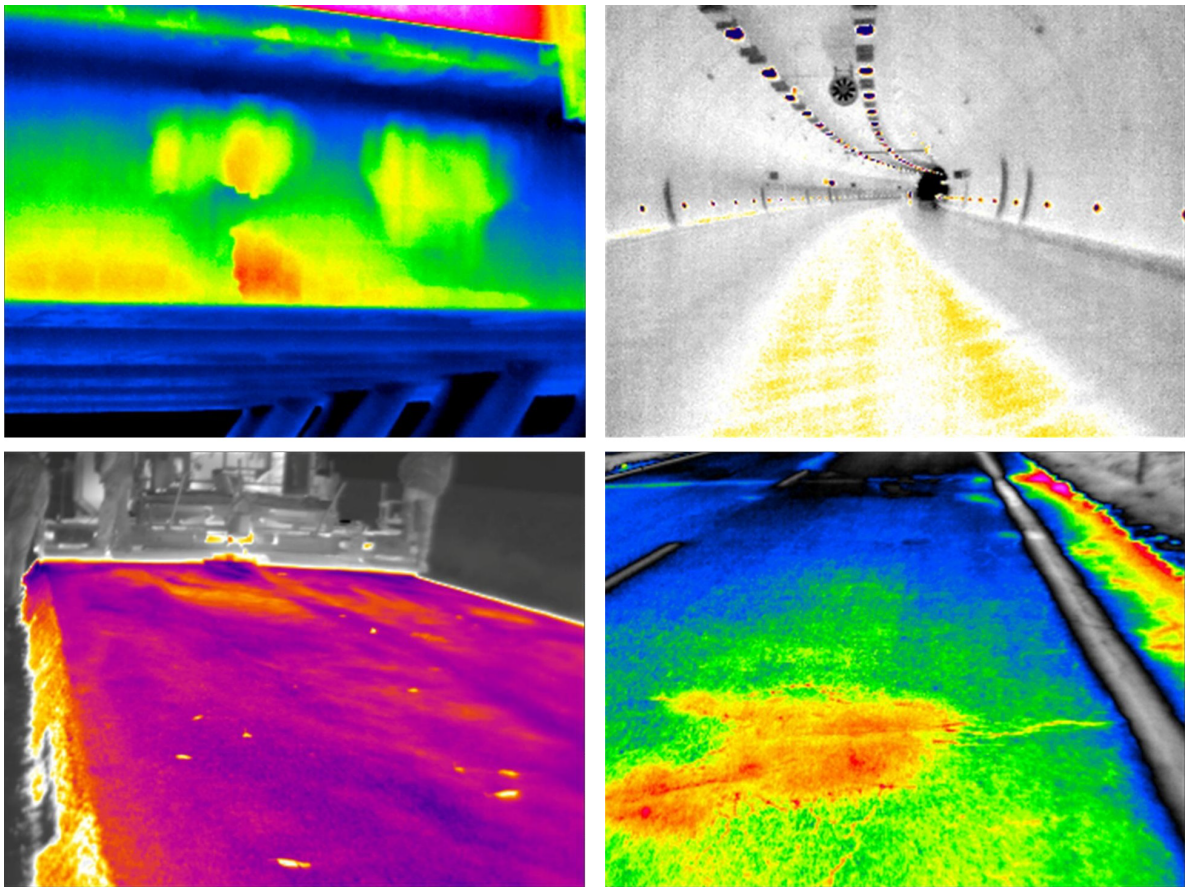
Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

METODIKA

UPLATNĚNÍ TERMOGRAFIE PŘI DIAGNOSTICE OBJEKTŮ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY



CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU

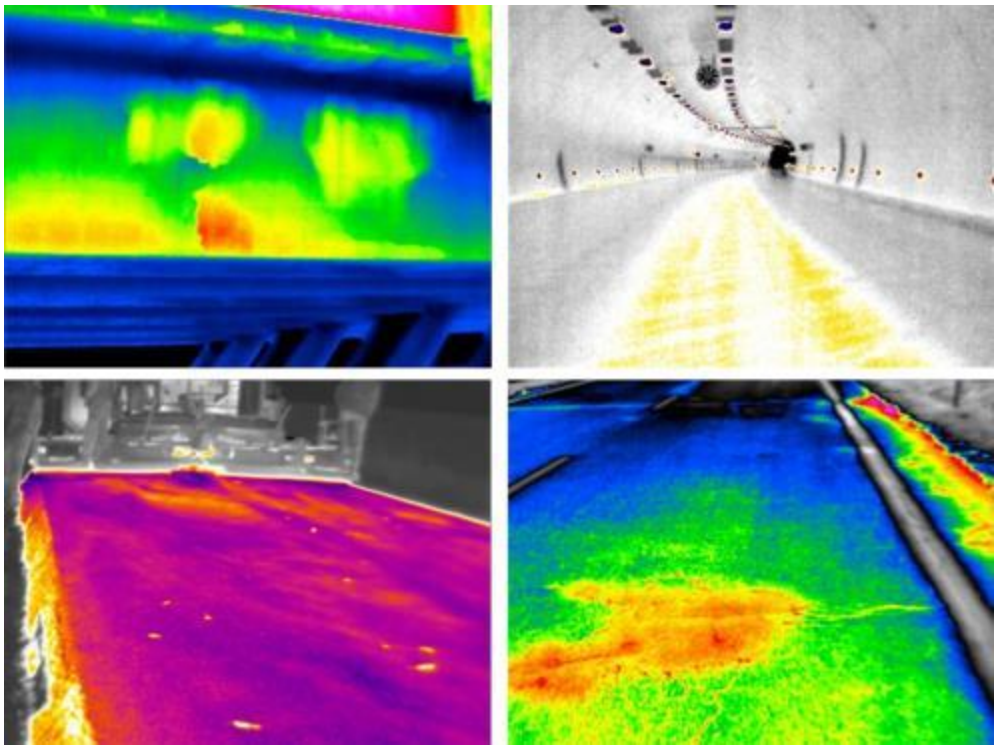
T A
Č R

Program Centra kompetence

Centrum dopravního výzkumu, v.v.i.

METODIKA

UPLATNĚNÍ TERMOGRAFIE PŘI DIAGNOSTICE OBJEKTŮ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY



CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU

T A
Č R

Program Centra kompetence

CENTRUM DOPRAVNÍHO VÝZKUMU

UPLATNĚNÍ TERMOGRAFIE PŘI DIAGNOSTICE OBJEKTŮ DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURY

certifikovaná metodika

2018

s finanční podporou

T A
Č R

Program Centra kompetence

Název: **Uplatnění termografie při diagnostice objektů dopravní infrastruktury**

Zpracovatel: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

Autoři: Ing. Michal Janků
Ing. Josef Stryk, Ph.D.

Oponenti: Ing. Jan Sova, Workswell s.r.o. - firma zaměřující se na bezdotykové měření teplot a termovizní inspekce
Ing. Jiří Hlavatý, Ph.D., Ředitelství silnic a dálnic ČR, ředitel úseku kontroly kvality staveb

Výstup projektu: TE01020168 Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI)

Certifikační orgán: Ministerstvo dopravy

Datum certifikace: 2018

Anotace

Název:

Uplatnění termografie při diagnostice objektů dopravní infrastruktury

Autoři:

Ing. Michal Janků, Ing. Josef Stryk, Ph.D.

Abstrakt:

Za účelem zachování řádného stavu budov, mostů, silnic a dalších staveb je nezbytná jejich pravidelná údržba. Často platí, že pokud se podaří zachytit poruchu na počátku jejího vzniku, jsou náklady na její odstranění daleko nižší, než po měsících až letech nekontrolované degradace. Lokalizovat poruchu včas, často znamená, detekovat ji ještě dříve, než je viditelná pouhým okem. Klíčovým prostředkem ke zjištění skrytých poruch jsou nedestruktivní diagnostické metody, mezi něž patří i termografické zkoušení.

Účelem předkládané metodiky je poskytnutí efektivního nástroje, který umožní rychlé zhodnocení stavu objektů dopravní infrastruktury a pomůže s určením míst, na která je potřeba zaměřit vizuální prohlídku či podrobnou diagnostiku. Měření je bezkontaktní a lze jej provádět bez nutnosti vyloučení provozu na pozemní komunikaci. Metodika popisuje možné způsoby použití infračervené termografie, zejména při diagnostice stavu mostů, vozovek a tunelů.

Předkládaná metodika byla zpracována v rámci projektu TE01020168 – Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (CESTI), za finanční podpory Technologické agentury ČR v rámci programu Centra kompetence. Tato metodika je určena správcům pozemních komunikací na všech úrovních (stát, kraje, města), projektantům, stavebním firmám a dalším subjektům, které mohou využívat data a zpracované výstupy z termografického měření.

Klíčová slova:

Infračervená termografie, měření teploty, most, vozovka, tunel

Certifikační orgán:

Ministerstvo dopravy ČR, odbor ITS, kosmických aktivit a VaVaI

Annotation

Title:

Application of thermography in the diagnostics of transport infrastructure objects

Authors:

Ing. Michal Janků, Ing. Josef Stryk, Ph.D.

Abstract:

In order to maintain the proper condition of buildings, bridges, roads and other structures, their regular maintenance is essential. Often, if the distress is detected at the beginning of the disorder, the cost of removing it is far lower than after months of uncontrolled degradation. Locating a distress in time, often means detecting it before it is visible to the naked eye. A key means of detecting hidden distresses is non-destructive diagnostic methods (NDT), including thermographic testing.

The purpose of the presented methodology is to provide an efficient tool that will allow a rapid assessment of the state of the transport infrastructure objects and help with the identification of the locations where visual inspection or detailed diagnosis is required. The thermographic measurement is non-contact and can be carried out without the need to exclude traffic on the road. The methodology describes possible ways of using infrared thermography, especially in diagnosis of bridges, roads and tunnels.

The presented methodology was prepared within project TE01020168 - Centre for Effective and Sustainable Transport Infrastructure (CESTI), with financial support of the Czech Technology Agency within the Centre of Competence Program. This methodology is intended for road managers at all levels (state, county, city), designers, construction companies and other entities that can use data and processed outputs from thermographic measurements.

Keywords:

Infrared thermography, temperature measurement, bridge, pavement, tunnel

Certification Authority:
Ministry of Transport

Obsah

1. Úvod 1

1.1 Cíl metodiky 1

1.2 Řešený výzkumný projekt 1

2. Princip termografické metody 2

2.1 Obecně 2

2.2 Termografické postupy 2

2.3 Infračervené záření 2

2.4 Emisivita záření 3

2.5 Rovnice termografie a chyby měření 4

2.6 Poruchy, které lze zaznamenat termokamerou 7

2.7 Princip zjišťování skrytých poruch 8

3. Jednotlivé způsoby termografického zkoušení 10

3.1 Ruční termografické zkoušení 10

3.2 Mobilní termografické zkoušení 12

3.3 Letecké termografické zkoušení 13

4. Metodika měření 14

4.1 Měření na mostech 14

4.1.1 Měření na površích vystavených přímému slunečnímu záření 14

4.1.2 Měření na stíněných površích 15

4.1.3 Noční a ranní měření na stíněných površích 16

4.1.4 Nastavení termokamery 17

4.1.5 Poznámky k měření 18

4.2 Měření vozovek 18

4.2.1 Lokalizace poruch 18

4.2.2 Monitorování vývoje teplot při pokládce asfaltových vrstev 21

4.3 Měření v tunelech 22

4.3.1 Aplikace ruční termokamery 22

4.3.2 Aplikace mobilního zařízení 23

5. Zpracování provedeného měření 25

5.1 SOFTWARE NA ZPRACOVÁNÍ TERMOGRAMŮ 25
5.2 ÚPRAVA TERMOGRAMŮ 26
6. Novost postupů, způsob uplatnění a ekonomické aspekty 27
6.1 SROVNÁNÍ NOVOSTI POSTUPŮ 27
6.2 POPIS UPLATNĚNÍ CERTIFIKOVANÉ METODIKY 27
6.3 EKONOMICKÉ ASPEKTY 27
7. Seznam použité související literatury 28
8. Seznam publikací, které předcházely metodice 30
9. Použité definice a zkratky 31
PŘÍLOHA: Monitoring vývoje teplot asfaltové vrstvy vozovky při její pokládce 33

1. Úvod

Infračervená termografie (dále jen termografie) je nedestruktivní diagnostická metoda, která se používá mimo jiné pro detekci a lokalizaci nehomogenit. Umožňuje odhalit skryté vady pod povrchem konstrukce, nebo poruchy, které nejsou dobře viditelné na povrchu. Odlišné teploty na povrchu konstrukce mohou být důsledkem poškození, např. delaminace, které se jako teplotní anomálie objeví na pořízených termogramech.

Tuto technologii lze využít k rychlému určení míst, na která je potřeba zaměřit vizuální prohlídku či podrobnou diagnostiku. Měření lze provádět i bez přímého přístupu ke konstrukci a bez nutnosti vyloučení provozu na pozemní komunikaci.

Metoda se využívá také pro účely monitorování vývoje teplot v průběhu procesu výstavby a následného provozu staveb.

Je možné ji použít také při lokalizaci pohybu osob a zvířat, zejména v noci a také v mnoha dalších aplikacích.

1.1 Cíl metodiky

Účelem této metodiky je podrobně popsat možné způsoby použití infračervené termografie při diagnostice a monitorování objektů dopravní infrastruktury, zejména mostů, vozovek a tunelů.

Tato metodika je určena správcům pozemních komunikací na všech úrovních (stát, kraje, města), projektantům, stavebním firmám a dalším subjektům, které mohou využívat data a zpracované výstupy z termografického měření.

1.2 Řešený výzkumný projekt

Tato metodika byla vypracována za finanční podpory Technologické agentury ČR v rámci programu Centra kompetence, projektu CESTI (TE01020168: Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu, pracovní skupiny WP6: Bezpečnost, spolehlivost a diagnostika konstrukcí) na výzkumné infrastruktuře pořízené z Operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace (CZ.1.05/2.1.00/03.0064).

2. Princip termografické metody

2.1 Obecně

Infračervená termografie je založená na detekci záření objektů v infračerveném (dále také IR) spektru vlnových délek. Takto září všechna tělesa, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula. Zařízení, které detekuje a skládá 2D obraz IR záření se obecně nazývá infračervená kamera, nebo infračervená termografická kamera, zkráceně termokamera. Výsledkem záznamu termokamery je obraz odpovídající intenzitě tepelného vyzařování snímaného objektu. Tento záznam se nazývá termogram. Intenzita tepelného záření objektů přitom přímo souvisí s jejich teplotou. Termogram je proto obrazem rozložení povrchové teploty tělesa a IR termografie se nejčastěji využívá k bezkontaktnímu měření prostorového a časového rozložení teplotních polí.

2.2 Termografické postupy

Termografie se dělí na kvalitativní nebo kvantitativní a pasivní nebo aktivní.

Cílem *kvantitativní termografie* je přesné stanovení hodnot teploty měřených objektů nebo jejich částí. V tomto případě je nezbytná znalost optických vlastností měřených objektů, často v závislosti na teplotě a je potřeba hodnotit vliv okolí na měřené hodnoty. Mezi významné aplikace kvantitativní termografie patří např. kontrola teplot při tepelném zpracování.

