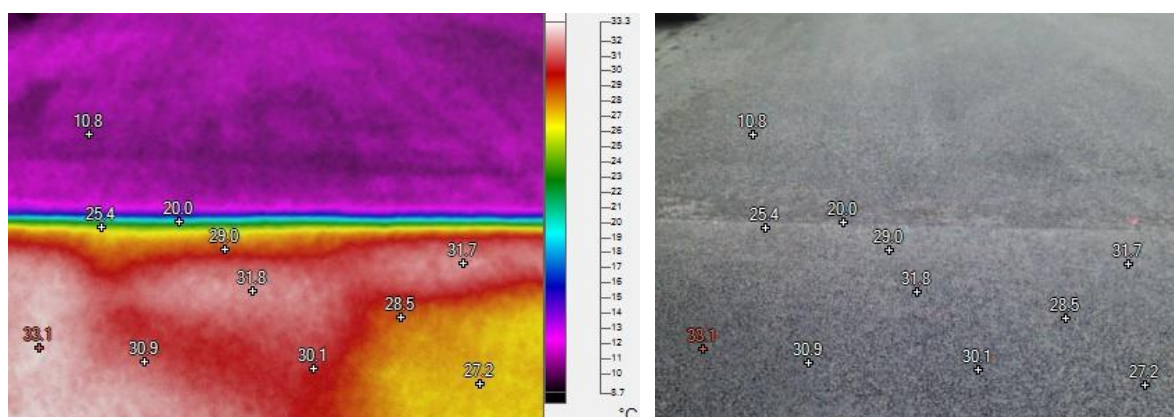
Slika 37. Temperaturna raspodjela u sanduku finišera

Na pužnici finišera (slika 38) temperatura bitumena iznosi 170,5°C, dok mješavina koja se nalazi uz rub sanduka finišera ima nižu temperaturu 122,5°C. Ovakav raspon temperatura je u granicama temperatura potrebnih za ugradnju bitumsene mješavine, te se može očekivati relativno dobro zbijanje i ugradnja bitumsene mješavine.



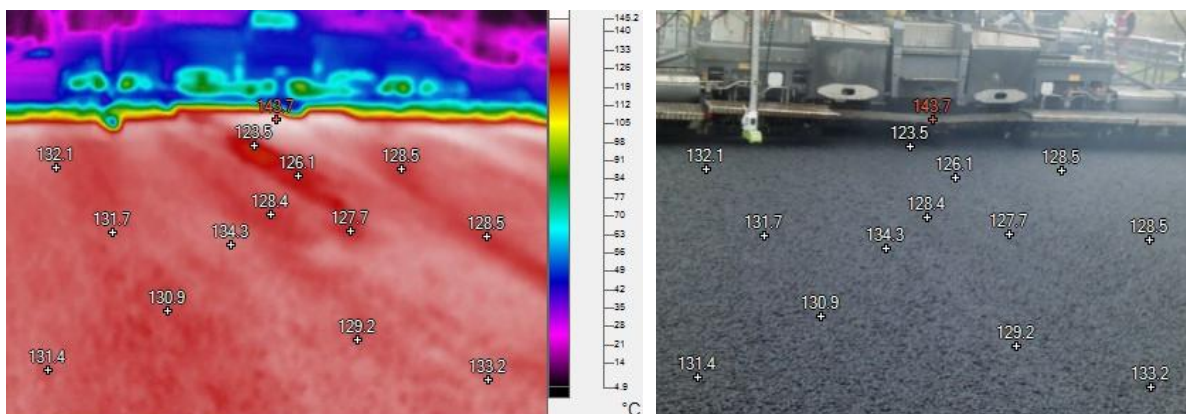
Slika 38. Temperaturna raspodjela na pužnici finišera

Polaganje bitumenske mješavine je započelo od prethodno postavljenog sloja koji je u tom trenutku imao temperaturu od 10°C. Golim okom spoj prethodno položenog i novopoloženog sloja je jedva uočljiv, dok se na termogramu da jasno primijetiti (slika 39). Temperatura na samom spoju ima vrijednost od 20°C, a ostale mjerene temperature su se kretale od 25,4°C do 33,1°C nakon zbijanja, te je time daljnje zbijanje onemogućeno.



