

**Univerzita Palackého v Olomouci**

**Přírodovědecká fakulta**

**Katedra geoinformatiky**

**SROVNÁNÍ VYBRANÝCH TERMÁLNÍCH  
CHARAKTERISTIK KRAJINY ZA POMOCÍ  
TECHNIK DPZ**

**Bakalářská práce**

**Marek STUHLÝ**

**Vedoucí práce Mgr. Tereza Pohanková**

**Olomouc 2024**

**Geoinformatika a kartografie**

## **ANOTACE**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na srovnání vybraných termálních charakteristik krajiny za pomoci technik dálkového průzkumu Země. Konkrétně zkoumá albedo, povrchovou teplotu a teplotní proudění půdy s cílem zjistit a ověřit nejvhodnější metodu pro měření jednotlivých charakteristik. Nejvhodnější metoda musí být co nejpřesnější a mít nejmenší odchylky ve výsledných hodnotách pro jednotlivé povrchy.

Práce se soustředí na srovnání přístupů k odvození jednotlivých termálních charakteristik. K automatizaci výpočtů slouží specializovaný programový kód, který zpracovává data ze satelitních snímků a vytváří výstupy ve formě rastrových souborů s příponou (.TIF).

V teoretické části jsou popsány fyzikální základy, potřebné k práci s termálními daty a popsány základní principy termálních charakteristik. V praktické části se již řeší způsob zpracování termálních dat a satelitních snímků. Je vytvořen programový kód, sloužící k automatizaci výpočtů jednotlivých charakteristik.

Výsledky této práce mohou být využitelné při rozhodování, jakou metodu vybrat při zpracování určité termální charakteristiky.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

dálkový průzkum země ; termální charakteristiky ; albedo ; teplotní proudění ; povrchová teplota

Počet stran práce: 45

Počet příloh: 4



## **ANOTATION**

This bachelor thesis focuses on the comparison of selected thermal landscape characteristics using remote sensing techniques. Specifically, it examines albedo, surface temperature and soil heat flux in order to identify and validate the most appropriate method for measuring each characteristic. The most suitable method must be as accurate as possible and have the least variation in the resulting values for each surface.

The work focuses on the comparison of approaches to the derivation of individual thermal characteristics. To automate the calculations, a specialized program code is used to process the satellite image data and produce outputs in the form as raster files (.TIF).

The theoretical part describes the physical basics needed to work with thermal data and describes the basic principles of thermal characteristics. The practical part deals with the processing of thermal data and satellite images. A program code is developed to automate the calculation of the individual characteristics.

The results of this work can be used to decide which method to choose when processing a particular thermal characteristic.

## **KEYWORDS**

Remote sensing ; thermal characteristic; albedo ; ground heat flux ; land surface temperature

Number of pages: 45

Number of appendixes: 4

**Prohlašuji, že**

- bakalářskou/diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval(a) samostatně a uvedl(a) jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědom(a), že na moji bakalářskou/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, bakalářskou/diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

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

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

- použít výsledky a výstupy mé bakalářské/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).

Marek Stuchlý

Rád bych poděkoval své vedoucí práce **Mgr. Tereze Pohankové** za její odborné vedení, trpělivost a cenné rady během celé fáze zpracování bakalářské práce. Její konstruktivní připomínky a podněty mi pomohly výrazně zlepšit kvalitu práce a dovedly mě až k úspěšnému dokončení.

Dále bych chtěl poděkovat celé mé **rodině**, za jejich nepřetržitou psychickou podporu, pochopení a povzbuzení během mého studia, zejména při psaní této práce.

# UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta  
Akademický rok: 2022/2023

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Marek STUHLÝ**  
Osobní číslo: **R21453**  
Studijní program: **B0532A330011 Geoinformatika a kartografie**  
Téma práce: **Srovnání vybraných termálních charakteristik krajiny za pomoci technik DPZ**  
Zadávající katedra: **Katedra geoinformatiky**

### Zásady pro vypracování

Cílem práce je porovnat vybrané přístupy k odvození termálních charakteristik za pomoci technik dálkového průzkumu země nad územím města Olomouce.

Hlavním výstupem bakalářské práce bude podrobný záznam o postupu výpočtu charakteristik ve formě programového kódu nebo modelu a následná interpretace analyzovaných satelitních snímků za pomoci základních statistických ukazatelů, případně vybraných prostorových analýz. Výsledky budou alespoň částečně vizualizovány. Součástí práce bude také terénní měření vybraných charakteristik (povrchová teplota, odrazivost povrchu aj.). Pro splnění bakalářské práce budou využívány výhradně programy, data a postupy, které patří do rodiny svobodných a otevřených technologií (př. QGIS, GRASS GIS, Python).