Kvalitativní termografie obecně nevyžaduje přesné měření teplot v absolutních hodnotách. Vyhodnocují se zejména teplotní rozdíly a kontrasty v IR vyzařování mezi různými místy jednoho měřeného objektu. Ve stavební termo-diagnostice se ve většině případů používá právě kvalitativní termografie, podobně jako v aplikacích popsaných v kap. 4.

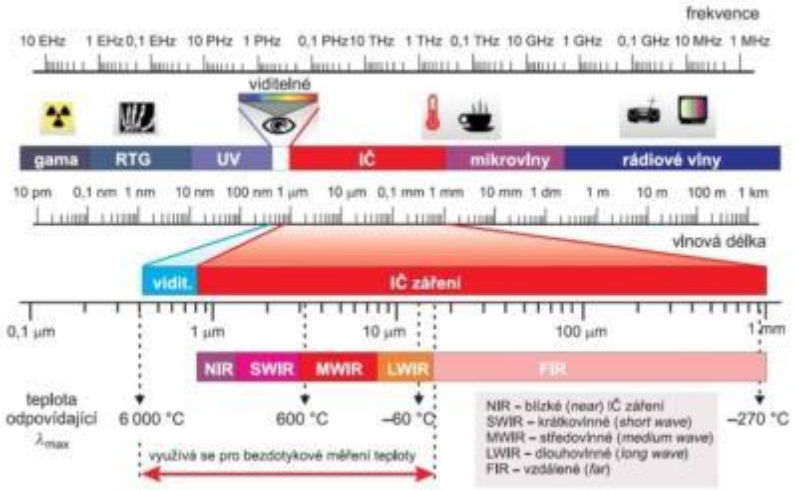
Oba přístupy, kvalitativní i kvantitativní, mohou být aplikovány ve smyslu pasivní nebo aktivní termografie. Na měřený objekt může být uměle aplikováno vybuzení externím zdrojem, které způsobí vznik teplotních kontrastů spojených s materiálovými nehomogenitami nebo výskytem vad v materiálu. V takovém případě se jedná o *aktivní termografii*. Aktivní termografie je významnou technikou při zjišťování defektů materiálu a nachází uplatnění zejména ve strojírenském a leteckém průmyslu.

Pokud se při měření uměle neovlivňuje teplota objektu a měří se tedy její přirozená teplota nebo přirozeně vzniklé teplotní kontrasty, jedná se o *pasivní termografii*. Vzhledem k velikostem staveb dopravní infrastruktury nepřichází aktivní termografie ve většině případů v úvahu, a proto se při měření těchto objektů uplatňuje právě pasivní termografie.

2.3 Infračervené záření

IR záření je část elektromagnetického spektra o vlnové délce od 780 nm do 1 mm (obr. 1). Tato část spektra se tedy nachází hned za viditelným světlem. Díky této blízkosti je

i konstrukce termokamery velmi podobná konstrukci klasické kamery či fotoaparátu. Vzhledem k vlnové délce záření emitovaného objekty při běžné teplotě, pracují používané termokamery nejčastěji v rozsahu 8 – 14 µm. Objektiv termokamery promítá dopadající infračervené záření na tzv. detektor záření, na kterém dochází ke změření intenzity tohoto záření. Tyto informace jsou následně digitalizovány a převedeny na výsledný snímek, tzv. termogram.



Obr. 1: *Rozsah spektra infračerveného záření využívaného při měření, zdroj: www.automa.cz*

2.4 Emisivita záření

Množství tepelného záření, které je z povrchu objektu vyzářeno, závisí nejen na jeho teplotě, ale i na emisivitě. Emisivita je tak v jistém smyslu efektivita vyzařování. Čím je emisivita vyšší a blíže 1, tím více tepelného záření povrch při dané teplotě vyzáří. Při emisivitě rovné 1 vyzáří povrch maximální množství tepelného záření, které je z fyzikálního hlediska možné vyzářit při dané povrchové teplotě černého tělesa. Tuto hodnotu emisivity má však pouze „ideální“ černé těleso a v praxi nejsme schopni této hodnoty dosáhnout, povrchy běžných předmětů mají hodnotu emisivity menší než 1.

Běžné stavební materiály, jako je beton, mají hodnotu emisivity přibližně 0,95. Teplotu těchto materiálů tak lze pomocí termokamery dobře změřit. Naopak lesklé kovy mají emisivitu výrazně nižší (tab. 1) a chovají se jako tzv. „IR zrcadla“ - většina IR záření přicházejícího do objektivu termokamery je pouze odraz okolního záření od zkoumaného předmětu a samotné IR záření tohoto předmětu tvoří jen menší část. Zjištění teploty těchto kovových materiálů je proto prostřednictvím termokamery komplikované a pro její úspěšné změření je vhodné provést úpravu kovového povrchu pomocí speciálního laku nebo lepicí pásky.

Tab. 1: *Hodnoty emisivit vybraných materiálů, zdroj: www.optotherm.com*

Materiál	Emisivita	Materiál	Emisivita
Beton, hrubý	0,92 – 0,97	Hliník, leštěný	0,05 – 0,10
Beton, hladký	0,85	Hliník, zoxidovaný	0,10 – 0,40
Omítka	0,90	Ocel, nezoxidovaná	0,10
Dřevo	0,80 - 0,95	Ocel, zoxidovaná	0,70 – 0,95
Voda	0,90 – 0,95	Asfaltová vozovka	0,93
Led	0,95 – 1,00	Barva na kov	0,60 – 0,90

2.5 Rovnice termografie a chyby měření

Při měření termokamerou se lze, stejně jako při každém jiném měření, dopustit řady chyb. Rovněž nesprávnou interpretací jinak správně naměřených dat lze dojít k chybným závěrům. Termokamera neměří teplotu přímo, ale stanovuje ji výpočtem pomocí tzv. rovnice termografie. Rovnice termografie popisuje, které složky se podílejí na výsledném záření přicházející do termokamery:

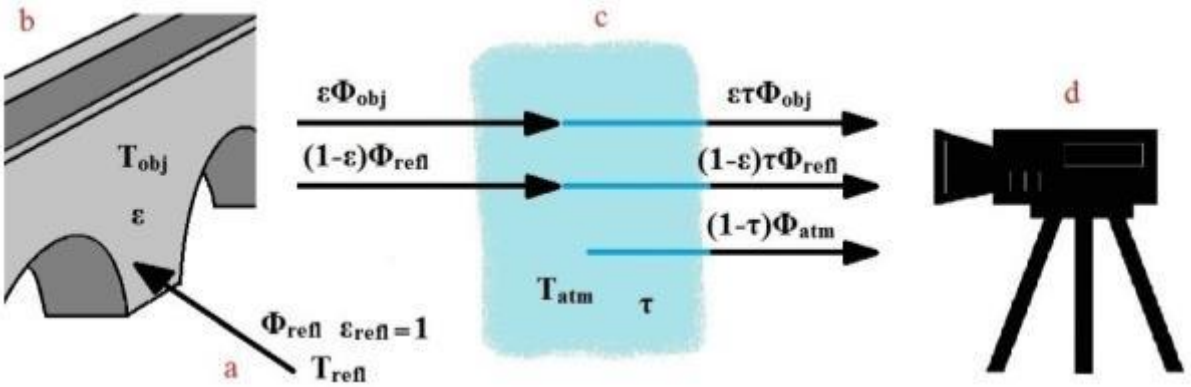
$$\varepsilon\tau\Phi_{obj} + (1-\varepsilon)\tau\Phi_{refl} + (1-\tau)\Phi_{atm} = \Phi_{celk} \qquad (1)$$

kde:

$\varepsilon\tau\Phi_{obj}$	*je zářivý tok z objektu zeslabený průchodem atmosférou, teplota objektu je* T_{obj},
$(1-\varepsilon)\tau\Phi_{refl}$	*je odrážený zářivý tok z okolních zdrojů, kde* $(1-\varepsilon)$ *vyjadřuje odrazivost objektu (předpokládáme, že záření přicházející z okolí představuje záření z povrchů v myšlené polokouli, které mají emisivitu = 1 a stejnou teplotou* T_{refl}*)*
$(1-\tau)\Phi_{atm}$	*je zářivý tok emitovaný atmosférou, kde* $(1-\tau)$ *vyjadřuje emisivitu atmosféry, jejíž teplota je* T_{atm},
Φ_{celk}	*je celkový zářivý tok, který dopadá na detektor termokamery*
ε	*je emisivita*
τ	*je koeficient průchodu atmosférou (na krátkou vzdálenost měření lze zanedbat, pak* $\tau = 1$*)*

pro $\tau = 1$*:*

$$\varepsilon\Phi_{obj} + (1-\varepsilon)\Phi_{refl} = \Phi_{celk} \qquad (2)$$



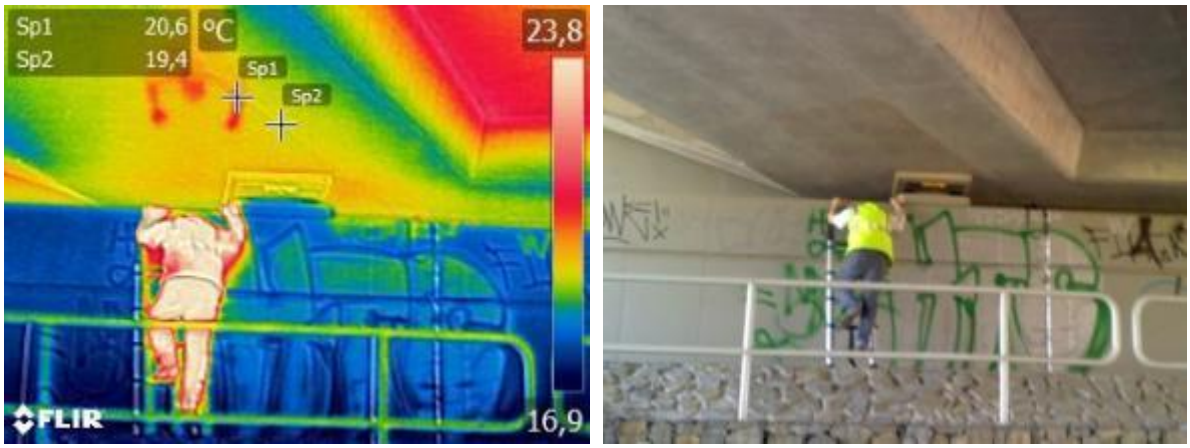
Obr. 2: *Skladba záření přicházející do termokamery;* ***a*** *– tepelné záření z okolí, které bude odraženo od měřeného povrchu,* ***b*** *– měřený objekt o teplotě T_{obj} a emisivitě ε,* ***c*** *– atmosféra o teplotě T_{atm} a koeficientem průchodu τ,* ***d*** *– termokamera, zdroj: CDV*

Z rovnice termografie (1) vyplývá, že celkový zářivý tok, který dopadá na detektor termokamery je složený ze tří hlavních složek: vlastní záření objektu, odražené záření a vlastní vyzařování atmosféry. Výslednou přesnost měření ovlivňuje:

1) Atmosféra – molekuly vody a oxidu uhličitého ve vzduchu pohlcují IR záření. Atmosféra jako plynné těleso o jisté teplotě také sama vyzařuje tepelné záření. Celkový vliv atmosféry na výsledek měření lze naštěstí s vysokou přesností kompenzovat po změření atmosférické teploty, atmosférické vlhkosti a vzdálenosti od měřeného objektu. Tyto hodnoty jsou v rovnici zahrnuty do koeficientu *τ.* Pro řadu aplikací však lze vliv atmosféry úplně zanedbat, potom *τ =1* a rovnice nabývá zjednodušeného tvaru (2).

2) Odražená zdánlivá teplota - je zdánlivá teplota jiných objektů, která se odráží z povrchu měřeného objektu k termokameře. Termokamera pak přirozeně není schopna rozlišit, zda jde o vlastní tepelné záření, nebo odražené tepelné záření. Vliv odražené zdánlivé teploty je tím větší, čím vyšší je odrazivost povrchu. S vysokou emisivitou tedy klesá vliv odražené zdánlivé teploty. Povrch většiny stavebních materiálů (mimo kovy) má hodnotu emisivity dostatečně vysokou (0,95 a vyšší) a lze tak odraženou zdánlivou teplotu stanovit přibližně odhadem.

   Na obr. 3 je patrný odraz pracovníka na podhledu trámu. Hladký betonový povrch a malý úhel, který svírá paprsek IR záření se spodní plochou trámu, způsobují, že se odráží zdánlivá teplota pracovníka. V tomto případě je rozdíl v teplotě jen jeden stupeň celsia, avšak v případě měření teploty lesklého kovu může rozdíl mezi naměřenou a skutečnou teplotou samotného materiálu činit i desítky stupňů celsia, pokud se od tohoto materiálu odráží nějaký výrazný zdroj tepla.



Obr. 3: *Ukázka vlivu odražené zdánlivé teploty, zdroj: CDV*

3) Emisivita – termokamera pro danou povrchovou teplotu a nastavenou emisivitu očekává určité množství tepelného záření. Pokud má zkoumaný povrch objektu nižší hodnotu emisivity, než jaká je nastavená v termokameře - dopadá na detektor termokamery méně tepelného záření, než kolik termokamera očekává a ta pak vyhodnotí tuto skutečnost jako nižší povrchovou teplotu, než je ve skutečnosti. Obdobně platí, že pokud je emisivita povrchu vyšší, než jaká je nastavená – termokamera určí teplotu povrchu vyšší, než ve skutečnosti.

   Obrázek 4 ukazuje křídlo betonového mostu posprejovaného grafity. Na termogramu se jeví barevný povrch zdánlivě chladnější, rozdíl činí až 3°C. Ve skutečnosti jsou povrchové teploty přibližně stejné.

Obr. 4: *Vliv posprejovaného povrchu na naměřenou teplotu, zdroj: CDV*

Ostatní:

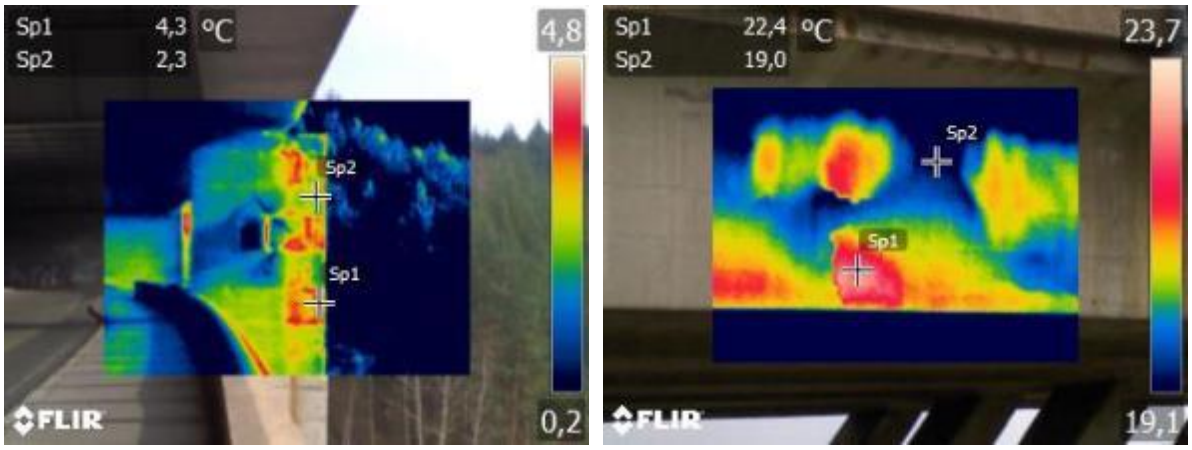
4) Nevhodné podmínky pro měření – budovy nebo například stromy mohou vrhat stín na zkoumaný objekt a způsobovat tak nerovnoměrné zahřívání jeho povrchu. Tento efekt může přetrvávat i desítky minut po konci osvícení povrchu díky naakumulovanému teplu v konstrukci.