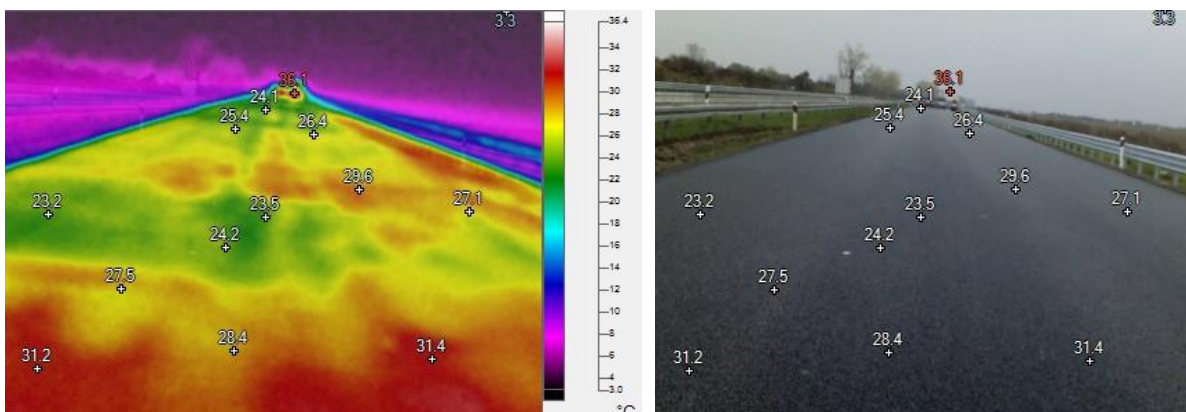
Slika 39. Temperaturna raspodjela na hladnom spoju

Na slici 40 može se uočiti hladnije područje na kolniku s temperaturom od 123,5°C. Navedena pojava predstavlja temperaturnu segregaciju koja ciklički nastaje na kolniku nakon završetka istovara i promjene kamiona. Bez obzira na pojavu temperaturne segregacije temperature neposredno iza finišera su i dalje bile znatno veće od temperature prekida zbijanja (80°C) s iznosima od 123,5°C do 143,7°C. Temperaturne razlike su bile veće od 15°C, no ovakav raspon temperatura je i više nego dovoljan za pravilno zbijanje bitumenske mješavine.



Slika 40. Temperaturna raspodjela neposredno iza finišera

Nakon ugradnje i zbijanja bitumenske mješavine kolnik je imao relativno niske temperature (ispod 32°C) koje bi onemogućile dodatno zbijanje bitumenske mješavine. Razlika između najniže i najviše izmjerene temperature iznosi 8,2°C, što pokazuje da nije došlo do pojave temperaturne segregacije prilikom ugradnje bitumenske mješavine (slika 41).



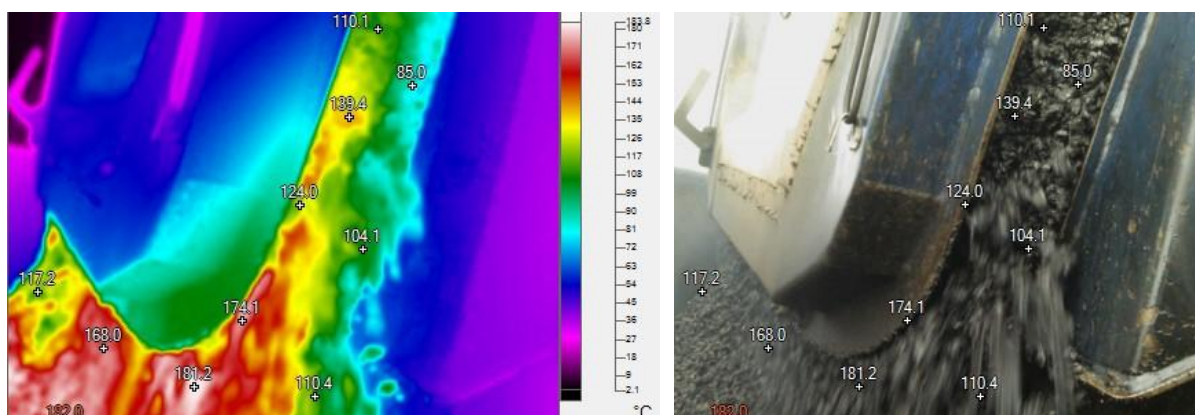
Slika 41. Temperaturna raspodjela nakon zbijanja