Text práce student zpracuje v souladu se závaznou šablonou pro kvalifikační práce KGI. O bakalářské práci student vytvoří webovou stránku a poster. Celou práci (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, poster a web) odevzdá student v digitální podobě na datové úložiště katedry. Do evidence STAG student odevzdá úplný text práce s přílohami, které určí vedoucí práce. Fyzicky student odevzdá výtisk posteru ve formátu A2 a přílohy určené vedoucím práce.

Rozsah pracovní zprávy: **max. 50 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

### Seznam doporučené literatury:

VŮŽENÍLEK, V.: Diplomové práce z geoinformatiky. Olomouc, Univerzita Palackého v Olomouci, 2002. 31 s. LIANG, S., Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms, Remote Sensing of Environment, Volume 76, Issue 2001, Pages 213-238, ISSN 0034-4257, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/0034-4257(00)00205-4) PROST, G.L. (2013). Remote Sensing for Geoscientists: Image Analysis and Integration, Third Edition (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b15638> ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. (1998) Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome.

Vedoucí bakalářské práce: **Mgr. Tereza Pohanková**  
Katedra geoinformatiky

**Zadání 2. strana**

Datum zadání bakalářské práce: 5. května 2023  
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. května 2024

LS.

---

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



---

prof. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Olomouci dne 1. září 2023

# OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1 CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>11</b>
<b>2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>12</b>
2.1 Fyzikální podstata objektů .....	12
2.2 Termální charakteristiky .....	14
2.3 Termální data .....	17
2.4 Satelitní snímky .....	18
2.4.1 Satelitní mise Landsat 8 a Landsat 9 .....	18
2.4.2 Další satelitní mise .....	20
<b>3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ .....</b>	<b>22</b>
3.1 Použité metody .....	22
3.1.1 Metody pro výpočet albeda .....	22
3.1.2 Metoda pro výpočet teploty půdy .....	22
3.1.3 Metody pro výpočet tepelného proudění .....	23
3.2 Použitá data .....	23
<b>4 SBĚR TERÉNNÍCH DAT .....</b>	<b>26</b>
4.1 Sběr dat .....	26
<b>5 POSTUP ŘEŠENÍ .....</b>	<b>29</b>
5.1 Spuštění skriptu .....	29
5.2 Výpočty na vrchní části atmosféry .....	31
5.3 Výpočty Albeda .....	31
5.4 Ostatní výpočty .....	32
5.5 Automatizace .....	34
<b>6 VÝSLEDKY .....</b>	<b>36</b>
6.1 Výsledky výpočetních metod .....	36
6.1.1 Povrchová teplota – Land Surface Temperature (LST) .....	36
6.1.2 Albedo .....	39
6.1.3 Půdní teplotní proudění – Ground Heat Flux (GHF) .....	43
6.2 Validace výsledků .....	50
<b>7 DISKUZE .....</b>	<b>53</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>54</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE</b>	
<b>PŘÍLOHY</b>	

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
BT	Brightness Temperature
DPZ	Dálkový průzkum země
EM	Elektromagnetické
ESA	European Space Agency
GeoJSON	Geographical JavaScript Object Notation
GeoTIFF	GeoTagged Image Format
GeoPandas	GeoPython Data and Analysis
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GHF	Ground Heat Flux
GIS	geografický informační systém
GIT	geoinformační technologie
JPEG	Joint Picture Experts Group
JSON	JavaScript Object Notation
KGI	Katedra geoinformatiky PřF UP
L8	Landsat 8
L9	Landsat 9
LSE	Land Surface Emissivity
LST	Land Surface Temperature
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared
NumPy	Numerical Python
OLI	Operational Land Manager
Pandas	Python Data Analysis Library
Rn	Net Radiation – čisté záření
RGB	Red Green Blue
SWIR	Shortwave Infrared
TIF	Tagged Image Format
TIMS	Thermal Infrared Multispectral Scanner
TIR	Thermal InfraRed
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TOA	Top of Atmosphere
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UP	Univerzita Palackého v Olomouci
USGS	The United States Geological Survey
VC	Vegetation cover

## ÚVOD

Studium termálních charakteristik krajiny hraje klíčovou roli v pochopení složité problematiky energetické bilance zemského povrchu. S nástupem technologií dálkového průzkumu Země se stalo možné pozorovat, analyzovat a porovnávat tyto charakteristiky na rozsáhlých územích s dříve nedosažitelnou přesností. Dálkový průzkum nabízí neinvazivní prostředky ke studiu těchto proměnných v různých prostorových a časových měřítkách. S využitím dat ze satelitů vybavených senzory určenými pro monitorování životního prostředí poskytuje tato práce hloubkové srovnání termálních charakteristik v různých krajinách.