5) Vlastní nejistota termokamery – nepřesnost se u běžně dostupných termokamer pohybuje v rozmezí maximálně ± 2°C nebo ± 2 % z měřeného údaje. Pro obor kvalitativní termografie (viz kapitola 2.2) je však důležitější určení teplotních rozdílů na povrchu zkoumaného objektu než stanovení teploty s absolutní přesností, proto jsou drobné nepřesnosti termokamery přijatelné.

2.6 Poruchy, které lze zaznamenat termokamerou

IR termografii lze za vhodných podmínek výhodně použít při zjišťování plošných poruch tzv. **delaminací** na betonových konstrukcích. Tyto poruchy mohou být způsobeny korozí betonářské výztuže.

Čím je menší hloubka uložení výztuže pod povrchem, nižší kvalita krycí vrstvy a nepříznivé prostředí, tím dříve hrozí vznik koroze. Korozní produkty mají podstatně větší objem než původní kov a jejich tvorba má za následek zvýšený tlak na betonovou krycí vrstvu. S přibýváním korozních produktů se tento tlak zvyšuje až do oddělení (delaminaci) betonové vrstvy od výztuže. Následně může dojít až k úplnému odtržení částí betonu.

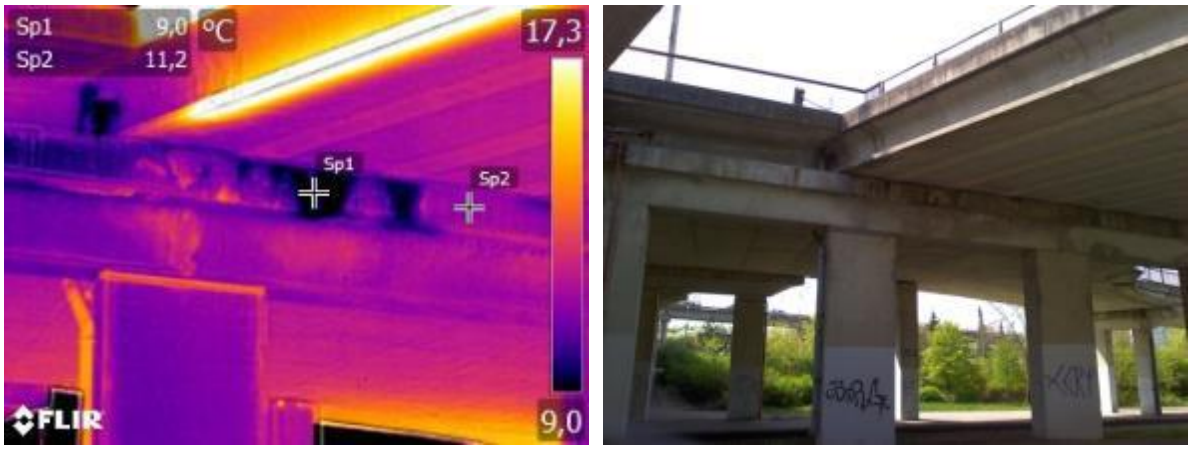


Obr. 5: *Delaminace krycí betonové vrstvy - na pilíři mostu (vlevo); na mostním nosníku (vpravo); delaminované oblasti mají vyšší teplotu – červená barva v termogramu, zdroj: CDV*

Delaminace povrchové vrstvy nemusí být způsobena jen korozí výztuže. Na obr. 6 je termogram křídla opěry mostu, na kterém byl proveden sanační nátěr. Červené oblasti označují místa, na kterých se tento nátěr odděluje od podkladu.

Obr. 6: *Sanační nátěr na křídle opěry místy oddělený od podkladu, červená – teplejší barva, zdroj: CDV*

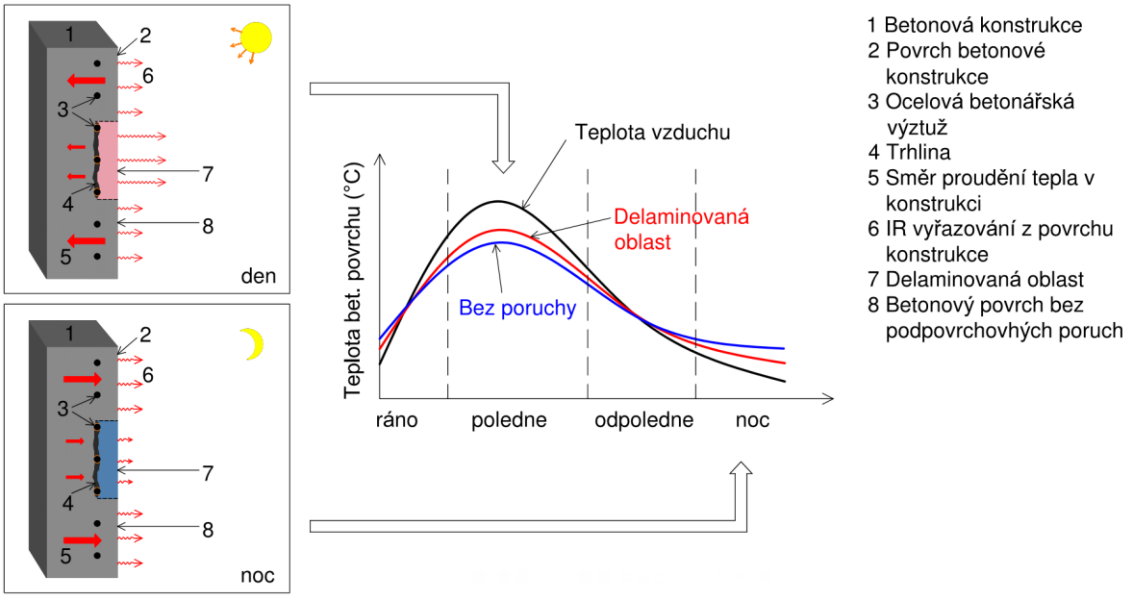
Další možností aplikace termografie je **zjišťování přítomnosti vody** v konstrukci. Při měření se vychází ze skutečnosti, že kapalina při vypařování odebírá teplo svému okolí. Pomocí termokamery tak lze odhalit oblasti s přítomností vlhkosti, která nemusí být pouhým okem na první pohled zřejmá. Na obr. 7 je patrný zátok na úložný práh podpěry pravděpodobně způsobený porušeným dilatačním závěrem mostu.



Obr. 7: *Zátok na úložný práh, tmavá – chladnější barva, zdroj: CDV*

2.7 Princip zjišťování skrytých poruch

Rychlost, jakou se teplo šíří v konstrukci, závisí na tepelné vodivosti. Ta je přímo úměrná teplotnímu rozdílu (ΔT) mezi místy přenosu tepla. Během dne dochází obvykle ke kolísání mezi denní a noční teplotou. Na tyto změny reaguje i konstrukce. Vlivem dopadajícího slunečního záření a vzrůstající okolní teplotě se nejprve ohřívá povrch objektu, od kterého se teplo šíří hlouběji do konstrukce. Pokud naopak dojde ke snížení okolní teploty (v noci), konstrukce se ochlazuje a teplo se šíří opačným směrem.



Obr. 8: *Princip zjišťování skrytých poruch pomocí termografie; oblast nad poruchou se působením slunečního záření, nebo vlivem zvýšené okolní teploty rychleji zahřívá, v noci naopak rychleji vychladne, zdroj: CDV*

V případě, že se pod povrchem konstrukce nachází nějaká porucha (např. delaminace) nebo dutina, působí vzduch zde obsažený jako „izolace“, která omezuje proudění tepla. Tato porucha způsobuje, že se povrch nad ní zahřívá více než obdobný povrch konstrukce bez závad. Důvodem je omezení odvodu tepla z povrchu do hloubky konstrukce (obr. 8). Při ohřívání konstrukce lze proto očekávat, že oblasti nad poruchou budou teplejší než okolní nepoškozený beton - vzniká tzv. *pozitivní teplotní kontrast*. Při ochlazování konstrukce nastává opak, kdy v těchto místech dochází k rychlejšímu odvodu tepla, a proto se budou tyto oblasti na pořízených termogramech jevit jako chladnější - *negativní teplotní kontrast*. Tohoto jevu lze využít například při termografické diagnostice mostů a vyhledávání delaminací.

3. Jednotlivé způsoby termografického zkoušení

Dle způsobu použití existují tři základní systémy pro termografické zkoušení, které jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách:

- ruční,
- mobilní,
- letecké.

Volba vhodného způsobu měření a typu přístroje musí vždy vycházet z účelu měření, požadované přesnosti a místních podmínek (zejména přístupnosti a omezení při měření).

Základní vlastnosti a požadavky na infračervené kamery použité pro termografické nedestruktivní zkoušení popisuje ČSN EN 16714-2.

Obecné postupy termografického nedestruktivního zkoušení popisuje ČSN EN 16714-1.

3.1 Ruční termografické zkoušení

Ruční termokamery jsou lehké (váha okolo jednoho kilogramu), poměrně jednoduché na ovládání a k jejich obsluze stačí základní zaškolení. Naopak samotné měření a vyhodnocení pořízených termogramů by měl provádět zkušený pracovník, který se dokáže vyvarovat možných chyb.

Obr. 9: *Příklady ručních termokamer, zleva: FLIR T640, FLUKE Ti450 PRO, TESTO 890-2, zdroj: www.flir.eu, www.fluke.com, www.testo.com*

V oblasti dopravních staveb lze ruční termokamery využít především při diagnostice mostů. Hlavní parametr ovlivňující kvalitu termokamer (s níž souvisí i jejich cena) je rozlišení detektoru. V současné době jsou na trhu základní modely termokamer s rozlišením od 80 x 60 pixelů až po špičkové profesionální termokamery s rozlišením pohybujícím se okolo jednoho megapixelu. Většina výrobců v dnešní době nabízí termokamery, které ještě následně umí softwarově zvýšit rozlišení termogramů. V následující tabulce (tab. 2) je uveden přehled několika vybraných modelů termokamer spadajících do vyšší a profesionální třídy.

Tab. 2: *Parametry vybraných modelů termokamer (údaje ze září 2018)*

Výrobce	Model	Rozlišení detektoru	Teplotní citlivost	Teplotní rozsah	Zorné pole
FLIR	E75	320 x 240 px	<0,040°C	-20 až 1200°C	24° x 18°
	T540	464 x 348 px	<0,040°C	-20 až 1200°C	24° x 18°
	T660	640 x 480 px	<0,020°C	-40 až 650°C	25° x 19°
	T1K	1024 x 768 px	<0,020°C	-40 až 2000°C	28° x 21°
FLUKE	Ti450 PRO	320 x 240 px	<0,025°C	-10 až 1500°C	24° x 17°
	Ti480 PRO	640 x 480 px	<0,050°C	-10 až 800°C	34° x 24°
	TiX520	320 x 240 px	<0,050°C	-20 až 850°C	24° x 17°
	TiX580	640 x 480 px	<0,050°C	-20 až 800°C	34° x 24°
TESTO	875-2i	160 x 120 px	<0,050°C	-20 až 350°C	32° x 23°
	882	320 x 240 px	<0,050°C	-20 až 350°C	32° x 23°
	885-2	320 x 240 px	<0,030°C	-20 až 350°C	30° x 23°
	890-2	640 x 480 px	<0,040°C	-30 až 350°C	42° x 32°

Další důležitá vlastnost, která je podstatná především při hledání teplotních rozdílů na povrchu objektů, je dostatečná teplotní citlivost. Z tabulky je zřejmé, že většina termokamer již dnes dosahuje teplotní citlivosti < 0,05°C.

Pro některé průmyslové aplikace je důležitý dostatečně velký teplotní rozsah termokamery. Při měření objektů dopravní infrastruktury se však zpravidla nesetkáváme s teplotami, se kterými by si běžná termokamera neuměla poradit, a proto je dostatečný základní teplotní rozsah.

Termokamery nemají na rozdíl od digitálních fotoaparátů optický zoom, proto je potřeba si vystačit se základním objektivem. U některých modelů však lze v případě potřeby použít výměnný objektiv. Při měření na větší vzdálenosti lze například použít teleobjektiv. Naopak pro měření na krátké vzdálenosti je výhodný širokoúhlý objektiv. Je nezbytné věnovat dostatečnou pozornost zaostření. Levnější termokamery mají pouze manuální ostření. Špatně zaostřený termogram je pro následné vyhodnocení nepoužitelný.

Z velikosti rozlišení detektoru termokamery a zorného pole (FOV) objektivu lze určit geometrické rozlišení termokamery. Například pro termokameru FLIR E60bx (rozlišení 320 x 240 px) činí okamžité zorné pole (IFOV) 1,36mrad (= 25°/320px * π/180°). Vynásobením této hodnoty vzdáleností termokamery od měřeného objektu lze stanovit délku strany pomyslného čtverce na povrchu objektu, který odpovídá jednomu pixelu termogramu. Pro vzdálenost 10 metrů vychází tento rozměr na 13,6 mm a představuje tak nejmenší oblast na povrchu objektu, kterou lze teoreticky změřit. Pro přesné měření se však doporučuje, aby

nejmenší měřená oblast zabírala plochu alespoň 3 x 3 pixely, protože jednopixelové měření může být z řady důvodů nepřesné. Velikosti zkoumaných objektů (defektů) je tedy potřeba přizpůsobit vzdálenost, ze které je prováděno měření. S narůstající vzdáleností se rozlišovací schopnost termokamery snižuje.

3.2 Mobilní termografické zkoušení

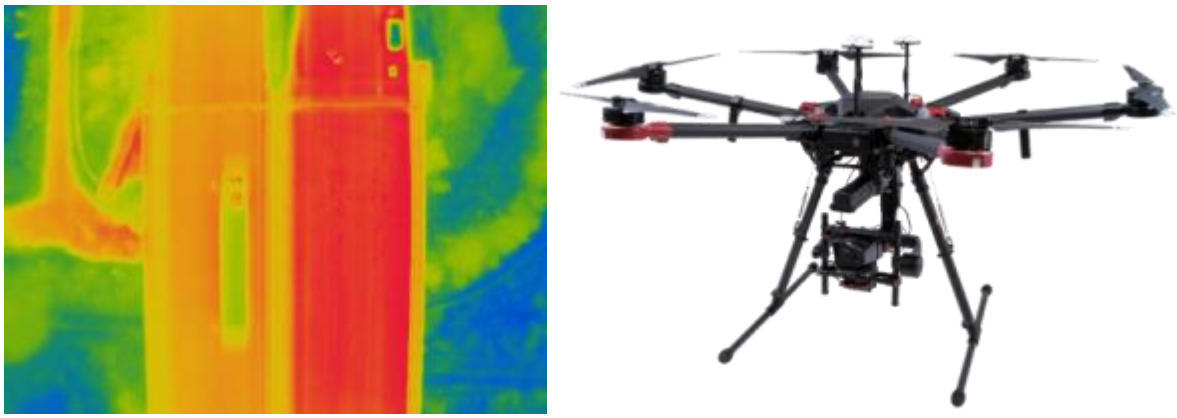
V případě mobilního termografického zkoušení je termokamera osazena na měřící vozidlo (obr. 10). Při tomto měření je možné použít průmyslový typ termokamery, který zpravidla nemá vlastní displej, je ovládána prostřednictvím počítače, na jehož displeji jsou záběry zobrazovány. Na vozidle může být zároveň umístěna digitální kamera a jednotka GPS. Data z těchto zařízení jsou synchronizována a ukládána do paměti přenosného počítače ve vozidle.

