

**Univerzita Palackého v Olomouci**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra geoinformatiky**

**TERMÁLNÍ MAPOVÁNÍ VYBRANÝCH PLOCH  
MĚSTA OLOMOUCE**

**Diplomová práce**

**Bc. Petra ĎURIANČÍKOVÁ**

**Vedoucí práce RNDr. Jakub MIŘIJOVSKÝ, Ph.D.**

**Olomouc 2022**

**Geoinformatika a kartografie**

## **ANOTACE**

Tato diplomová práce se zabývá analýzou teplotních charakteristik vybraných ploch města Olomouce za použití termálního mapování. V rámci práce je také řešena různá emisivita povrchů, která ovlivňuje samotné termální měření.

Princip řešení je založen na vlastním opakovaném měření ruční termální kamerou v hodinovém intervalu. Měření probíhalo v letních měsících za radiálního počasí. Lokality měření zahrnují typické urbanistické struktury Olomouce: historické centrum, vilovou čtvrť a sídliště. Výběr konkrétních lokalit je založen na konzultaci s Magistrátem města Olomouce. Zpracování termálních dat je zaměřeno především na automatizaci. Teploty ve stupních Celsia jsou získány z termálních snímků pomocí skriptu napsaném v jazyce R. Termální mozaiky jsou zpracovány v softwaru Agisoft Metashape skriptem napsaném v jazyce Python. Na základě vybraných ploch na mozaikách jsou zpracovány grafy teplotních charakteristik.

Práce dále obsahuje interpretace grafů, vyvozené obecné závěry a doporučení pro zlepšení současného stavu. Výsledky práce poslouží Magistrátu města Olomouce a politickým subjektům pro informovaná rozhodnutí v rámci udržitelného územního plánování a rozvoje města. Postup práce také může sloužit jako návod pro zpracování velkého počtu snímků z ruční termální kamery od společnosti FLIR.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

termální mapování; Olomouc; teplota povrchu; městské klima

Počet stran práce: 61

Počet příloh: 8 (z toho 2 volné a 6 elektronických)



## **ANOTATION**

This diploma thesis deals with the temperature characteristics analysis of selected areas of the city of Olomouc using thermal mapping. The thesis also deals with the different emissivity of the surfaces, which affects the thermal measurements.

The principle of the solution is based on the custom repeated measurements with a handheld thermal camera at hourly intervals. The measurements were carried out during the summer months in radiative weather. The measurement locations include typical urban structures of Olomouc: the historical centre, villa district and housing estate. The selection of specific sites is based on consultation with the Olomouc City Council. The processing of thermal data is mainly focused on automation. Temperatures in degrees Celsius are obtained from thermal images using a script written in R. Thermal mosaics are processed in Agisoft Metashape software using a script written in Python. Based on the selected surfaces on the mosaics, graphs of the thermal characteristics are prepared.

The thesis also contains interpretations of the graphs, general conclusions, and recommendations for improvement of the current situation. The results of the thesis will serve the Olomouc City Council and political bodies for informed decisions regarding sustainable spatial planning and city development. The thesis workflow can also serve as a guide for processing of a large number of images from the FLIR handheld thermal camera.

## **KEYWORDS**

thermal mapping; Olomouc; surface temperature; urban climate

Number of pages: 61

Number of appendixes: 8

**Prohlašuji, že**

- diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, aby jeden výtisk diplomové práce byl uložen v Knihovně UP k prezenčnímu nahlédnutí,

- souhlasím, že údaje o mé diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci dne

Bc. Petra Ďuriančíková

Děkuji vedoucímu práce RNDr. Jakobovi Miřijovskému, Ph.D. za cenné rady, připomínky, morální podporu a čas, který mi během řešení práce věnoval. Dále bych chtěla poděkovat Mgr. Lee Maňákové a Mgr. Miloslavu Dvořákovi z Odboru dopravy a územního rozvoje Magistrátu města Olomouce.

Velké díky patří především Terce, Magdě, mému příteli Marcelovi a mé rodině za pochopení a podporu, bez které by tato práce nevznikla.

# UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Petra ĎURIANČÍKOVÁ  
Osobní číslo: R200038  
Studijní program: N0532A330009 Geoinformatika a kartografie  
Studijní obor: Geoinformatika a kartografie  
Téma práce: Termální mapování vybraných ploch města Olomouce  
Zadávající katedra: Katedra geoinformatiky

### Zásady pro vypracování

Cílem práce je analyzovat teplotní charakteristiky vybraných ploch města Olomouce za použití termálního mapování. Studentka ve spolupráci s Magistrem města Olomouc vytipuje vybrané plochy, na kterých bude v pravidelných časových intervalech provádět teplotní mapování. Měřená data analyzuje a vytvoří několik sad teplotních poměrů vybraných ploch. Studentka využije letecká termální data z roku 2016 a bude se podílet na letecké kampani v roce 2021. Data z této kampaně zpracuje do podoby termální mozaiky. Obě datové sady následně porovná a analyzuje. Bude se rovněž zabývat vlivy, které ovlivňují samotné měření. Pokusí se tyto vlivy exaktně eliminovat (např. odstranění vinětače kamery). Jako podpůrná data lze využít družicové snímky ze systému Landsat.

Text práce s vybranými přílohami bude odevzdán ve dvou svázaných výtiscích na sekretariát katedry. O diplomové práci student vytvoří webovou stránku v souladu s pravidly dostupnými na stránkách katedry. Práce bude zpracována podle zásad dle Voženílek (2002) a závazné šablony pro diplomové práce na KGI. Povinnou přílohou práce bude poster formátu A2.

Rozsah pracovní zprávy: max. 50 stran  
Rozsah grafických prací: dle potřeby  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná

### Seznam doporučené literatury:

ZEMEK, František. Letecký dálkový průzkum Země: teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů. Centrum výzkumu globální změny AV ČR, 2014.  
Jiménez&#x2010;Muñoz, Juan C., and José A. Sobrino. „A generalized single&#x2010;channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data.“ *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984&#x2013;2012) 108.D22 (2003).  
Qin, Zhi-hao, A. Karnieli, and P. Berliner. „A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region.“ *International Journal of Remote Sensing* 22.18 (2001): 3719-3746.  
Jacob, F., et al. „Atmospheric corrections of single broadband channel and multidirectional airborne thermal infrared data: application to the ReSeDA experiment.“ *International Journal of Remote Sensing* 24.16 (2003): 3269-3290  
Voženílek, V. (2002): Diplomové práce z geoinformatiky. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, UP, 31 s.


Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.  
Katedra geoinformatiky

Datum zadání diplomové práce: 9. listopadu 2020  
Termín odevzdání diplomové práce: 6. května 2022

L.S.

---

doc. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.  
děkan



---

prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.  
vedoucí katedry

V Olomouci dne 14. prosince 2020

# OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>12</b>
<b>2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ .....</b>	<b>13</b>
2.1 Použité metody .....	13
2.2 Použitá data .....	13
2.3 Použité programy a programovací jazyky .....	14
2.4 Zájmové území .....	15
2.5 Postup zpracování .....	15
<b>3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>17</b>
3.1 DPZ v termální části elektromagnetického spektra .....	17
3.2 Ruční termální kamery .....	18
3.3 Termální snímkování v městském klimatu .....	19
<b>4 SBĚR DAT .....</b>	<b>24</b>
4.1 Testovací měření .....	24
4.2 Lokality a časový rámec .....	25
4.3 Nastavení kamery .....	27
4.4 Počasí .....	27
4.5 Snímkování UAV .....	28
<b>5 ZPRACOVÁNÍ DAT I .....</b>	<b>30</b>
5.1 Získání hodnot teploty .....	30
5.1.1 R .....	30
5.1.2 FLIR Thermal Studio .....	32
5.1.3 Srovnání výsledků .....	33
5.1.4 Korekce emisivity .....	33
5.2 Převod na TIFF .....	36
<b>6 ZPRACOVÁNÍ DAT II .....</b>	<b>37</b>
6.1 Tvorba mozaik .....	37
6.2 Zájmové plochy .....	40
6.2.1 Historické centrum .....	40
6.2.2 Třída Svornosti .....	41
6.2.3 Sídliště Nešporova .....	43
<b>7 ANALÝZY A INTERPRETACE .....</b>	<b>45</b>
7.1 Historické centrum .....	45
7.2 Třída Svornosti .....	47
7.3 Sídliště Nešporova .....	49
7.4 Srovnání napříč lokalitami .....	53
7.4.1 Asfalt .....	53
7.4.2 Beton .....	54
7.4.3 Tráva .....	55
7.4.4 Žula .....	55

<b>8</b>	<b>VÝSLEDKY</b> .....	<b>57</b>
8.1	Doporučení pro územní plánování .....	58
<b>9</b>	<b>DISKUZE</b> .....	<b>59</b>
<b>10</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>61</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE</b>	
	<b>PŘÍLOHY</b>	

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
CSV	Comma Separated Values
ČHMÚ	Český HydroMeteorologický Ústav
DPZ	Dálkový Průzkum Země
ε	Emisivita
FPA	Focal Plane Array
GIS	Geografický Informační Systém
IDE	Integrated Development Environment
FOV	Field Of View
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LCZ	Local Climate Zone
LST	Land Surface Temperature
LULC	Land Use/Land Cover
MMOL	Magistrát Města Olomouce
NDVI	Normalized Difference Vegetation index
TIFF	Tagged Image File Format
TIR	Thermal InfraRed
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UHI	Urban Heat Island
UP	Univerzita Palackého



## ÚVOD

Podíl městského obyvatelstva se neustále zvyšuje, v současnosti ve městech žije více než polovina světové populace (OSN, 2018). S tímto rychlým vývojem přichází ruku v ruce zranitelnost vůči extrémům počasí a zhoršujícím se klimatickým podmínkám. Města se v letních měsících potýkají s obrovským zahříváním člověkem vybudovaných struktur, které dopadá na životní komfort jejich obyvatel. I přes to jsme ale stále svědky kácení zdravých vzrostlých stromů, budování nezastíněných prostranství dlážděných betonem či obecně neohlížení se na principy udržitelného rozvoje.

Aby byly místní samosprávy schopny čelit těmto výzvám, je třeba analyzovat teploty povrchů ve městě. Pro studium městského klimatu má zásadní význam povrchová teplota. Tu lze měřit bodově meteorologickými stanicemi, ovšem ztrácí se zde prostorový prvek a variabilita povrchu. Lze využít také satelitní či letecké termální snímky, jejich rozlišení je ale pro některé lokální charakteristiky příliš malé. Velmi často je také využíváno pocitové mapování. Data získaná z takového šetření jsou ale subjektivní a pro strategické rozhodování je nutné je podložit daty objektivními.

Zde se nabízí velký potenciál pro využití ručních termálních kamer, které na rozdíl od satelitních snímků zachovávají lokální charakteristiky povrchů, ale umožňují přitom plošná měření. Oproti snímkování drony není pro jejich užívání potřeba speciální licence ani povolení. V olomouckém městském prostředí nebylo zatím provedeno mnoho podobných výzkumů. Tato práce bude navíc přímo využita magistrátem města, v jehož spolupráci byly vybrány snímkové lokality.

# 1 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je analyzovat teplotní charakteristiky vybraných ploch města Olomouce za použití termálního mapování. Ve spolupráci s Magistrátem města Olomouce (MMOL) byly vytipovány vybrané plochy, na kterých bylo v pravidelných intervalech provedeno teplotní mapování. Měřená data byla analyzována a byly vytvořeny sady teplotních poměrů vybraných ploch ve formě termálních mozaik a grafů. V rámci diplomové práce byly také řešeny vlivy, které ovlivňují samotné termální měření (např. různá emisivita povrchů). Snahou bylo tyto vlivy exaktně eliminovat.

Neuskutečněným cílem práce je letecká kampaň, jejíž výsledky měly být zpracovány do termální mozaiky a porovnány s daty z letecké kampaně z roku 2016. Původně bylo zamýšleno pracovat s termální kamerou Workswell Thermal Vision Pro, kterou lze připevnit na letadlo či UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Po zadání práce bylo ovšem zjištěno, že termální čidlo FLIR Tau 2 na této kameře je nefunkční a výrobce není schopen jej opravit. Jako náhrada mělo sloužit UAV snímkování dronem DJI Mavic 2 Enterprise Dual, který disponuje termální kamerou. Ani toto snímkování ale nepřineslo vyhovující výsledky, jelikož termální snímky jsou v uzavřeném formátu a společnost DJI k dubnu 2022 neposkytuje software, který by umožnil extrakci raw či skutečných hodnot teploty. Od letecké kampaně v roce 2021 bylo tedy po dohodě s vedoucím upuštěno.

Cíl práce byl řešen v posloupnosti několika dílčích cílů:

- rešerše literatury,
- testování termální kamery,
- sběr dat,
- zpracování dat I – extrakce skutečných hodnot teploty,
- zpracování dat II – tvorba mozaik a zonální statistiky,
- analýzy a interpretace.

Výsledky práce poslouží MMOL a politickým subjektům pro informovaná rozhodnutí v rámci udržitelného územního plánování a rozvoje města. Součástí práce je také sada doporučení pro zlepšení stávajícího stavu teplotního chodu vybraných ploch. Postupy zpracování termálních dat a poznatky, které byly zjištěny během řešení praktické části práce mohou být využity v navazujících diplomových pracích a výzkumech.

## 2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

### 2.1 Použité metody

#### Bezkontaktní termální snímkování

Veškerá termální data analyzována v této diplomové práci byla získána pomocí bezkontaktního termálního snímkování. Termální snímkování ruční kamerou proběhlo mezi 23. 7. a 7. 8. 2021 na třech lokalitách v hodinovém intervalu (více viz kapitola 4.2). Měřicích dní bylo celkem sedm. Termální snímkování pomocí UAV bylo realizováno vedoucím práce 19. 10. 2021 ráno a odpoledne.

#### Fotogrammetrické metody

Fotogrammetrie je věda, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálních modelů terénu a dalších produktů, které lze získat z obrazového, nejčastěji fotografického záznamu (ISPRS, 2019). V práci byly využity fotogrammetrické metody při procesu mozaikování termálních snímků.

#### Deskriptivní analýza

Analýzy provedené na termálních datech spadají do kategorie deskriptivních (popisných). Cílem je identifikovat trendy, relativní rozdíly v denních chodech teplot a vliv zastínění či oslunění povrchu.

#### Zonal Statistics

Z metod GIS byl použit především nástroj *Zonal Statistics as Table* ze softwaru ArcGIS Pro. Tento nástroj umožňuje výpočet statistik, jako je např. průměr, medián, maximum či minimum v definovaných zónách. Slouží pro výpočet statistik nad rastrovými daty, zóny ale mohou být také ve formátu vektorovém (Esri, 2022).

### 2.2 Použitá data

Vstupními daty jsou termální snímky ve formátu JPEG (Joint Photographic Experts Group) pořízené ruční termální kamerou FLIR E60, kterou vlastní Katedra geoinformatiky Univerzity Palackého (UP). Snímky mají rozlišení 320 × 240 px (Obr. 2.1). Celkem bylo v rámci měření pořízeno přes deset tisíc snímků. Měření probíhalo v daný den pravidelně každou hodinu.



Obr. 2.1 Příklad termálního snímku z kamery FLIR E60.

FLIR E60 je ruční termální kamera od firmy Teledyne FLIR LLC (dříve FLIR Systems, Inc.) se spektrálním rozlišením 7,5–13  $\mu\text{m}$ . Přesnost měření je udávána na  $\pm 2$  °C nebo  $\pm 2$  % naměřené hodnoty při okolní teplotě prostředí mezi 10 a 35 °C (FLIR Systems, Inc., 2016). Kamera není schopna ukládat geografické souřadnice snímků. Další technické parametry lze najít v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Technická specifikace kamery FLIR E60 (upraveno podle FLIR Systems, Inc., 2016)

infračervené rozlišení	320 × 240 px
teplotní citlivost	< 0.05°C při 30 °C
Field Of View (FOV)	25° × 19°
min. zaostřovací vzdálenost	0,4 m
ohnisková vzdálenost	18 mm
frekvence snímkování	60 Hz
ostření	manuální
digitální zoom	2× a 4×
teplotní rozsah	-20–650 °C
spektrální rozlišení	7,5–13 $\mu\text{m}$
přesnost	$\pm 2$ °C nebo $\pm 2$ % naměřené teploty
typ detektoru	mozaikové uspořádání (Focal Plane Array – FPA), nechlazený mikrobolometr

## 2.3 Použité programy a programovací jazyky

### R

R je programovací jazyk pod licencí GNU General Public License, který slouží především pro statistické výpočty a grafiku. V diplomové práci byla využita verze 4.1.0 v prostředí IDE (Integrated Development Environment) R Studio.

Skript napsaný v jazyce R slouží pro extrakci kalibračních konstant z termální kamery FLIR E60, atmosférické korekce a korekce emisivity, extrakci raw hodnot teploty a převod na teploty skutečné a konverzi do formátu TIFF (Tagged Image File Format). Použity byly především následující knihovny pod licencí GNU GPL: *Exiftool* (autor: P. Harvey), *Thermimage* (autor: G. Tattersall), *ijtiff* (autoři: R. Nolan a S. Padilla-Parra), *gdalUtils* (autoři: J. A. Greenberg a M. Mattiuzzi).

### Python

Python je programovací jazyk pod licencí Python Software Foundation License, která je kompatibilní s GNU. Bylo pracováno s verzí 3.9.7 v prostředí IDE Spyder.

Python byl využit pro grafické srovnání odchylek mezi teplotami extrahovanými pomocí skriptu napsaném v R a ze softwaru FLIR Thermal Studio Pro. Dále také sloužil pro automatizaci tvorby mozaik v softwaru Agisoft Metashape.

### Agisoft Metashape Pro

Agisoft Metashape je software pro fotogrammetrické zpracování obrazu a generování 3D modelů. Jedná se o komerční software, jehož licencí Professional disponuje Katedra geoinformatiky. V diplomové práci byla využita verze 1.8.2 pro zpracování termálních mozaik.

### **FLIR Thermal Studio Pro**

FLIR Thermal Studio je komerční software pro analýzu termálních snímků z kamer od společnosti Teledyne FLIR LLC. Jedná se o náhradu staršího softwaru FLIR Tools, který neumožňoval zpracování více snímků najednou. Plná licence byla poskytnuta výrobcem pro účely této práce. Byla využita verze 1.9.3 pro extrakci skutečných hodnot teplot ze snímků a pro testování vlivu nastavení emisivity.

### **ArcGIS Pro**

ArcGIS Pro je komplexní GIS software od firmy Esri. Verze 2.9.2 byla využita pro výpočet statistik nad termálními snímky.

### **Microsoft Excel**

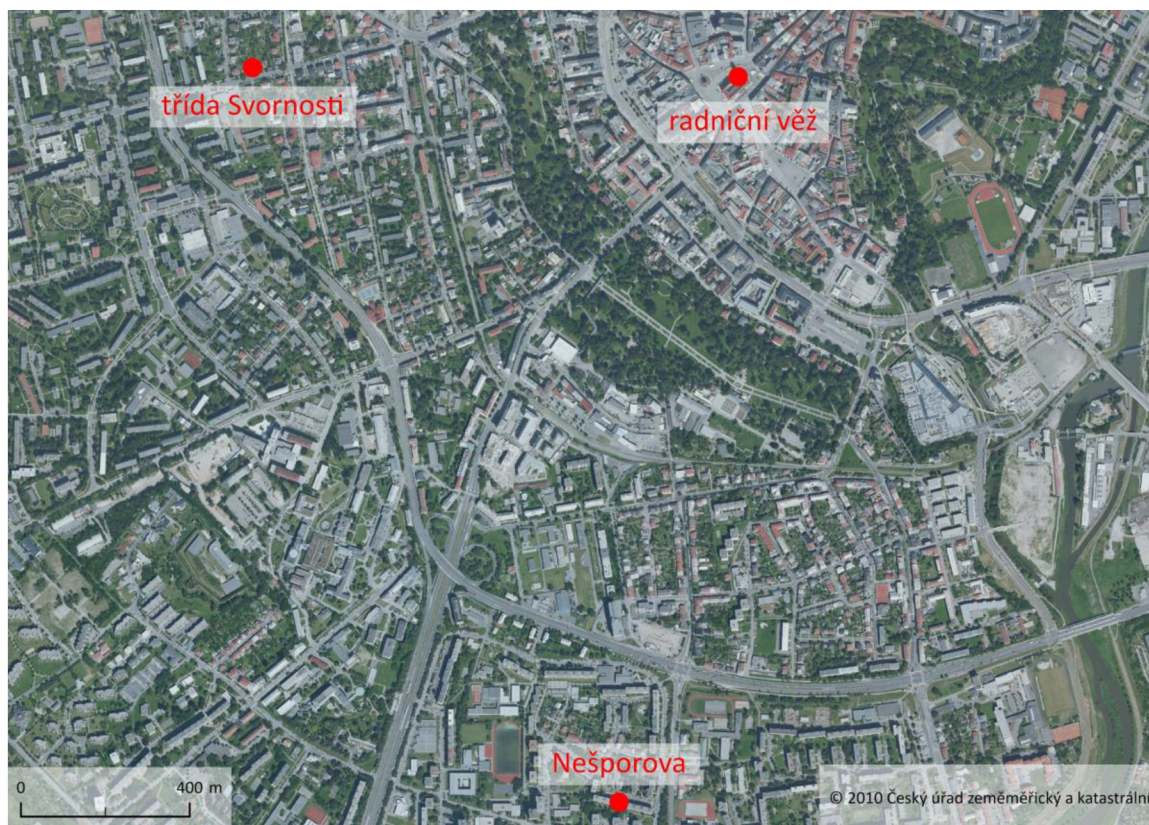
Microsoft Excel byl využit pro tvorbu grafů a výpočty teplotních charakteristik.

## **2.4 Zájmové území**

Zájmovým územím je město Olomouc. Po konzultaci s MMOL a po zvážení přístupnosti ke snímkování z výšky byly zvoleny následující měřící lokality (Obr. 2.2):

- historické centrum (snímkováno z vyhlídky radniční věže),
- vilová čtvrť na třídě Svornosti (snímkováno ze střechy vily),
- sídliště na ulici Nešporova (snímkováno z balkonu v osmém patře).

Detailnější popis zájmového území a jednotlivých lokalit je k dispozici v kapitole 4.2.



Obr. 2.2 Lokality termálního snímkování.

## **2.5 Postup zpracování**

Postup zpracování lze rozdělit do následujících pěti částí: úvodní fáze, sběr dat, dvě fáze zpracování dat a analýzy a jejich interpretace (Obr. 2.3). V úvodní fázi byla provedena



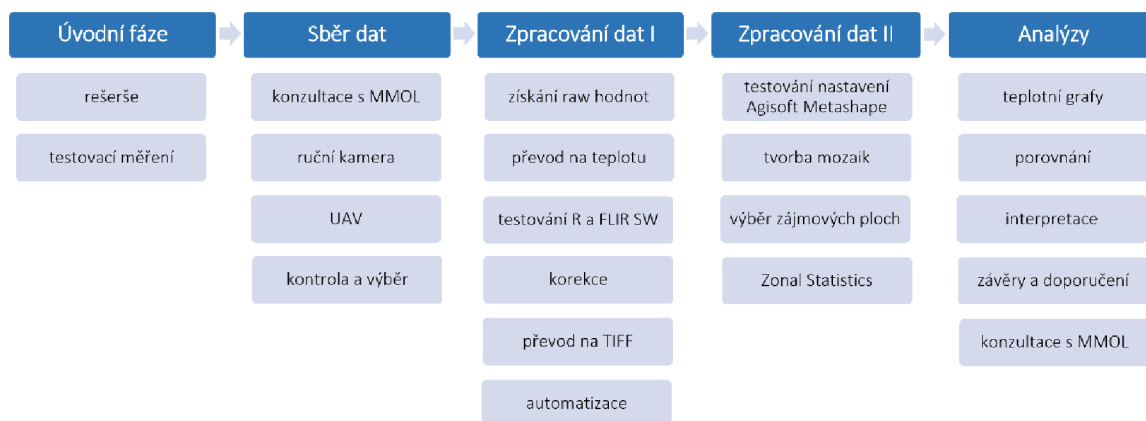
rešerše současného stavu problematiky a seznámení se s principy měření termální kamerou FLIR E60.

Následně proběhla konzultace s MMOL, konkrétně s Mgr. Leou Maňákovou a Mgr. Miloslavem Dvořákem z Odboru dopravy a územního rozvoje. Na základě konzultace byly vybrány lokality, které by z hlediska teplotního chování MMOL zajímaly. Tyto lokality byly nasnímkovány ruční termální kamerou. Poté proběhlo také termální snímkování pomocí UAV. Snímky bylo poté nutné ručně zkontrolovat a provést výběr těch nejvhodnějších.

V první fázi zpracování dat bylo potřeba ze snímků extrahovat hodnoty teploty. Testovány byly dva postupy – zpracování pomocí funkce *raw2temp* z knihovny *Thermimage* pro programovací jazyk R a zpracování pomocí softwaru FLIR Thermal Studio. Dále byly provedeny korekce emisivity a snímky byly převedeny do formátu TIFF pro usnadnění dalšího zpracování. Vzhledem k velkému počtu snímků bylo nutné všechny tyto kroky automatizovat.

Druhá fáze zpracování dat sestávala z tvorby termální mozaik a výpočtu průměrných teplot pro vybrané plochy. Mozaiky byly vytvořeny poloautomaticky v softwaru Agisoft Metashape. Nastavení workflow pro tvorbu mozaik bylo nejdříve otestováno na výběru snímků. Poté byly v softwaru ArcGIS Pro vybrány a vytvořeny jednotlivé zájmové plochy na mozaikách, pro které byly následně vypočteny teplotní statistiky.