Metodický postup této práce spočívá ve shromažďování satelitních snímků se středním rozlišením a pozemních dat z vybraných studijních lokalit. Tyto lokality byly vybrány na základě jejich rozmanitých geografických charakteristik, aby byla zajištěna komplexní analýza různých typů krajiny a povrchů. Shromážděná data byla podrobena zpracování, aby bylo možné kvantifikovat tepelné vlastnosti každého povrchu, a tím usnadnit srovnávací analýzu v různých regionech.

Tato práce je strukturována tak, aby nejprve představila teoretické základy a význam potřeby studia termálních charakteristik krajiny. Následují kapitoly o použitých metodách, samotné řešení této práce a v neposlední řadě výsledky a závěr. Následující kapitoly představují výsledky, srovnávací a validační analýzy, diskutují zjištění a zkoumají praktické důsledky pro environmentální politiku a řízení.

Tato práce pomáhá k hlubšímu pochopení krajinných procesů a zvyšuje naši schopnost řídit a přizpůsobovat se měnícím se podmínkám životního prostředí.

Zjištění získané z této práce mají sloužit jako informace pro výzkumné pracovníky a odborníky z praxe, kteří se zabývají monitorováním a řízením životního prostředí.



# 1 CÍLE PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je porovnat vybrané přístupy k odvození termálních charakteristik za pomoci technik dálkového průzkumu země nad územím města Olomouce. Konkrétně se bude jednat o následující termální charakteristiky: *albedo*, *povrchová teplota* a *půdní teplotní proudění*. Tyto charakteristiky jsou důležité, protože ovlivňují klimatické podmínky, které jsou ovlivněny velikostí vegetačního krytu, typu povrchu a lidskou činností. Hlavním cílem je objasnit, jak se liší výsledky jednotlivých charakteristik povrchu při použití různých metod výpočtu.

Hlavním výstupem bakalářské práce bude podrobný záznam o postupu výpočtu charakteristik ve formě programového kódu nebo modelu a následná interpretace analyzovaných satelitních snímků za pomoci základních statistických ukazatelů, případně vybraných prostorových analýz. Výsledky budou alespoň částečně vizualizovány formou tabulek a grafů. Součástí práce bude také terénní měření vybraných charakteristik (povrchová teplota, odrazivost povrchu). Pro splnění bakalářské práce budou využívány výhradně programy, data a postupy, které patří do rodiny svobodných a otevřených technologií (př. QGIS, GRASS GIS, Python).

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V této kapitole budou popsány fyzikální základy, potřebné k práci s termálními daty. Dále také více popsané základní principy termálních charakteristik, jejichž veličiny a jednotky, které se budou využívat, jsou popsány níže v *Tabulka 1*

*Tabulka 1 - veličiny a jejich jednotky (zdroj: vlastní tvorba)*

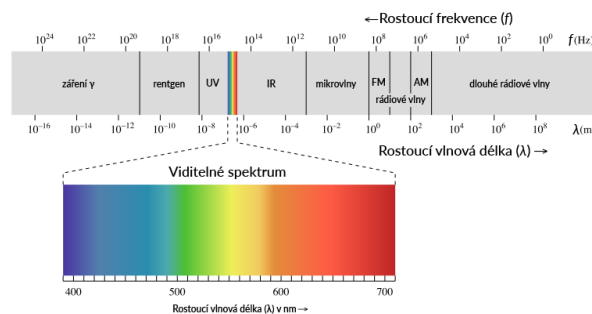
Název veličiny - EN	Název veličiny - CZ	Zkratka	Jednotky
Net Radiation	Přímé záření	Rn	W/m <sup>2</sup>
Ground Heat Flux	Pozemní teplotní proudění	G	W/m <sup>2</sup>
Sensible Heat Flux	Citelné teplotní proudění	H	W/m <sup>2</sup>
Latent Heat Flux	Latentní teplotní proudění	LE	W/m <sup>2</sup>
Air density	Hustota vzduchu	p	kg/m <sup>3</sup>
Specific heat capacity of air at constant pressure	Měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku	c <sub>p</sub>	J/kg×K
Aerodynamic resistance to heat transfer	Aerodynamický odpor při přenosu tepla	r <sub>a</sub>	s/m
Surface temperature	Povrchová teplota	T <sub>s</sub>	°C
Air temperature	Teplota vzduchu	T <sub>z</sub>	°C