Obr. 10: *Příklad měřicího vozidla s osazenou termokamerou a digitální kamerou na střeše, zdroj: CDV*

Mobilní termografické zkoušení nachází uplatnění především při diagnostice vozovek a tunelů. Při měření je nezbytné respektovat vlastnosti a omezení termokamery – nepřiměřeně vysoká rychlost způsobuje rozmazání záběru a snižuje tedy přesnost měření. Ovládací software umožňuje nastavení frekvence snímání termokamery. Například frekvence 10 Hz při jízdě 36 km/h odpovídá jednomu termogramu každý jeden metr jízdy, což je pro vyhodnocení měření naprosto dostačující.

3.3 Letecké termografické zkoušení

V případě leteckého termografického zkoušení je termokamera umístěna na leteckém dopravním prostředku. Pro účely diagnostiky staveb dopravní infrastruktury je praktičtější použití dronu. V současné době je na trhu velké množství těchto dálkově ovládaných zařízení. Drony se standardně prodávají s klasickou digitální kamerou. Pro použití spolu s termokamerou je potřeba zvolit vhodný typ dronu o dostatečné nosnosti a také vybrat odpovídající termokameru (zpravidla menší ve srovnání s ruční termokamerou). Dron je dálkově ovládán obsluhou na zemi. Při řízení lze pro snazší orientaci v prostou využít přímého přenosu obrazu z kamery dronu na displej dálkového ovládání. Letová doba dronu závisí na kapacitě baterií a pohybuje se okolo třiceti minut na jedno nabití. Dron lze využít pro termovizní snímkování jinak obtížně dostupných konstrukcí, například vysokých mostů. Dron je nezbytné používat v souladu s platnou legislativou.



Obr. 11: *Vozovka na mostech s viditelným rozdílem mezi jednotlivými pásy (vlevo), Dron DJI M600 Pro s termokamerou WIRIS (vpravo), zdroj: www.workswell.cz*

4. Metodika měření

Podmínky a postup při měření termokamerami ovlivňují naměřené údaje a následné vyhodnocení, proto je potřebné dodržovat níže uvedené postupy, aby se minimalizovaly chyby při měření.

V následující tabulce je uveden přehled aplikací termografické metody při diagnostice staveb dopravní infrastruktury.

Tab. 3: *Přehled aplikací termografické metody při diagnostice staveb dopravní infrastruktury*

Stavba	**Typ aplikace**	**Způsoby termografického snímání**		
		ruční	**mobilní**	**letecké**
Mosty	Zjištění podpovrchových vad – delaminací a dutin	x		x
	Kontrola zatékání do konstrukce	x		x
	Kontrola pojížděné části mostu		x	x
Vozovky	Lokalizace poruch		x	
	Kontrola teplotní homogenity asfaltové směsi při pokládce nové vozovkové vrstvy	x		
Tunely	Zjištění podpovrchových vad – delaminací a dutin	x	x	
	Kontrola zatékání do konstrukce	x	x	

4.1 Měření na mostech

Měření se zpravidla provádí na betonových, železobetonových a předpjatých konstrukcích, pro které platí níže uvedená pravidla.

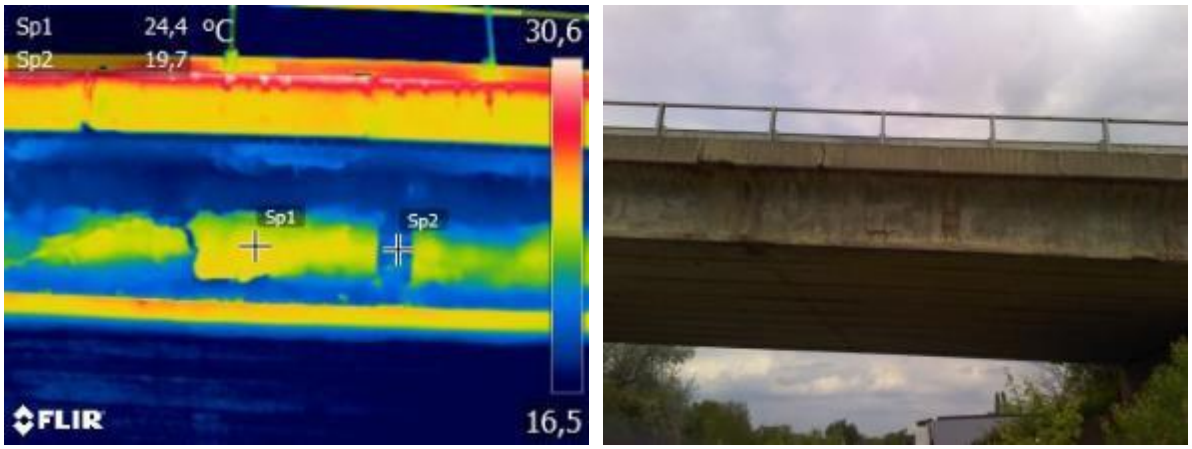
4.1.1 Měření na površích vystavených přímému slunečnímu záření

Optimálních výsledků je dosaženo, pokud jsou splněny následující podmínky:

1) Sluneční záření – měření se provádí ve dnech, kdy je nepřerušovaný sluneční svit, oblačnost je minimální. Letní dny jsou výhodnější než zimní z důvodu intenzivnějšího a delšího slunečního osvitu.

2) Větrné podmínky – obecně platí, že vítr snižuje vliv slunečních paprsků na zahřívání povrchu a zmenšuje tak teplotní kontrast v místech s podpovrchovými poruchami. Žádný nebo mírný vítr nebude mít rušivý efekt na případné vytvoření tepelného kontrastu na povrchu konstrukce vystavené slunečnímu záření. Nedoporučuje se provádět měření, pokud se dle předpovědi počasí očekává, že by průměrná rychlost větru před a během měření měla přesahovat 7 m/s.

3) Doba měření – měření by se mělo provádět alespoň 4 hodiny po východu slunce, z důvodu vytvoření dostatečného tepelného kontrastu. V takovém případě lze s velkou pravděpodobností odhalit delaminace i v hloubce přibližně 5 cm. Využitelná doba pro měření trvá v průměru 6 hodin.

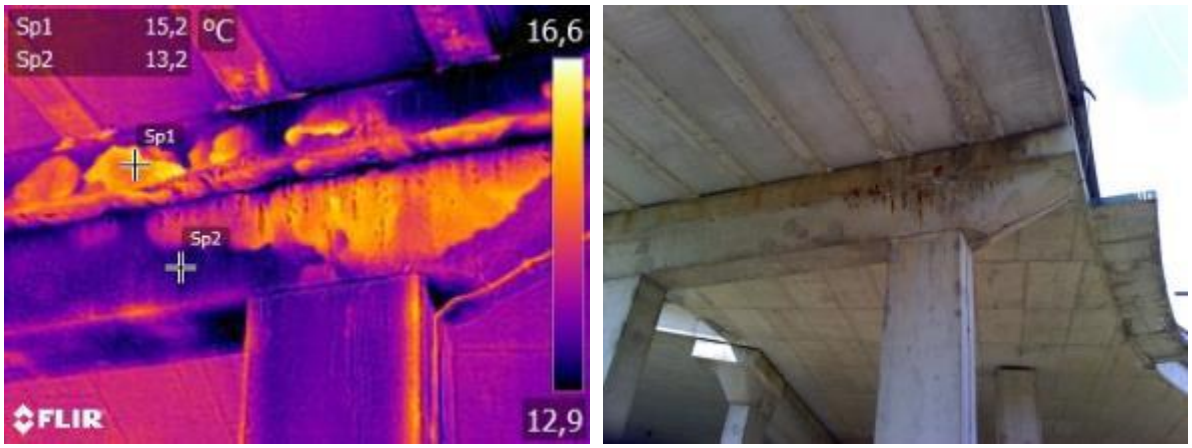


Obr. 12: *Boční pohled na mostní nosník typu I73; v bodě Sp1 je delaminovaná krycí vrstva betonu, v bodě Sp2 již došlo k odtržení této vrstvy, zdroj: CDV*

4.1.2 Měření na stíněných površích

Optimálních výsledků je dosaženo, pokud jsou splněny následující podmínky:

1) Změna okolní teploty - doporučuje se provádět měření ve dnech, ve kterých se očekává změna okolní teploty vzduchu alespoň o 10°C, tedy zpravidla ve dnech, kdy je dostatečný rozdíl mezi denní a noční teplotou. Obecně platí, že rychlejší nárůst okolní teploty má za následek výraznější teplotní kontrast. Ve chvíli, kdy se změní růst teploty na pokles, nastává snižování tepelného kontrastu až do úplného vymizení. Geometrie mostu spolu s okolním terénem a vegetací mohou mít za následek, že se teplota vzduchu v blízkosti mostu bude měnit jen velmi pomalu, což znemožní vznik teplotního kontrastu na jeho povrchu a nevytvoří vhodné podmínky pro měření.
2) Větrné podmínky – vítr může pomoci v místech, kde se jinak teplota vzduchu mění jen velmi pomalu (viz předchozí odstavec) a umožnit rychlejší příliv teplejšího/chladnějšího vzduchu ke konstrukci mostu a tedy vznik teplotního kontrastu. Vysoké průměrné rychlosti větru proto nemusí mít nutně negativní vliv na vývoj teplotního kontrastu při měření stíněných povrchů.

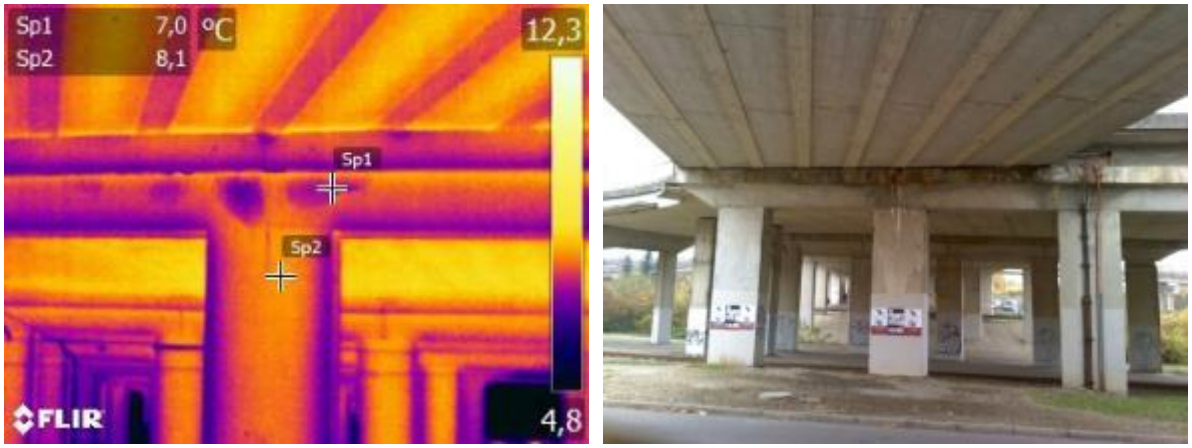


Obr. 13: *Porušený povrch příčle a úložného prahu mostu - žlutá barva, zdroj: CDV*

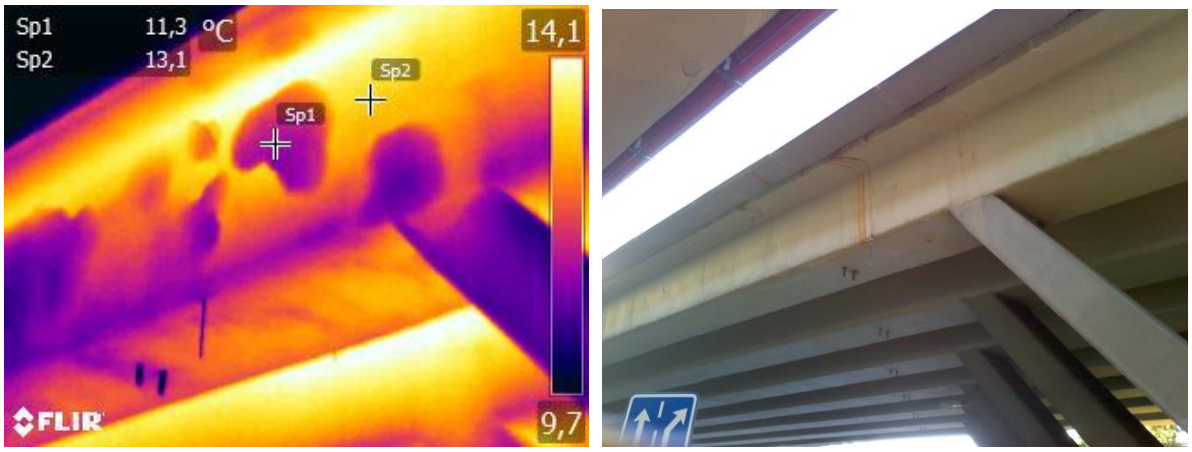
3) Doba měření – měření lze začít provádět nejdříve 4 až 5 hodin po východu slunce, z důvodu vytvoření dostatečného teplotního kontrastu. Při zachování vhodných podmínek, lze měřit po dobu až 8 hodin, ovšem v závislosti na roční době.

4.1.3 Noční a ranní měření na stíněných površích

Měření lze teoreticky provádět i v nočních hodinách, delaminaci však v tomto případě označuje negativní teplotní kontrast. S měřením je vhodné začít nejdříve 1 hodinu po západu slunce. Z hlediska provádění je ovšem praktičtější ranní měření. Pokud se teplota vzduchu uplynulou noc pohybovala alespoň o 10°C níže než předchozí den, lze při dostatečném teplotním kontrastu provádět měření i v ranních hodinách. Toto měření je možno provádět do doby, než začne teplota vzduchu i konstrukce opět růst, tedy přibližně 1 hodinu po východu slunce. Klasickým příkladem je teplý den, po kterém následuje bezoblačná noc, kdy teploty většinou klesají na nižší teploty.



Obr. 14: *Měření v brzkých ranních hodinách; delaminovaný povrch je chladnější než zbytek konstrukce - bod Sp1, zdroj: CDV*



Obr. 15: *Měření v ranních hodinách; delaminovaný povrch trámu nosné konstrukce mostu je chladnější než zbytek konstrukce – bod Sp1, zdroj: CDV*

Při poklesu teploty platí, že se delaminované oblasti ochlazují rychleji, než neporušený povrch. Proto se budou tyto poruchy na termogramech jevit jako chladnější (obr. 14 a 15). Omezení týkající se geometrie mostu a jeho okolí jsou stejná jako při měření ve dne.

4.1.4 Nastavení termokamery

1) Ostření - v prvé řadě je potřeba mít při měření objektiv termokamery vždy správně zaostřený na povrch konstrukce, jen tak lze odhalit poruchy i při nízkém teplotním kontrastu. Při ostření si lze vypomoci například umístěním pravidelně tvarovaného předmětu na měřený povrch. Automatické ostření zatím není u termokamer běžné a jsou jim vybaveny jen nejdražší modely.