V poslední části práce byly průměrné teploty na zájmových plochách vyhodnoceny, vykresleny do grafů a porovnány mezi sebou. Výsledky byly interpretovány, byly formulovány obecné závěry a doporučení pro zlepšení některých teplotních poměrů. Na závěr opět proběhla konzultace s MMOL, kde byly výsledky práce prezentovány.



Obr. 2.3 Vývojový diagram postupu zpracování.

### 3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Globální oteplování je v současnosti hojně skloňovaný termín jak v laických, tak ve vědeckých kruzích. V globálním měřítku je oteplování věnována velká pozornost, zatímco lokální iniciativy jsou zejména v Česku stále spíše výjimkou než pravidlem. Termální mapování přitom i v této oblasti nabízí široké možnosti využití – od detekce městských tepelných ostrovů až po detailní měření účinnosti izolačních materiálů.

#### 3.1 DPZ v termální části elektromagnetického spektra

Vyzářená infračervená radiace se obvykle nazývá „teplo“ či termální záření. V dálkovém průzkumu Země (DPZ) je jako termální infračervené záření (Thermal InfraRed – TIR) označována oblast od 8 do 14  $\mu\text{m}$  (tzv. druhé atmosférické okno, ve kterém lze měřit ve dne i v noci). V rámci termálního DPZ se měří záření emitované z povrchu objektu zájmu, narozdíl od optického DPZ, kde se měří záření odražené (Zemek, 2014). Fyzikální podstatou DPZ v termální části elektromagnetického spektra se již detailně zabývali Purket (2017) a Pour (2019) ve svých akademických pracích. Zde jsou proto popsány jen nejdůležitější principy.

##### Kinetická a radiační teplota

Měření teploty je obvykle prováděno tak, že se měřicí přístroj (nejčastěji teploměr) umístí do kontaktu s objektem, jehož teplota se měří, nebo se do měřené látky ponoří. V takovém případě se měří kinetická teplota. Kinetická teplota je „vnitřním“ projevem průměrné translační energie molekul objektu. Kromě tohoto vnitřního projevu vyzařují objekty energii v závislosti na své teplotě. Tato vyzařovaná energie je „vnějším“ projevem energetického stavu objektu. Právě tento vnější projev je zaznamenáván pomocí DPZ. Vyzářovaná energie se používá k určení radiační teploty objektů na zemském povrchu (Lillesand a kol., 2015).

##### Emisivita ( $\epsilon$ )

Emisivita je míra vyzařovací schopnosti každého reálného tělesa. Ideálním stavem je tzv. absolutně černé těleso, které absorbuje a znovu vyzáří veškerou energii, která na něj dopadne. Emisivita nabývá hodnot mezi 0 a 1 a mění se s vlnovou délkou a úhlem snímání. Emisivita absolutně černého tělesa je rovna jedné. V závislosti na materiálu se emisivita může do jisté míry měnit také v závislosti na teplotě. V případě, že se teplota pozorovaných objektů pohybuje v intervalu 270–330 K (přibližně -3–58  $^{\circ}\text{C}$ ), a objekt je snímán v ortogonálním směru, emisivita závisí pouze na vlnové délce (Zemek, 2014). Emisivita je dle Lillesanda a kol. (2015) definována jako

$$\epsilon = \frac{\text{energie vyzářená objektem o dané teplotě}}{\text{energie vyzářená absolutně černým tělesem o stejné teplotě}} \quad (1)$$

Většina reálných těles jsou tzv. šedá tělesa či selektivní zářiče. Šedé těleso vykazuje hodnotu emisivity menší než 1, tato hodnota ale zůstává konstantní pro všechny vlnové délky. Pokud se emisivita objektu mění s vlnovou délkou, jedná se o selektivní zářič (Lillesand a kol., 2015).

Korekce emisivity jsou při termálním snímání obzvláště důležité, jelikož mohou způsobit výrazné chyby v naměřených teplotách. Tento problém nastává především u objektů s velmi nízkou emisivitou (např. kovové střechy). Ty pak vykazují velmi nízké hodnoty teplot (i pod 0  $^{\circ}\text{C}$ ) (Minkina a Dudzik 2009). Upravení hodnot emisivity je jednoduché, pokud je znám materiál zkoumaného objektu. V tomto případě lze využít

tabulkové hodnoty či hodnoty měření z jiných studií. Vliv zde ale může mít také vnitřní struktura materiálu a jeho konstrukce. Na úrovni družicových snímků se tento problém řeší pomocí odhadu emisivity z indexu NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), s nímž koreluje. Při snímkování ve větších měřítcích je také možné využít data LULC (Land Use/Land Cover), např. Corine Land Cover či Urban Atlas a hodnoty emisivity přiřazovat dle klasifikovaných kategorií (Pour, 2019).

### Základní zákony záření

Z hlediska fyzikálního lze termální vyzařování objektů popsat základními zákony záření. Každý objekt, který má teplotu vyšší než absolutní nula ( $-273,15\text{ °C}$ ) vyzařuje energii. Tento vztah přesně definuje Stefanův-Boltzmannův zákon

$$I = \sigma T^4, \quad (2)$$

kde  $I$  je celková intenzita záření objektu [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ],  $\sigma$  je Stefan-Boltzmannova konstanta a  $T$  je kinetická teplota objektu [K]. Intenzita vyzařování objektu je tedy přímo úměrná čtvrté mocnině jeho teploty (Michalski a kol., 2001). Vlnovou délku, při které objekt vyzařuje nejvíce, popisuje Wienův zákon posuvu

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad (3)$$

kde  $\lambda_{max}$  je vlnová délka s maximálním vyzařováním [ $\mu\text{m}$ ],  $b$  je Wienova konstanta a  $T$  je kinetická teplota objektu [K]. Vlnová délka, jíž přísluší maximální intenzita vyzařování je nepřímo úměrná teplotě tělesa. Čím delší je vlnová délka, tím je objekt chladnější a méně vyzařuje (Zemek, 2014).

Oba výše uvedené zákony využívá Planckův zákon

$$Q = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (4)$$

kde  $Q$  je energie jednoho kvanta,  $f$  je jeho frekvence [Hz],  $h$  je Planckova konstanta,  $c$  je rychlost světla ve vakuu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] a  $\lambda$  je vlnová délka [ $\mu\text{m}$ ]. Zákon udává, že absolutně černé těleso nemůže vyzařovat nebo pohlcovat energii v libovolném množství, ale nespojitě po kvantech (základ kvantové fyziky). Energie kvanta je nepřímo úměrná jeho vlnové délce. Tento vztah má v DPZ důležitý význam, jelikož záření dlouhých vlnových délek (např. mikrovlnné) lze zaznamenat mnohem obtížněji než záření délek krátkých (např. TIR) (Lillesand a kol., 2015).

## 3.2 Ruční termální kamery

Termální kamery se řadí mezi pasivní optické systémy, které zachycují infračervené záření emitované objekty (nepřímé). Přestože infračervené světlo objevil William Herschel již kolem roku 1800, první infračervená snímací zařízení a zobrazovací přístroje byly sestaveny až koncem 40. let 20. století jako nástroj nočního vidění pro americkou armádu. První komerční termální kamery byly vyrobeny v roce 1983, čímž se otevřelo nové spektrum jejich aplikací: od využití v zemědělství, zdravotnictví či elektrotechnice až po detekci požárů či úniků tepla v domovech (Gade a Moeslund, 2014).

Kamery lze rozdělit na dva typy: skenovací zařízení a zařízení využívající mozaikového uspořádání detektorů (FPA). Skenovací zařízení jsou schopné zachytit pouze jeden bod či řádek obrazu v daný čas, zatímco kamery využívající FPA snímají zároveň všechny prvky



obrazu každým detektorem v poli. FPA kamery jsou v současné době využívány výrazně více, jelikož nemají žádné pohyblivé části, snímkování je rychlejší a nabízí lepší prostorové rozlišení (Herbert, 2007).

Detektory používané v termokamerách jsou obecně dvojího typu: fotonové a tepelné. Fotonové detektory převádějí absorbované elektromagnetické záření přímo na změnu rozložení elektrické energie v polovodiči změnou koncentrace volných nosičů náboje. Tepelné detektory přeměňují absorbované elektromagnetické záření na tepelnou energii, která způsobuje zvýšení teploty detektoru. Fotonové detektory jsou přesnější a citlivější i k malým změnám teploty snímaného povrchu. Jejich nevýhodou je však vysoká cena a nutnost chlazení. V ručních termálních kamerách jsou proto využívány především tepelné detektory typu mikrobolometr. Mikrobolometr je specifický typ rezistoru. Materiály nejčastěji používané v mikrobolometrech jsou oxid vanadičitý (VOx) a amorfni křemík (a-Si). Infračervené záření mění elektrický odpor materiálu, který poté může být převeden na elektrický signál a zpracován do obrazu (Gade a Moeslund, 2014).

Ruční termální kamery patří kromě mobilních telefonů mezi cenově nejdostupnější zařízení pro termální mapování. Není nutné je umísťovat na žádný nosič (např. dron či letadlo) a jejich používání nevyžaduje speciální výcvik. Ruční termální kamera se zpravidla skládá z tepelného detektoru, objektivu, displeje s ovládáním a rukojeti. Mezi nevýhody ručních termálních kamer patří relativně malé zorné pole (FOV), složité georeferencování snímků (v některých případech i žádný záznam polohy snímků) a menší rozlišení (standardně mezi  $320 \times 240$  a  $640 \times 480$  px) (Paugam a kol., 2013).

### **3.3 Termální snímkování v městském klimatu**

Klimatické podmínky ve městě se výrazně odlišují od okolního venkovského prostředí. Městské oblasti jsou také zásadně ohroženy potenciálními globálními změnami klimatu. Studie týkající se dopadu globálních změn na místní klima měst mají velký význam pro zdraví (jak fyzické, tak psychické) jejich obyvatel. Na rozdíl od měst v západní Evropě se však městské oblasti ve střední Evropě po druhé světové válce vyvíjely v důsledku politických a ekonomických podmínek výrazně odlišným způsobem. Městské struktury tedy bývají také odlišné a studie městského klimatu musí zahrnovat i tato specifika (Vysoudil, 2015).

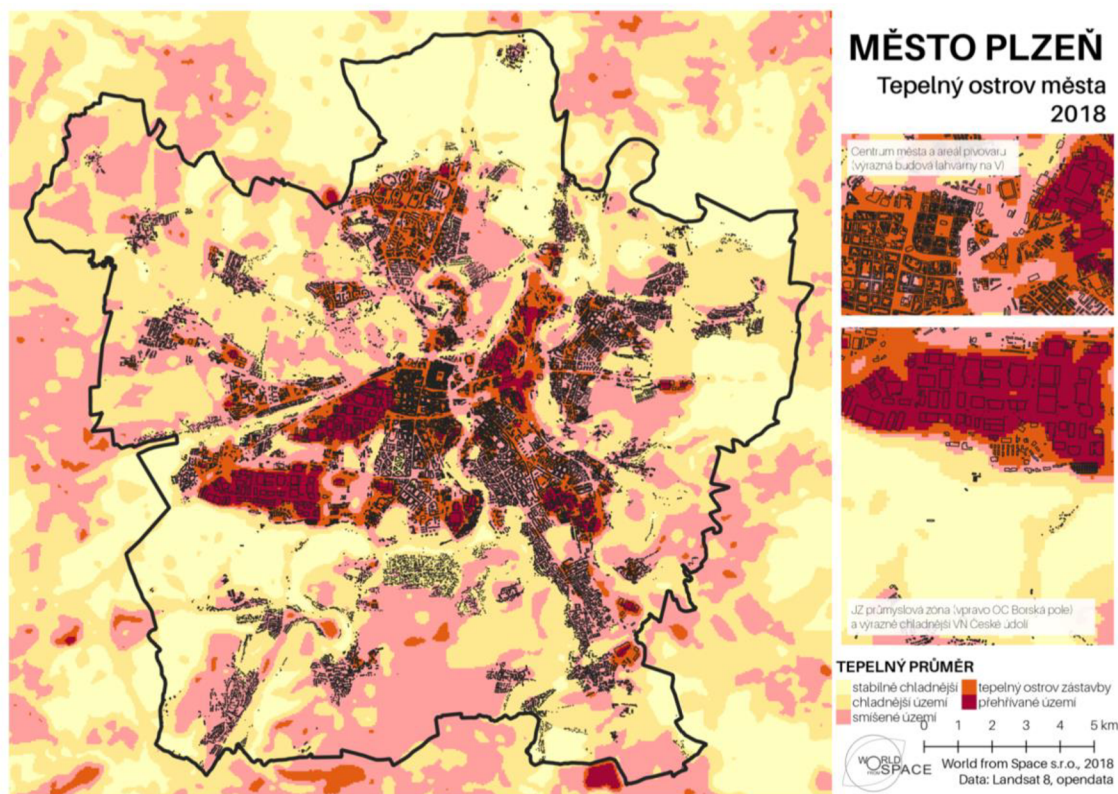
#### **Land Surface Temperature**

V městském prostředí je klíčovým parametrem pro určení stupně zahřívání různých struktur především teplota zemského povrchu (Land Surface Temperature – LST). LST úzce souvisí s ročním obdobím, denní dobou, vegetačním krytem a stupněm oslunění. LST také moduluje teplotu vzduchu ve spodní vrstvě městské atmosféry a je hlavním faktorem určujícím vyzařování povrchu, výměnu energie a vnitřní klima budov (Ren a kol., 2022). Podle Vysoudila (2015) se městské klima vyznačuje především následujícími faktory: nižší průměrnou rychlostí větru, relativní vlhkostí vzduchu, slunečním zářením, viditelností, a naopak vyššími průměrnými denními i ročními teplotami vzduchu, hodnotami znečištění ovzduší, oblačností a srážkami.

#### **Urban Heat Island**

Teplotu povrchů získanou pomocí bezkontaktního termálního snímkování lze efektivně využít pro studium tepelného ostrova měst (Urban Heat Island – UHI, Obr. 3.1). Tepelné ostrovy vznikají v důsledku urbanizace a používání snadno se zahřívajících konstrukčních materiálů. Vliv má také používání klimatizace a vytápění objektů. Městské oblasti typicky vykazují výrazně vyšší teploty než oblasti okolní, a to zejména během noci.

Na rozdíl od bodových měření meteorologickými stanicemi umožňuje termální DPZ zachytit vzory a trendy v teplotních charakteristikách zájmových povrchů (Voogt a Oke, 2003).

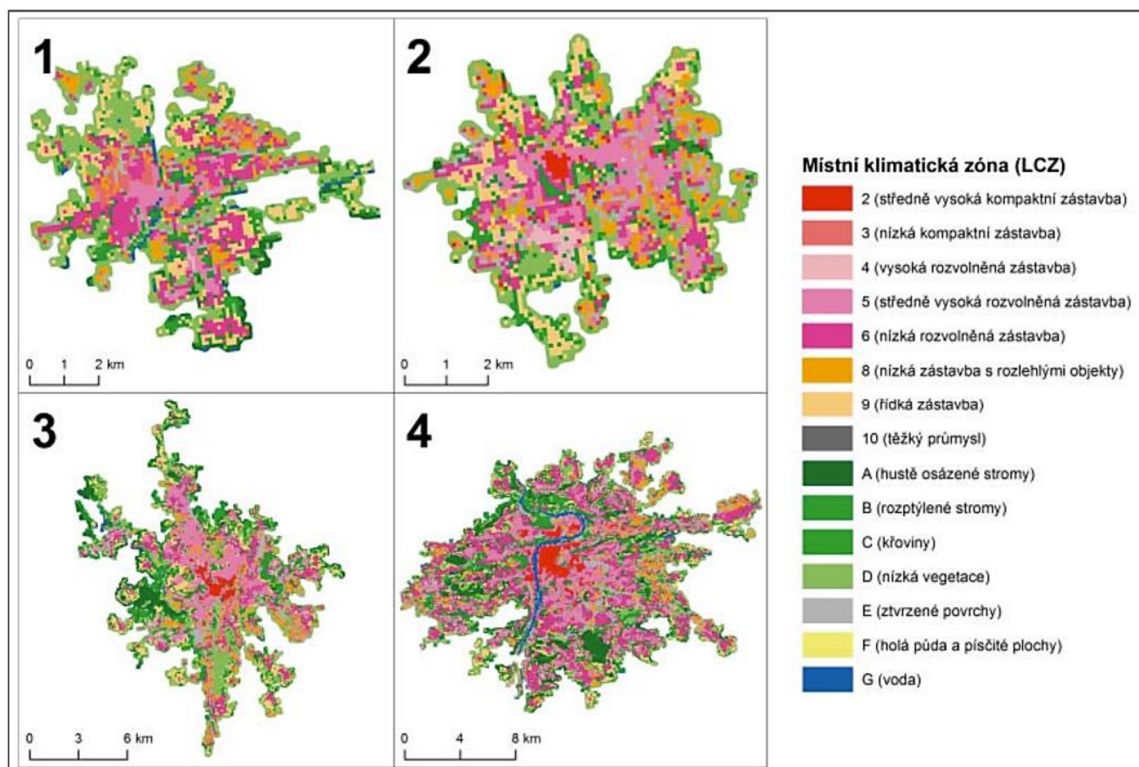


Obr. 3.1 Tepelný ostrov Plzně (zdroj: World from Space, 2018)

Detekci tepelných ostrovů měst se v českém prostředí zabývali např. Geletič a kol. (2019), Pour (2019), World from Space (2018) či Dobrovolný (2013). Kromě práce Poura (2019), který využil data z leteckého snímkování, jsou všechny výzkumy založeny na analýze satelitních snímků Landsat, které jsou sice volně dostupné, ale jejich rozlišení je tak malé, že některé lokální charakteristiky teplot nelze interpretovat.

### Local Climate Zones

Pro statistickou analýzu teplot městských oblastí se v současné době využívají lokální klimatické zóny (Local Climate Zones – LCZ, Obr. 3.2). Výhodou LCZ je možnost je univerzálně aplikovat na různá města a výsledky poté mezi sebou srovnat. Jedná se o homogenní oblasti o rozloze přibližně 4 km<sup>2</sup>, které jsou klasifikovány na základě charakteristik městských struktur (Pour, 2019). Na výzkum LCZ v Olomouci se zaměřuje také Katedra geografie UP (viz např. studie Lehnerta a kol., 2018 a Geletiče a Lehnerta 2017, 2016).



Obr. 3.2 Místní klimatické zóny v 1) Hradci Králové, 2) Olomouci, 3) Brně a 4) Praze (zdroj: Lehnert a Geletič, 2017)

Zmíněné koncepty a aplikace termálního snímkování lze realizovat díky satelitním snímkům či leteckým kampaním. Stále se ale jedná o relativně malá měřítka, která zahrnují celá města či jejich části a nezabývají se detailní charakteristikou teplot povrchů, která se může ve městě lišit i na ploše tak malé, jako je 10 m<sup>2</sup>.

Pro takto lokální teplotní podmínky jsou nejčastěji využívána statická měření meteorologickou stanicí (např. Lehnert a kol., 2021) nebo mobilní měření teploměrem (např. Raška, 2021). Tato měření jsou typicky velmi přesná, teplotní data lze ale získat pouze v bodovém charakteru. Tímto se ztrácí prostorový kontext i variabilita teplot zkoumaných materiálů. Alternativou jsou měření ruční termální kamerou, která zachovávají možnost snímání větších ploch, přičemž se díky jejich rozlišení neztrácí lokální teplotní vzory jako je tomu u satelitních snímků.

#### Studie využívající ruční termální kameru

V současné době bylo realizováno jen několik studií v českém městském prostředí, které využívaly měření ruční termální kamerou. Většina těchto studií (kromě Palatky, 2013 a Reslera a kol., 2021) vykazuje stejné nedostatky, a to absenci korekcí emisivity a doplňkového měření skutečné teploty povrchu a vzduchu v době měření. Efektivně totiž nelze zajistit, aby na měřených lokalitách byly vždy totožné klimatické podmínky. Pokud tyto faktory nejsou zahrnuty, nelze uvádět absolutní hodnoty teplot, jelikož mohou být nepřesné. Dále také žádná z prací nezmiňuje, zda bylo měření provedeno při oslunění či zastínění povrchu, což má na chod teplot také výrazný vliv.

Vysoudil a Ogrin (2009) se zabývali využitím ruční termální kamery v topoklimatickém výzkumu na příkladu okolí města Olomouce a slovinského města Koper. Autoři výzkum prezentují jako podklad pro další měření, kdy uvádějí, že naměřené absolutní hodnoty teplot mohou být využity pro databázi emisivity a teplot některých typů aktivního povrchu. Žádné korekce emisivity ale ve své práci nezmiňují. Dále je také nejasné, za

jakého počasí bylo měřeno (je zmíněn pouze radiační ráz) a zda bylo bráno v úvahu zastínění povrchu.

Ruční termální kamera byla využívána také v diplomových pracích Katedry geografie UP pod vedením doc. Vysoudila: Dosoudilová (2010, 2013), Palatka (2011, 2013).

Dosoudilová (2010) se ve své bakalářské práci věnuje teplotě aktivních povrchů s důrazem na charakter georeliéfu. Bylo zjištěno, že největší rozdíly mezi různými sklony svahů nastávají v období pozitivní energetické bilance (letní měsíce) a nejsou vázány na určitou denní dobu. Rozdíly povrchových teplot závisí na vlastnostech daného povrchu. Bylo by tedy vhodné se zabývat detailnějším měřením homogenních částí vybraných povrchů, na což se zaměřuje i tato práce. Palatka (2011) se ve své bakalářské práci zabývá stejnou problematikou, pouze ve vztahu k orientaci povrchů.

Dosoudilová (2013) zkoumá ve své diplomové práci možnosti využití ruční termální kamery pro studium městského klimatu. Upozorňuje především na problém termálního měření kovových ploch, jejichž emisivita je extrémně nízká, což způsobuje také falešné extrémně nízké teploty. Využití ruční termální kamery je vhodné jak pro zkoumání efektivitu tepelné izolace budov, tak pro identifikaci trendů a extrémů teplot v rámci města. Palatka (2013) se své diplomové práci zaměřuje na srovnání LST s teplotami půdy a vzduchu. Stejně jako Dosoudilová (2010) potvrzuje, že největší vliv na chod teplot má charakter aktivního povrchu.

Zavádějící může být také prezentace měření ruční termální kamerou široké veřejnosti (např. Kottová, 2019 nebo Vinklář, 2015). Fotografie z termální kamery jsou zde používány bez jakéhokoli dalšího zpracování a nezaládaný uživatel je tak může pokládat za skutečné. Takové články jsou velmi časté, a i přesto, že působí profesionálním dojmem (Kottová přebírá fotografie Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy), mnohdy mohou poskytovat zkreslené informace.

Ruční termální kamera byla využita pro měření teplot povrchů a zdí budov také ve studii Reslera a kol. (2021), kteří se zabývali validací tzv. modelu PALM (pokročilý meteorologický model toků atmosféry) na městském prostředí Praha-Dejvice. Tento výzkum sice nebyl využit přímo pro teplotní charakteristiky městské části, jedná se ale o přínosné využití ruční termální kamery jako podpůrného zdroje dat k měření meteorologických čidel.

Všechny zmíněné výzkumy využívají pouze samostatné termální snímky z ruční kamery, i přes to, že při vytvoření mozaik je možné kamerou pokrýt mnohem větší plochy zájmu. Toto je nejspíše způsobeno častou absencí zaznamenávání polohy snímků v kamerách. I přes chybějící souřadnice lze ale mozaikování zrealizovat. Tato práce proto může sloužit jako návod, jak tento proces provést.

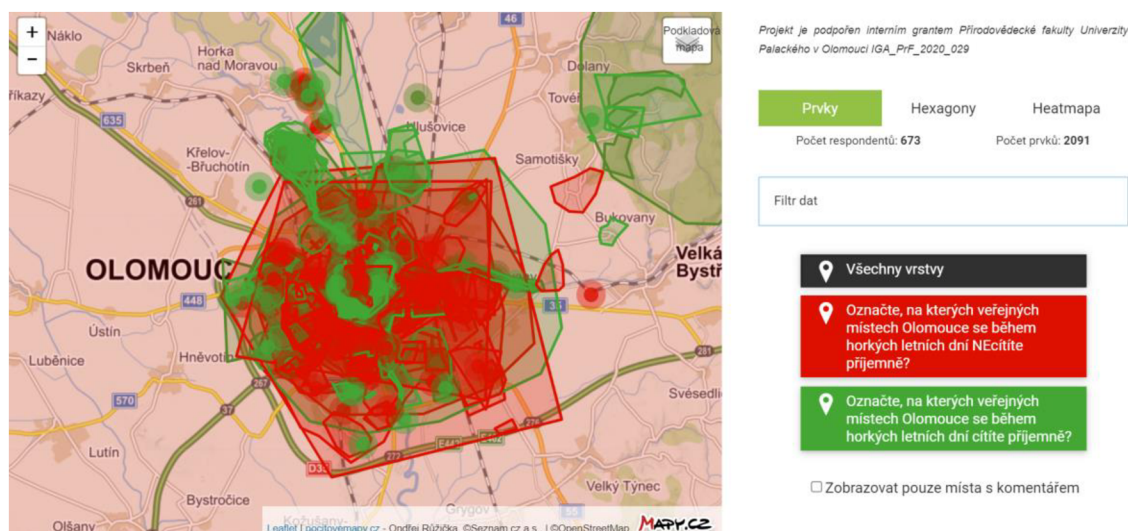
Na Katedře geoinformatiky UP bylo zpracovány dvě práce zaměřující se na městské klima okrajově využívající ruční termální kameru: již zmíněná disertační práce Poura (2019) a diplomová práce Purketa (2017). V obou pracích byla kamera využita pro referenční měření, se kterým byly porovnány letecké snímky.