## 5.2 Termalno snimanje na Lokaciji 2

Drugo termovizijsko mjerenje je obavljeno dana 02. prosinca 2024. godine, u 11:15 sati, na autocesti A2 Zagreb - Macelj, dionica autoceste Zabok - Sv. Križ Začretje od stacionaže km 33+580,00 do stacionaže km 32+400,00, u smjeru Macelja. Temperatura zraka i podloge iznosila je 5°C, a bitumenska mješavina SMA11 45/80-65 AG1 M1 je ugrađena u vozni trak.

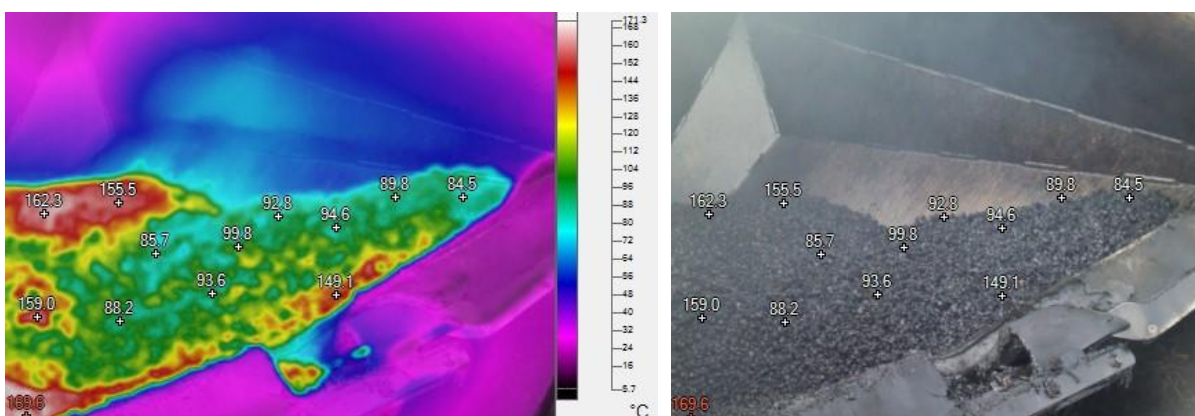
Prijevoz od asfaltne baze, smještene u Donjoj Lomnici, do gradilišta trajao je 40-50 minuta što je vrlo vjerojatno utjecalo na formiranje hladne kore. Slika 42 prikazuje raspodjelu temperature u kamionu tijekom procesa istovara u finišer, te se može primijetiti kako temperatura mješavine koja se nalazi uz rubove sanduka kamiona ima relativno nisku

vrijednost, kao i mješavina koja čini koru (85°C). Mješavina koja se nalazi bliže sredini sanduka kamiona i ispod kore doseže temperature do čak 182°C.



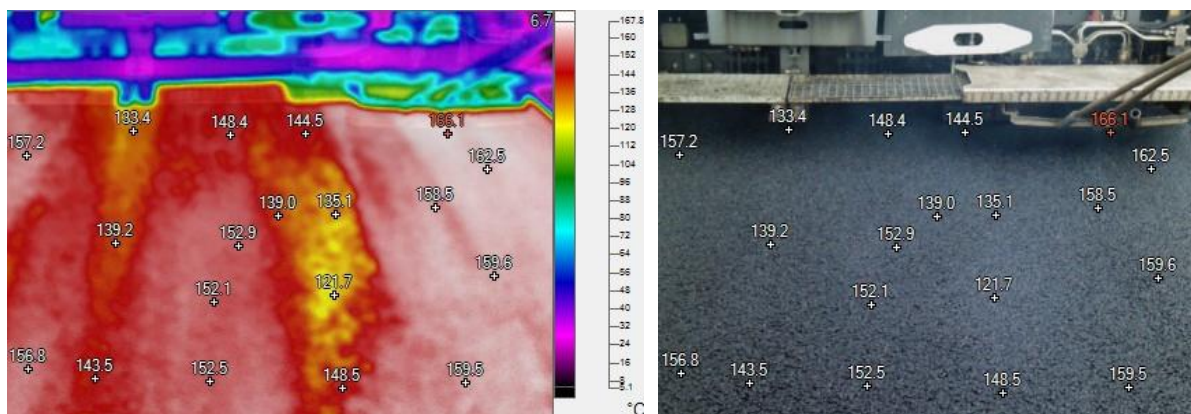
Slika 42. Temperaturna raspodjela pri istovaru u sanduk finišera