2) Nastavení teplotního rozsahu - termokamera v automatickém režimu obvykle sama upravuje zobrazení barev na svém displeji podle rozpětí teplot snímaných objektů nacházejících se v aktuálním zorném poli. Automatický režim ovšem nemusí být vždy nejvhodnější. Pokud například do záběru zasahuje obloha nebo jiné objekty s hodně odlišnou teplotou, termokamera se obvykle v automatickém režimu tomuto teplotnímu rozsahu přizpůsobí a malé teplotní odchylky mohou zaniknout. Pro měření na stíněných površích, kde se rozdíl teplot u delaminací zpravidla pohybuje kolem 1 až 2 °C, je výhodné v termokameře nastavit úzké rozpětí teplot (v závislosti na měřeném povrchu) maximálně do 5 °C.

3) Úhel pozorování – doporučuje se provádět měření kolmo na povrch konstrukce, případně co nejblíže tomuto směru. Při snímání povrchu pod nízkým úhlem může dojít k nežádoucímu zaznamenání odrazů od okolních objektů (viz. odražená zdánlivá teplota kap. 2.5)

4) Volba objektivu – výběr objektivu se odvíjí od vzdálenosti, ze které je prováděno měření. Nejběžněji používané termokamery mají objektivy s úhlem záběru okolo 25°, ty jsou vhodné pro pozorování ze vzdálenosti přibližně 10 až 20 m. Pro kratší vzdálenosti je

doporučeno použít širokoúhlý objektiv (45°), pro delší naopak teleobjektiv. Doporučuje se použít termokameru s minimálním rozlišením 320 x 240 pixelů.

4.1.5 Poznámky k měření

Nedoporučuje se provádět měření ve dnech, kdy se denní teploty příliš neliší od nočních a zároveň na zkoumaný povrch konstrukce nedopadá sluneční záření. Typickým příkladem je sychravé podzimní počasí. V těchto situacích téměř nevzniká teplotní kontrast a poruchy tedy nemusí být zjistitelné.

Dále není vhodné provádět měření v době, kdy přechází pozitivní teplotní kontrast v negativní a naopak (viz kap. 2.7 a obr. 8). V těchto okamžicích se teplota povrchu nad poruchou rovná teplotě okolního neporušeného betonu a proto nelze závady pomocí termokamery odhalit. Tato situace nastává zpravidla v ranních a podvečerních hodinách.

V případě, že je dutina vyplněna materiálem, jako je například voda nebo led, nedochází už v takové míře k omezování vedení tepla, jako když je v dutině pouze vzduch. To může způsobit, že nebude tato podpovrchová dutina na termogramu patrná.

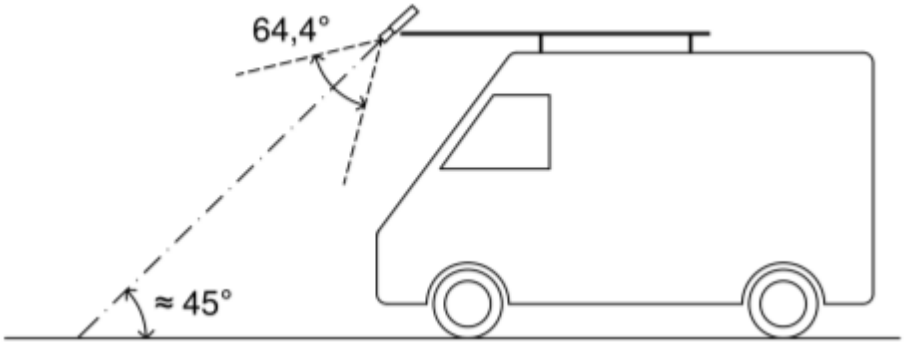
Vlhkost na povrchu betonu v důsledku srážek může snižovat tepelný kontrast mezi oblastí s dutinami a betonem bez podpovrchových poruch.

4.2 Měření vozovek

Termografickou metodu lze využít nejen při diagnostice stavu existujících vozovek, ale také za účelem plošného sledování vývoje teplot asfaltové vrstvy vozovky a její homogenity při pokládce.

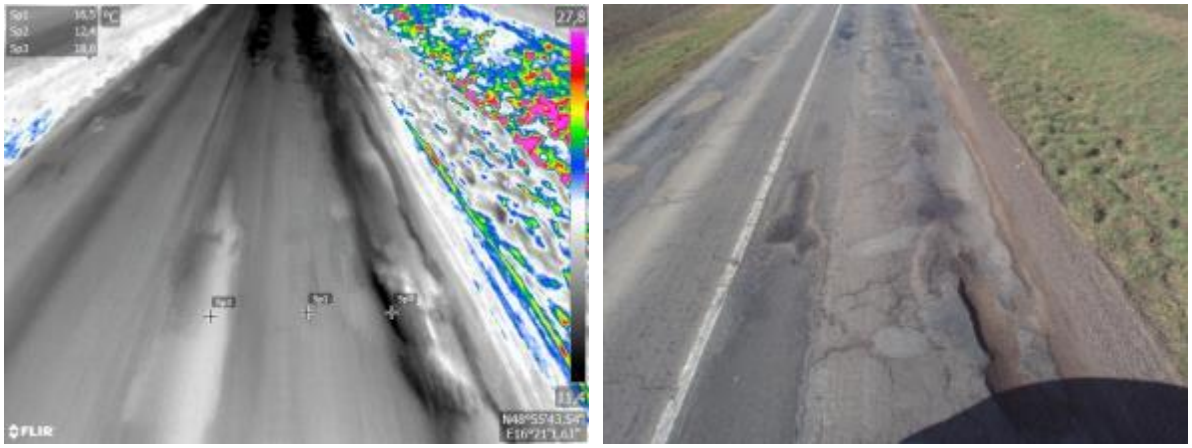
4.2.1 Lokalizace poruch

Při diagnostice vozovek se používají termokamery, které umožňují pořizovat kontinuální záznam, tzn. termografické video. Měření se pak provádí z jedoucího vozidla. Termokameru je vhodné umístit přiměřeně vysoko a použít vhodný objektiv, tak aby se do záběru vešel celý jízdní pruh. Úspěšně byla použita termokamera s rozlišením 640 x 480 px a objektivem 80°x 64,4°. Natočení termokamery k rovině vozovky se doporučuje alespoň 45° (obr. 16). Při příliš malém úhlu může docházet k nežádoucímu zkreslení naměřených hodnot. Větší úhel natočení termokamery naopak není při měření na škodu. V takovém případě je ovšem potřeba posunout termokameru více před vozidlo, aby jeho přední část nepřekážela v zorném poli termokamery.



Obr. 16: *Schéma osazení termokamery na měřicím vozidle, zdroj: CDV*

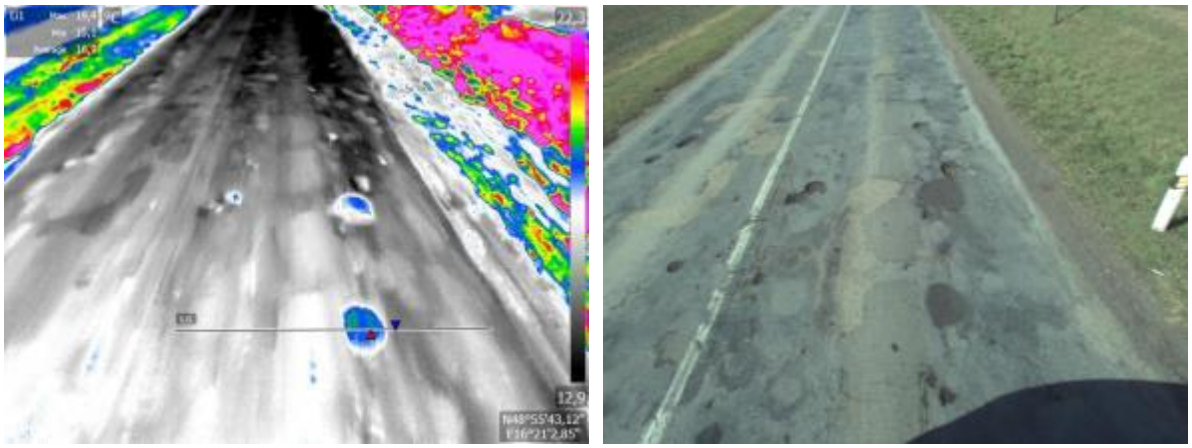
Měření je výhodné provádět za slunečného počasí, díky kterému lze na povrchu vozovky dosáhnout vyšších teplotních kontrastů. Musí se přihlédnout k ovlivnění záznamu měření od stínů, které vrhá okolní zástavba nebo vegetace. Při měření a následné analýze je možné lokalizovat výtluky, vysprávky a trhliny. Výtluk je na záznamu dobře rozlišitelný díky chladnější teplotě v místě poruchy – obr. 17, v termogramu odpovídá nízké teplotě černá barva. Nižší teplota je způsobena stínem, který vrhá hrana výtluku nebo přítomností vody ve výtluku.



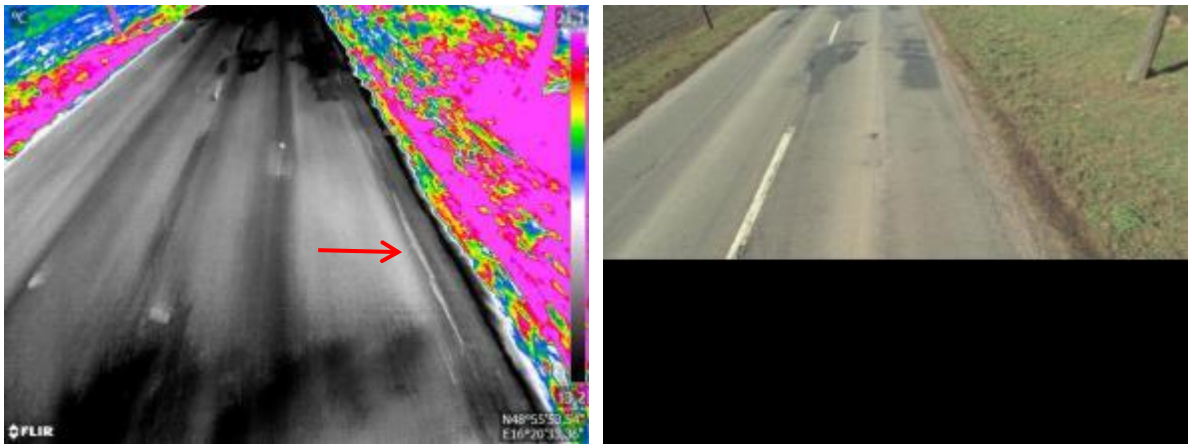
Obr. 17: *Lokalizace výtluků pomocí termokamery - bod Sp2, zdroj: CDV*

Rovněž vysprávky výtluků lze pomocí termokamery snadno lokalizovat. Vysprávky bývají zpravidla z mírně odlišného materiálu a mají odlišný barevný odstín. Na obr. 18 jsou zobrazeny vysprávky provedené z tmavšího materiálu, který se na slunci více zahřívá a proto je lze na termogramu dobře rozlišit díky vyšší teplotě.

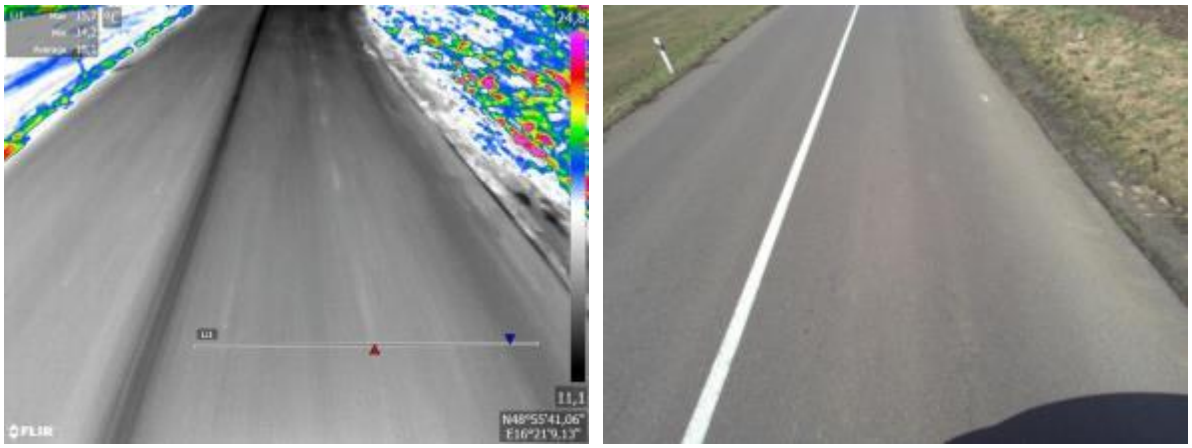
Trhliny se projeví mírně odlišnou teplotou díky rozdílnému oteplování / ochlazování vozovky v místě poruchy a mimo ni. Na obr. 19 je znázorněna podélná trhlina (bílou barvou). Vozovka bez zjevných poruch se vyznačuje homogenním termogramem (obr. 20).



Obr. 18: *Lokalizace vysprávek pomocí termokamery, zdroj: CDV*

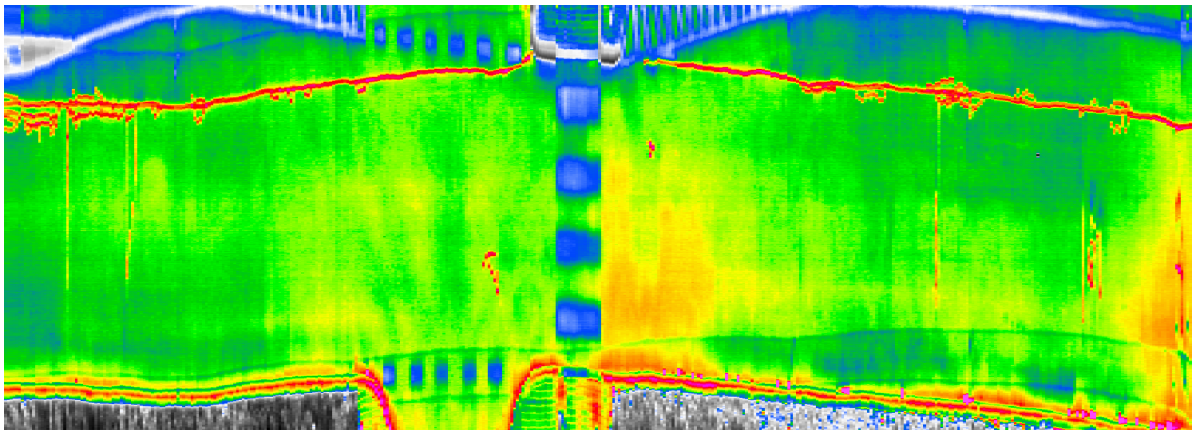


Obr. 19: *Lokalizace trhlin pomocí termokamery, zdroj: CDV*



Obr. 20: *Vozovka bez zjevných poruch, zdroj: CDV*

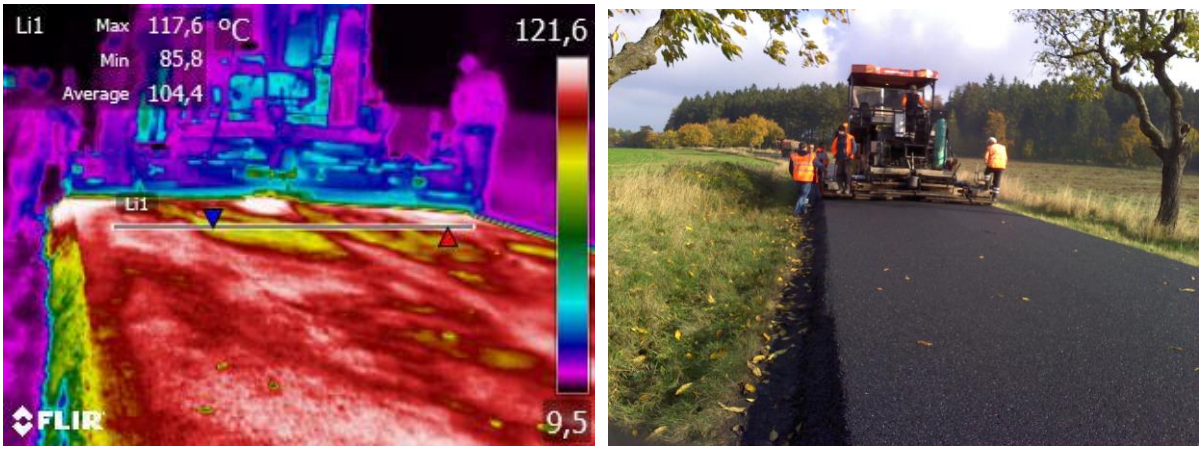
Jednotlivé snímky, ze kterých se skládá termografické video lze upravit a složit za sebe. Vznikne tím teplotní mapa měřené komunikace (obr. 21). Na termogramu je možné identifikovat vodorovné dopravní značení (modrá barva), asfaltová zálivka (nepravidelná červená čára ve vrchní části obrázku) apod.