### **Pocitové mapování teplot**

V Olomouci bylo provedeno také pocitové mapování teplot založené na subjektivním názoru občanů pomocí metod Geoparticipace. Koncept Geoparticipace pracuje s účastí veřejnosti na rozhodovacích procesech v místě jejich bydliště, pomocí prostorových nástrojů (Pánek a kol, 2017). Prostřednictvím anonymního online dotazníku měli respondenti označit místa či plochy, kde se během horkých letních dní cítí či necítí dobře. Projekt byl realizován v roce 2020 ve spolupráci Kateder geografie a rozvojových a environmentálních studií UP a MMOL. Pocitové teplotní mapy již vznikly či vznikají



v mnoha českých městech, např. v Ostravě, Praze, Plzni, Českých Budějovicích a dalších. Jak ale poukazuje Pánek a kol. (2017), pocitové mapy je třeba kombinovat s analýzami objektivních „tvrdých“ dat, a to zejména při tvorbě strategických dokumentů. V případě teplotní pocitové mapy Olomouce, která je dostupná online, např. nelze mnoho označených ploch brát v úvahu pro další analýzy, jelikož respondenti označili jako (ne)příjemné místo celou Olomouc (někteří dokonce celý svět) (Obr. 3.3).



Obr. 3.3 Picitová teplotní mapa Olomouce (zdroj: <https://www.pocitovemapy.cz/olomouc-teplota-2020/nahled>)

Pocitovou teplotní mapu Olomouce analyzoval Habermann (2021), podle kterého jsou nejproblémovějšími místy z hlediska termálního stresu centrum města, hlavní dopravní frekventované komunikace a hlavní vlakové nádraží. Tyto závěry jsou ale založeny pouze na subjektivním vnímání obyvateli Olomouce a je třeba je podložit relevantními daty.

### Územní plánování a udržitelný rozvoj

Termální mapování bezesporu hraje důležitou roli ve strategiích měst, územním plánování a udržitelném rozvoji. Analýzy teplotních charakteristik a trendů umožňují vedením měst aplikovat opatření zmírňující dopady oteplování se klimatu na občany či identifikovat špatně zateplené části budov (Smola, 2007; Vinklár, 2015; Struha, 2018). Bez teplotních měření by se jednalo pouze o subjektivní dohady odpovědných osob. Mapování pomocí ruční termální kamery nese do budoucna potenciál pro jednoduché plošné měření relativních teplot. Pro měření teplot absolutních je ovšem třeba ho doplnit referenčním měřením teploměrem.

## 4 SBĚR DAT

Tato kapitola se zabývá postupem sběru dat, tedy především ručním termálním snímkováním. Popsáno je testovací měření, lokality a časový rámeček ostrého měření, nastavení kamery a ráz počasí. V závěru kapitoly je popsáno také termální snímkování UAV.

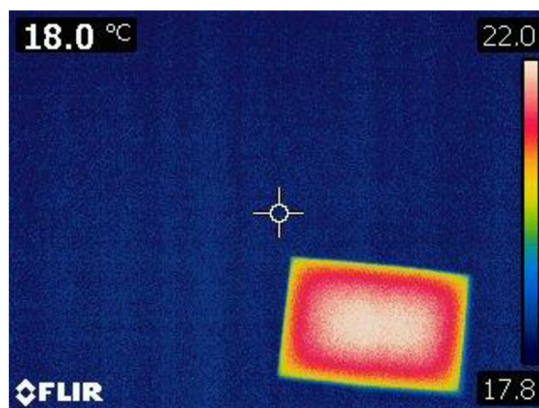
### 4.1 Testovací měření

Nejprve proběhlo seznámení se s ruční termální kamerou FLIR E60 (Obr. 4.1). S kamerou se pracuje poměrně jednoduše. Princip snímkování funguje podobně jako u pistolových bezkontaktních teploměrů. Důležité ale je správně zaostřit na zájmovou oblast. Nedostatečné zaostření může vyústit v nesprávně naměřené hodnoty teplot (FLIR Systems, Inc., 2016). Během sekvence snímků není vhodné ostření měnit.



Obr. 4.1 Termální kamera FLIR E60 (zdroj: <https://www.flir.com/support/products/e60/>).

Termální kamera byla následně testována na vliv radiální vinětaže objektivu, která způsobovala v předchozích pracích na Katedře geoinformatiky odchylky od skutečných hodnot teplot (Purket, 2017; Nováková, 2019; Pour, 2019). V těchto pracích ale byla používána jiná termální kamera – Workswell Thermal Vision Pro. Test byl proveden na klidné vodní hladině napuštěné vany, která byla během předcházejících osmi hodin vytemperována na stabilní teplotu. Pro zaostření se na hladině nacházela mycí houba (Obr. 4.2). Po vizuální analýze přibližně deseti snímků bylo zjištěno, že kamera žádný vliv vinětaže objektivu nevykazuje.



Obr. 4.2 Ukázka snímku vodní hladiny.



## 4.2 Lokality a časový rámeček

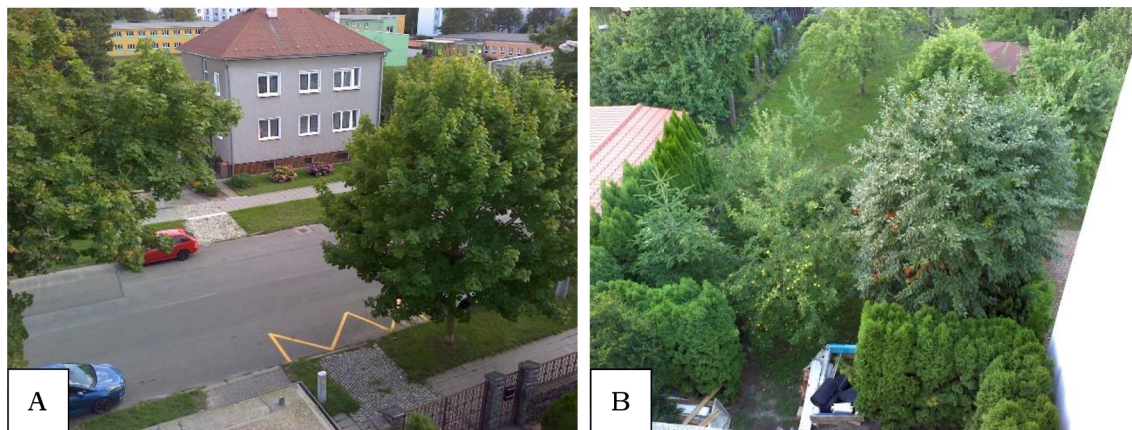
Zájmovou oblastí je město Olomouc. Olomouc je šestým největším městem v Česku, k 1. 1. 2021 zde žilo 100 514 obyvatel (Český statistický úřad, 2021). Olomouc se nachází ve výšce 245 m n. m. na převážně rovinném reliéfu. Průměrná teplota vzduchu během letních měsíců zde dosahuje 19,5 °C (Lehnert a kol., 2021). Struktura města je silně závislá na historickém vývoji a na dopravním systému města. Ve městě se nachází železnice, která jej rozděluje na převážně průmyslovou východní část a západní obytnou část. Olomouc se blíží monocentrickému modelu města s dostředivou dopravní sítí. Historické centrum Olomouce je pěší zónou a je obklopeno parky (Burian a kol., 2020). Po konzultaci s MMOL byly vybrány tři urbanistické koncepty, které jsou pro Olomouc typické: historické centrum, vilová čtvrť a sídliště.

Historické centrum je jednou z nejvíce specifických částí města Olomouce. Je charakterizováno kompaktní historickou zástavbou a kamennou štětovou a štípanou dlažbou (Schubert a kol., 2007). Dominantní funkci zde zastávají Horní a Dolní náměstí (Ptáček a kol., 2007). Horní náměstí bylo v roce 2001 revitalizováno architektky Šépkou, Hájkem a Hláškem v souladu s původním barokním vzhledem (Šépka, 2022). Na náměstí se nenachází žádná vegetace, což bylo již mnohokrát sporem mezi obyvateli, vedením města a architektky (viz např. Novotný, 2008). Snímkováno bylo z vyhlídky radniční věže ve čtyřech směrech: k Riegrově ulici (Obr. 4.3 A), k Ostružnické ulici (Obr. 4.3 B), k Dolnímu náměstí (Obr. 4.3 C) a mezi sloupem Nejsvětější Trojice a Moravskou restaurací (Obr. 4.3 D). Z radniční věže bylo snímováno ve dvou dnech (23. a 29. 7. 2021) od 8 hodin ráno do 19 hodin v hodinovém intervalu. Časový rámeček měření je z důvodu omezeného přístupu na radniční věž kratší než na ostatních lokalitách.



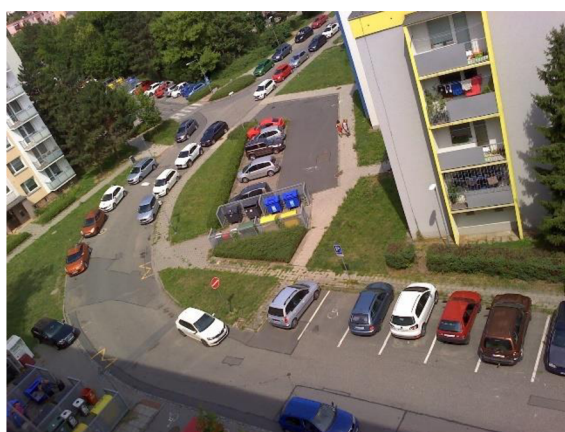
Obr. 4.3 Lokality termálního snímkování z radniční věže.

Vilová čtvrť byla reprezentována třídou Svornosti. Tato ulice spadá do tzv. úřednické čtvrti, která představuje areál kompaktní vilové zástavby a nízkopodlažních bytových domů. Charakteristická pro toto území je také schematická mřížová uliční síť, která je pravidelně osázena zelení (Ptáček a kol., 2007). Snímkování proběhlo ze střechy jedné z vil ve dvou směrech: do zahrady (Obr. 4.4 A) a do ulice (Obr. 4.4 B). Snímkováno bylo ve dvou dnech, snímky byly ale použity pouze z 30. 7. 2021, jelikož předchozí měření dostatečně nezachytilo zájmové povrchy. Snímkování proběhlo od 6 hodin ráno (již po východu slunce) do 21 hodin večer v hodinovém intervalu.



Obr. 4.4 Lokality termálního snímkování ze střechy vily.

Sídlště se v Olomouci se začala vyvíjet již na konci 50. let 20. století, avšak největší boom výstavby se dostavil až v 80. letech. V Olomouci se zformovalo celkem pět lokalit, z nichž je sídlště Povel–Nové Sady nejmladší. Snímkováno bylo právě v této lokalitě na Nešporově ulici. Celkem žije na sídlštích více než 40 % olomoucké populace (Ptáček a kol., 2007). Charakteristickými strukturami jsou především vysokopodlažní panelové domy, asfaltová parkoviště a betonové chodníky s travnatými plochami. Na Nešporově ulici bylo snímkováno z balkonu v osmém patře panelového domu pouze v jednom směru (Obr. 4.5) ve třech dnech (27. 7., 31. 7. a 7. 8.). Druhé měření bylo ovlivněno srážkami po 7. hodině ráno, proto na této lokalitě bylo snímkováno třikrát. Snímkování proběhlo mezi 6. hodinou ranní a 21. večerní v hodinovém intervalu.



Obr. 4.5 Lokalita termálního snímkování z balkonu na sídlšti.



### 4.3 Nastavení kamery

Měření bylo provedeno z proměnlivé výšky – z vyhlídky radniční věže na Horním náměstí (~45 m), ze střechy vily na třídě Svornosti (~15 m) a z balkonu v osmém patře panelového domu na Nešporově ulici (~35 m). Jelikož nebylo možné měřit ve svislém směru, je předpokládáno, že skutečné vzdálenosti jsou mnohem větší. Jako hodnota vzdálenosti k měřenému bodu bylo tedy nastaveno 200 metrů, což je také nejvyšší možná hodnota, kterou kamera umožňuje.

Hodnota emisivity byla stanovena na 0,95. Podle Poura (2019) se pohybuje emisivita většiny objektů ve městě kolem tohoto čísla. Pro další zpracování dat je nutné hodnoty emisivity kompenzovat, především pro povrchy, jejichž emisivita se výrazněji liší (viz kapitola 5.1.4). Při snímkování ale není možné v kameře nastavit různé hodnoty emisivity pro různé části snímků.

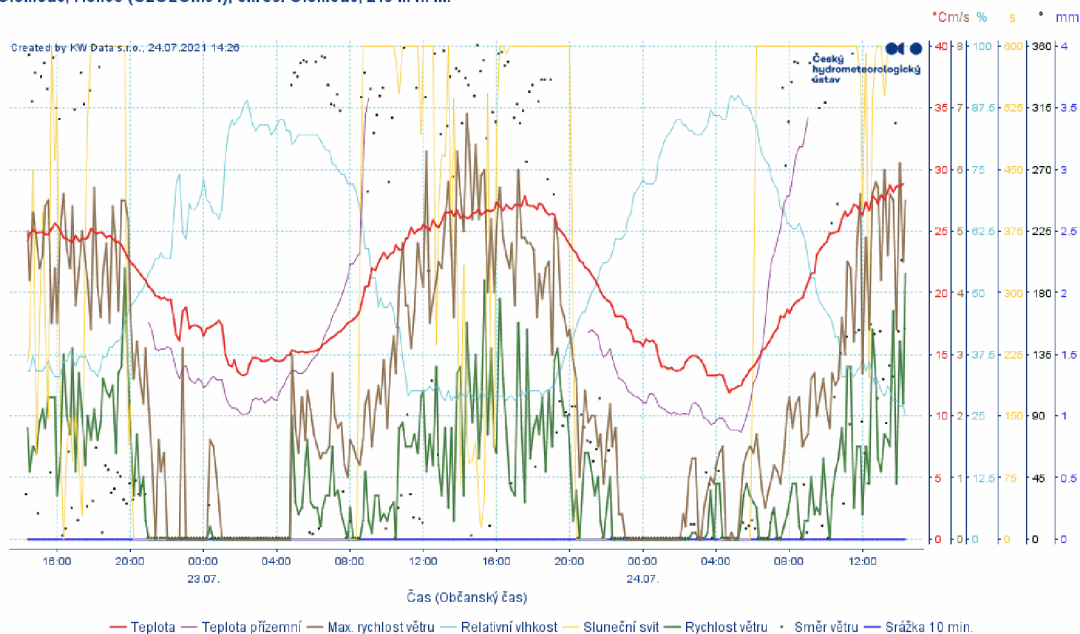
Teplota vzduchu a relativní vlhkost byly každou hodinu přenastaveny podle aktuálních hodnot z měřicí stanice Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) v Olomouci Holicích. Odražená teplota byla nastavena na konstantní hodnotu 21 °C, což je defaultním nastavením kamery.

### 4.4 Počasí

Teplota povrchu úzce koresponduje s teplotami vzduchu a jejich denním chodem. Maxima a minima teploty povrchu se oproti teplotě vzduchu mírně zpožďují. Vliv má také ráz počasí. Při radiačním počasí má křivka denního chodu teplot vzduchu tvar připomínající sinusoidu (Vysoudil, 2013).

Při termálním snímkování bylo cílem provést měření právě při radiačním počasí. Byl sledován průběh teplot jeden až dva dny před měřením a během něj podle meteorologické stanice ČHMÚ v Holicích. Ideální rozsah denních teplot byl stanoven na přibližně 15–30 °C. Ideální stupeň oblačnosti bylo skoro jasno či polojasno. Důležité bylo vyhnout se srážkám a vysokým rychlostem větru. Příklad radiačního počasí při měření 23. 7. 2021 lze sledovat na Obr. 4.6.

Olomouc, Holice (O2OLOM01), okres: Olomouc, 210 m n. m.



Obr. 4.6 Ukázka grafu meteorologických ukazatelů (zdroj: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/kam/prohlizec.html?cam=olomouc>).

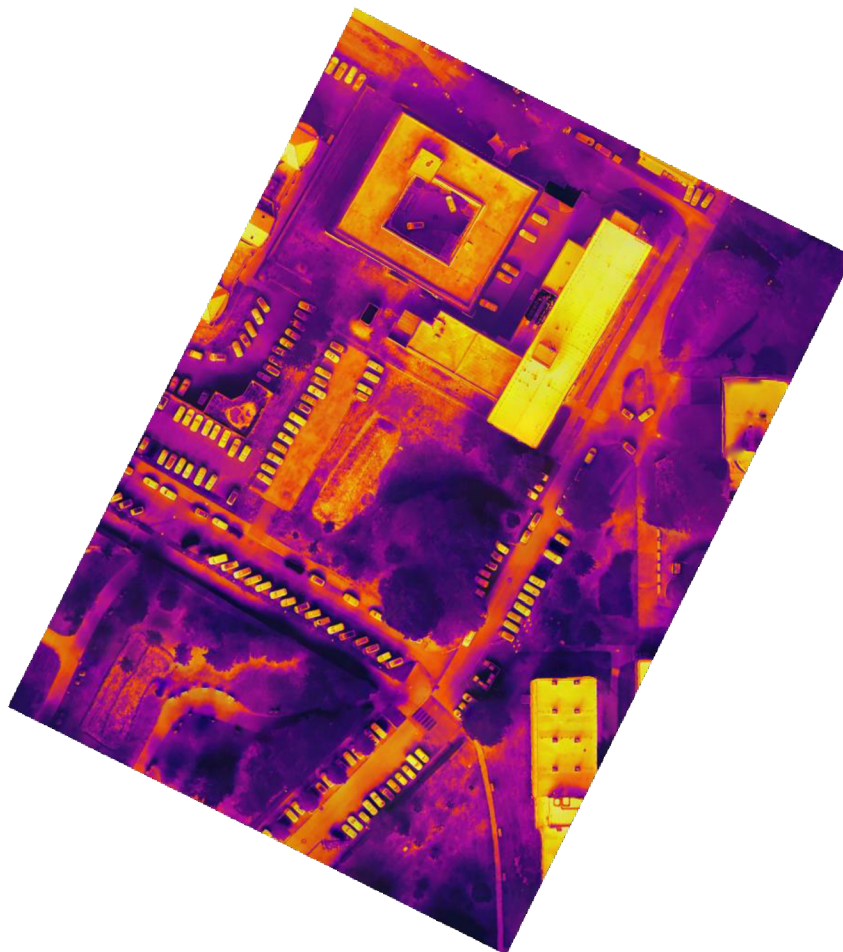
Jelikož na různých lokalitách a v různých dnech není možné dosáhnout identického počasí (viz Tab. 4.1), je třeba brát naměřené absolutní hodnoty teplot s rezervou. V úvahu také nebyly brány lokální specifika daného typu urbanistické struktury, jako např. přízemní vítr či referenční měření teploty zájmového povrchu. Práce je proto zaměřena především na relativní rozdíly teplot.

Tab. 4.1 Teploty vzduchu během dne [°C] na lokalitách měření dle ČHMÚ

Historické centrum		Třída Svornosti	Sídliště Nešporova		
23. 7.	29. 7.	30. 7.	27. 7.	31. 7.	7. 8.
14–27 °C	17–27 °C	15–30 °C	20–30 °C	18–28 °C	13–26 °C

## 4.5 Snímkování UAV

Termální snímkování UAV proběhlo pomocí dronu DJI Mavic 2 Enterprise Dual, který byl Katedře geoinformatiky zapůjčen společností TELINK. Snímkování provedl vedoucí práce 19. 10. 2021 ráno a odpoledne nad částí kampusu Přírodovědecké fakulty UP (Obr. 4.7). Vzhledem k rozdílnému rázu počasí oproti předchozím měřením měly snímky sloužit pouze pro porovnání procesu zpracování.



Obr. 4.7 Ukázka odpolední mozaiky ze snímků UAV.

Zpracování snímků pořízených tímto dronem se ale bohužel ukázalo jako problematické. Společnost DJI k tomuto modelu k dubnu 2022 neposkytuje software, který by umožnil export teplot pro další zpracování. Je možné použít pouze software DJI

Thermal Analysis Tool, který je značně nedostačující. Lze zde provést pouze bodové či plošné analýzy teplot, hodnoty ale stále zůstávají v softwaru. Jelikož je radiometrický formát snímků DJI uzavřený a nejsou známy kalibrační konstanty senzoru a převodní rovnice mezi raw hodnotami a skutečnými teplotami, nebylo možné tento nedostatek obejít ani pomocí funkce *raw2temp* z knihovny *Thermimage* v R.

## 5 ZPRACOVÁNÍ DAT I

Tato kapitola detailně popisuje první fázi zpracování termálních snímků z kamery FLIR E60. Zpracování probíhalo primárně pomocí programovacího jazyka R, po poskytnutí licence také v softwaru FLIR Thermal Studio. V rámci skriptu v jazyce R bylo nutné provést více kroků – získat raw hodnoty z termální kamery, získat kalibrační a atmosférické konstanty a provést převod na teploty ve stupních Celsia. V rámci softwaru FLIR Thermal Studio jsou všechny tyto kroky provedeny automaticky. Jelikož se ale jedná o komerční řešení, které není volně dostupné, pro další práci byly zvoleny snímky vytvořené pomocí skriptu.

### 5.1 Získání hodnot teploty

Prvním krokem byla samotná extrakce teplot z termálních snímků. Mohlo by se jednat o triviální úlohu, ale vzhledem k uzavřenému formátu termálních snímků společnosti Teledyne FLIR LLC, bylo nutné toto workflow samostatně vytvořit. K dispozici byl software FLIR Tools dostupný zdarma, jeho nevýhodou je ovšem absence jakékoli automatizace. Teploty ve formátu CSV (Comma Separated Values) je možné exportovat pouze jednotlivě, což v případě tisíců snímků není realizovatelné. Provoz softwaru byl navíc již před zadáním práce oficiálně ukončen.

#### 5.1.1 R

Jako alternativa byl nejprve testován přepis funkce *raw2temp* (původně v jazyce R) pro Python 3 (Azpúrua, 2019), který ve své práci použila Nováková (2019). Bohužel tato ani žádné jiné dostupné funkce napsané v jazyce Python pro export teplot z čidel FLIR nelze použít, jelikož nepodporují formát snímků z kamery FLIR E60. Toto je nejspíš dáno tím, že jelikož se kamera již neprodává, nemá mnoho vývojářů potřebu vyvíjet pro ni nové funkce a skripty. Naproti tomu Purket (2017) ve své práci použil původní funkci v jazyce R kombinovanou s příkazy v jazyce Shell a příkazovém řádku. Za účelem zrychlení a zjednodušení byl jeho postup přepsán kompletně v jazyce R.

#### Raw hodnoty

Raw hodnoty jsou hodnoty záření nebo absorbované infračervené energie v libovolných jednotkách, které si stanoví výrobce kamery (Tattersall, 2017a). Pro přečtení raw hodnot z termálních snímků ve formátu JPEG je nutné mít staženou knihovnu *ExifTool*. Slouží především pro čtení, psaní a upravování metadat. Jedná se o platformě nezávislou knihovnu založenou na jazyce Perl, kterou lze mimo jiné spouštět z příkazového řádku (Harvey, 2022). Pro přečtení raw hodnot slouží funkce `readflirJPG`. Hodnoty lze poté uložit např. do CSV souboru (Obr. 5.1).

```
img <- readflirJPG(file, exiftoolpath="installed")
```

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
2	16198	16210	16212	16208	16204	16217	16213	16213	16209	16207	16216	16215
3	16233	16236	16230	16205	16197	16249	16233	16235	16246	16248	16237	16222
4	16273	16235	16230	16237	16231	16249	16253	16217	16256	16256	16236	16253
5	16268	16270	16267	16258	16228	16270	16259	16269	16271	16253	16274	16248
6	16261	16274	16286	16268	16280	16291	16289	16280	16313	16274	16280	16275
7	16299	16317	16294	16303	16267	16307	16331	16308	16292	16287	16290	16305
8	16318	16333	16303	16309	16318	16314	16332	16319	16313	16339	16291	16342
9	16352	16352	16333	16324	16341	16364	16333	16340	16333	16343	16336	16342
10	16346	16338	16365	16325	16337	16347	16367	16347	16348	16376	16366	16355
11	16365	16358	16353	16361	16373	16360	16368	16373	16357	16340	16379	16331
12	16396	16353	16364	16370	16380	16379	16375	16362	16384	16367	16371	16377
13	16399	16387	16402	16406	16373	16412	16393	16401	16408	16402	16390	16404
14	16425	16391	16404	16408	16409	16402	16419	16401	16409	16403	16391	16409
15	16415	16412	16415	16438	16418	16445	16411	16435	16446	16440	16441	16445
16	16435	16451	16447	16433	16444	16460	16454	16473	16449	16472	16467	16472
17	16495	16464	16492	16475	16450	16505	16502	16480	16490	16488	16500	16502
18	16494	16507	16520	16507	16505	16518	16495	16507	16496	16516	16492	16519
19	16522	16515	16523	16543	16506	16529	16504	16519	16527	16543	16525	16524

Obr. 5.1 Náhled výsledných raw hodnot v CSV souboru.