### 2.1 Fyzikální podstata objektů

Infračervená termografie je vědní obor, který slouží k barevné vizualizaci teplotních obrazů. V 80. letech minulého století vyvinula NASA první termální infračervený multispektrální skener (TIMS - Thermal Infrared Multispectral Scanner) (Don Palluconi 1985). Jako první družicový nosič, který byl osazen termálním senzorem, byl Landsat 3 v roce 1978. (Zemek 2014)

Hlavním zdrojem elektromagnetického (EM) záření je Slunce, ale zároveň každé těleso, jehož teplota je vyšší než absolutní nula, vyzařuje nějaké množství EM záření. (Reichl a Všetická 2006)

Viditelná část EM spektra, kterou člověk vnímá nejvíce, je pouze malá část z celého toho spektra, její vlnová délka je 400–700 nm viz Obrázek 1. Vlastnosti těchto vlnových délek jsou takové, že při dopadu na fotoreceptory oka (čípky a tyčinky) dokáží vytvářet zrakový vjem a barevný obraz. (Beneš et al. 2015) V dálkovém průzkumu země (DPZ) jsou krom viditelné části spektra důležité také blízké infračervené až mikrovlnné délky záření. Pouze zřídka se v DPZ využívají délky ultrafialového (UV) záření, protože v těchto délkách už je záření hodně ovlivněno atmosférou. (Zemek 2014) Obrázek 1 níže uvádí rozdělení a pojmenování jednotlivých částí EM spektra. Viditelná část je v rozmezí 400–700 nm, následuje blízká infračervená (NIR – Near InfraRed) v rozmezí 700–1 300 nm, střední infračervená (MIR – Mid InfraRed) v délkách 1 300–3 000 nm a jako poslední je vzdálená infračervená část spektra 3 000–1 000 000 nm.



Obrázek 1 - elektromagnetické záření. (Reichl a Všeticka 2006)

## Zákony vyzáření černého tělesa

### Wiennův zákon posuvu

Při nižších teplotách je nejvyšší intenzita vyzařování na dlouhovlnných částech spektra (např. mikrovlnná část), při zvyšování teploty se vlnová délka  $\lambda_{max}$  mění na krátkovlnnou část spektra. Tento jev je důležitý pro DPZ, jelikož zaznamenání dlouhovlnných délek (např. mikrovlnné) je obtížnější než těch krátkovlnných (např. TIR). (Lillesand et al. 2015)

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

Rovnice 1 - Wiennův zákon posuvu

kde  $\lambda_{max}$  je vlnová délka maxima spektrální hustoty vyzařování ( $W \times m^{-2}$ ),  $b$  je tzv. Wienova konstanta (neboli 2,898 mm K) a  $T$  je teplota tělesa ( $^{\circ}C$ ).

### Stefan-Boltzmannův zákon

Popisuje vyzařování energie černého tělesa, které má vyšší teplotu než absolutní nula a jeho intenzita vyzařování je přímo úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty černého tělesa.

$$M = \sigma T^4$$

Rovnice 2 - Stefan-Boltzmannův zákon

kde  $M$  je celková intenzita záření objektu ( $W \times m^{-2}$ ),  $\sigma$  je Stefan-Boltzmanova konstanta,  $T$  je kinetická teplota vyzařujícího objektu (K).

### Planckův radiační zákon

Planckův zákon popisuje, že černé těleso může energii přijímat pouze po kvantech a nikoli v libovolném množství. Každé kvantum je přímo úměrné frekvenci záření. (Planck a Masius 1914)

$$Q = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Rovnice 3 - Planckův zákon

kde  $Q$  je energie jednoho kvanta,  $f$  je jeho frekvence (Hz),  $h$  je Planckova konstanta,  $c$  je rychlost světla ve vakuu ( $m \times s^{-1}$ ) a  $\lambda$  je vlnová délka ( $\mu m$ ).

## 2.2 Termální charakteristiky

Termální charakteristiky se vztahují k vlastnostem a atributům souvisejícím s chováním materiálu nebo systému v závislosti na změnách teploty. Tyto charakteristiky jsou důležité v různých oblastech vědy, techniky, fyziky apod., protože pomáhají popsat, jak materiály a systémy interagují s tepelnou energií a jak na ni reagují. (Connor 2020) Příkladem využití termálních charakteristik v praxi může být například predikce míst, kde je vyšší šance na vzplanutí ohně nebo k monitorování vysoce rizikového zařízení, jako jsou jističe, elektroměry a vysokonapěťové zařízení. (Ullah et al. 2020)

### Albedo

Albedo zemského povrchu, definované jako poměr odraženého ku dopadajícímu elektromagnetickému záření, (Kotak et al. 2015) je základní klimatickou proměnnou, která je nutná k přesnému modelování globálního energetického bilance zemského povrchu.