Obr. 21: *Teplotní mapa měřené komunikace, zdroj: CDV*

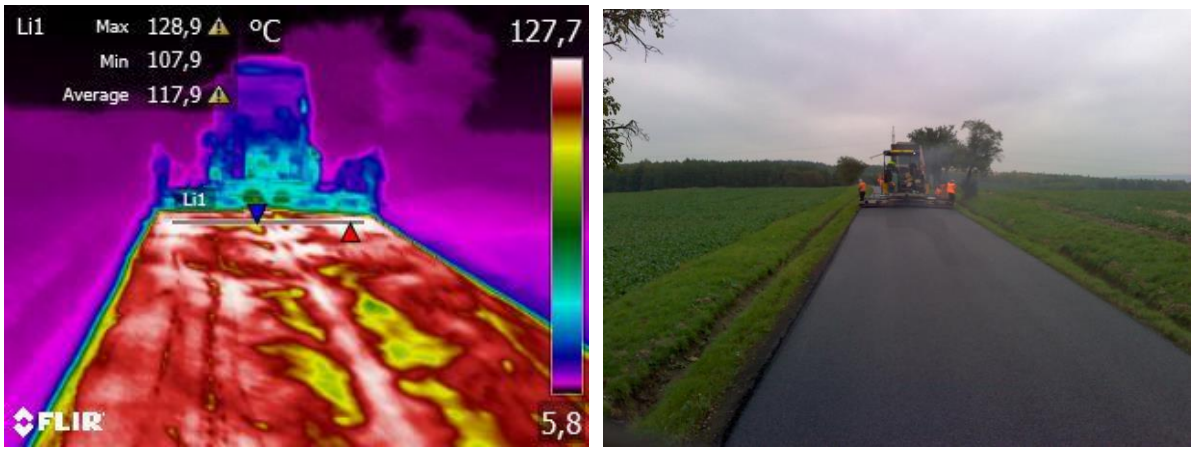
4.2.2 Monitorování vývoje teplot při pokládce asfaltových vrstev

Jedním z důležitých faktorů ovlivňujících životnost vozovky s asfaltovým krytem je mezerovitost a objemová hmotnost asfaltové vrstvy, která souvisí také s mírou zhutnění. Teplotní segregace asfaltové směsi při pokládce vede k lokálním změnám mezerovitosti a tím i ke změnám objemové hmotnosti asfaltové směsi. Na některých místech dochází k nedokonalému zhutnění asfaltové vrstvy a v průběhu provozu komunikace mohou být tato místa následně negativně ovlivněna.



Obr. 22: *Kontrola teplotní homogenity asfaltové směsi – příklad 1, zdroj: CDV*

Termokamera umožňuje kontinuální sledování vývoje teplot při pokládkách asfaltových vrstev vozovky. Obsluha finišeru tak může v průběhu pokládky operativně přijmout nezbytná opatření pro zvýšení kvality budované vozovky. Na termogramu (obr. 22) jsou za finišerem patrné oblasti s teplotou lišící se až o 30° C. Tyto rozdíly v teplotách vznikly v důsledku nerovnoměrného chladnutí asfaltové směsi na korbě nákladního vozidla. Pokud by došlo ještě k výraznějšímu vychladnutí směsi, může dojít ke zmíněným problémům se zpracováním a se zhutněním asfaltové směsi.



Obr. 23: *Kontrola teplotní homogenity asfaltové směsi – příklad 2, zdroj: CDV*

4.3 Měření v tunelech

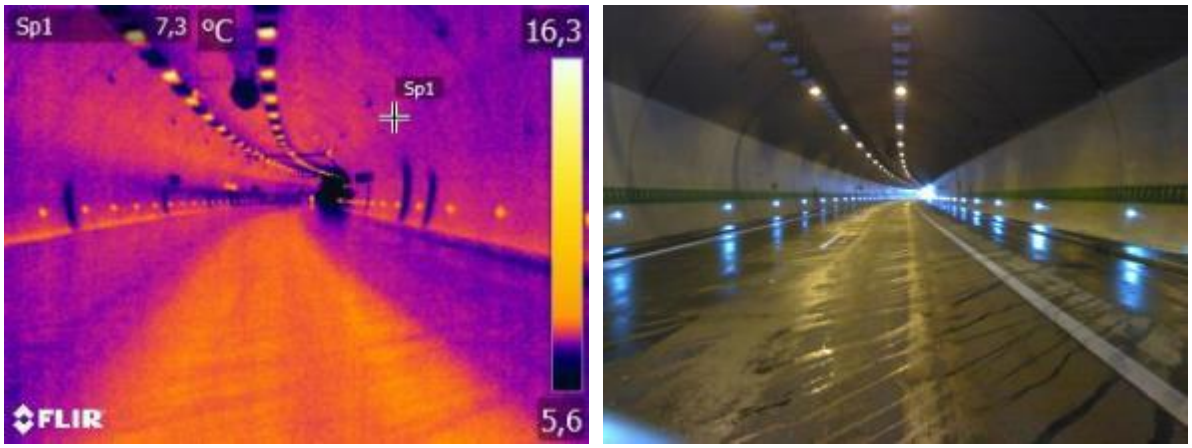
Termokameru lze s výhodou použít na ostění tunelu ze stříkaného betonu. Nicméně, u nových tunelů se téměř žádné anomálie zaznamenatelné pomocí termokamery nevyskytují. Jedním z důvodů může být fakt, že se tyto poruchy nenachází blízko povrchu a hlubší defekty nedokáže termokamera odhalit.

Princip zjišťování dutin je obdobný jako u mostů a je popsaný v kapitole 2.7. Pro vytvoření teplotního kontrastu na povrchu ostění je nezbytný dostatečný rozdíl mezi noční a denní teplotou. Aby se tato změna venkovní teploty projevila i v tunelu, je potřeba dostatečného proudění vzduchu v něm. Nejvhodnější doba pro průzkum nastává začátkem léta. Naopak detekce průsaků vody a vlhkosti je nezávislá na ročním období a změně okolní teploty v průběhu dne. Teplotní rozdíly na povrchu ostění jsou určovány jeho stavem a interakčními procesy se vzduchem v tunelu:

- ochlazení v důsledku odpařování vody z povrchu,
- reakce na teplý nebo studený vzduch,
- drsnost povrchu,
- dutiny (štěrková hnízda pod povrchem, špatný kontakt ostění se skálou),
- nehomogenní složení materiálu.

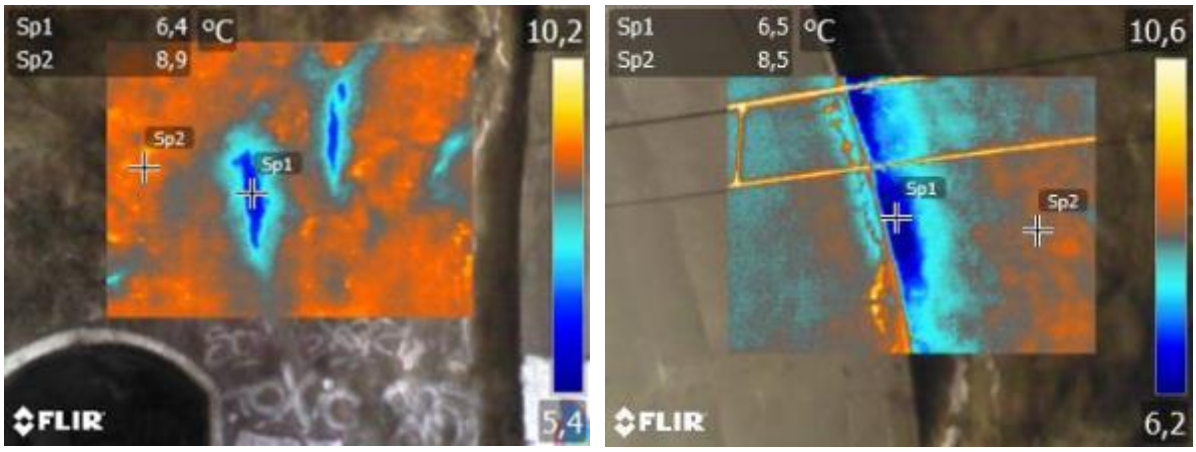
4.3.1 Aplikace ruční termokamery

Při pohybu v tunelu je nezbytné respektovat požadavky na BOZP. Z důvodu omezení rizik se proto doporučuje provádět měření v tunelu ruční termokamerou pouze při vyloučeném nebo omezeném provozu (obr. 24). Z prostorových důvodů se při měření doporučuje použít širokoúhlý objektiv (45°).



Obr. 24: *Termogram z měření v silničním tunelu během pravidelné údržby, kdy byl provoz převedený do druhého tubusu, zdroj: CDV*

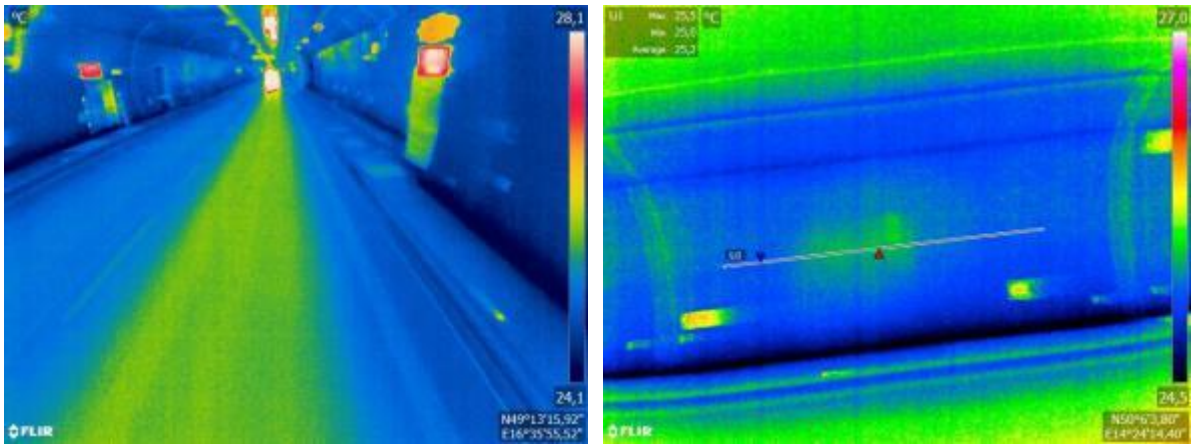
V železničním tunelu je možné po domluvě se správci provádět měření mezi průjezdy jednotlivých vlaků. Na obrázku 25 je termogram ze staršího železničního tunelu. Modrá – chladnější barva naznačuje průsak vody. Vlhký povrch se na termogramu jeví jako chladnější, protože voda odebírá při vypařování teplo svému okolí.



Obr. 25: *Termogram z měření v železničním tunelu s viditelnými průsaky – modrá barva, zdroj: CDV*

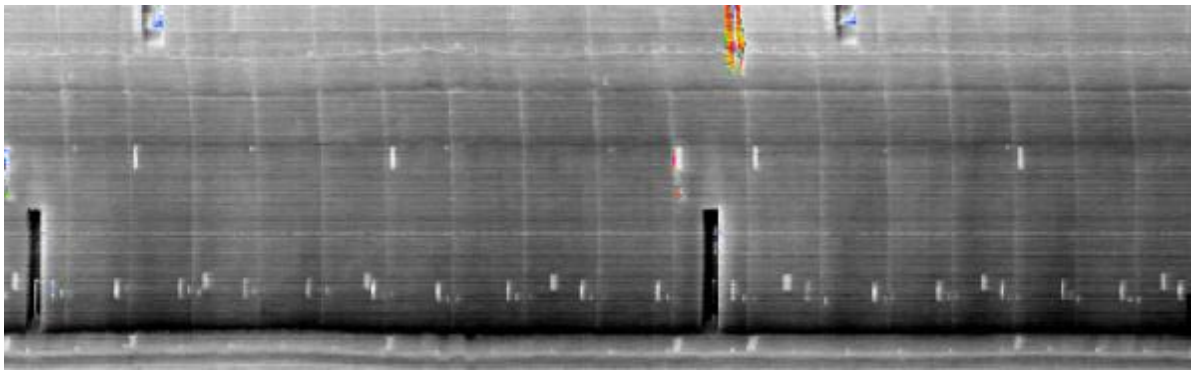
4.3.2 Aplikace mobilního zařízení

Při diagnostice tunelu je výhodné využít kontinuální způsob snímání. Při tomto měření je termokamera upevněná na střeše měřícího vozidla. Kontrolu ostění tak lze provést s minimálním omezením provozu v tunelu. Na obrázku 26 je termogram pořízený z měřícího vozidla s termokamerou osazenou ve směru jízdy a kolmo na směr jízdy. Při snímkování ostění kolmo na směr jízdy může dojít ke špatné interpretaci termogramů. Zdánlivá teplota měřícího vozidla se totiž odráží od hladkého ostění tunelu. V závislosti na emisivitě betonového povrchu a teplotě vozidla činí tento rozdíl několik desetin stupně.



Obr. 26: *Termogramy z měření v silničním tunelu: s termokamerou osazenou ve směru jízdy (vlevo), s termokamerou osazenou kolmo na směr jízdy + zdánlivá odražená teplota měřícího vozidla (vpravo), zdroj: CDV*

Jednotlivé snímky, ze kterých se skládá termografické video, lze upravit a složit za sebe podobně jako při měření vozovek. Vznikne tím teplotní mapa měřeného ostění (obr. 27).