## Konstanty

Před spuštěním přepočtu raw hodnot na teploty ve stupních Celsia je třeba spustit smyčku, která z každého snímku pomocí funkce `flirsettings` extrahuje Planckovy kalibrační a atmosférické konstanty, nastavenou teplotu vzduchu (`AtmosT`) a relativní vlhkost (`RH`). Ve skriptu jsou zahrnuty také hodnota emisivity, vzdálenosti od měřeného objektu (`OD`) a odražené teploty (`RefIT`). Tyto veličiny byly v případě měření kamerou FLIR E60 konstantní (viz kapitola 4.3). Hodnoty atmosférických konstant poté vstupují do funkce `raw2temp` spolu s ostatními veličinami. Funkce provádí atmosférické korekce v rámci přepočtu teplot. Kód je přepsán podle Tattersalla (2017a).

```

cams <- flirsettings(file, exiftoolpath="installed", camvals="")
cams

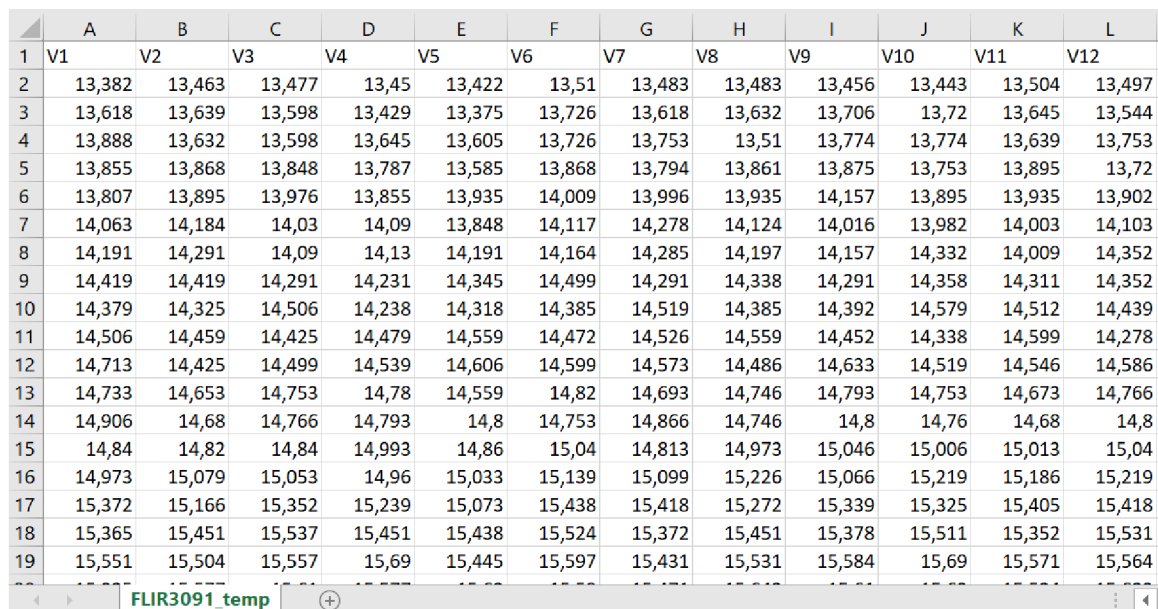
Emissivity <- cams$Info$Emissivity
PlanckR1 <- cams$Info$PlanckR1
PlanckB <- cams$Info$PlanckB
PlanckF <- cams$Info$PlanckF
PlanckO <- cams$Info$PlanckO
PlanckR2 <- cams$Info$PlanckR2
ATA1 <- cams$Info$AtmosphericTransAlpha1
ATA2 <- cams$Info$AtmosphericTransAlpha2
ATB1 <- cams$Info$AtmosphericTransBeta1
ATB2 <- cams$Info$AtmosphericTransBeta2
ATX <- cams$Info$AtmosphericTransX
OD <- cams$Info$ObjectDistance
RefIT <- cams$Info$ReflectedApparentTemperature
AtmosT <- cams$Info$AtmosphericTemperature
RH <- cams$Info$RelativeHumidity

```

## Raw2temp

Funkce *raw2temp* z knihovny *Thermimage* přepočítává raw hodnoty získané v prvním kroku pomocí komplexního algoritmu, který zahrnuje Planckův vyzařovací a Stefanův-Boltzmannův zákon, kalibrační konstanty, absorpci atmosféry, absorpci infračerveného záření kamerou, emisivitu a mnohé další veličiny (Tattersall, 2017a). V tomto kroku lze také provést korekci emisivity přepsáním hodnoty E. Ta byla vždy přepsána dle hodnot z literatury (kapitola 5.1.4), pro všechny snímky, kde se daný povrch vyskytoval. Výsledné hodnoty lze poté znovu uložit jako CSV soubor (Obr. 5.2).

```
temp <- round(  
  raw2temp(as.matrix(raw_csv), E=0.83, OD=OD,  
    RTemp=ReflT, ATemp=AtmosT, IRWTemp=ReflT, IRT=1,  
    RH=RH, PR1=PlanckR1, PB=PlanckB, PF=PlanckF,  
    PO=PlanckO, PR2=PlanckR2, ATA1=ATA1, ATA2=ATA2,  
    ATB1=ATB1, ATB2=ATB2, ATX=ATX),  
  digits=3)
```



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
2	13,382	13,463	13,477	13,45	13,422	13,51	13,483	13,483	13,456	13,443	13,504	13,497
3	13,618	13,639	13,598	13,429	13,375	13,726	13,618	13,632	13,706	13,72	13,645	13,544
4	13,888	13,632	13,598	13,645	13,605	13,726	13,753	13,51	13,774	13,774	13,639	13,753
5	13,855	13,868	13,848	13,787	13,585	13,868	13,794	13,861	13,875	13,753	13,895	13,72
6	13,807	13,895	13,976	13,855	13,935	14,009	13,996	13,935	14,157	13,895	13,935	13,902
7	14,063	14,184	14,03	14,09	13,848	14,117	14,278	14,124	14,016	13,982	14,003	14,103
8	14,191	14,291	14,09	14,13	14,191	14,164	14,285	14,197	14,157	14,332	14,009	14,352
9	14,419	14,419	14,291	14,231	14,345	14,499	14,291	14,338	14,291	14,358	14,311	14,352
10	14,379	14,325	14,506	14,238	14,318	14,385	14,519	14,385	14,392	14,579	14,512	14,439
11	14,506	14,459	14,425	14,479	14,559	14,472	14,526	14,559	14,452	14,338	14,599	14,278
12	14,713	14,425	14,499	14,539	14,606	14,599	14,573	14,486	14,633	14,519	14,546	14,586
13	14,733	14,653	14,753	14,78	14,559	14,82	14,693	14,746	14,793	14,753	14,673	14,766
14	14,906	14,68	14,766	14,793	14,8	14,753	14,866	14,746	14,8	14,76	14,68	14,8
15	14,84	14,82	14,84	14,993	14,86	15,04	14,813	14,973	15,046	15,006	15,013	15,04
16	14,973	15,079	15,053	14,96	15,033	15,139	15,099	15,226	15,066	15,219	15,186	15,219
17	15,372	15,166	15,352	15,239	15,073	15,438	15,418	15,272	15,339	15,325	15,405	15,418
18	15,365	15,451	15,537	15,451	15,438	15,524	15,372	15,451	15,378	15,511	15,352	15,531
19	15,551	15,504	15,557	15,69	15,445	15,597	15,431	15,531	15,584	15,69	15,571	15,564

Obr. 5.2 Náhled výsledných hodnot teploty [°C] v CSV souboru.

## 5.1.2 FLIR Thermal Studio

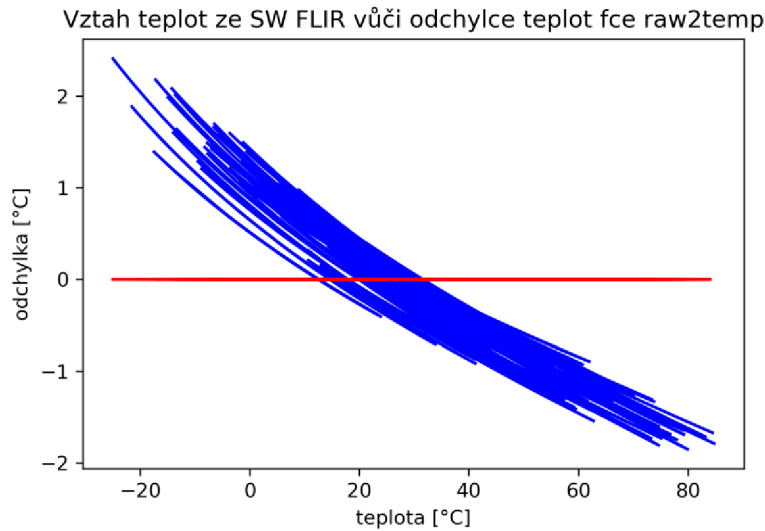
Po napsání a otestování kódu byla společností Teledyne FLIR LLC na základě žádosti zapůjčena licence na plnou verzi softwaru FLIR Thermal Studio pro účely této práce. Licence na verzi Professional běžně stojí \$399 ročně. Základní verze, která je zdarma, export teplot ze snímků neumožňuje. Oproti přechozímu softwaru FLIR Tools, který byl rovněž zdarma a tuto funkci umožňoval, je toto krokem zpět.

Prostředí softwaru je jednoduché a intuitivní. Výhodou je především možnost dávkového zpracování (batch processing) velkého množství snímků a rychlost. Teploty byly ze snímků extrahovány do souborů CSV přibližně dvakrát rychleji než v případě skriptu. Nevýhodou je především cena a také závislost na platformě Windows. Jelikož se jedná o komerční řešení, jako výchozí byly zvoleny teploty získané pomocí skriptu, který je založen na volně dostupných knihovnách v R.



### 5.1.3 Srovnání výsledků

Výsledné hodnoty teplot ze skriptu i ze softwaru FLIR Thermal Studio byly mezi sebou srovnány. Pomocí skriptu napsaném v jazyce Python (elektronická příloha 1) bylo postupně náhodně vybráno 20, 50, 100, 200, 500 a 1 000 CSV souborů, které byly mezi sebou odečteny. Všechny výsledné grafy jsou k dispozici jako elektronická příloha 2. Odchyly většiny hodnot vypočtených pomocí skriptu se pohybují maximálně mezi  $\pm 2$  °C vůči teplotě ze softwaru FLIR Thermal Studio (Obr. 5.3). Tato hodnota odpovídá přesnosti kamery (viz Tab. 2.1). Mezi 15 a 60 °C jsou odchyly mezi +0,5 a -1,2 °C. Odchyly narůstají s extrémními teplotami – největší jsou u outlierů.



Obr. 5.3 Vztah teplot ze softwaru FLIR vůči odchylce teplot fce raw2temp při výběru 200 souborů.

Srovnání mezi výsledky funkce *raw2temp* a různými FLIR softwary (Thermacam Researcher Pro v2.9, ExamInIR, FLIR Research R&D Max) provedl také autor knihovny *ThermImage*. V době, kdy tento test provedl, ještě nebyl software FLIR Thermal Studio vydán. Tatersall (2017b) porovnával průměry teplot na 307 200 px – rozdíly průměrů se pohybovaly mezi -0,07 a -0,25 °C.

### 5.1.4 Korekce emisivity

Většina přírodních povrchů se chová jako tzv. selektivní zářič (viz kapitola 3) a vykazuje hodnoty emisivity mezi 0,85 a 0,99. V případech, kdy pro zájmový povrch není brána v potaz jeho emisivita, se mohou jeho teploty výrazně lišit od reálného stavu (Lillesand a kol., 2015). V diplomové práci jsou zkoumány čtyři materiály povrchů: tráva, beton, žula a asfalt. Hodnota emisivity byla vždy stanovena na základě rešerše literatury pro vlnové délky co nejbližší spektrálnímu rozlišení kamery (7,5–13  $\mu\text{m}$ ).

Hodnoty emisivity pro travnaté povrchy jsou v literatuře konstantní, mezi 0,96 a 0,99 (viz např. Lillesand a kol., 2015; Harrap a Rands, 2021; Labeled a Stoll, 1991; Langsdale a kol., 2021). V práci byla použita hodnota 0,98, která se vyskytuje ve většině literatury pro vlnovou délku 7,5–13  $\mu\text{m}$ .

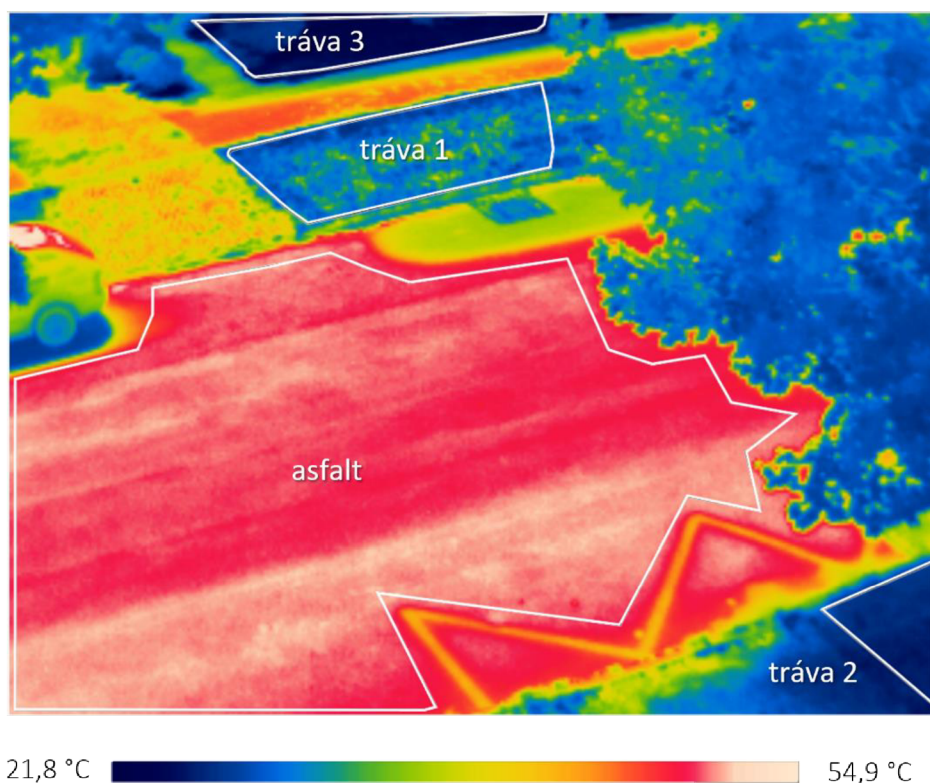
Hodnoty emisivity pro žulové a betonové povrchy se v literatuře nejčastěji pohybují okolo 0,94 a 0,96 (viz např. Cerdeira a kol., 2011; Din a kol., 2012; Moretti a kol., 2021; Guerrero a kol., 2005; Matricardi, 2014; Hu a kol., 2017). Vzhledem k původnímu

nastavení emisivity na 0,95, které se od těchto hodnot příliš neliší, zde žádná korekce provedena nebyla a toto nastavení bylo ponecháno.

Hodnoty emisivity pro asfaltové povrchy se v literatuře liší poměrně zásadně, a to od 0,81 (Huang a kol., 2020) až do 0,99 (Parison a kol., 2020). Více zdrojů zmiňuje také hodnoty 0,85 (Michalski a kol., 2001; Alleman a Heitzman, 2019) a 0,93 (Marchetti a kol., 2008; Brewster, 1992). Jako referenční byla zvolena hodnota 0,83 na základě studie od Li a kol. (2021). Tato studie byla vyhodnocena jako nejrelevantnější vzhledem k vlnové délce i použitému materiálu (asfaltový beton). Tato směs se pro stavbu silnic v Česku využívá nejvíce a je chybně nazývána pouze jako asfalt (Brida, 2022).

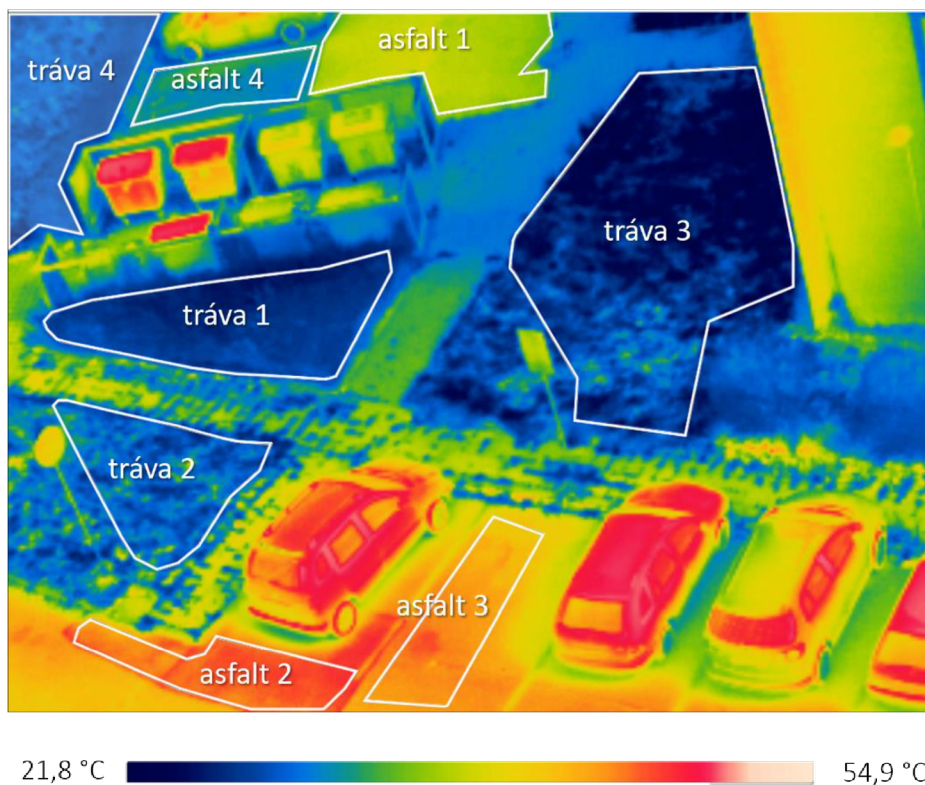
Vliv nastavení emisivity na průměrné teploty travnatých a asfaltových povrchů byl také testován. V softwaru FLIR Thermal Studio je možné manuálně nakreslit plochy zájmu a těm emisivitu změnit. Teploty jsou poté automaticky přepočítány.

První testovanou lokalitou byla třída Svornosti. V rámci testu byly vybrány tři travnaté plochy a jedna asfaltová (Obr. 5.4). Druhou testovanou lokalitou bylo sídliště na Nešporově ulici, kde byly vybrány čtyři asfaltové a čtyři travnaté plochy (Obr. 5.5).



Obr. 5.4 Zájmové plochy pro test emisivity na třídě Svornosti.





Obr. 5.5 Zájmové plochy pro test emisivity na sídlišti Nešporova.

Na travnaté plochy má změna nastavení emisivity téměř zanedbatelný vliv, zatímco u asfaltových ploch způsobila změnu teploty o několik stupňů Celsia (Tab. 5.1). Čím vyšší je teplota asfaltu, tím větší je i změna při správném nastavení emisivity.

Tab. 5.1 Rozdíl v teplotách při správném nastavení emisivity

<b>Třída Svornosti</b>			
typ povrchu	teplota [°C] při $\varepsilon = 0,95$	teplota [°C] při správném $\varepsilon$	rozdíl [°C]
asfalt	50,8	54,6	+3,8
tráva 1	31,6	31,3	-0,3
tráva 2	26,9	26,7	-0,2
tráva 3	25,2	25,1	-0,1
<b>Sídliště Nešporova</b>			
asfalt 1	30,7	32	+1,3
asfalt 2	35,2	37,2	+2
asfalt 3	34,2	36	+1,8
asfalt 4	28,1	29,1	+1
tráva 1	24,6	24,5	-0,1
tráva 2	26,5	26,4	-0,1
tráva 3	24	23,9	-0,1
tráva 4	25,7	25,6	-0,1

## 5.2 Převod na TIFF

Pro převod souborů CSV se skutečnými hodnotami teplot na rastrový formát TIFF byly využity knihovny *ijtiff* (Nolan a Padilla-Para, 2018) a *gdalUtils* (Greenberg a Mattiuzzi, 2020). Pro hodnoty ve formátu floating-point 32-bit (desetinná čísla) lze využít pouze knihovnu *ijtiff* a funkci `tif_write`.

```
raster <- tif_write(  
  matrix_100,  
  paste(wd_32, "/", strip_csv, "_32.tif", sep=""),  
  bits_per_sample = 32,  
  compression = "none",  
  overwrite = TRUE,  
  msg = TRUE)
```

Pro převod do formátu signed integer 16-bit (celá čísla) je třeba využít knihovnu *gdalUtils* (funkce `gdal_translate`), pomocí které je navíc možné snímkům definovat stejný počátek souřadnic (výhodné pro testovací srovnání). V práci byly snímky převedeny na 16-bit signed integer především kvůli rychlosti mozaikování v softwaru Agisoft Metashape. Před tímto krokem je nutné data vynásobit např. 100, aby se neztratily hodnoty za desetinnou čárkou.

```
gdal_translate(  
  paste(wd_32, "/", strip_csv, "_32.tif", sep=""),  
  paste(wd_tiff, "/", strip_csv, ".tif", sep=""),  
  ot = "Int16",  
  a_ullr = c(0, 240, 320, 0),  
  overwrite = TRUE)
```

Náhodný výběr výsledných rastrů ve formátu TIFF, které vznikly po převodu hodnot ze softwaru FLIR Thermal Studio a ze skriptu, byly mezi sebou srovnány. Cílem bylo otestovat, zda odchylky teplot nevykazují prostorový charakter. Test toto vyvrátil.

Celý skript s komentářem je k dispozici jako elektronická příloha 3. Část skriptu byla napsána podle Novákové (2022).

## 6 ZPRACOVÁNÍ DAT II

Tato kapitola popisuje druhou fázi zpracování termálních dat, tedy proces mozaikování a výpočet teplotních statistik na vybraných plochách. Je popsáno nejvhodnější nastavení softwaru Agisoft Metashape, skript pro automatizaci a výběr zájmových ploch pro následnou analýzu teplotních charakteristik.

### 6.1 Tvorba mozaik

Tvorba mozaik se v softwaru Agisoft Metashape skládá z následujících kroků: zarovnání snímků (*Align Photos*), vytvoření bodového mračka (*Build Dense Cloud*), vytvoření polygonové sítě (*Build Mesh*) a vytvoření ortomozaiky (*Build Orthomosaic*). Před exportem ortomozaiky je vhodné použít nástroj *Raster Transform*, který umožňuje hodnoty přepočíst zpět na desetinná čísla. Použití tohoto nástroje zároveň umožňuje při exportu definovat NoData hodnoty (software používá hodnotu 32 767).

Jelikož bylo nutné vytvořit velký počet mozaik, postup byl automatizován pomocí skriptu napsaném v jazyce Python (elektronická příloha 4), který prochází jednotlivé složky se snímky a vytváří podle nich pojmenované mozaiky. Jednotlivé příkazy vychází z Metashape Python API reference (Agisoft LLC, 2022).

Funkce *Align Photos* je v API reference verze 1.8.2 dostupná jako dvě na sebe navazující funkce s rozdílnými názvy: *matchPhotos* a *alignCameras*. Jako nejvhodnější nastavení pro zarovnání termálních snímků byla zvolena nejvyšší přesnost (*downscale=0*), generický předvýběr snímků (*generic\_preselection=True*), referenční předvýběr snímků (*reference\_preselection=True*) v módu zdroj (*reference\_preselection\_mode=Metashape.ReferencePreselectionSource*), limit klíčových bodů na 40 000 (*keypoint\_limit=40000*), limit vázacích bodů na 10 000 (*tiepoint\_limit=10000*) a byl povolen reset zarovnání (*reset\_matches=True*). Poslední nastavení bylo povoleno zejména z důvodu, kdy se mozaika napoprvé nevytvořila a bylo nutné spustit zarovnání znovu.

```
chunk.matchPhotos(  
    downscale=0,  
    generic_preselection=True,  
    reference_preselection=True,  
    reference_preselection_mode=Metashape.ReferencePreselectionSource,  
    filter_mask=False,  
    mask_tiepoints=False,  
    filter_stationary_points=False,  
    keypoint_limit=40000,  
    tiepoint_limit=10000,  
    guided_matching=False,  
    reset_matches=True)  
chunk.alignCameras()
```

Následně byly vytvořeny tzv. *Depth Maps* a bodové mračno (*Dense Cloud*). Tyto dvě funkce opět odpovídají pouze jedné funkci *Build Dense Cloud* v rámci grafického prostředí softwaru. Jako nejvhodnější nastavení byla zvolena střední přesnost (*downscale=4*) a mírná filtrace (*filter\_mode=Metashape.MildFiltering*).

```

chunk.buildDepthMaps (
    downscale=4,
    filter_mode=Metashape.MildFiltering)

chunk.buildDenseCloud (
    point_colors=False,
    point_confidence=False,
    keep_depth=True)

```

Poté byla vytvořena polygonová síť (mesh) příkazem *buildModel*. Nejvhodnějším nastavením byl typ povrchu založený na výškovém poli (2,5D), povolená interpolace, střední počet polygonových ploch (*face\_count=Metashape.MediumFaceCount*), který je automaticky nastaven na 60 000 a použití zdrojových dat z bodového mračna.

```

chunk.buildModel (
    surface_type=Metashape.HeightField,
    interpolation=Metashape.EnabledInterpolation,
    face_count=Metashape.MediumFaceCount,
    face_count_custom=60000,
    source_data=Metashape.DenseCloudData,
    vertex_colors=False)

```

Dále již následuje tvorba ortomozaiky. Před spuštěním funkce *buildOrthomosaic* je nutné projekt uložit pomocí příkazu *doc.save()*. Jako data povrchu byla zvolena data z vytvořené polygonové sítě, jako mód prolnutí byla zvolena mozaika (*blending\_mode=Metashape.MosaicBlending*) a bylo povoleno vyplnění děr.

```

chunk.buildOrthomosaic (
    surface_data=Metashape.ModelData,
    blending_mode=Metashape.MosaicBlending,
    fill_holes=True,
    ghosting_filter=False,
    cull_faces=False,
    refine_seamlines=False)

```

Nakonec byla provedena rastrová transformace vydělením všech hodnot 100 a export ortomozaiky (Obr. 6.1). Při exportu je důležité neprovést žádnou komprimaci obrazu a vyplnit NoData hodnotu na 32 767.

```

chunk.raster_transform.formula=['B1 / 100']
chunk.raster_transform.enabled=True
compression = Metashape.ImageCompression()
compression.tiff_compression
=Metashape.ImageCompression.TiffCompressionNone

```

```

chunk.exportRaster(
    output_dir+output_name,
    source_data=Metashape.OrthomosaicData,
    image_format=Metashape.ImageFormatTIFF,
    raster_transform=Metashape.RasterTransformValue,
    nodata_value='32767',
    save_alpha=False,
    image_compression=compression)

```



Obr. 6.1 Ukázka výsledné mozaiky (třída Svornosti, 19 hodin, emisivita: 0,95).