Nadalje, na bočne stranice sanduka finišera pada bitumenska mješavina koja je imala niže temperature, a takva hladnija mješavina će se posljednja i ugraditi. Iz termograma (slika 43) je vidljivo kako su pojedina područja imala iznose temperature od 84,5°C što je relativno blizu temperaturne granice zbijanja (80°C), dok su najviše temperature iznosile 169,6°C. Takva temperaturna razlika pogoduje nastanku hladnih tokova i točaka prilikom ugradnje bitumenske mješavine.



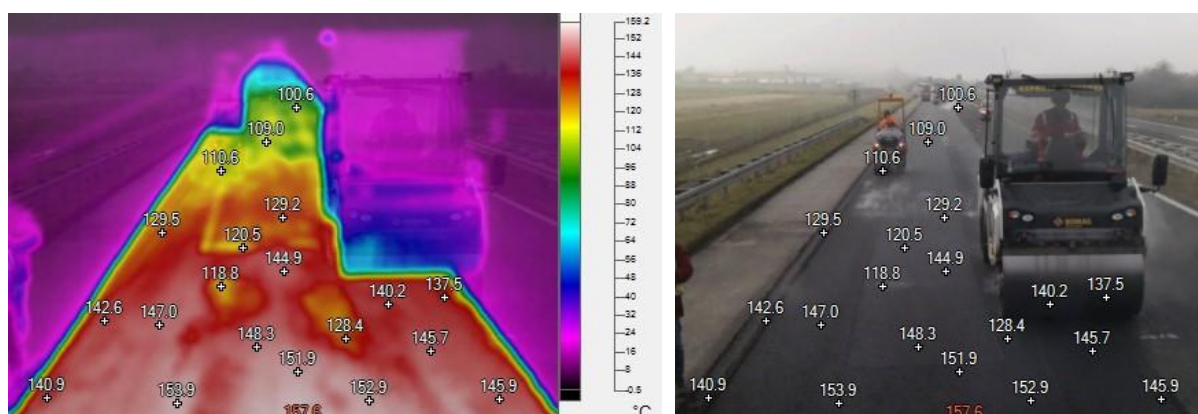
Slika 43. Temperaturna raspodjela u sanduku finišera

Mjerene temperature neposredno iza finišera (slika 44) ukazuju na vrlo ujednačenu raspodjelu temperatura bitumenske mješavine, što može ukazati na to da se u sanduku finišera hladnija mješavina dovoljno izmiješala s toplijom bitumenskom mješavinom i bez uporabe presipača. Minimalno izmjerena temperatura iznosila je 121,7°C, što je daleko veće od granične temperature od 80°C pri kojoj se može postići tražena zbijenost. Međutim, mogu se uočiti lokalne temperaturne razlike veće od 21°C, što upućuje na visoku razinu temperaturne segregacije. Na predmetnoj lokaciji može se očekivati smanjena gustoća asfaltnog sloja, a to u konačnici može rezultirati prijevremenim oštećenjem kolnika.



Slika 44. Temperaturna raspodjela neposredno iza finišera

Temperature za vrijeme zbijanja su iznosile od 100,6°C do 157,6°C (slika 45), iako je to temperaturna razlika od 57°C vidljivo je da je u pojedinim fazama zbijanja postignuta ujednačena temperatura. Lokalizirano su vidljive veće temperaturne razlike (144,9–118,8; 145,7–128,4) koje upućuju na postojanje temperaturne segregacije u vidu hladnih točaka. Predmetna lokacija predstavlja potencijalno mjesto prijevremene degradacije kolničke konstrukcije. U cilju utvrđivanja utjecaja temperaturnih razlika na kakvoću izvedenog sloja preporuka je da se na navedenim lokacijama provede mjerenje gustoće asfaltnog sloja.