Obr. 27: *Skládaná teplotní mapa měřeného ostění tunelu, zdroj: CDV*

5. Zpracování provedeného měření

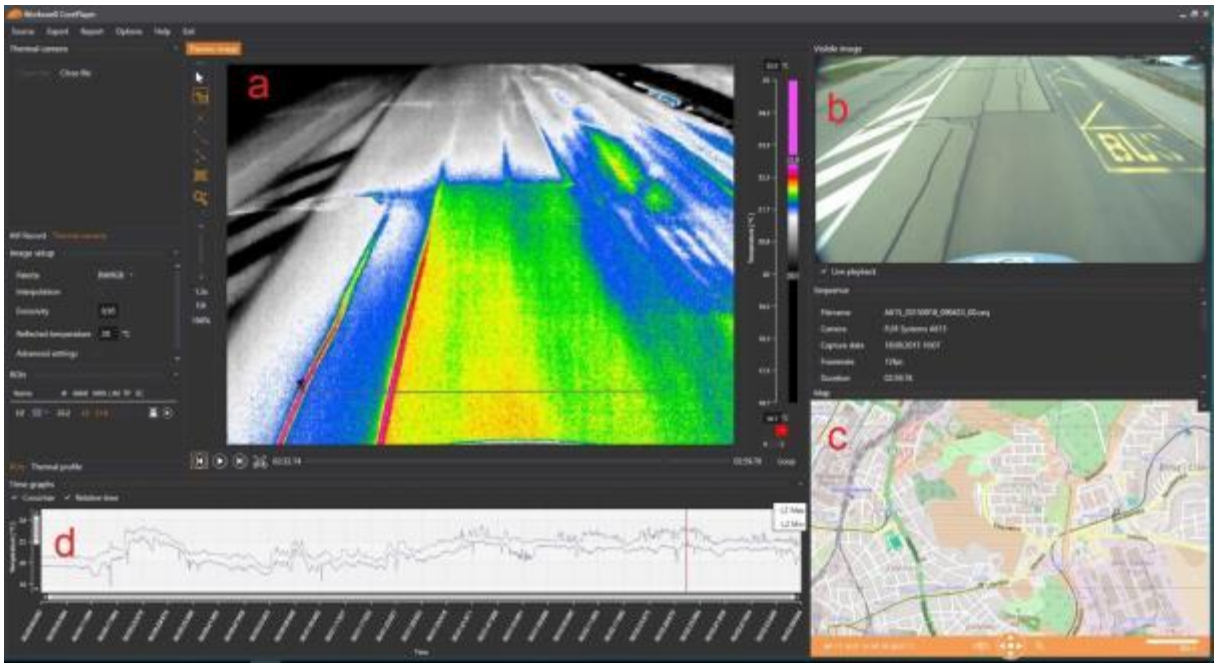
5.1 Software na zpracování termogramů

Každý výrobce termokamer zpravidla dodává ke svým výrobkům alespoň základní software pro prohlížení a zpracování termogramů. Někteří výrobci dále nabízí za příplatek pokročilejší verze softwaru s více funkcemi.

Mezi základní funkce softwaru patří volba různých barevných palet, nastavení teplotního rozsahu, přidávání bodových měření, vyhodnocení minim a maxim apod.

Obr. 28: *Ukázka softwaru pro zpracování termogramů - FLIR Tools, zdroj: CDV*

Pokročilejší software umožňuje záznam a přehrávání termografického videa, které může být doplněno o digitální video a přesnou pozici díky GPS. V následné analýze lze pro zvolené body nebo oblast vytvořit graf vývoje teploty v čase. U termografického videa pořízeného z měřícího vozidla je možné vyhodnotit vývoj teploty povrchu vozovky na zkoumaném úseku včetně určení lokálních minim a maxim.

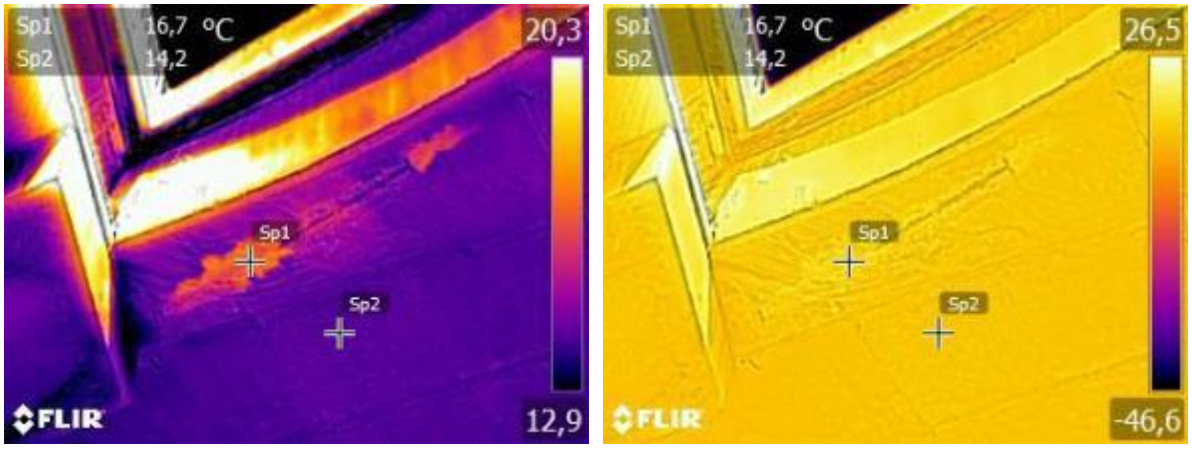


Obr. 29: *Ukázka softwaru pro zpracování termografického videa - Workswell CorePlayer;* ***a*** *- záznam z termokamery FLIR A615, rozlišení 640x480 pixelů,* ***b*** *- digitální HD video synchronizované se záznamem z termokamery,* ***c*** *- přesná poloha díky GPS,* ***d*** *- graf průběhu teplot v čase, zdroj: CDV*

5.2 Úprava termogramů

Při úpravě termogramů lze přidávat různé měřící funkce. U obrázků 18, 20, 22 a 23 bylo použito liniové měření. Software v tomto případě určí maximum, minimum a průměrnou hodnotu z množiny vybraných bodů.

Na obrázku 30 je ukázáno, jak je důležité zvolit správný teplotní rozsah. U levého termogramu byl rozsah nastaven manuálně, u termogramu vpravo byla ponechána automatická volba, kterou software nevhodně vyhodnotil, kvůli části oblohy v záběru.



Obr. 30: *Zpracování termogramů – důležitost správné volby teplotního rozsahu, zdroj: CDV*

6. Novost postupů, způsob uplatnění a ekonomické aspekty

6.1 Srovnání novosti postupů

V roce 2017 byly v ČR zavedeny normy řady EN 16714, které se týkají terminologie, přístrojů a obecných postupů pro termografické zkoušení.

Termografie se pro účely diagnostiky stavu dopravní infrastruktury v ČR zatím příliš nepoužívá a neexistuje žádný technický předpis, který by se touto problematikou zabýval. Různé aplikace se zkoušely v rámci řešení projektu CESTI.

Tato metodika nově uvádí, jaké jsou aplikace termografie na objektech dopravní infrastruktury, zejména při diagnostice mostů, vozovek a tunelů. Uvádí jak postupovat při měření a jakým způsobem vyhodnocovat a interpretovat naměřená data.

V příloze je uveden příklad uplatnění této NDT metody při monitorování vývoje **teplot** asfaltové vrstvy vozovky při její pokládce.

Uvádí se zde odkazy na aktuální předpisy, metodiky, články a jiné zdroje týkající se tohoto tématu.

Metodika vychází ze zkušeností:

- účastníků projektu CESTI: Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu (www.cesti.cz)
- PIARC D.2.3: Metody nedestruktivní diagnostiky a monitorování stavu vozovek (www.piarc.org)

6.2 Popis uplatnění certifikované metodiky

Tato metodika je určena správcům pozemních komunikací na všech úrovních (stát, kraje, města), projektantům, stavebním firmám a dalším subjektům, které mohou využívat data a zpracované výstupy z termografického snímání.

Bude uplatněna při diagnostice stavu mostů, vozovek a tunelů metodou infračervené termografie.

Informace zde uvedené se dají využít také pro účely monitorování vývoje teplot v průběhu procesu výstavby a následného provozu staveb.

6.3 Ekonomické aspekty

Zavedení postupů uvedených v metodice nevyžaduje žádné náklady.

Z ekonomického hlediska je hlavním přínosem rychlost, nenáročnost na vyhodnocení a nízká cena této diagnostické metody, která má univerzální použití a dá se použít jako vyhledávací měření k určení míst, na která je potřeba zaměřit vizuální prohlídku či podrobnou diagnostiku.

Postupy zde uvedené byly např. aplikovány při kontrolách dodržení teplot při pokládkách vrstev vozovek, zejména u nízkoteplotních asfaltových směsí, což má přímou vazbu na kvalitu prací a provedeného díla.

Metodika uvádí, jak postupovat při uplatnění různých aplikací termografie tak, aby mohl být využit jejich potenciál a vhodným způsobem byly doplněny stávající používané diagnostické metody.

Výsledky diagnostiky staveb jsou podkladem pro včasný návrh vhodného způsobu opatření a zásahu (údržba/ oprava/ rekonstrukce). Pokud jsou tyto podklady v dostatečném rozsahu a kvalitě vede to k optimalizaci nákladů a zvyšování životnosti staveb. K tomuto účelu může přispět také používání této NDT metody.

7. Seznam použité související literatury

Normy a technické předpisy:

ČSN EN 16714-1: Nedestruktivní zkoušení – Termografické zkoušení – Část 1: Obecné postupy, 2017

ČSN EN 16714-2: Nedestruktivní zkoušení – Termografické zkoušení – Část 2: Přístroje, 2017

ČSN EN 16714-3: Nedestruktivní zkoušení – Termografické zkoušení – Část 3: Termíny a definice, 2017

ČSN ISO 18434-1: Monitorování stavu a diagnostika strojů – Termografie – Část 1: Všeobecné postupy, 2009

TP 62: Katalog poruch vozovek s cementobetonovým krytem, 2010

TP 72: Diagnostický průzkum mostů pozemních komunikací, 2009

TP 82 Katalog poruch netuhých vozovek, 2010

MP: Provádění hlavních prohlídek tunelů pozemních komunikací, 2013

Katalog závad mostních objektů pozemních komunikací, 2008

ASTM D4788 - 03(2013): Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography

Výzkumné zprávy a publikace:

Development of Hand-held Thermographic Inspection Technologies: Revised Guidelines for Thermographic, Department of Civil and Environmental Engineering University of Missouri-Columbia, 2014

Development of Guidelines for Reduction of Temperature Differential Damage (TDD) for Hot Mix Asphalt Pavement Projects in Connecticut – Final Report , Connecticut Department of Transportation, 2005

Field Testing of Hand-Held Infrared Thermography, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Missouri-Columbia, 2015

Laboratory and Field Investigation of Temperature Differential in HMA Mixtures Using an Infrared Camera, South Carolina Department of Transportation, 2006

SHRP 2 (Strategic Highway Research Program 2), Nondestructive testing to identify concrete bridge deck deterioration, Transportation Research Board, 2013

SHRP 2 (Strategic Highway Research Program 2), Nondestructive testing to identify delaminations between HMA layers, vol. 1, 2 and 3, Transportation Research Board, 2013

SHRP 2 (Strategic Highway Research Program 2), Mapping voids, debonding, delaminations, moisture, and other defects behind or within tunnel linings, Transportation Research Board, 2013

SHRP 2 (Strategic Highway Research Program 2), Using Infrared and High-Speed Ground-Penetrating Radar for Uniformity Measurements on New HMA Layers, Transportation Research Board, 2013

MINKINA, Waldemar a DUDZIK, Sebastian. *Infrared Thermography: Errors and Uncertainties*. 1st ed. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 212 s. ISBN: 978-0-470-68224-1

Ostatní:

KADLEC, Karel, 2014. Teoretické základy bezdotykového měření teploty. *Automa* [online]. **20**(2) [cit. 3.10.2018]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-cislo/automa-2014_02/

Optotherm Themal Imaging: Emissivity Values, 2018 [online]. [cit. 3.10.2018]. Dostupné z: https://www.optotherm.com/emiss-table.htm

SOVA, Jan, 2017. Bezdotykové měření teplotních polí II. *Aldebaran* [online]. **15**(19) [cit. 3.10.2018]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_19_erm.php

Flir: Thermal camera for predictive maintenance FLIR T640, 2018. [online]. [cit. 4.10.2018]. Dostupné z: *https://www.flir.eu/products/t640/*

Fluke: Termokamera Fluke Ti450 PRO, 2018. [online]. [cit. 4.10.2018]. Dostupné z: *https://www.fluke.com/cs-cz/produkt/termalni-zobrazovani/termokamery/profesionalni-rada/termokamera-fluke-ti450-pro*

Testo: testo 890-2 – termokamera, 2018. [online]. [cit. 4.10.2018]. Dostupné z: https://www.testo.com/cz-CZ/testo-890-2/p/0563-0890-V2

Workswell: WIRIS & DJI M600 Pro, 2018. [online]. [cit. 4.10.2018]. Dostupné z: https://workswell.cz/wiris/

Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu: Účastníci projektu, 2018. [online]. [cit. 4.10.2018]. Dostupné z: http://www.cesti.cz/index.php?page=ucast_prj

World Road Association – PIARC: D.2 Pavements, 2018. [online]. [cit. 4.10.2018]. Dostupné z: https://www.piarc.org/en/Technical-Committees-World-Road-Association/Strategic-Theme-Infrastructure/Technical-Committee-Road-Pavements/

8. Seznam publikací, které předcházely metodice

Metodiky:

Aplikace nových a progresivních diagnostických metod na objektech dopravní infrastruktury - postup při zavádění do praxe, metodika, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., ve schvalovacím procesu

Výzkumné zprávy:

Databáze nových a progresivních diagnostických metod se vzorovými příklady jejich uplatnění, zpráva projektu CESTI, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 18 příloh, 2014

Analýza způsobů lokalizace při měření proměnných parametrů vozovek, zpráva projektu CESTI, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 16 s., 2017

Technicko-ekonomické srovnání NDT metod - vozovky, zpráva projektu CESTI, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 30 s., 2017

Katalog poruch odvodnění na pozemních komunikacích**,** zpráva projektu CESTI, Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., 35 s., 2017

Chapter 3.2 Infrared cameras to detect distresses, State of the art in monitoring road condition and road/vehicle interaction, report of World Road Association (PIARC), TC D.2.3, authors: Janků, M., Stryk, J., in evaluation phase

Články:

Janků M., Stryk J. Možnosti využití termografické metody při diagnostice objektů dopravní infrastruktury. Silniční obzor, 2014, roč. 75, č. 12, s. 331-334.

Janků M., Březina I., Grošek J. Use of Infrared Thermography to Detect Defects on Concrete Bridges. Procedia Engineering. 2017, (190), 62 - 69.

Janků M., Stryk J. Application of infrared camera to bituminous concrete pavements: measuring vehicle. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017, (236), 1 - 6.

Janků M., Stryk J. Metodika pro termografické měření objektů dopravní infrastruktury. Defektoskopie 2017: sborník příspěvků, Chomutov, 7. - 9. 11. 2017, Brno: VUT, 2017, 97 - 108.

Janků M., Stryk J. Využití infračervené termografie při pokládce asfaltových vrstev vozovky. Asfaltové vozovky 2017: sborník příspěvků, 28. - 29. 11. 2017, České Budějovice. Praha: Pragoprojekt, 6 s.

Stryk J., Janků M., Grošek J., Březina I. Diagnostika objektů dopravní infrastruktury nedestruktivními metodami. Silniční obzor, 2017, roč. 78, č. 12, s. 323-237.