Během automatizace procesu bylo zjištěno, že v případě, kdy software není schopen snímky zarovnat, se chyba objeví až při generování mračna bodů. Jedná se nejspíše o chybu softwaru. V tomto případě bylo nutné buď skript spustit několikrát nebo mozaiky vytvořit manuálně. Mozaiky, které se nevygenerovaly v uspokojivé kvalitě (např. nekompletní části povrchů, artefakty na okrajích), bylo také nutné vytvořit manuálně. Všechny výsledné mozaiky jsou k dispozici jako elektronická příloha 5.

Zkoumán byl také vliv mozaikování na teploty na snímcích v místech, kde se snímky spojují (tzv. seamlines viz Obr. 6.2). Agisoft Metashape využívá v rámci procesu generování ortomozaik převzorkování bilineární interpolací, kde je hodnota výsledného pixelu vypočítána zprůměrováním čtyř pixelů v jeho okolí (Vohland a Jung, 2021). Bilineární interpolace sice zavádí chybu, protože mění hodnoty pixelů, jedná se ale o nejlepší kompromis mezi přesností a časem výpočtu (Taconet, 2020).



Obr. 6.2 Seamline na spojení dvou snímků.

I přes využití bilineární interpolace bylo zjištěno, že rozdíly v teplotách jsou okolo seamlines pouze v řádech desetin stupňů Celsia (viz Tab. 6.1). Bylo tedy potvrzeno, že mozaikování termální data významně nepoškozuje, nýbrž umožňuje v případě měření ruční kamerou zobrazit větší zájmové území.

Tab. 6.1 Srovnání teplot [°C] okolo seamlines

snímek 1			snímek 2			mozaika		
min	max	avg	min	max	avg	min	max	avg
30,38	37,17	33,87	29,9	36,88	33,7	30,18	36,68	33,8
49	53,85	52,95	51,71	54,13	53,24	49,89	53,89	53,09
40,31	59,17	52,54	38,81	58,84	50,7	39,96	58,87	52,16

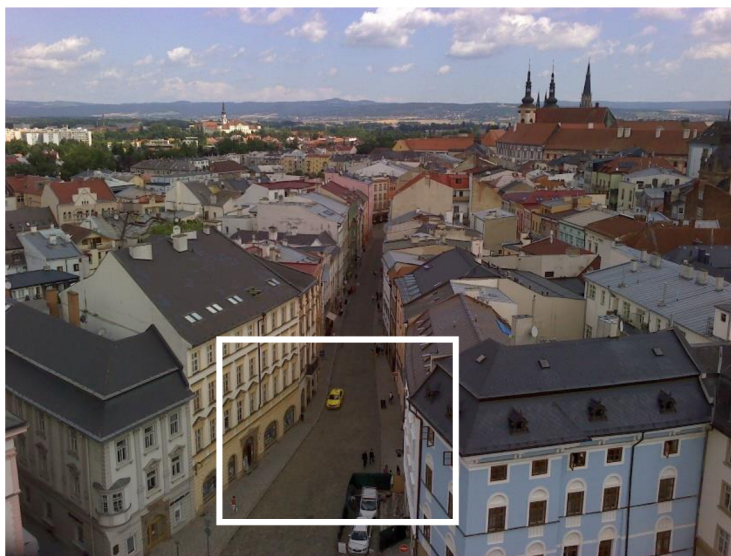
## 6.2 Zájmové plochy

Zájmové plochy byly vybírány na základě expertního odhadu autorky a konzultací s vedoucím práce. Vždy se jedná o povrchy terénu, nikoliv o zdi zástavby či jiné stavební konstrukce. Jako reprezentativní vzorek bylo bráno přibližně 1 000 px, v případě, že to zájmový povrch umožňoval, minimálně však 50 px. Takovýto vzorek používal ve svém výzkumu i Zemek (2014). Jelikož jsou snímky a tedy i mozaiky bez prostorového určení, každá má jinou velikost pixelu. Toto je mimo jiné dáno i tím, že každý snímek byl focen z mírně jiného úhlu. Georeferencování snímků by mozaiky především zdeformovalo. Zájmové plochy byly tedy vždy vybírány manuálně, jejich poloha a velikost se může mírně lišit. Důraz byl kladen především na rozdíly mezi teplotami povrchů převážně ve stínu a převážně na slunci.

### 6.2.1 Historické centrum

Ve směru k Riegrově ulici a k Dolnímu náměstí byly zvoleny pouze samostatné zájmové oblasti pro žulovou dlažbu. Ve směru k Ostružnické ulici byl kladen důraz především na plochy převážně zastíněné (A) a převážně nezastíněné (B). Takto byla zkoumána žulová dlažba, žulový chodník a betonový chodník (Obr. 6.3 a 6.4). Ve směru

mezi sloupem Nejsvětější Trojice a Moravskou restaurací byla opět zkoumána převážně nezastíněná a zastíněná žulová dlažba.



Obr. 6.3 Výřez oblasti z Obr. 6.4 na Ostružnické ulici.

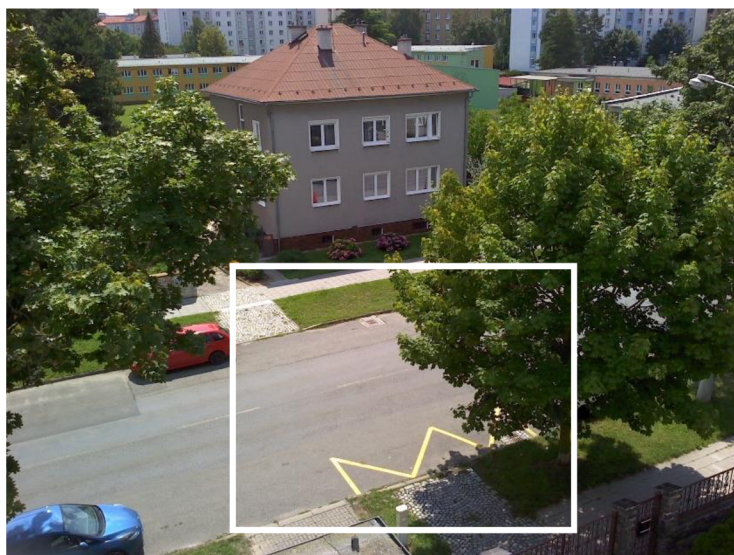


Obr. 6.4 Přibližné polohy zájmových oblastí na Ostružnické ulici.

### 6.2.2 Třída Svornosti

Na třídě Svornosti byly zvoleny tři zájmové oblasti pro travnaté povrchy, dvě pro žulovou dlažbu, jedna pro betonový chodník a jedna pro asfaltovou silnici (Obr. 6.5 a 6.6). V případě trávy byly povrchy zvoleny na základě zastínění během dne: tráva zastíněná stromem (A), převážně nezastíněná tráva (B), tráva na částečně zastíněné zahradě (C, Obr. 6.7 a 6.8). Stejně tak tomu bylo i u dlažby z žulových kostek, kde byly zvoleny dva povrchy: převážně zastíněná žula (A) a převážně nezastíněná žula (B). Silnice a chodník byly po celý den převážně nezastíněné.





Obr. 6.5 Výřez oblasti z Obr. 6.6 na třídě Svornosti při pohledu do ulice.



Obr. 6.6 Přibližné polohy zájmových oblastí na třídě Svornosti při pohledu do ulice.





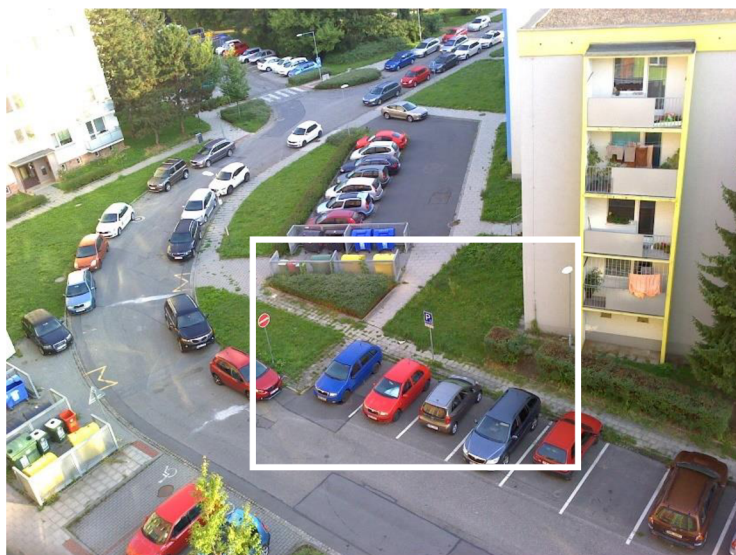
Obr. 6.7 Výřez oblasti z Obr. 6.8 na třídě Svornosti při pohledu do ulice.



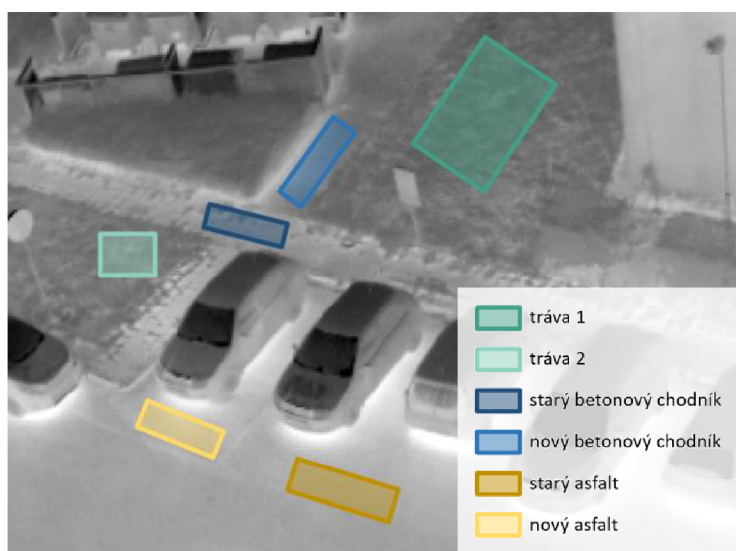
Obr. 6.8 Přibližné polohy zájmových oblastí na třídě Svornosti při pohledu do zahrady.

### 6.2.3 Sídliště Nešporova

Na sídlišti na ulici Nešporova byly oblasti (Obr. 6.9 a 6.10) zvoleny především na základě stáří materiálu. U chodníku byl řešen starý beton (menší dlaždice s většími spárami, výrazně prorostlý trávou) a nový beton (větší dlaždice s hladkým povrchem a minimálními spárami). U silnice byl zkoumán starý asfalt (většina silnice) a nový asfalt (záplata ve tmavší barvě). Dále byly také vybrány dva travnaté povrchy (první blíže k panelovému domu, druhý u parkoviště).



Obr. 6.9 Výřez oblasti z Obr. 6.10 na sídlišti Nešporova.



Obr. 6.10 Přibližné polohy zájmových oblastí na sídlišti Nešporova.

Na zájmových plochách byla poté vypočítána průměrná teplota pomocí nástroje *Zonal Statistics as Table* v softwaru ArcGIS Pro. Nástroj počítá také maximální a minimální teplotu, medián, směrodatnou odchylku, sumu zahrnutých pixelů, rozsah hodnot či percentil. Průměr teplot byl zvolen jako nejvíce vypovídající, jelikož vystihuje celou plochu zájmového povrchu. Medián teplot nebyl zvolen, jelikož jeho rozdíl vůči průměru byl minimální a na zájmových plochách se nevyskytovaly outliery. Průměrná teplota pro travnaté povrchy byla vždy počítána na mozaikách vytvořených s hodnotou emisivity 0,98, pro asfalt na mozaikách s hodnotou emisivity 0,83 a pro beton a žulu na mozaikách s hodnotou emisivity 0,95.

## 7 ANALÝZY A INTERPRETACE

Tato kapitola popisuje deskriptivní analýzu, která byla provedena na vybraných zájmových plochách. Dále jsou zde popsány grafy teplotních charakteristik, které jsou z pohledu autorky nejzajímavější. Veškeré vytvořené grafy jsou k dispozici jako elektronická příloha 6.

Cílem deskriptivní analýzy bylo zjistit, jak rychle či pomalu se dané povrchy zahřívají a ochlazují v závislosti na zastínění a materiálu. Povrchy byly v rámci jednoho měření porovnávány mezi sebou. Všechny teplotní rozdíly jsou uvedeny relativně. Absolutní hodnoty by mohly být zavádějící vzhledem k tomu, že nebylo provedeno referenční měření a nebyl brán v úvahu tzv. ovan povrchu či lokální klimatické podmínky, které se mohou v hustě zastavěných oblastech výrazně lišit. V případě srovnání stejných povrchů napříč lokalitami byl kladen důraz především na identifikaci trendů v denním chodu teplot, nikoliv na rozdíly v teplotách.

Rychlost zahřívání a ochlazování povrchů byla přibližně stanovena na základě proložení naměřených teplot lineární funkcí

$$y = ax + b, \quad (5)$$

kde  $y$  je teplota,  $x$  je hodina,  $a$  je koeficient sklonu (tedy jakým způsobem funkce klesá či roste) a  $b$  určuje průtnutí s osou  $y$ , které ale není pro růst/pokles teplot důležité. Na základě rovnice 5 lze odvodit výpočet koeficientu  $a$

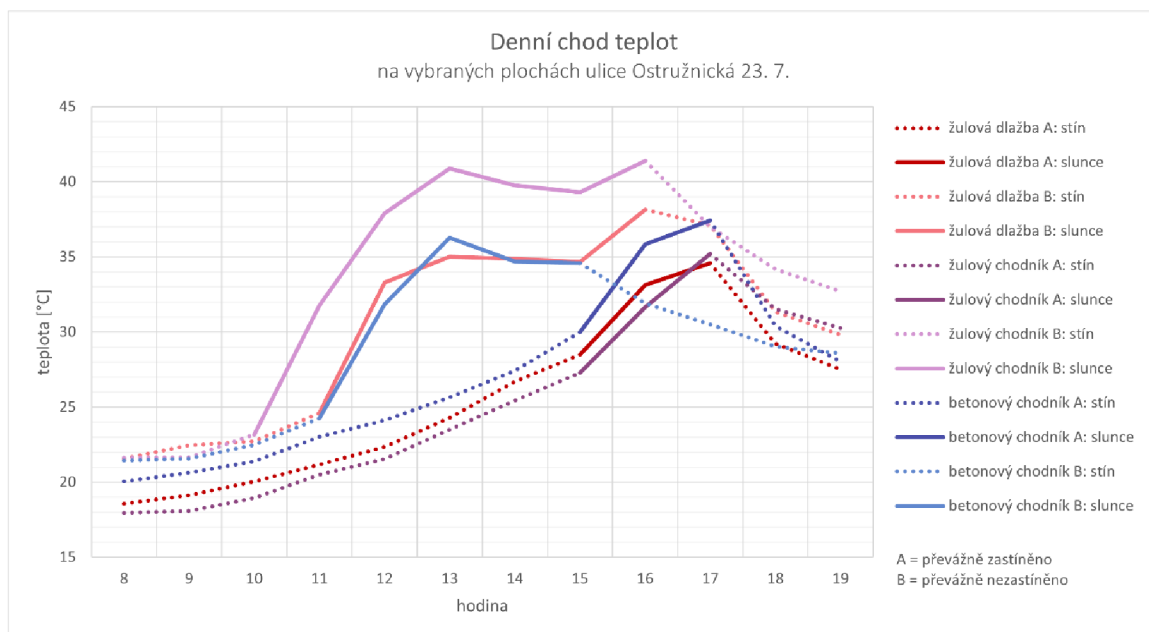
$$a = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (6)$$

kde  $y_2, x_2$  označují koncovou teplotu a hodinu a  $y_1, x_1$  počáteční teplotu a hodinu. Pokud je výsledné  $a$  kladné, funkce je rostoucí, pokud je záporné, funkce je klesající.

Grafy jsou vždy zpracovány v následujícím formátu. Plochy označené jako A byly převážnou část dne zastíněny. Plochy označené jako B byly převážnou část dne osluněny. Každá plocha se během dne po určitou dobu vyskytovala ve stínu. Toto je v liniových grafech zohledněno tečkovanou čarou, v bodových grafech bodem bez výplně a ve sloupcových grafech sloupcem s vzorkovou výplní.

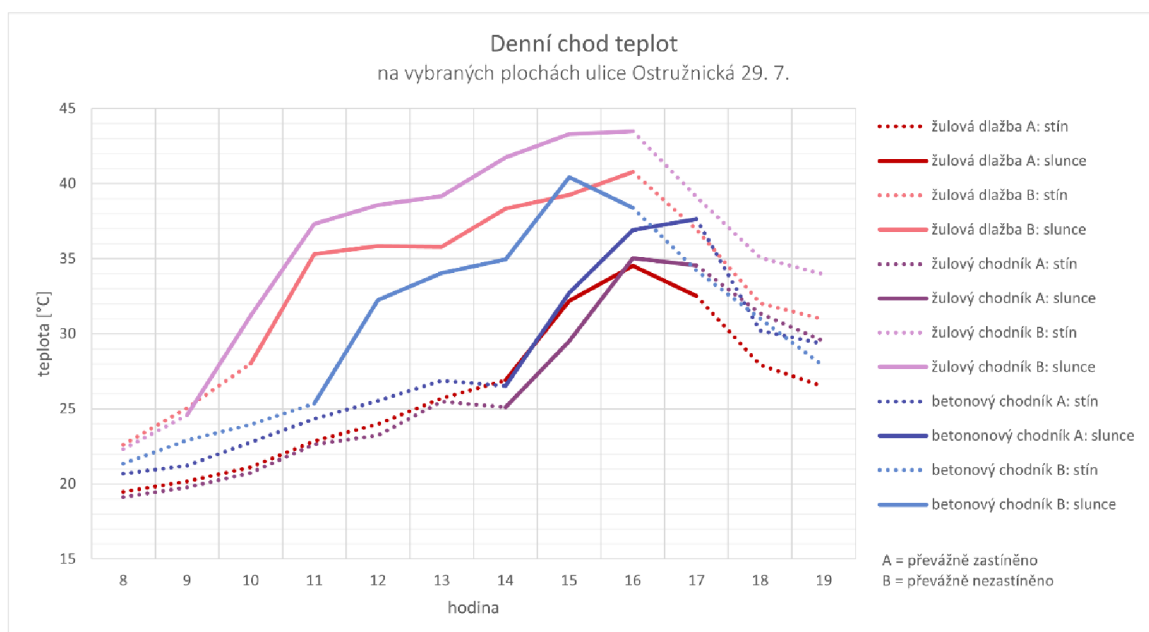
### 7.1 Historické centrum

Z hlediska vývoje teplot a různorodosti materiálů je nejzajímavější Ostružnická ulice. Na této ulici najdeme jak historickou žulovou dlažbu typickou pro celé Horní náměstí, tak nový chodník z tryskané žuly a starší chodník z betonu. Jelikož se jedná o úzkou ulici obklopenou zástavbou, během dne se posunuje stín z jedné strany ulice na druhou a lze sledovat rozdíly teplot v důsledku zastínění/oslunění povrchů.



Obr. 7.1 Denní chod teplot povrchů na Ostružnické ulici 23. 7.

Na obrázku 7.1 lze sledovat výrazný nárůst teploty mezi 10. a 13. hodinou u nezastíněného žulového chodníku. Tento chodník se dokonce zahřívá více než starší betonový chodník v druhé části ulice, který byl vystaven slunečnímu záření pouze o hodinu méně. I přes to, že se jedná o stejný materiál, žulový chodník se při oslunění ohřívá o 9 až 29 % více než žulová dlažba. Toto je pravděpodobně dáno především velikostí jednotlivých dlaždic a spár mezi nimi nebo rozdílným opracováním kamene. V případě dlouhodobého zastínění během dne, jsou rozdíly mezi žulovou dlažbou a chodníkem minimální. Nejvyšší rozdíl mezi teplotami způsobený zastíněním/osluněním povrchu vykazuje žulový chodník (až 74 %). Zajímavým trendem je také podobné zahřívání převážně nezastíněné žulové dlažby a betonového chodníku.



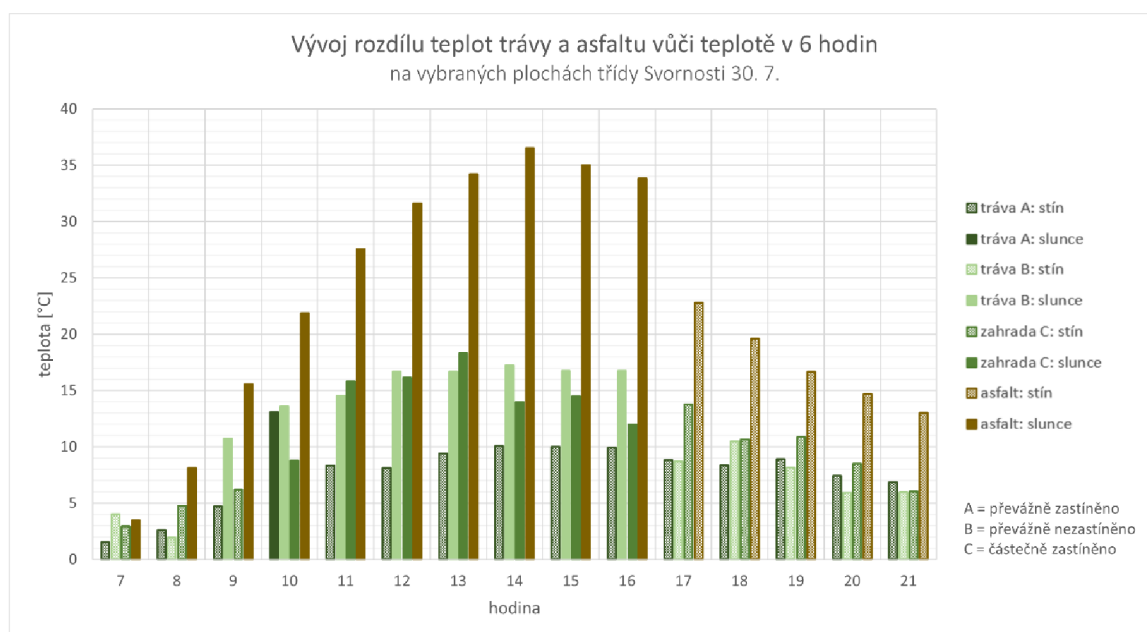
Obr. 7.2 Denní chod teplot všech povrchů na Ostružnické ulici 29. 7.

Stejné trendy se projeví i při druhém měření 29. 7. (Obr. 7.2). Převážně nezastíněná žulová dlažba se zde zahřívá dokonce více než betonový chodník, byla ale vystavena slunci o hodinu déle. Žulový chodník se při oslunění ohřívá o 9 až 11 % více než žulová dlažba.

Rychlosti zahřívání bezprostředně po oslunění se u převážně nezastíněných povrchů příliš neliší. Oproti převážně zastíněným povrchům po oslunění se zahřívají přibližně 1,5krát rychleji při obou měřeních. Pokles teploty po zastínění je nejvýraznější u převážně zastíněného betonu.

## 7.2 Třída Svornosti

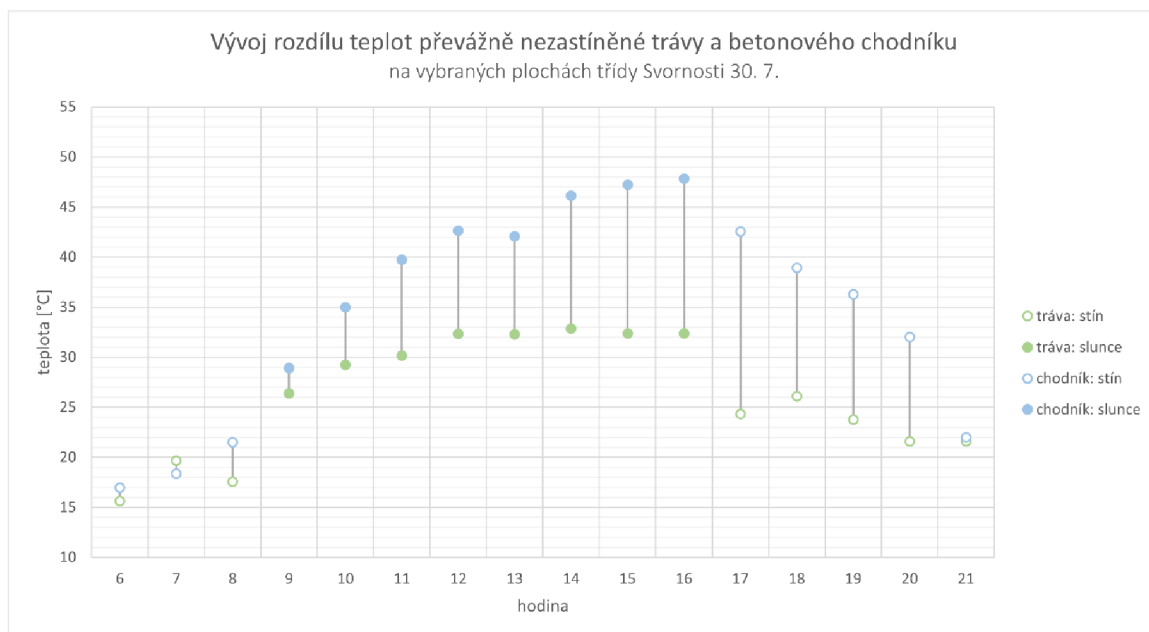
Na třídě Svornosti byly porovnávány travnaté povrchy v různém stupni zastínění. Dále byla zkoumána žulová dlažba, betonový chodník a asfaltová silnice. Oproti betonovému chodníku na Ostružnické ulici je tento chodník z novějšího materiálu.