Slika 45. Temperaturna raspodjela prilikom procesa zbijanja bitumenske mješavine

## 6 ZAKLJUČAK

Beskontaktost, dvodimenzionalnost, brzina i široka mogućnost primjene infracrvene termografije prednjači pred ostalim dijagnostičkim metodama. Jednostavna interpretacija termograma omogućava praćenje temperaturnih razlika koje mogu rezultirati temperaturnom segregacijom te posljedično oštećenjem kolnika i smanjenjem trajnosti. Takav pristup kontrole kvalitete ugradnje bitumenske mješavine u sloj kolničke konstrukcije predstavlja značajan napredak u cestogradnji.

Temperaturna segregacija najčešće nastaje kao posljedica hlađenja bitumenske mješavine tijekom transporta i pretovara pri čemu nastaju temperaturne razlike između rubnih i središnjih dijelova mješavine, što se odražava na mogućnost zbijanja. Mjesta na kojima je došlo do temperaturne segregacije karakterizira visok udio šupljina. Takav asfaltni kolnik je propusniji na vodu i zrak te je podložan nastanku pukotina uslijed djelovanja vode, oksidaciji, gubitku agregata tijekom uporabe. Uobičajena metoda mjerenja temperature bitumenske mješavine tijekom različitih faza ugradnje vrši se kontaktnim ili infracrvenim termometrom na nasumično odabranim lokacijama, te je moguće da područja zahvaćena s temperaturnom segregacijom ne budu uočena. Prednost infracrvene termografije je mogućnost mjerenja temperaturnih razlika bitumenske mješavine u stvarnom vremenu tijekom različitih faza ugradnje, omogućavajući identifikaciju temperaturne segregacije. Praćenjem temperatura tijekom cijelog procesa ugradnje bitumenske mješavine osigurava postizanje tražene kvalitete asfaltnog kolnika.

Pravilnim skladištenjem i transportom bitumenske mješavine, uporabom termoizoliranih kamiona, primjenom presipača, miješanjem u finišeru i optimalnim zbijanjem valjcima sprječava se nastanak temperaturne segregacije, čime se povećava trajnost kolnika smanjujući troškove održavanja. Posebnu važnost ima uloga presipača, omogućujući dodatno miješanje i izjednačavanje temperaturnih razlika prije polaganja bitumenske mješavine.

Na provedenim terenskim mjerenjima pratile su se temperaturne razlike za vrijeme utovara, transporta, pretovara i ugradnje. Na asfaltnoj bazi su uočene prve temperaturne razlike koje upućuju na početno formiranje kore, a za vrijeme transporta prelazi u uznapredovali stadij stvarajući niže temperature i uz rubove sanduka kamiona. Uporabom presipača temperaturne razlike su se smanjile na zadovoljavajuće razine potrebne za proces zbijanja te na predmetnoj lokaciji nije došlo do pojave temperaturnih razlika koje se mogu dovesti u vezu s pojavom temperaturne segregacije. Na dionici bez uporabe presipača, temperaturne

razlike su bile manjih iznosa što je pospješilo izjednačavanje temperaturnih razlika miješanjem mješavine u finišeru. Međutim, na pojedinim lokacijama su bila vidljiva mjesta većih temperaturnih razlika koja upućuju na mogućnost pojave temperaturne segregacije oblika hladnih točaka. U cilju osiguranja kvalitete preporuka je da se na ovim lokacijama provede mjerenje gustoće asfaltnog sloja.

Unatoč brojnim prednostima primjene infracrvene termografije, pri kontroli kvalitete ugradnje bitumenske mješavine, ova metoda još uvijek se ne prihvaća kao rutinska mjera. Glavni razlozi su visoki inicijalni troškovi nabave kamere i edukacije osoblja, nedostatak specifikacija kao i točnost povezivanja termograma s lokacijom na kolniku.