Stryk J., Matula R., Březina I., Janků M. Přínosy uplatnění nedestruktivních diagnostických metod při plánování údržby a oprav. *Aktuální otázky správy a údržby pozemních komunikací*: sborník příspěvků, Znojmo, 3. - 4. 5. 2017, 7 s.

Stryk J. Uplatnění nových diagnostických metod při hodnocení stavu vozovek PK. *Silniční konference 2017*: sborník příspěvků, Brno, 18. - 19. 10. 2017, s. 107 - 111.

Ostatní:

Centrum pro efektivní a udržitelnou dopravní infrastrukturu: Vzorové příklady uplatnění NDT metod, 2018. [online]. [cit. 4.10.2018]. Dostupné z: http://www.cesti.cz/index.php?page=NDT

9. Použité definice a zkratky

Definice:

Níže jsou uvedeny pouze vybrané definice, ostatní jsou uvedeny v ČSN EN 16714-3.

Černé těleso – je ideální těleso, které pohlcuje veškeré záření všech vlnových délek, dopadající na jeho povrch. Absolutně černé těleso je současně ideální zářič, ze všech možných těles o stejné teplotě vysílá největší možné množství zářivé energie.

Delaminace – oddělení části materiálu ve vrstvě, separace vzájemně propojených vrstev.

Emitování – vyzařování energie zářením.

Infračervené záření – elektromagnetické záření o vlnové délce mezi 780 nm a 1 mm, nachází se mezi viditelným světlem a mikrovlnným zářením.

Termogram – resp. infračervený snímek je obraz pořízený termokamerou, který znázorňuje rozložení zdánlivých teplot na povrchu zkoumaného zdroje záření formou barevného spektra, kde zaznamenané teplotě odpovídá barevný tón.

Termokamera – optické zařízení včetně objektivů, filtrů, detektoru a interního zpracování dat pro sběr a zobrazování infračerveného záření emitovaného zkoušeným objektem a které měří zářivý tok a/nebo teplotu.

Zkratky:

BOZP - souhrn opatření stanovených legislativou a zaměstnavatelem, která mají předcházet ohrožení nebo poškození lidského zdraví v pracovním procesu a chránit firemní majetek.

GPS - Global Positioning System, je družicový polohový systém provozovaný Ministerstvem obrany Spojených států amerických, s jehož pomocí je možno určit polohu a přesný čas kdekoliv na Zemi s přesností do deseti metrů. Přesnost GPS lze s použitím dalších metod ještě zvýšit.

IR - Infra-red, česky infračervený. Označení vychází z faktu, že infračervené záření se nachází ve spektru elektromagnetického záření hned pod červenou barvou viditelného spektra.

FOV – zorný úhel, ve kterém přístroj snímá celkovou na něj dopadající zářivou energii

IFOV – okamžitý zorný úhel nebo úhlová projekce prvku detektoru na rovinu objektu

NDT - nedestruktivní testování, zahrnuje soubor metod, které jsou na základě měřitelných, nebo sledovatelných fyzikálních jevů schopny odhalit vady ve výrobku bez jeho porušení nebo poškození.

PŘÍLOHA: Monitoring vývoje teplot asfaltové vrstvy vozovky při její pokládce

Lokalizace:

Silnice III. třídy, okres Rokycany, kraj Plzeňský

Datum měření:

27. 10. 2016

Provedl:

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.

1. Důvod provedení měření

Sledování vývoje teplot při pokládce a následném hutnění asfaltové obrusné vrstvy vozovky s použitím nízkoteplotní asfaltové směsi.

V rámci měření byl na zkušebním úseku vozovky monitorován vývoj teploty asfaltové vrstvy po dobu 35 minut od pokládky. Sledovány byly dosažené teploty a postupný průběh poklesu teploty v čase.

2. Sledovaná část vozovky

Obr. 1: *Průběh pokládky asfaltové vrstvy vozovky finišerem, zdroj: CDV*

3. Provedení měření

Měření bylo provedeno pomocí infračervené stacionární termokamery FLIR A615 s širokoúhlým 80° objektivem. Termokamera byla upevněná na stativ a zaznamenávala termografické video. Měření se provádělo na vzdálenost 4 až 8 m. Snímkovací frekvence byla zvolena 3 Hz.

Technická specifikace termokamery FLIR A615:

- rozlišení: 640 x 480 pixelů,
- použitý teplotní rozsah: -20 až 150°C,
- teplotní citlivost: < 0.05°C při 30°C,
- přesnost: ±2°C nebo ±2 %,
- spektrální rozsah: 7,5 – 14 µm,
- frekvence snímků: až 50 Hz.

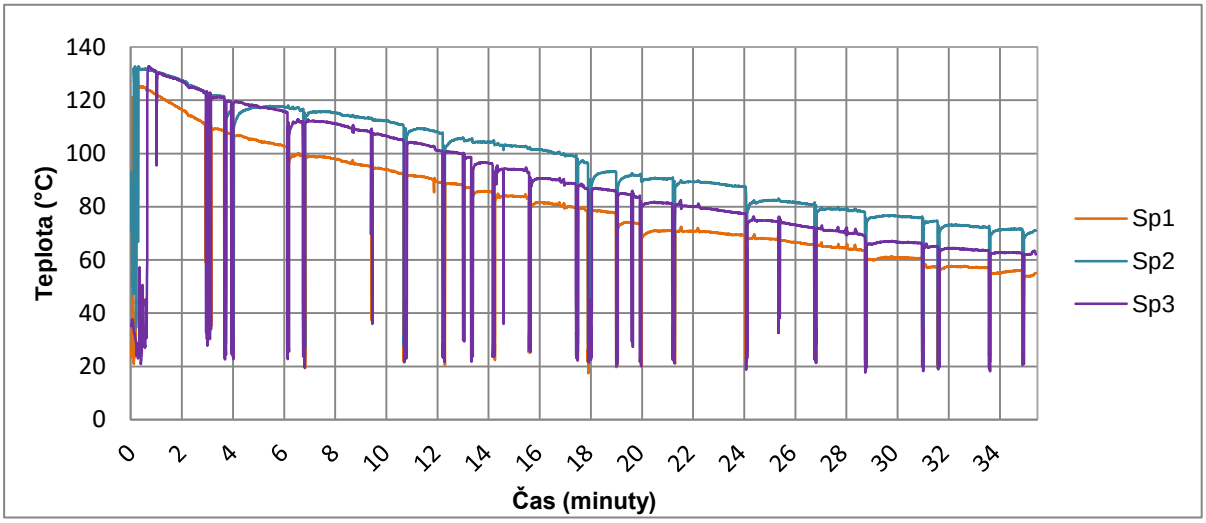
Při měření byla data ukládána do přenosného počítače a následně vyhodnocena v softwaru FLIR Tools.

4. Výstupy z měření

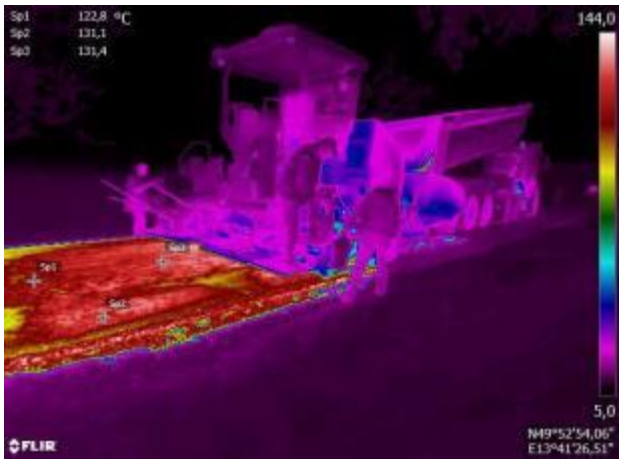
Výsledkem měření je 35-ti minutové termografické video, na kterém byla následně provedena analýza. Pro tři body na vozovce byl vykreslen graf průběhu teplot v čase. Teploty se pohybují v rozmezí 131°C těsně po pokládce až po 54°C v čase 35 minut od pokládky. Propady v teplotní křivce jsou způsobeny průjezdy vibračního válce, teplota tedy v těchto okamžicích nesouvisí s teplotou vozovky.

Jako výstup je níže uvedeno osm snímků z termografického videa v časech 0, 4, 8, 13, 17, 21, 27 a 35 minut.

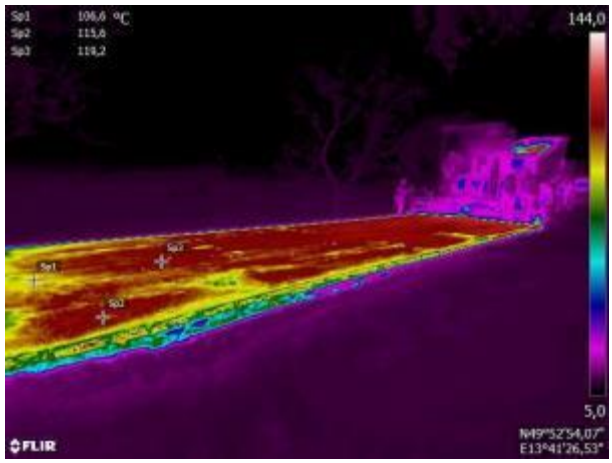
Graf 1: *Vývoj teploty asfaltové směsi*



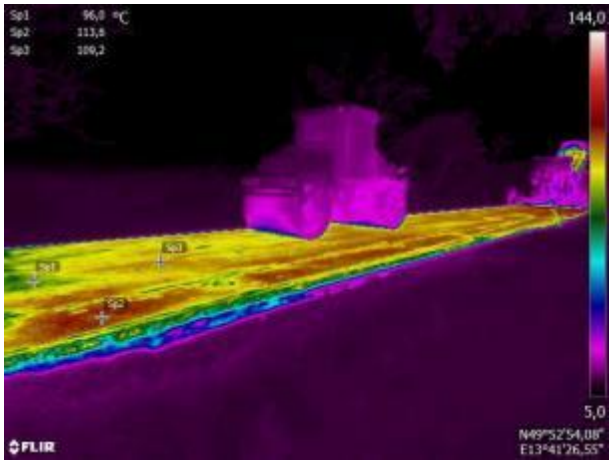
t = 0 min



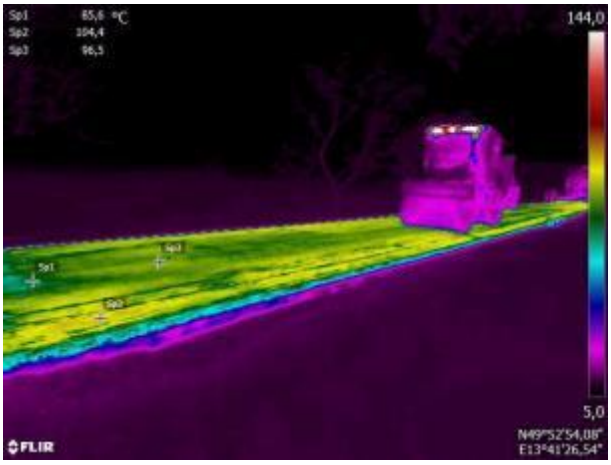
t = 4 min



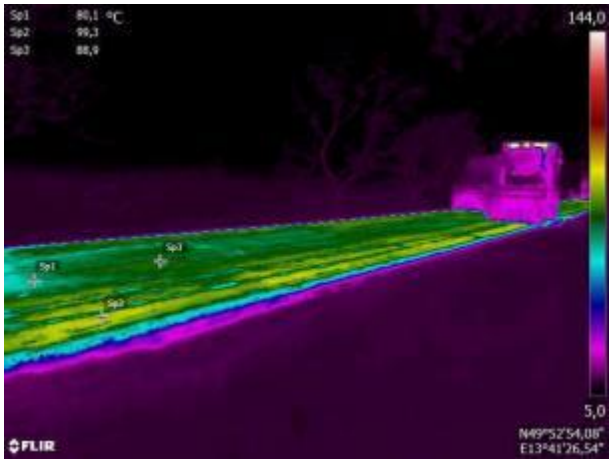
t = 8 min



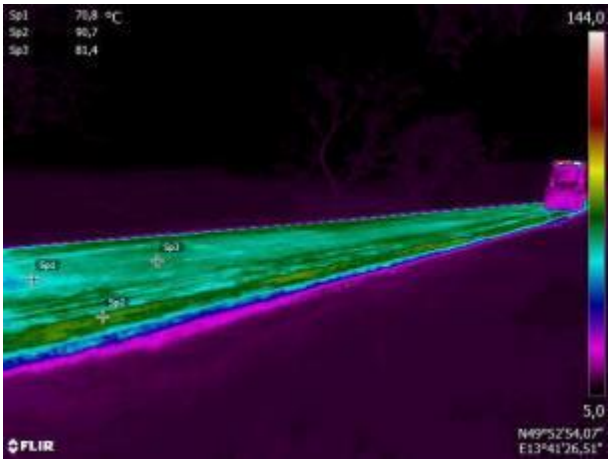
t = 13 min



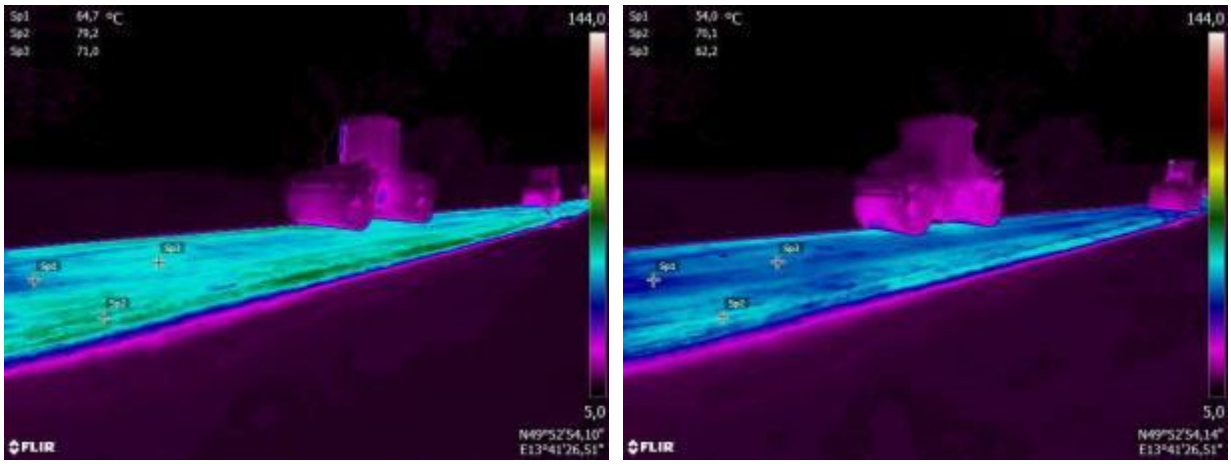
t = 17 min



t = 21 min



t = 27 min *t = 35 min*



5. Závěr

Využitím infračervené termokamery při pokládce vznikají přesné záznamy o vývoji teploty asfaltové směsi v čase. Tímto způsobem se dá kontrolovat dodržení předepsaných teplot a plošně vyhodnocovat teplotní segregaci asfaltové směsi.

Je možné sledovat souvislosti mezi rychlostí chladnutí směsi, okolní teplotou a přejezdy vibračního válce.

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i.
Líšeňská 33a
636 00 Brno
www.cdv.cz