Obr. 7.3 Vývoj rozdílu teplot trávy a asfaltu vůči teplotě v 6 hodin na třídě Svornosti 30. 7.

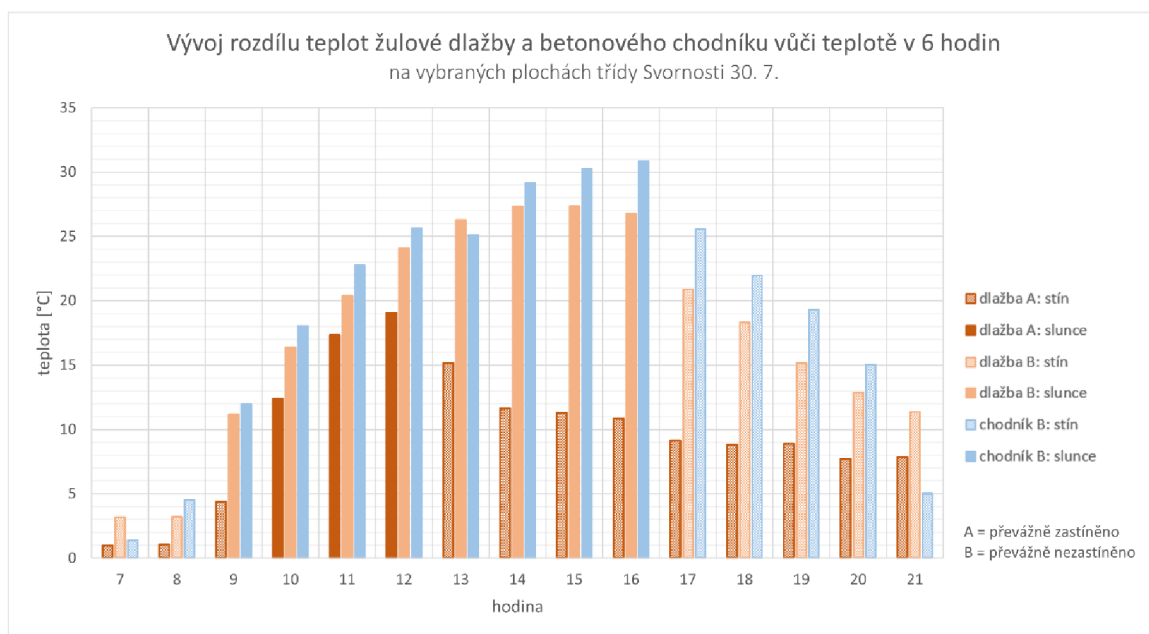
Obrázek 7.3 znázorňuje rozdíl (nárůst) teploty travnatých ploch a asfaltové silnice oproti nejnižší teplotě, která byla naměřena v 6 hodin ráno. Nejmenší nárůst vykazuje celý den tráva A, která byla kromě 10. hodiny stabilně zastíněná stromem. Nárůst teplot částečně zastíněné zahrady s vyšší trávou a převážně nezastíněné nižší trávy na ulici se nijak významně neliší. Nižší tráva na ulici se ale rychleji ochlazuje po zastínění v 17 hodin. Nárůst teplot asfaltu během dne je více než dvakrát větší než nejvyšší nárůst u travnatých ploch. Asfalt se zahřívá z minimální na maximální teplotu dvakrát rychleji než převážně nezastíněná tráva a 3,5krát rychleji než tráva převážně zastíněná. Asfalt se také po zastínění ochlazuje téměř dvakrát rychleji než tráva převážně nezastíněná.





Obr. 7.4 Vývoj rozdílů teplot trávě a betonového chodníku na třídě Svornosti 30. 7.

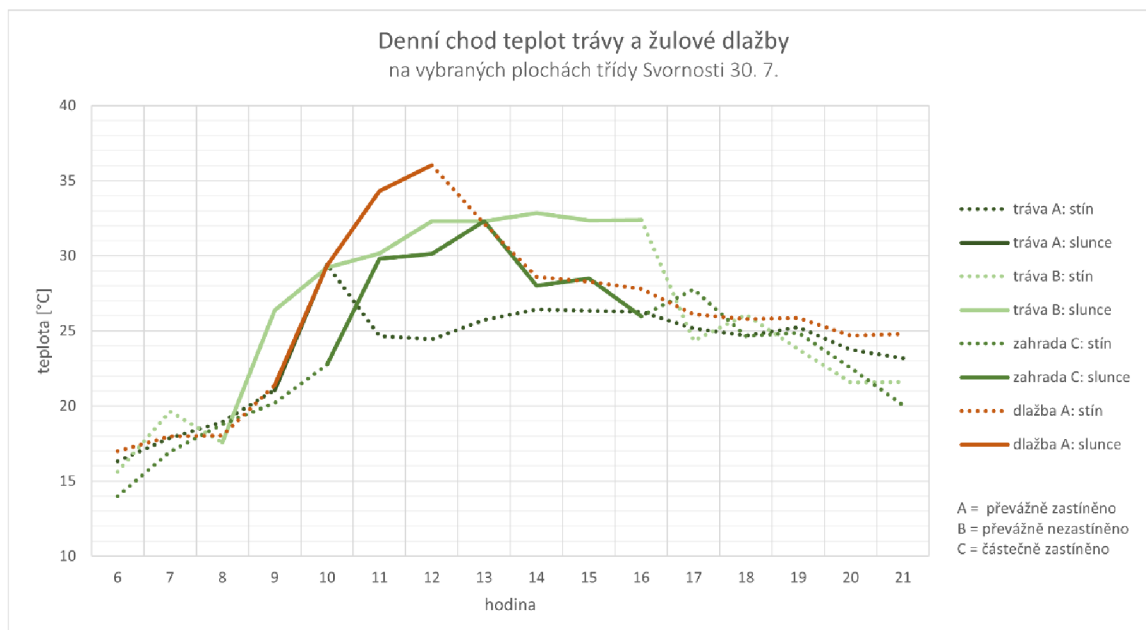
Betonový chodník se na třídě Svornosti zahřívá i ochlazuje rychleji než travnaté povrchy. Nejlépe toto ilustruje obrázek 7.4, kde je tráva i beton stejnou dobu ve stínu. Beton se zde zahřívá z min. na max. teplotu 1,8krát rychleji. Stejně tak je tomu i u zastíněné trávy. Tráva na zahradě se zahřívá podobně rychle jako beton. Beton se zároveň ochlazuje výrazně rychleji, a to téměř 2,5krát oproti převážně nezastíněné trávě (Obr. 7.4), téměř 3,5krát oproti částečně zastíněné zahradě, a dokonce 9krát oproti převážně zastíněné trávě.



Obr. 7.5 Vývoj rozdílů teplot dlažby a chodníku vůči teplotě v 6 hodin na třídě Svornosti 30. 7.

Na obrázku 7.5 lze vidět vývoj rozdílů teplot u žulové dlažby a betonového chodníku. Materiály vykazují podobný trend jako na Ostružnické ulici (kapitola 7.1), tedy podobné zahřívání. Na třídě Svornosti jsou vždy mírně vyšší teploty u betonového chodníku, což je pravděpodobně zapříčiněno novějším materiálem. Největší vliv zde opět má zastínění

povrchu, což lze sledovat především u dlažby A a B. Rozdíl teplot dosahuje až 56 %. Zajímavý je také výrazný pokles teploty betonu mezi 20. a 21. hodinou po západu slunce.

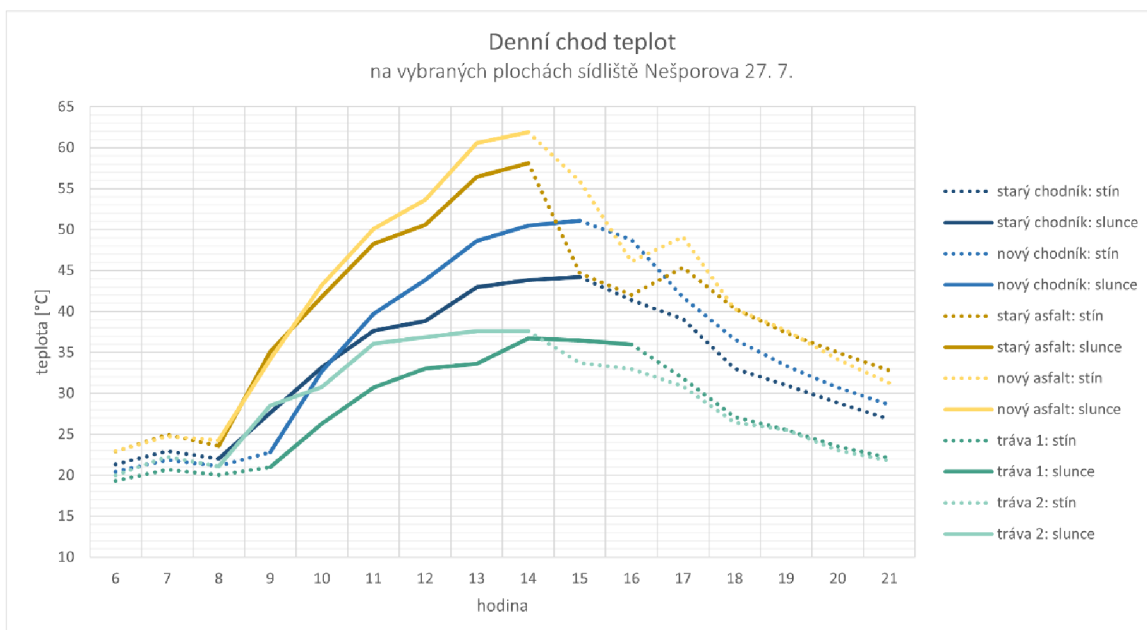


Obr. 7.6 Denní chod teplot trávy a žulové dlažby na třídě Svornosti 30. 7.

Obrázek 7.6 opět potvrzuje výrazný vliv zastínění na povrchy. Denní chod teplot žulové dlažby ve stínu se od travnatých ploch příliš neliší. Rychlost zahřívání bezprostředně po oslunění je také podobná travnatým povrchům. Nejpomaleji se zahřívá tráva na zahradě.

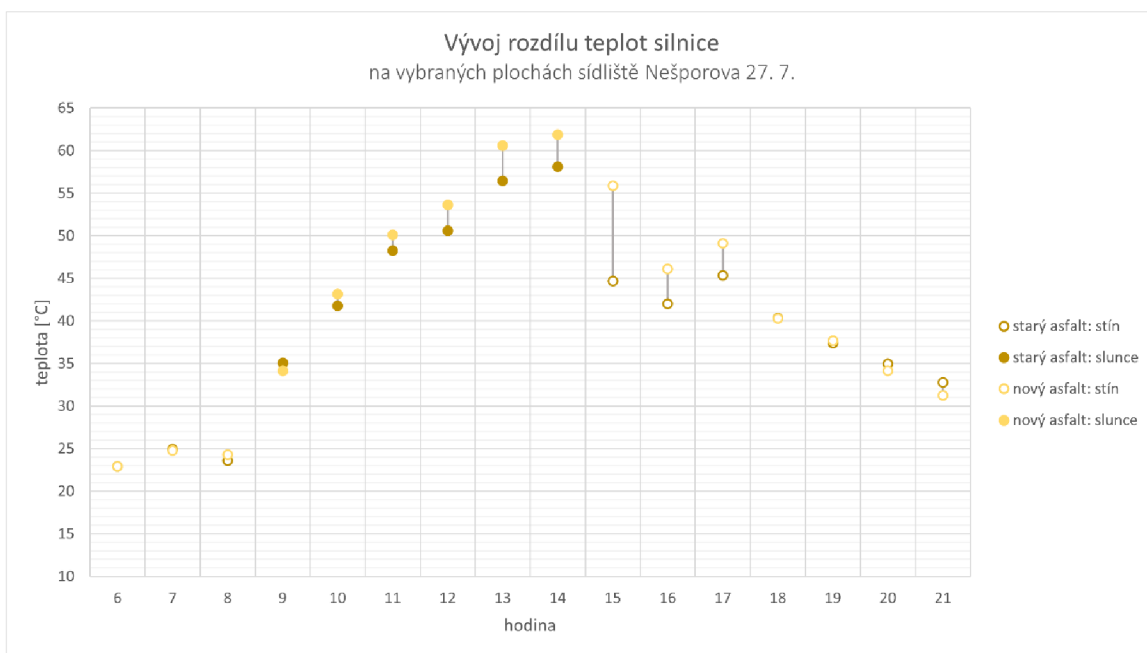
### 7.3 Sídliště Nešporova

Na sídlišti na ulici Nešporova byly porovnávány především starší a novější materiály – asfalt a beton. U asfaltu se jedná o standardní materiál silnice a novější záplatu nerovností. U betonu byl zkoumán starší chodník podobného materiálu jako na Ostružnické ulici a novější chodník odpovídající naopak materiálu na třídě Svornosti. Dále byly měřeny dva travnaté povrchy – u panelového domu a mezi chodníkem a parkovištěm.



Obr. 7.7 Denní chod teplot všech povrchů na sídlišti Nešporova 27. 7.

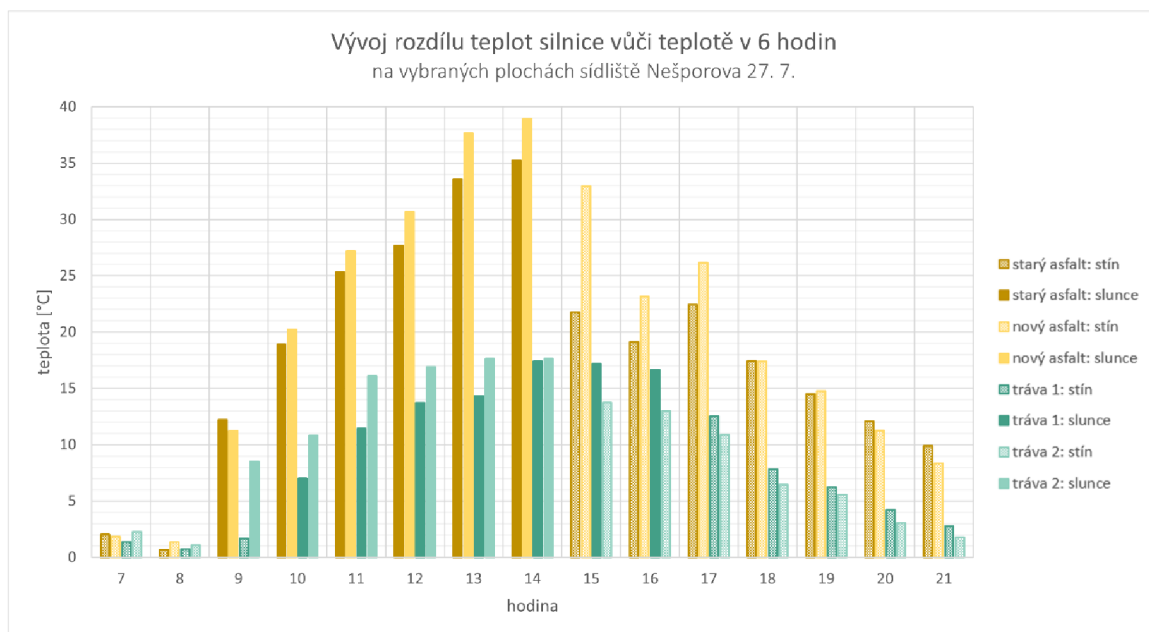
Na obrázku 7.7 lze sledovat, že novější materiály se zahřívají více než ty starší. Toto platí jak u betonového chodníku, tak u asfaltové silnice. Jedinou výjimkou je měření v 9 hodin, kdy se novější chodník ve stínu zahřívá méně než ten starší. Stejný trend vykazují všechna tři měření, včetně druhého, kdy po 7. hodině přšlo.



Obr. 7.8 Vývoj rozdílu teplot starého a nového asfaltu a betonu na sídlišti Nešporova 27. 7.

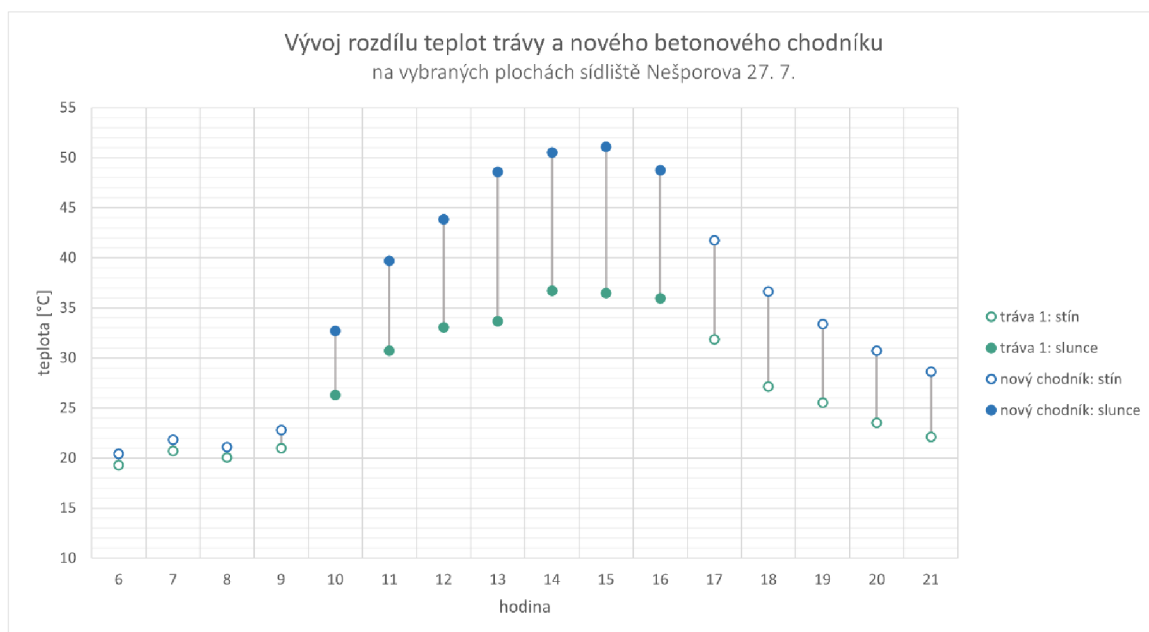
Na obrázku 7.8 lze sledovat, že bezprostředně po zastínění v 15 hodin výrazně klesá teplota starého asfaltu oproti novému. Pokud ale zhodnotíme průběh teplot po celou dobu zastínění až do 21. hodiny, teplota nového asfaltu klesá přibližně 1,2krát rychleji než teplota asfaltu starého. Toto se opět platí i pro měření v jiných dnech a stejnou rychlost poklesu vykazují také nový beton oproti staršímu.





Obr. 7.9 Vývoj rozdílu teplot asfaltu a trávy vůči teplotě v 6 hodin na sídlišti Nešporova 27. 7.

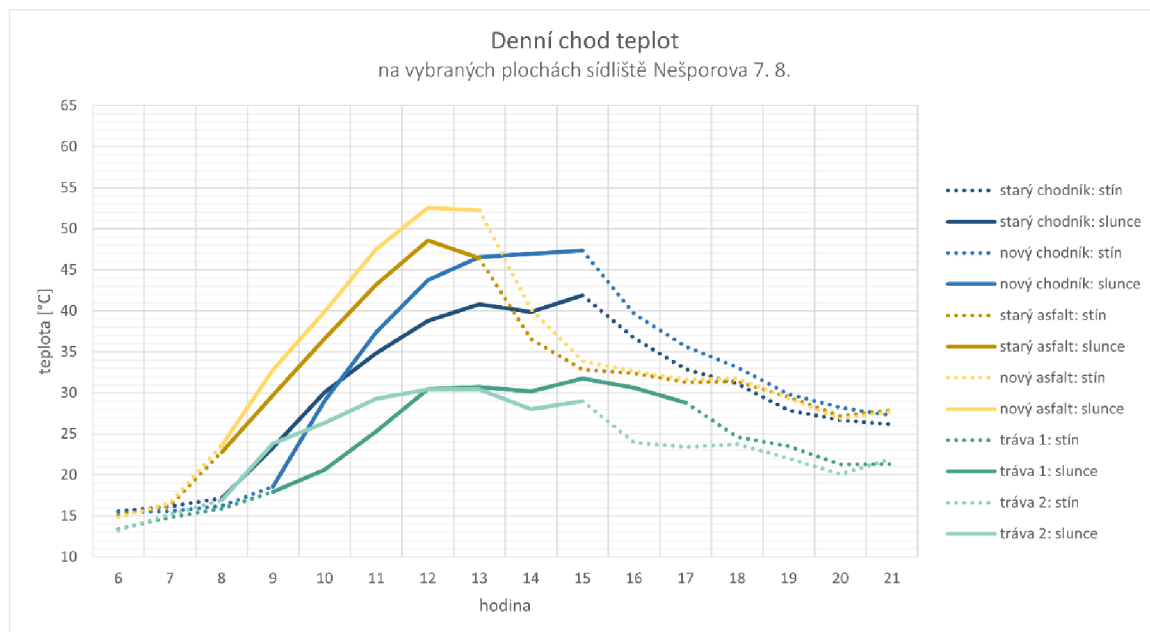
Obrázek 7.9 potvrzuje stejný trend rozdílu teplot mezi asfaltovou silnicí a travnatými povrchy jako na třídě Svornosti (Obr. 7.3). Nárůst teplot asfaltu vůči teplotě v 6 hodin ráno je během oslunění také až více než dvakrát větší než u trávy u všech měření. Nejnižší nárůst teplot během dne vykazují oba travnaté povrchy. Chod teplot je posunutý o jednu až dvě hodiny v závislosti na zastínění u všech měření, jinak je u obou velmi podobný. Asfalt se při všech měřeních ochlazuje 1,5 až třikrát rychleji než travnaté povrchy. Co se týče rychlosti zahřívání mezi minimální a maximální teplotou, asfalt se zahřívá přibližně dvakrát rychleji než tráva, a to i v případech měření ovlivněného deštěm.



Obr. 7.10 Vývoj rozdílu teplot trávy a betonového chodníku na sídlišti Nešporova 27. 7.

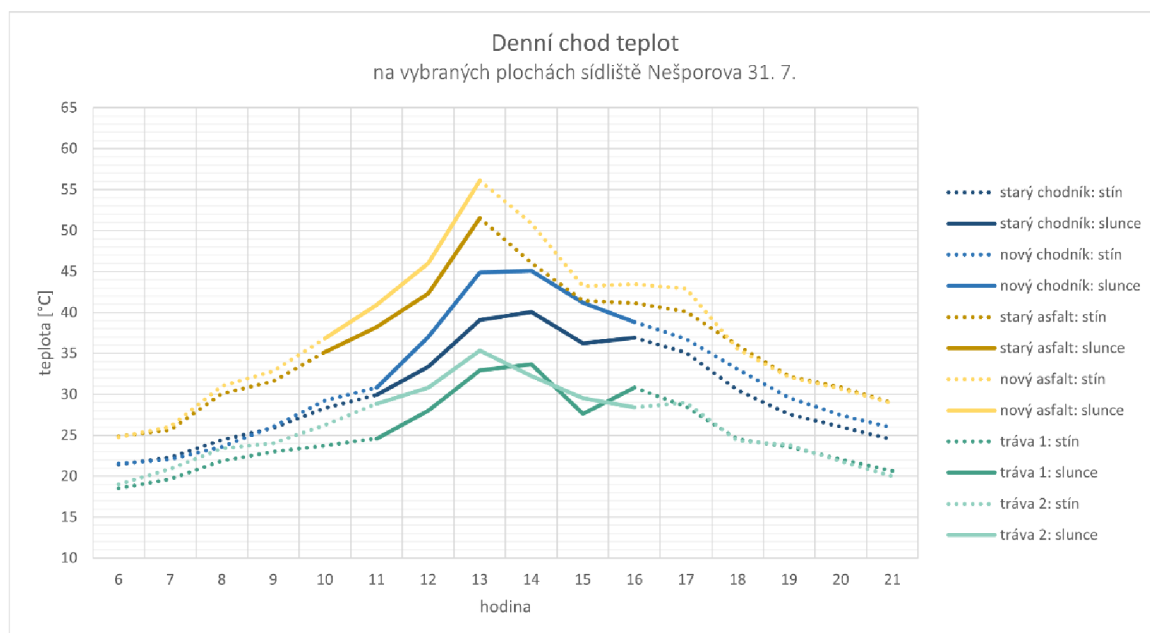
Betonový chodník se na sídlišti zahřívá i ochlazuje rychleji než travnaté povrchy, což potvrzuje stejný trend na třídě Svornosti (Obr. 7.4). Nejlépe toto ilustruje obrázek 7.10, kde je tráva i beton stejnou dobu ve stínu. Novější beton vykazuje u všech měření

výraznější rozdíly než beton starší. V případě novějšího betonu je zahřívání z min. na max. teplotu 1,7 až dvakrát rychlejší, ochlazování je rychlejší 1,6 až třikrát (využita byla data z prvního a třetího měření).



Obr. 7.11 Denní chod teplot všech povrchů na sídlišti Nešporova 7. 8.

Na obrázku 7.11 je vidět zajímavý trend teplot, který vznikl při měření 7. 8. 2021. Mezi 20. a 21. hodinou dochází u většiny zkoumaných povrchů k mírnému nárůstu teplot, i přes to, že mezi těmito hodinami zapadlo slunce. Tento jev může být způsoben lokálním oteplením teploty vzduchu či přízemním větrem. Při srovnání obrázku 7.11 s obrázkem 7.6 (měření z 27. 7.) je patrné, že na rozpětí teplot povrchů měla největší vliv teplota vzduchu. Ta byla 7. 8. přibližně o 4 °C nižší (viz Tab. 4.1).