## 7 POPIS LITERATURE

- [1] Rukavina T., Termografija na prometnicama, *Prometnice - nove tehnologije i materijali*, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, 2010., str. 315-367
- [2] Pašagić, V.: Primjena termografije u građevinarstvu, *GRAĐEVINAR*, 2008., vol. 60, br. 12. str. 1055-1064
- [3] Andrassy M., Boras I., Švaić S.: Osnove termografije s primjenom, Kiggen, Zagreb, 2008.
- [4] web: <https://glossary.periodni.com/rjecnik.php?hr=elektromagnetski+spektar>  
(posjećeno 10.02.2025., 9:46)
- [5] Hudson R.D.: Infrared System Engineering, John Wiley and Sons. New York, 1969.
- [6] Rohsenow W. M. and Hartnett J. P.: Handbook of Heat Transfer, McGraw - Hill, 1973
- [7] Milovanović B., Radni materijali s predavanja, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- [8] Saedi H., Assessment of Compaction Temperatures on Hot Mix Asphalt (HMA) Properties, *ReseachGate*, 2018.
- [9] Zaltuom A. M., A Review Study of The Effect of Air Voids on Asphalt Pavement Life, *AIJR Proceedings of First Conference for Engineering Sciences and Technology (CEST-2018)*, Libya, vol. 2, pp.618-625, 2018.
- [10] Meghna, Shivananda P., Quality Control of Hot Mix Asphalt Review, *International Journal of Applied Engineering Research*, India, vol. 13, no. 7, pp. 169-173, 2018.
- [11] Sebesta S., Scullion T., Liu W., Harrison G., Thermal Imaging of Hot-Mix Paving Operations for Quality Assessment: State of the Practice in Texas, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Washington, no. 1946, pp. 123–129, 2006.
- [12] Cho Y., Bode T., Song J., Jeong, J., Thermography-Driven Distress Prediction from Hot Mix Asphalt Road Paving Construction, *ASCE Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 138, no. 2, pp. 206-214. 2012.
- [13] Mahoney J.P., Muench S.T., Pierce L.M., Read S.A., Jakob H, Moore R., Construction – Related Temperature Differentials in Asphalt Concrete Pavement: Identification and



- Assessment, *Transportation Research Record*, vol. 1712, no. 1 (2000), pp. 93-100, 2000.
- [14] Bocci E. i drugi, Ageing and Cooling of Hot-Mix-Asphalt during Hauling and Paving - A Laboratory and Site Study, *Sustainability*, vol.12, no. 20, 8612, 2020.
- [15] Kwon O., Choubane B., Hernando D., Allick Jr. W., Evaluation of the impact of asphalt mix segregation on pavement performance, *Transportation Research Record*, vol. 2673, no. 1 (2019), pp. 310-316, 2019.
- [16] Hrvatske ceste d.o.o., Opći tehnički uvjeti za radove na cesta: Knjiga VII – Kolnička konstrukcija, Zagreb, 2024.
- [17] Dhakal N., Elseifi M. A., Use of infrared thermography to detect thermal segregation in asphalt overlay and reflective cracking potential, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 28, no. 2, 2015.
- [18] Domitrović J., Milovanović B., Rukavina T., Infrared thermography for quality control of HMA paving – Zagreb airport case study, *Proceedings of the 17th Quantitative InfraRed Thermography Conference*, Zagreb: Energetika marketing; 2024. [pristupljeno 12.02.2025.] Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:808798>
- [19] Plati C., Georgiou P., Loizos A., Use of infrared thermography for assessing HMA paving and compaction, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 46, pp. 192-208, 2014.
- [20] Hainin M. R., Oluwasola E. A., Brow, E. R., Density profile of hot mix asphalt layer during compaction with various types of rollers and lift thickness, *Construction and Building Materials*, vol. 121, pp. 265-277, 2016.
- [21] Kim M., Phaltane P., Mohammad L. N., Elseifi M., Temperature segregation and its impact on the quality and performance of asphalt pavements, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 536–547, 2018.
- [22] Mohammad L. N., Hassan M. M., Kim M., Effects of paver stoppage on temperature segregation in asphalt pavements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 2 (2017), p. 04016200, 2017.
- [23] Rukavina T., Radni materijali s predavanja – Gospodarenje kolnicima, Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2024.
- [24] Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatske ceste d.o.o., Katalog oštećenja asfaltnih kolnika, Zagreb, 2004.