Obr. 7.12 Denní chod teplot všech povrchů na sídlišti Nešporova 31. 7.

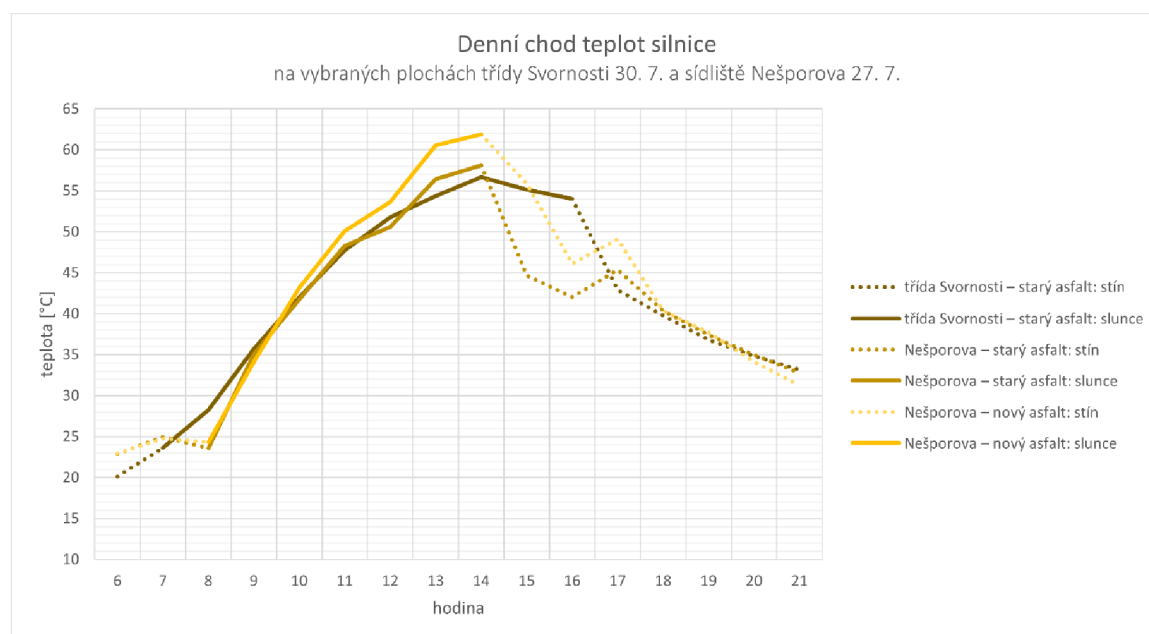
Jelikož při měření 31. 7. (Obr. 7.12) začalo po 7. hodině ráno pršet, bylo předpokládáno, že srážky se projeví na chodu teplot povrchů a ochladí je. Jak je ale patrné z obrázku 7.12, k ochlazení nedošlo. Jak poukazuje Habermann (2021) a Lehnert a kol. (2021), např. i kropení povrchů vede k ochlazení pouze v řádu desítek minut. Je tedy pravděpodobné, že vzhledem k hodinovému intervalu měření, se efekt ochlazení při měření v 8 hodin již vytratil. Srážky měly vliv pouze na celkový denní chod teplot a jejich rozpětí, kdy povrchy začínají na přibližně stejných teplotách jako u měření 27. 7. (Obr. 7.3), jejich maxima jsou ale o poznání nižší.

## 7.4 Srovnání napříč lokalitami

U stejných či podobných materiálů povrchu bylo provedeno srovnání napříč jednotlivými lokalitami. Nelze zde však zkoumat rozdíly v teplotách či rychlosti zahřívání vzhledem k nestejným klimatickým podmínkám. Grafy ale mohou sloužit pro identifikaci trendů teplotních chodů podobných materiálů.

### 7.4.1 Asfalt

Asfaltová silnice se vyskytuje na třídě Svornosti a sídlišti Nešporova. V případě třídy Svornosti se jedná o podobnou strukturu asfaltu, který je na sídlišti označen jako starý.

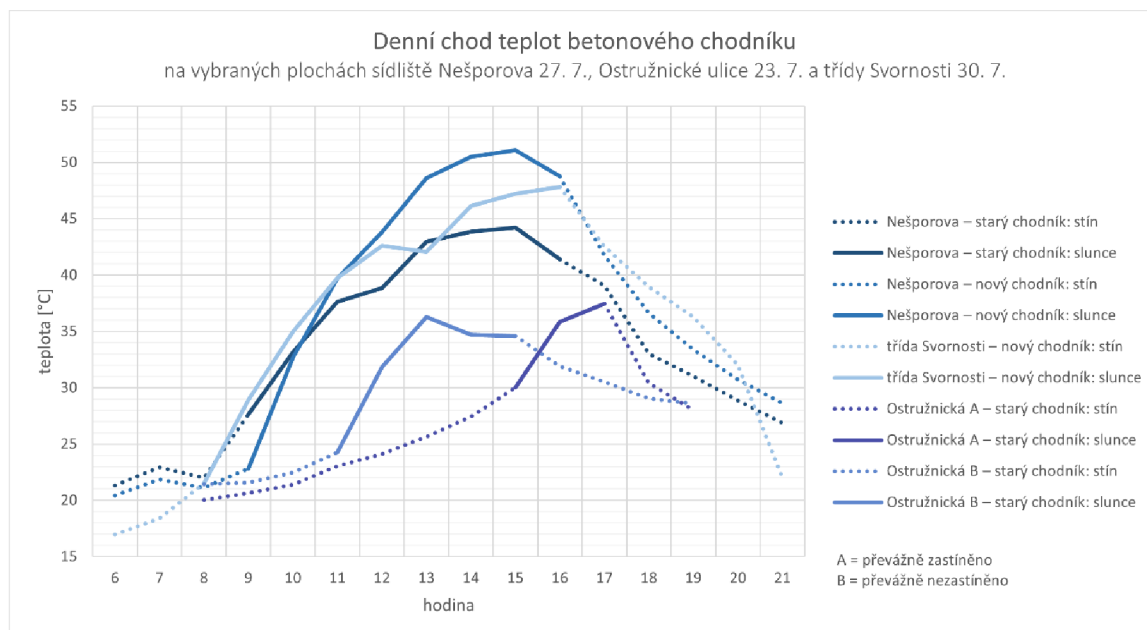


Obr. 7.13 Denní chod teplot silnice na třídě Svornosti 30. 7. a sídlišti Nešporova 27. 7.

Na obrázku 7.13 lze vidět, že trend denního chodu teplot je na obou lokalitách velmi podobný. Po oslunění asfaltu dochází k prudkému, téměř lineárnímu, nárůstu jeho teploty. Po zastínění nastává pokles, který ale není tak prudký jako nárůst a po několika hodinách pokles zpomaluje. Asfalt se po zastínění do 21. hodiny ochlazuje přibližně na polovinu své maximální teploty. Stejný trend denního chodu byl identifikován i u měření 7. 8., kde jsou teploty asfaltu na sídlišti nižší. Z trendu vybočuje druhé měření (31. 7.), toto je ale způsobeno ranními srážkami.

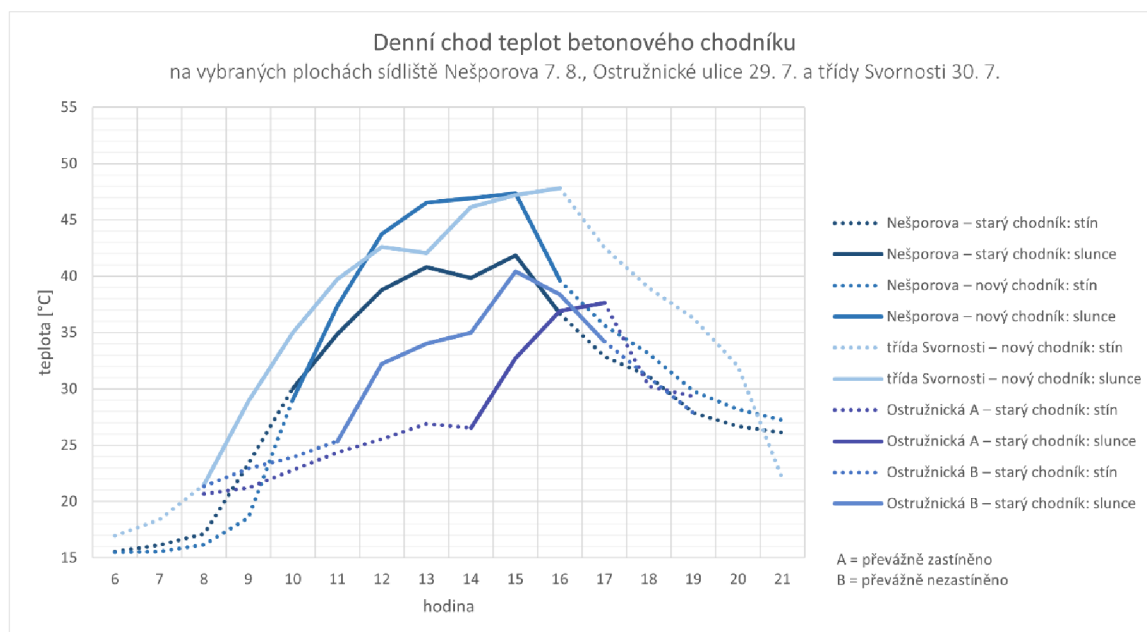
## 7.4.2 Beton

Betonový chodník se nachází na všech lokalitách. Starší beton je použit na Ostružnické ulici a na sídlišti Nešporova, novější beton rovněž na sídlišti a na třídě Svornosti.



Obr. 7.14 Denní chod teplot betonového chodníku na všech lokalitách (první měření).

Trendy v denním chodu teplot u betonového chodníku (Obr. 7.14) jsou podobné především při ochlazování ve stínu. Podobně se ochlazují oba materiály chodníku na sídlišti, nový chodník na třídě Svornosti a převážně zastíněný chodník na Ostružnické ulici. Pevně zastíněný chodník na Ostružnické ulici z trendu vybočuje a ochlazuje se pomaleji. Zároveň ale také dosahuje mnohem nižších teplot než na ostatních lokalitách. Žádný chodník se také neochlazuje po 20. hodině tak rychle jako ten na třídě Svornosti. Jedná se tedy pravděpodobně o specifické podmínky měření z 30. 7.

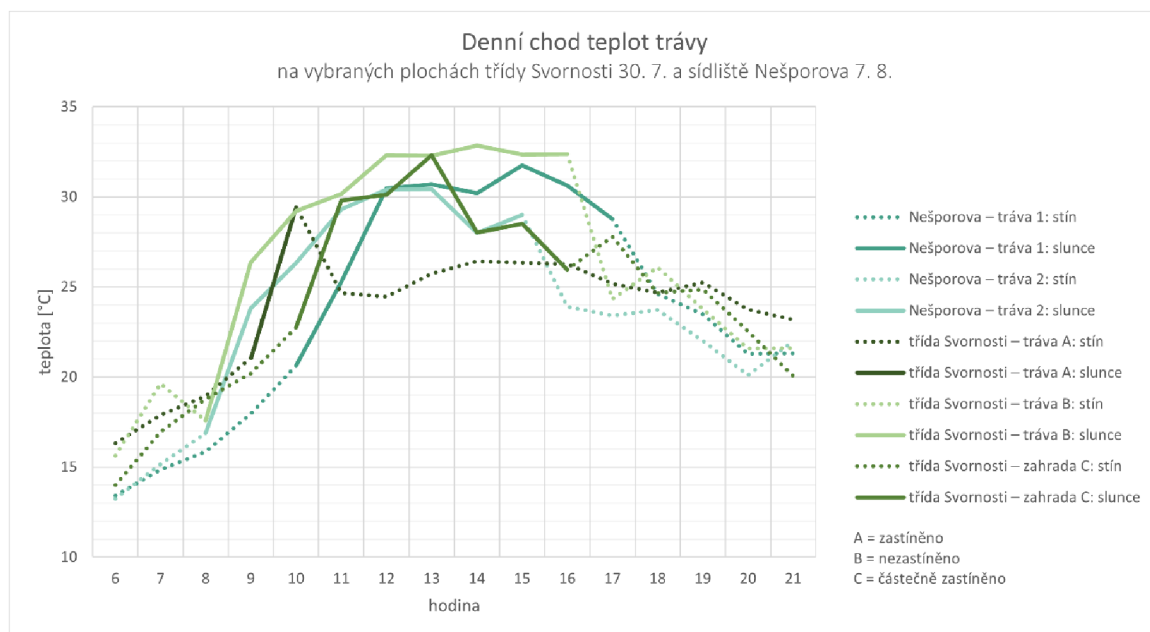


Obr. 7.15 Denní chod teplot betonového chodníku na všech lokalitách (druhá měření).

Podobné trendy ochlazování betonu lze sledovat i na obrázku 7.15. Potvrdily se také při srovnání měření ze 7. 8. na sídlišti, 23. 7. na Ostružnické ulici a 30. 7. na třídě Svornosti.

### 7.4.3 Tráva

Travnaté povrchy jsou přítomny na třídě Svornosti a na sídlišti. Trend teplot je nejlépe porovnatelný mezi přibližně stejně zastíněnými povrchy. Tráva A na třídě Svornosti byla zastíněna s výjimkou jedné hodiny celý den, a proto do trendů nezapadá.

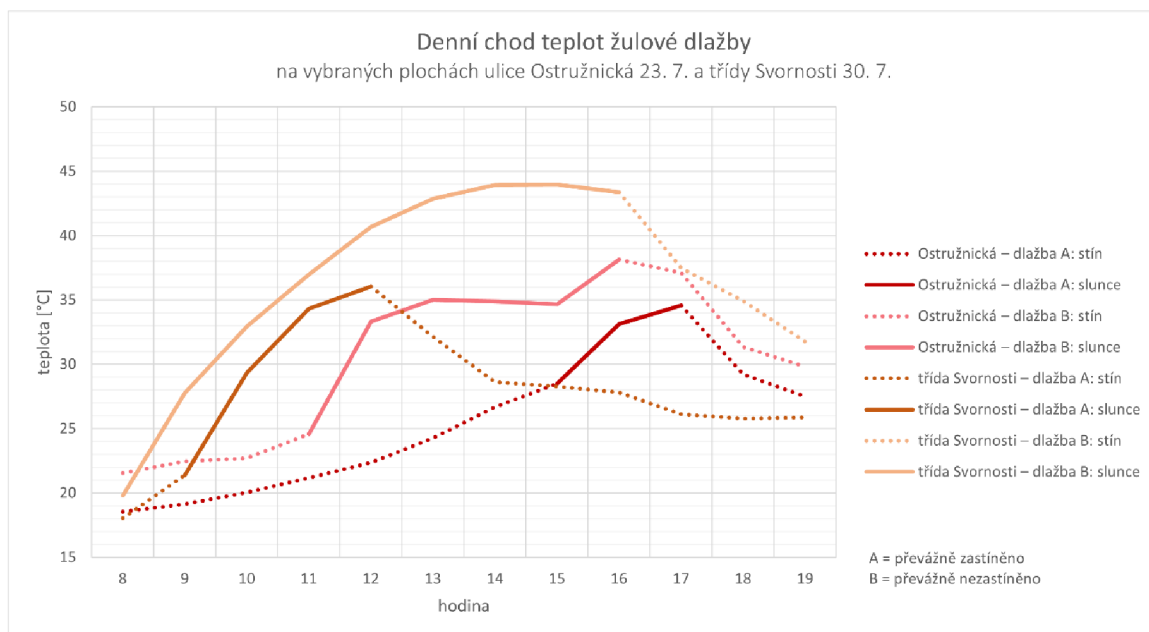


Obr. 7.16 Denní chod teplot trávy na třídě Svornosti a sídlišti Nešporova.

U denního chodu teplot travnatých povrchů (Obr. 7.16) lze sledovat především podobnou rychlost zahřátí po oslunění a vyrovnání teplot několik hodin po zastínění. Stejný trend se vyskytuje i u srovnání měření na sídlišti z 27. 7.

### 7.4.4 Žula

Žulová dlažba ve dvou různých zpracováních (chodník z tryskané žuly a kostky) se nachází na Ostružnické ulici. Žulové kostky lze nalézt také na třídě Svornosti. Jelikož se jedná o podobné struktury i velikost materiálu, byly porovnány pouze žulové kostky.



Obr. 7.17 Denní chod teplot žulové dlažby na Ostružnické ulici a třídě Svornosti.

Na obrázku 7.17 lze sledovat, že převážně zastíněné dlažby mají po oslunění i po zastínění téměř totožný trend vzrůstu i poklesu teplot, jsou pouze posunuty v hodinách podle toho, kdy se nad plochu posunulo slunce. Podobný průběh dvě až tři hodiny po oslunění vykazuje také převážně zastíněná dlažba na třídě Svornosti a převážně nezastíněná dlažba na Ostružnické ulici. Toto se potvrdilo i na druhém měření na Ostružnické ulici 29. 7.

## 8 VÝSLEDKY

Výsledkem práce je mimo jiné maximálně automatizovaný postup práce s termálními daty z ruční termální kamery (kapitola 5 a 6). Pomocí postupu byly zpracovány následující výstupy:

- 10 345 termálních snímků pořízených kamerou,
- skript pro extrakci teplot ve stupních Celsia a převod na formát TIFF (elektronická příloha 3),
- skript pro automatické zpracování termálních mozaik v softwaru Agisoft Metashape (elektronická příloha 4),
- 304 termálních mozaik (elektronická příloha 5),
- 116 grafů teplotních charakteristik vybraných povrchů (elektronická příloha 6).

V rámci zpracování dat byla také řešena různá emisivita vybraných povrchů, která může ovlivňovat naměřené hodnoty teplot. Tento faktor byl ošetřen pomocí korekce hodnot emisivity dle literatury (viz kapitola 5.1.4).

Z analýzy teplotních charakteristik (kapitola 7) vyplývá, že travnaté povrchy dobře drží svou teplotu. Během dne se pomalu ohřívají a nedosahují tak vysokých teplot jako povrchy umělé. Např. asfalt dosahuje v poledních hodinách dvakrát vyšších teplot než tráva. Ve srovnání s nejnižší teplotou v 6 hodin ráno se asfalt při svém maximu zahřívá také dvakrát více než tráva. Zároveň se travnaté povrchy i pomalu ochlazují ve stínu. Asfalt či beton se ochlazují až 3,5krát rychleji, zároveň se ale zahřívají přibližně 1,8 až dvakrát rychleji.

Ze všech zkoumaných povrchů dosahuje nejvyšších teplot asfalt. Při srovnání průměrů maximálních teplot vykazuje beton přibližně o 16 % nižší hodnoty, žula o 25 % a tráva o 40 %. Z antropogenních povrchů je tedy žula tím nejméně záhřevným. Tyto výsledky korespondují s poznatky Poura (2019), kdy nevyšší teploty na odpolední termální mozaice vykazoval asfalt, nejnižší naopak travnaté povrchy. Dlažební kostky vykazovaly mírně vyšší zahřívání než beton – tento trend se projevil i na Ostružnické ulici (kapitola 7.1).

Žulový chodník z pravidelných dlaždic z tryskané žuly se na slunci zahřívá o nejméně 9 % více než žulová dlažba ve formě kostek. Ve stínu mezi těmito povrchy nejsou velké rozdíly. V rámci materiálů v historickém centru vykazuje největší teplotní rozdíly mezi stínem a sluncem právě žulový chodník.

Na teplotu povrchů má největší vliv jejich zastínění. Např. žulová dlažba vykazuje během dne podobné zahřívání i teploty jako travnaté povrchy, pokud je stejně zastíněna. V ranních hodinách, před tím, než jsou povrchy vystaveny slunci, se od trávy výrazně neliší ani teplota betonových chodníků. Asfalt se po zastínění až do západu slunce ochlazuje přibližně na polovinu své maximální teploty.

Starší umělé materiály se zahřívají méně než ty novější. Toto se potvrdilo jak u asfaltu, tak u betonu. Zároveň se také starší materiály pomaleji ochlazují. Rozdíly jsou pravděpodobně dány strukturou materiálů, v případě chodníku také rozdílnou velikostí spár mezi dlaždicemi.

Stejně materiály vykazují podobné trendy denního chodu teplot i napříč lokalitami. Výsledky práce lze tedy zobecnit na další povrchy ze stejných materiálů v případě, že bude měřeno za podobných klimatických podmínek na lokalitách stejného charakteru.

## 8.1 Doporučení pro územní plánování

V územním plánování je třeba počítat s určitou formou zastínění antropogenních povrchů. Může se jednat jak o stromy (které splňují svoji funkci na třídě Svornosti), tak o markýzy, střechy či stín z okolních budov. Upřednostnění travnatých povrchů nad žulovou dlažbou v místech, která jsou většinu dne zastíněna, nepřináší nijak významné ochlazení. Při výstavbě nových chodníků je třeba zvážit typ materiálu, jelikož nejnovější betonové chodníky vykazují vyšší zahřívání než ty staré. Nejvhodnějším se z hlediska záhřevnosti jeví žulové kostky. Vzhledem k obtížnějšímu pohybu po tomto materiálu je ale důležité jejich umístění dostatečně zvážit a konzultovat s obyvateli. Vhodné by bylo např. provést dotazníkové šetření formou Geoparticipace. Dalším vhodným materiálem jsou dlaždice z tryskané žuly. U záplat asfaltových silnic by se měl klást důraz na použitou asfaltobetonovou směs, která by měla být co nejpodobnější starším částem silnice, které vykazují nižší zahřívání.

Urbánní prvky na třídě Svornosti jsou dle autorky navrženy korektně z hlediska tepelného komfortu. Na ulici se nachází vzrostlé stromy umístěné v pravidelných intervalech, které poskytují během horkých dní stín nad povrchem ulice. Betonové chodníky jsou prokládány žulovou dlažbou na příjezdových cestách domů.

V historickém centru je nejnáchylnějším materiálem vůči horku žulový chodník. Jelikož již několikrát proběhla diskuze o potenciální výsadbě stromů, která byla architekty revitalizace Horního náměstí odmítnuta, vhodné by bylo alespoň dočasné umístění markýz v letních měsících, a to především na otevřených prostranstvích. V přilehlých ulicích, jako např. na Ostružnické, plní funkci ochlazování stín historické zástavby. Podle Habermanna (2021) a Lehnerta a kol. (2021) mají ale největší psychologický efekt na obyvatele vegetační prvky.

Na sídlišti Nešporova chybí na zkoumaných místech vzrostlé stromy, které by zapadaly i do celkového konceptu bydlení. Obecně lze stromy najít na travnatých plochách v blízkosti silnic či parkovišť velmi ojediněle, i přes to, že by zde plnily ochlazovací funkci pro asfaltový povrch parkovišť, a tedy i auta rezidentů. Dále by bylo vhodné investovat do oprav starší betonové dlažby namísto budování nové. Starší dlažba je již částečně prorostlá trávnikem a zahřívá se mnohem méně než nový betonový chodník.



## 9 DISKUZE

V průběhu řešení práce se vyskytla řada problémů, na které bylo nutné se zaměřit. Hlavní cíl práce, analýza teplotních charakteristik vybraných ploch za použití termálního mapování, byl naplněn. Neuskutečněným vedlejším cílem práce je letecká kampaň, jejíž výsledky měly být zpracovány do termální mozaiky a porovnány s daty z letecké kampaně z roku 2016. Původně bylo zamýšleno pracovat s termální kamerou Workswell Thermal Vision Pro, kterou lze připevnit na letadlo či UAV. Po zadání práce bylo ovšem zjištěno, že termální čidlo FLIR Tau 2 na této kameře je nefunkční a výrobce není schopen jej opravit.

Jako náhrada mělo sloužit UAV snímkování dronem DJI Mavic 2 Enterprise Dual, který disponuje termální kamerou. Vzhledem k chybě na straně zapůjčující společnosti byl ale dron doručen se zpožděním a nebylo tedy možné měřit za podobného počasí jako u ostatních měření. Termální snímky z dronu měly tedy sloužit pouze pro porovnání procesu zpracování dat vůči ruční termální kameře.

Ani toto snímkování ale nepřineslo vyhovující výsledky, jelikož termální snímky jsou v uzavřeném formátu a společnost DJI k dubnu 2022 neposkytuje software, který by umožnil extrakci raw či skutečných hodnot teploty. Formát DJI nebylo možné zpracovat ani pomocí funkce *raw2temp* v jazyce R, která byla použita na data z termální kamery. Od tohoto cíle bylo tedy po dohodě s vedoucím upuštěno.

Termální měření ruční kamerou nelze považovat za 100% přesná. Na termální měření má vliv mnoho faktorů, které nelze efektivně ošetřit. Zásadní proměnnou je zde přesnost kamery, kterou udává výrobce (viz Tab. 2.1). Dalším faktorem je také nastavení emisivity pro různé typy povrchů. I přes to, že nastavení proběhlo na základě rešerše literatury, skutečné hodnoty emisivity zkoumaných povrchů se mohou lišit v závislosti na struktuře materiálů. Nejvhodnější by bylo emisivitu změřit pro každý zkoumaný povrch individuálně. Vzhledem k časové náročnosti a nutnosti speciálního vybavení byl tento přístup v rámci diplomové práce neproveditelný. Vliv na naměřené teploty mají také klimatické podmínky. I přes to, že bylo snahou provést měření za co nejpodobnějšího počasí, nikdy tohoto nelze dosáhnout zcela. Vzhledem k časové náročnosti pravidelného snímkování z výšky nebylo možné provést ani referenční měření teploty daného povrchu ve stejný čas. Všechny výsledky a porovnání jsou proto uvedeny pouze relativně.

V rámci samotného měření by bylo vhodné provést více opakování. V práci byly všechny povrchy měřeny nejméně dva různé dny, v případě třídy Svornosti ovšem nebylo možné snímky z prvního dne využít. Tyto snímky byly nafočeny s přílišným důrazem na fasády budov, a tedy dostatečně nezachytily povrchy ulice. Měření by dle autorky bylo vhodné opakovat alespoň třikrát. V práci toto nebylo možné realizovat vzhledem k charakteru letního počasí v roce 2021. Dnů s vhodným radiačním počasím nebylo tento rok mnoho.