- [25] Oloufa A., Mahgoub H., Ali H., Infrared Thermography for Asphalt Crack Imaging and Automated Detection, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1889, no. 1, 2004.
- [26] web: <https://www.fluke.com/en-us/product/thermalcameras/tis45?srsltid=AfmBOorjumLnM0aJpbvjE7XHQf6wpJkzSrraBBIJNuvkr7iyGTPnO4> (posjećeno 17.2.2025., 13:30)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Elektromagnetski spektar [4].....	3
Slika 2. Koeficijent emisije ovisno o kutu mjerenja [5].....	5
Slika 3. Koeficijent emisije crnog tijela, ne sivog i sivog tijela [2].....	5
Slika 4. Raspodjela snage zračenja [2].....	6
Slika 5. Ograničenja propusnosti atmosfere [5].....	7
Slika 6. Ilustrativni prikaz mjerenja IC zračenja s termovizijskom kamerom [2].....	7
Slika 7. Princip rada termografskog sustava [5].....	8
Slika 8. Prikaz položaja instalacija u objektu - aktivna termografija [7].....	9
Slika 9. Primjena ICT prilikom održavanja sustava - pasivna termografija [7].....	10
Slika 10. Prisutnost vlage na ravnom krovu [7].....	10
Slika 11. Temperaturna raspodjela elemenata električnih instalacija - kvantitativna termografija [1].....	11
Slika 12. Segregacija agregata [12].....	14
Slika 13. Temperaturna segregacija izmjerena u kutu sanduka a) običnog i b) izoliranog kamiona [14].....	16
Slika 14. Hladna područja ugrađene bitumenske mješavine [14].....	16
Slika 15. Hladnija lokalna područja - hladne točke [1].....	17
Slika 16. Hladnija lokalna područja - hladni tokovi [1].....	18
Slika 17. Odnos otpornosti na kolotražnje i udjela šupljina [9].....	20
Slika 18. Udarne rupe na površini kolnika [1].....	23
Slika 19. Temperaturni gradijent temperature zraka i razlike temperature [1].....	25
Slika 20. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja mrežastih pukotina [24].....	26
Slika 21. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja uzdužnih pukotina [24].....	26
Slika 22. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja poprečnih pukotina [24].....	27
Slika 23. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja pukotina u tragovima kotača [24].....	27
Slika 24. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja u otvorenim radnim spojevima [24].....	28
Slika 25. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja za pukotine uslijed slijeganja [24].....	28
Slika 26. Shematski prikaz stupnjeva oštećenja rubnih pukotina [24].....	29
Slika 27. Termalno snimanje tijekom noći [25].....	29
Slika 28. Prikaz spoja a) digitalnom kamerom i b) termalnom kamerom [25].....	30
Slika 29. Termogram pukotina na betonskom (krutom) kolniku [25].....	30
Slika 30. Termogram pukotine s očišćenim središnjim dijelom [25].....	31
Slika 31. Termogram pukotina detektiranih WiseCrax softverom [25].....	31
Slika 32. Programski softver FLUKE za obradu podataka.....	33

---

Slika 33. Prozor za konfiguraciju podataka termograma .....	34
Slika 34. Temperaturna raspodjela na asfaltnoj bazi.....	35
Slika 35. Temperaturna raspodjela pri pretovaru iz kamiona u presipač.....	35
Slika 36. Temperaturna raspodjela u sanduku presipača.....	36
Slika 37. Temperaturna raspodjela u sanduku finišera.....	36
Slika 38. Temperaturna raspodjela na pužnici finišera.....	37
Slika 39. Temperaturna raspodjela na hladnom spoju .....	37
Slika 40. Temperaturna raspodjela neposredno iza finišera.....	38
Slika 41. Temperaturna raspodjela nakon zbijanja.....	38
Slika 42. Temperaturna raspodjela pri istovaru u sanduk finišera .....	39
Slika 43. Temperaturna raspodjela u sanduku finišera.....	39
Slika 44. Temperaturna raspodjela neposredno iza finišera.....	40
Slika 45. Temperaturna raspodjela prilikom procesa zbijanja bitumenske mješavine .....	40

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Udio šupljina ovisno o vrsti bitumenske mješavine [16].....	20
Tablica 2. Detekcija skrivenih oštećenja IC termografijom [1] .....	24
Tablica 3. Sastavni dijelovi termovizijske kamere FLUKE TiS45 [26] .....	32