Pro analýzu teplotních charakteristik byly použity průměrné teploty zájmových ploch. Nebyl použit medián hodnot, jelikož se od průměru zásadně neodlišoval a na zájmových plochách se nevyskytovaly outliery (jako např. velmi nízké hodnoty kovových střech). Průměrné teploty mohou být ovlivněny především, pokud se povrch z části nachází ve stínu a z části na slunci. Tento jev bylo snahou eliminovat, a proto byly vybírány zájmové plochy, které se většinu času vyskytovaly celé ve stínu či celé na slunci.

V rámci práce byly vytvořeny ze snímků termální mozaiky. Procesem mozaikování ale dochází k průměrování hodnot teplot na spojeních snímků bilineární interpolací. I přes to, že rozdíly v teplotách jsou velmi malé, je třeba toto brát v úvahu. Jelikož na začátku práce nebylo jasné, jak velké území bude termální kamerou snímkováno, některé snímky pořízené kvůli mozaikám nakonec nebyly vůbec použity. Pro zarovnání termálních

snímků před mozaikováním je nutné fotit s více než 80% překryvy nejlépe ve svislém směru. Vzhledem k místům měření ale nebylo možné tento směr dodržet. Software Agisfot Metashape při tvorbě některých mozaik selhal nejspíše právě z tohoto důvodu. V případě, že se zkoumané povrchy nachází na malém území a přilehlé okolí není předmětem zájmu, je možné využít pro analýzu pouze samostatné snímky a mozaiky není třeba vytvářet.

Některé výsledky této práce nekorespondují s výsledky práce Poura (2019). Např. asfaltové povrchy se podle analýzy odpolední termální mozaiky Olomouce zahřívají přibližně o třetinu více než ty travnaté. Podle měření ruční termální kamerou byly ale tyto rozdíly mnohem větší. Asfalt také podle Poura (2019) dosahuje řádově nižších teplot. Rozdíly v ranní a odpolední teplotě u travnatých povrchů jsou naopak větší, než jaké byly naměřeny v této práci. Toto je pravděpodobně způsobeno více faktory: rozdílným měřítkem (Pour analyzuje celou Olomouc), rozdílnými klimatickými podmínkami a časem měření. Tato práce je také zaměřena na specifické městské lokality a okraj města či rozsáhlé přírodní plochy do analýzy nevstupovaly. Některé výsledky ovšem s prací Poura souhlasí. Asfalt je nejvíce se zahřívajícím materiálem, travnaté povrchy se zahřívají o 40 % méně. Naměřené ranní teploty před východem slunce jsou velmi podobné napříč antropogenními i travnatými povrchy.

## 10 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou analýzy teplotních charakteristik vybraných ploch města Olomouce pomocí termálního mapování. Hlavním cílem práce bylo provedení vlastního sběru dat v pravidelných intervalech, eliminace nežádoucích vlivů na termální měření a vytvoření a analýza sad teplotních poměrů pro měřené plochy.

Termální snímkování ruční kamerou FLIR E60 proběhlo v letních měsících za radiačního počasí na třech lokalitách vybraných na základě konzultace s MMOL: v historickém centru, na třídě Svornosti a sídlišti Povel na ulici Nešporova. Každá z lokalit reprezentuje typickou urbanistickou strukturu Olomouce. Snímkováno bylo z výšky v hodinových intervalech mezi 6. hodinou ranní a 21. večerní. Historické centrum bylo snímkováno mezi 8. hodinou ranní a 19. večerní.

Přes deset tisíc termálních snímků bylo zpracováno především pomocí skriptu v jazyce R. Pomocí funkce *raw2temp* byly ze snímků extrahovány raw hodnoty, které byly následně převedeny na teploty ve stupních Celsia. V rámci převodu byly aplikovány korekce emisivity na základě hodnot z literatury. Pro analýzu travnatých povrchů bylo dále pracováno se snímky s emisivitou nastavenou na 0,98, pro asfalt s emisivitou nastavenou na 0,83. Pro beton a žulu bylo nastavení ponecháno na výchozí hodnotě 0,95. Snímky byly dále převedeny do formátu TIFF a pomocí skriptu v jazyce Python byly v softwaru Agisoft Metashape automaticky vytvořeny termální mozaiky. Mozaiky, které nebyly vygenerovány dostatečně kvalitně, byly zpracovány manuálně v grafickém prostředí softwaru.

Na mozaikách byly vybrány menší zájmové plochy, jejichž průměrné teploty byly získány pomocí nástroje *Zonal Statistics as Table* v softwaru ArcGIS Pro. Teploty byly poté vyneseny do grafů a analyzovány pomocí deskriptivní statistiky.

Travnaté povrchy dobře udržují svou teplotu, pomalu se zahřívají i ochlazují. Beton a asfalt se naopak zahřívají přibližně 1,8 až dvakrát rychleji a až 3,5krát rychleji se také ochlazují. Při srovnání průměrů nejvyšších dosažených teplot se řadí materiály následovně (od nejvyšších teplot po nejnižší): asfalt, beton (o 16 % méně než asfalt), žula (o 25 % méně), tráva (o 40 % méně). Žulový chodník v historickém centru se zahřívá více než žulová dlažba, a to nejméně o 9 %. Na teploty všech povrchů má největší vliv zastínění. Starší asfalt a beton vykazují nižší teploty než stejné materiály v novějším provedení.

Z hlediska územního plánování je třeba antropogenní povrchy během horkých dnů stínit. Výsadba trávy v místech, která jsou většinu dne zastíněna, nemá z hlediska ochlazování velký význam. Při výstavbě nových chodníků je třeba zvážit typ materiálu, jelikož nové betonové chodníky se zahřívají více než ty staré. Jako nejvhodnější materiál se z hlediska záhřevnosti jeví žulové kostky či žulové dlaždice. U oprav silnic je třeba se zaměřit na použité asfaltobetonové směsi, které by měly odpovídat složení stávajících silnic. V historickém centru by bylo vhodné zastínit především žulové chodníky na volných prostranstvích. Na sídlišti by k ochlazení parkovišť mohla pomoci výsadba stromů v jejich blízkosti.

Výsledky práce poslouží MMOL a dalším politickým subjektům k informovaným rozhodnutím v rámci územního plánování a udržitelného rozvoje města Olomouce. Postup práce může sloužit jako návod na zpracování velkého množství dat z ruční termální kamery od společnosti FLIR.

# POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

AGISOFT LLC. Metashape Python Reference: Release 1.8.2. In: *Agisoft Metashape* [online]. 2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: [https://www.agisoft.com/pdf/metashape\\_python\\_api\\_1\\_8\\_2.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape_python_api_1_8_2.pdf)

ALLEMAN, James a Michael HEITZMAN. Quantifying Pavement Albedo: Final Report. In: *NCAT Report 19-09* [online]. Montgomery: National Center for Asphalt Technology, 2019, s. 28 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: [https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2019/12/quantifying\\_pvmt\\_albedo\\_w\\_cvr.pdf](https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2019/12/quantifying_pvmt_albedo_w_cvr.pdf)

AZPÚRUA, Héctor. FLIR Image Extractor. In: *GitHub* [online]. 2018 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: [https://github.com/Nervengift/read\\_thermal.py](https://github.com/Nervengift/read_thermal.py)

BREWSTER, M. Quinn. *Thermal Radiative Transfer and Properties*. New York: Wiley, 1992. ISBN 978-0-471-53982-7.

BRIDA, Peter. *Hrubozrnné asfaltové směsi*. Brno, 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Stavební fakulta. Vedoucí práce: Doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

BURIAN, Jaroslav, Karel MACKŮ, Jarmila ZIMMERMANNOVÁ a Rostislav NĚTEK. Sustainable Spatial and Temporal Development of Land Prices: A Case Study of Czech Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information* [online]. 2020, **9**(6) [cit. 2022-04-18]. ISSN 2220-9964. DOI: 10.3390/ijgi9060396. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2220-9964/9/6/396>

CERDEIRA, Fernando, Manuel E. VÁZQUEZ, Joaquin COLLAZO a Enrique GRANADA. Applicability of infrared thermography to the study of the behaviour of stone panels as building envelopes. *Energy and Buildings* [online]. 2011, **43**(8), 1845–1851 [cit. 2022-04-17]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.03.029. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811001071>

ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. Počet obyvatel v obcích - k 1.1.2021. In: *Český statistický úřad: katalog produktů* [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/pocet-obyvatel-v-obcich-k-112021>

DIN, Mohd F. M. a kol. Investigation of thermal effect on exterior wall surface of building material at urban city area. *International Journal of Energy and Environment* [online]. 2012, **3**(4), 531–540 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/236856029>

DOBROVOLNÝ, Petr. The surface urban heat island in the city of Brno (Czech Republic) derived from land surface temperatures and selected reasons for its spatial variability. *Theoretical and Applied Climatology* [online]. 2013, **112**(1-2), 89–98 [cit. 2022-04-22]. DOI: 10.1007/s00704-012-0717-8. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00704-012-0717-8>

DOSOUDILOVÁ, Barbora. *Využití ruční termální kamery pro studium místního klimatu*. Olomouc, 2013. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce: Doc. RNDr. Miroslav Vysoudil, CSc.

DOSOUDILOVÁ, Barbora. *Vliv georeliéfu a aktivního povrchu na režim povrchové teploty na základě vyhodnocení termálních snímků*. Olomouc, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce: Doc. RNDr. Miroslav Vysoudil, CSc.

ESRI. How the zonal statistics tools work. In: *ArcGIS Pro Resources: Tool reference* [online]. 2022 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/how-zonal-statistics-works.htm>

FLIR SYSTEMS, INC. *User's manual FLIR Exx series* [online]. 2016 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: [https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/flir\\_e60\\_user\\_manual.pdf?ext=.pdf](https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/data-sheets/flir_e60_user_manual.pdf?ext=.pdf)

GADE, Rikke a Thomas B. MOESLUND. Thermal cameras and applications: a survey. *Machine Vision and Applications* [online]. 2014, **2014**(25), 245–262 [cit. 2022-04-21]. DOI: 10.1007/s00138-013-0570-5. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00138-013-0570-5>

GELETIČ, Jan a Michal LEHNERT. GIS-based delineation of local climate zones: The case of medium-sized Central European cities. *Moravian Geographical Reports* [online]. 2016, **24**(3), 2–12 [cit. 2022-04-23]. DOI: 10.1515/mgr-2016-0012. Dostupné z: <https://www.sciendo.com/article/10.1515/mgr-2016-0012>

GELETIČ, Jan, Michal LEHNERT, Stevan SAVIĆ a Dragan MILOŠEVIĆ. Inter-/intra-zonal seasonal variability of the surface urban heat island based on local climate zones in three central European cities. *Building and Environment* [online]. 2019, **156**, 21–32 [cit. 2022-04-22]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.04.011. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132319302434>

GREENBERG, Jonathan A. a Matteo MATTIUZZI. GdalUtils: Wrappers for the Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) Utilities. In: *CRAN* [online]. 2020 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://cran.r-project.org/web/packages/gdalUtils/index.html>

GUERRERO, Ignacio C., Silvia M. OCAÑA a Ignazio G. REQUENA. Thermal–physical aspects of materials used for the construction of rural buildings in Soria (Spain). *Construction and Building Materials* [online]. 2005, **19**(3), 197–211 [cit. 2022-04-17]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.05.016. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061804001230>

HABERMANN, Lubomír. *Pocitová mapa teplotního stresu v Olomouci*. Olomouc, 2021. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce: Mgr. Michal Lehnert, Ph.D.

HARRAP, Michael J. M. a Sean A. RANDS. Floral infrared emissivity estimates using simple tools. *Plant Methods* [online]. 2021, **17**(23) [cit. 2022-04-17]. DOI: 10.1186/s13007-021-00721-w. Dostupné z: <https://plantmethods.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13007-021-00721-w>

HARVEY, Phil. *ExifTool by Phil Harvey* [online]. 2022 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://exiftool.org/>

HUANG, Qibo, Zhendong QIAN, Jing HU a Dong ZHENG. Evaluation of Stone Mastic Asphalt Containing Ceramic Waste Aggregate for Cooling Asphalt Pavement. *Materials* [online]. 2020, **13**(13), 2964 [cit. 2022-04-17]. DOI: 10.3390/ma13132964. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/13/2964>

HU, Liqun a kol. Temperature Characteristics of Porous Portland Cement Concrete during the Hot Summer Session. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **2017** [cit. 2022-04-17]. DOI: 10.1155/2017/2058034. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/2058034/>

INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. ISPRS Statutes [online]. 2019 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.isprs.org/documents/statutes16.aspx>

KAPLAN, Herbert. *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment*. 3rd ed. SPIE Press, 2007. ISBN 9780819479020.

KOTTOVÁ, Anna. Vyasfaltovaná ulice, nebo kostky pod stromy?. In: *IROZHlas* [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: [https://www.irozhlas.cz/zpravy-domov/sucho-2019-v-cr-teplota-v-praze-pocasi-praha-klima-klimaticka-zmena-v-cr\\_1907260700\\_ako](https://www.irozhlas.cz/zpravy-domov/sucho-2019-v-cr-teplota-v-praze-pocasi-praha-klima-klimaticka-zmena-v-cr_1907260700_ako)

LABED, Jeeifa a Marc P. STOLL. Spatial variability of land surface emissivity in the thermal infrared band: Spectral signature and effective surface temperature. *Remote Sensing of Environment*. 1991, **38**(1), 1–17. ISSN 0034-4257. DOI: 10.1016/0034-4257(91)90068-H.

LANGSDALE, Mary a kol. Inter-Comparison of Field- and Laboratory-Derived Surface Emissivities of Natural and Manmade Materials in Support of Land Surface Temperature (LST) Remote Sensing. *Remote Sensing* [online]. 2021, **12**(24), 4127 [cit. 2022-04-17]. DOI: 10.3390/rs12244127. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/24/4127/htm>

LEHNERT, Michal a Jan GELETIČ. Místní klimatické zóny a jejich význam ve městech České republiky. *Urbanismus a územní rozvoj* [online]. 2017, **20**(2), 9–16 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/317267211>

LEHNERT, Michal, Jan GELETIČ, Petr DOBROVOLNÝ a Martin JUREK. Temperature differences among local climate zones established by mobile measurements in two central European cities. *Climate Research* [online]. 2018, **75**(1), 53–64 [cit. 2022-04-23]. DOI: 10.3354/cr01508. Dostupné z: <http://www.int-res.com/abstracts/cr/v75/n1/p53-64/>

LEHNERT, Michal, Vladimír TOKAR, Martin JUREK a Jan GELETIČ. Summer thermal comfort in Czech cities: measured effects of blue and green features in city centres. *International Journal of Biometeorology* [online]. 2021, **65**(8), 1277–1289 [cit. 2022-04-22]. ISSN 0020-7128. DOI: 10.1007/s00484-020-02010-y. Dostupné z: <https://link.springer.com/10.1007/s00484-020-02010-y>

LILLESAND, Thomas M., Ralph W. KIEFER a Jonathan W. CHIPMAN. *Remote sensing and image interpretation*. 7th ed. New York: Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-34328-9.

LI, Yeou-Fong, Po-An YANG, Chia-Ho WU, Ta-Wui CHENG a Chih-Hong HUANG. A Study on Radiation Cooling Effect on Asphalt Concrete Pavement Using Basic Oxygen Furnace Slag to Replace Partial Aggregates. *Sustainability* [online]. 2021, **13**(7), 3708 [cit. 2022-04-17]. DOI: 10.3390/su13073708. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/7/3708>

MARCHETTI, Mario, Laurent IBOS, Abderrahim BOUDENNE, Stefan DATCU, Yves CANDAU, Jean DUMOULIN a Jean LIVET. Analysis of the radiative behavior of road materials: Principles and measurements of infrared emissivity. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*



[online]. 2008, **272**, 45–55 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00362947/fr/>

MATRICARDI, David. *The role of paved surfaces in the Urban Heat Island phenomenon: Assessment of fundamental thermal parameters and Finite Element Analysis for UHI mitigation*. Boloña, 2014. Diplomová práce. Università di Bologna. Vedoucí práce: Dott. Ing. Cesare Sangiorgi.

MICHALSKI, Ludwig, Jacek KUCHARSKI, Joseph MCGHEE a Krystyna ECKERSDORF. *Temperature measurement*. 2nd ed. Chichester: J. Wiley, 2001. ISBN 0-471-86779-9.

MINKINA, Waldemar a Sebastian DUDZIK. *Infrared thermography: errors and uncertainties*. Chichester: Wiley, 2009. ISBN 978-047-0747-186.

MIROSLAV, Vysoudil. Urban space and climate: Introduction to the Special Issue. *Moravian Geographical Reports* [online]. 2015, **23**(3), 2–7 [cit. 2022-04-22]. DOI: 10.1515/mgr-2015-0012. Dostupné z: [https://www.geonika.cz/EN/research/ENMGRCIanky/2015\\_3\\_VYSOUDIL.pdf](https://www.geonika.cz/EN/research/ENMGRCIanky/2015_3_VYSOUDIL.pdf)

MORETTI, Laura a kol. Effect of Sampietrini Pavers on Urban Heat Islands. *Environmental Research and Public Health* [online]. 2021, **18**(24), 13108 [cit. 2022-04-17]. DOI: 10.3390/ijerph182413108. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8701738/>

NOLAN, Rory a Sergi PADILLA-PARRA. Ijtiff: An R package providing TIFF I/O for ImageJ users. *Journal of Open Source Software* [online]. 2018, **3**(23), 633 [cit. 2022-04-17]. DOI: 10.21105/joss.00633. Dostupné z: <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.00633>

NOVÁKOVÁ, Tereza. *Termální snímkování bezpilotním letadlem v hydrologii*. Olomouc, 2019. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce: Mgr. Tomáš Pour, Ph.D.

NOVÁKOVÁ, Tereza. Raw2temperature-R. In: *GitHub* [online]. 2022 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://github.com/terezano/raw2temperature-R>

NOVOTNÝ, Martin. Odpověď primátora Martina Novotného na otevřený dopis architektů z ateliéru HŠH. In: *Statutární město Olomouc* [online]. Olomouc, 2008 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.olomouc.eu/aktualni-informace/aktuality/7631>

OSN. *World urbanization prospects: the 2018 revision*. New York, 2018. ISBN 978-92-1-148319-2.

PALATKA, Stanislav. *Vliv aktivního povrchu a jeho orientace na režim povrchové teploty na základě vyhodnocení termálních snímků*. Olomouc, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce: Doc. RNDr. Miroslav Vysoudil, CSc.

PALATKA, Stanislav. *Pozemní termální monitoring při studiu městského klimatu*. Olomouc, 2013. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce: Doc. RNDr. Miroslav Vysoudil, CSc.

PÁNEK, Jiří, Vít PÁSZTO a Lukáš MAREK. Mapping Emotions: Spatial Distribution of Safety Perception in the City of Olomouc. *The Rise of Big Spatial Data*. Cham: Springer, 2017, 2017-10-

15, s. 211-224. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. ISBN 978-3-319-45122-0. DOI: 10.1007/978-3-319-45123-7\_16.

PARISON, Sophie, Martin HENDEL, Arnaud GRADOS a Laurent ROYON. Analysis of the heat budget of standard, cool and watered pavements under lab heat-wave conditions. *Energy and Buildings* [online]. 2020, **228** [cit. 2022-04-17]. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110455. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778820308331>

PAUGAM, Ronan, Martin J. WOOSTER a Gareth ROBERTS. Use of Handheld Thermal Imager Data for Airborne Mapping of Fire Radiative Power and Energy and Flame Front Rate of Spread. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* [online]. 2013, **51**(6), 3385-3399 [cit. 2022-04-22]. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2220368. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6377291/>

POUR, Tomáš. *Airborne thermal remote sensing in urban climate research*. Olomouc, 2019. Disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce: Prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.

PTÁČEK, Pavel, Zdeněk SZCZYRBA a Miloš FŇUKAL. Proměny prostorové struktury města Olomouce s důrazem na rezidenční funkce. *Urbanismus a územní rozvoj* [online]. 2007, **X**(2), 19–26 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: [https://www.uur.cz/images/5-publikacni-cinnost-a-knihovna/casopis/2007/2007-02/03\\_promeny.pdf](https://www.uur.cz/images/5-publikacni-cinnost-a-knihovna/casopis/2007/2007-02/03_promeny.pdf)

PURKET, Tomáš. *Tvorba termální letecké mozaiky Olomouce*. Olomouc, 2017. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce: RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.

RAŠKA, Daniel. *Tepelný ostrov malých sídel: okolí Olomouce*. Olomouc, 2021. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce: Mgr. Michal Lehnert, Ph.D.

REN, Jiayi, Jun YANG, Yuqing ZHANG, Xiangming XIAO, Jianhong Cecilia XIA, Xueming LI a Shaohua WANG. Exploring thermal comfort of urban buildings based on local climate zones. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2022, **340** [cit. 2022-04-22]. ISSN 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130744. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652622003833>

RESLER, Jaroslav, Kryštof EBEN, Jan GELETIČ, et al. Validation of the PALM model system 6.0 in a real urban environment: a case study in Dejvice, Prague, the Czech Republic. *Geoscientific Model Development* [online]. 2021, **14**(8), 4797–4842 [cit. 2022-04-23]. 10.5194/gmd-14-4797-2021. Dostupné z: <https://gmd.copernicus.org/articles/14/4797/2021/>

SCHUBERT, Alfréd a kol. *Péče o památkově významné venkovní komunikace*. Praha: Národní památkový ústav, ústřední pracoviště, 2007. Odborné a metodické publikace (Národní památkový ústav). ISBN 978-80-87104-10-1.

SMOLA, Josef. 17. Konference o územním plánování a stavebním řádu. *Urbanismus a územní rozvoj* [online]. 2009, **XII**(6) [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: [https://www.uur.cz/images/publikace/uur/2009/2009-06/10\\_konference.pdf](https://www.uur.cz/images/publikace/uur/2009/2009-06/10_konference.pdf)

STRUHA, Pavel. GIS jako účinný nástroj při řešení některých aspektů klimatické změny. In: *GIS v plánování měst a regionů 2018* [online]. 2018, s. 1–37 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.cagi.cz/upload/documents/konference/gisplan2018/01-gisplan2018-struha.pdf>

ŠÉPKA, Jan. Úpravy veřejných ploch Horního náměstí, Olomouc. In: *Šépka architekti* [online]. Praha, 2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.sepka-architekti.cz/index.php?lang=cs&page=project&name=upravy-verejnych-ploch-horniho-namesti-olomouc>

TACONET, Julien. *Multi-temporal and multispectral modeling of wheat crop parameters: estimating within-field variability using UAV imagery*. Liège, 2020. Diplomová práce. Université de Liège, Faculté Gembloux Agro-Bio Tech. Vedoucí práce: Yves Brostaux.

TATTERSALL, Glenn J. Thermimage: Thermal Image Analysis. In: *CRAN* [online]. 2017a [cit. 2022-04-16]. DOI: 10.5281/zenodo.1069704. Dostupné z: <https://cran.r-project.org/package=Thermimage>

TATTERSALL, Glenn J. ThermimageCalibration. In: *GitHub* [online]. 2017b [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://github.com/gtatters/ThermimageCalibration>

VINKLÁŘ, Petr. Jak zeleň ve městě pomáhá chladit. In: *Hradec Králové: oficiální web* [online]. 2015 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: <https://www.hrdeckralove.org/jak-zelen-ve-meste-pomaha-chladit/d-45527>

VOHLAND, Michael a András JUNG. *Hyperspectral Imaging for Fine to Medium Scale Applications in Environmental Sciences*. MDPI, 2021. ISBN 978-3-0365-0879-5.

VOOGT, James A. a Timothy R. OKE. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2003, **86**(3), 370–384 [cit. 2022-04-22]. ISSN 00344257. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425703000798>

VYSOUDIL, Miroslav. *Základy fyzické geografie 1: Meteorologie a klimatologie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 978-80-244-3892-4.

VYSOUDIL, Miroslav a Darko OGRIN. Portable infrared camera as a tool in topoclimatic research. *Dela* [online]. 2009, **2009**(31), 115–127 [cit. 2022-04-22]. DOI: 10.4312/dela.31.7.115-127. Dostupné z: <https://revije.ff.uni-lj.si/Dela/article/view/dela.31.7.115-127>

WORLD FROM SPACE. *Satelitní monitoring Plzeň 2018* [online]. 2018. Dostupné z: <https://www.lifetreecheck.eu/getattachment/5afce402-cff1-4794-91f4-1bbc375857c0/Satelitni-monitoring-tepelneho-ostrova-Plzne>

ZEMEK, František. *Letecký dálkový průzkum Země: teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů*. Brno: Centrum výzkumu globální změny AV ČR, 2014. ISBN 978-80-87902-07-3.

## **PŘÍLOHY**

# SEZNAM PŘÍLOH

## Elektronické přílohy

- Příloha 1 Programový kód pro srovnání odchylek teplot náhodného výběru snímků
- Příloha 2 Grafy srovnání odchylek teplot
- Příloha 3 Programový kód pro zpracování termálních snímků z kamery FLIR E60
- Příloha 4 Programový kód pro zpracování mozaik
- Příloha 5 Termální mozaiky
- Příloha 6 Grafy teplotních charakteristik

## Volné přílohy

- Příloha 7 Poster
- Příloha 8 DVD

## Popis struktury DVD

Adresáře:

Prilohy

- 1\_kod\_srovnani\_odchylek
- 2\_grafy\_srovnani\_odchylek
- 3\_kod\_zpracovani\_teplot
- 4\_kod\_zpracovani\_mozaik
- 5\_mozaiky
- 6\_grafy
- 7\_poster

Text\_Prace

Vstupni\_Data

Web