Albedo je obzvláště důležitým faktorem pro radiační oteplování a ochlazování povrchu v severních zeměpisných šířkách, což z velké části souvisí s přítomností nebo nepřítomností sezónní sněhové pokrývky. (Erb et al. 2022) V některých oblastech Arktidy dochází k dvojnásobnému až trojnásobku celosvětového průměru, což vede k rozsáhlým měřitelným posunům ve vegetaci a sněhové pokrývce. (Traversa et al. 2021)

Albedo lze odvozovat ze satelitních snímků, za pomoci pyranometru nebo albedometru. (Arctic Climate Connection 2023; Hukseflux 2023) Pomocí těchto technik lze zjistit odraz krátkovlnného slunečního záření ve formě wattů na metr čtvereční ( $W/m^2$ ). Hodnota albedo je zlomek mezi 0 a 1. Hodnota albedo 0 znamená, že povrch odráží 0 % dopadajícího slunečního záření, zatímco hodnota albedo 1 znamená, že povrch odráží 100 % dopadajícího slunečního záření. (Farahat et al. 2023) Příklady povrchů a hodnoty jejich albeda lze vyčíst z *Tabulka 2*

*Tabulka 2 - příklady povrchů a jejich albedo [bezrozměrné]*

POVRCH	ALBEDO
Střecha z tašek	0,1–0,15
Barevný nátěr	0,15–0,35
Stromy	0,15–0,18
Asfalt	0,05–0,2
Beton	0,25–0,7
Tráva	0,25–0,3

Zdroj: upraveno podle Kotak et al. 2015

### Metody výpočtu albeda

K vypočítání albeda byly použity následující metody. Více informací a popis samotných metod se nachází v kapitole 3.1.

Metoda podle Lianga: Tato metoda využívá úzkopásmová pozorování k výpočtu albeda v určitých vlnových délkách. Vypočítává celkovou vzestupnou i sestupnou intenzitu záření. (Liang et al. 1999)

Tasumi Method: Tato metoda využívá atmosférické korekční funkce upravené tak, aby obsahovaly pouze obecné informace o vlhkosti. (Tasumi et al. 2008)

### **Půdní teplotní proudění (Ground Heat Flux)**

Půdní teplotní proudění představuje tok tepla mezi dvěma médii nebo plochami s různými teplotami a tvoří významnou část energetické bilance povrchu. Ground Heat Flux je důležitý v studiu klimatu, energetiky, geofyziky, protože ovlivňuje teplotní změny a tepelné interakce mezi různými systémy a prostředím. (Liu 2022) Povrchy během dne dosáhnou své maximální tepelné kapacity a dále již teplo nepřijímají. Z toho důvodu se často během dlouhodobých studií zkoumání  $G$  vynechává. Rovnice výpočtu půdního teplotního proudění je:

$$G = R_n - LE - H - V$$

Rovnice 4 - výpočet půdního teplotního proudění

kde  $R_n$  je čisté záření ( $W \times m^{-2}$ ),  $G$  je pozemní teplotní proudění od koruny stromu až do země ( $W \times m^{-2}$ ), se rovná  $H$  (citelné tepelné proudění) ( $W \times m^{-2}$ ) a  $LE$  je latentní teplotní proudění ( $W \times m^{-2}$ ) a  $V$  (množství energie, která vzniká při fotosyntéze v rostlinách) ( $W \times m^{-2}$ ). (Ruairuen et al. 2015)

### **Citelné teplotní proudění (Sensible Heat Flux)**

Citelné teplotní proudění je teplo vyměňované tělesem nebo termodynamickou soustavou. Výměna tepla mění teplotu tělesa nebo soustavy těles a některé jejich makroskopické veličiny (fyzikální podstata, které jsou pozorovatelné pouhým okem). Zároveň, ale ponechává jiné veličiny beze změny jako například objem nebo tlak. (Maruyama a Segawa 2016) Rovnice výpočtu citelného teplotního proudění je:

$$H = \rho \times c_p \times r_a^{-1} \times (T_s - T_z)$$

Rovnice 5 - výpočet citelného teplotního proudění

kde  $\rho$  je hustota vzduchu ( $kg/m^3$ ),  $c_p$  je měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku ( $J/kg \times K$ ),  $r_a$  je aerodynamický odpor při přenosu tepla ( $s/m$ ),  $T_s$  je povrchová teplota ( $^{\circ}C$ ) a  $T_z$  je teplota vzduchu ( $^{\circ}C$ ).

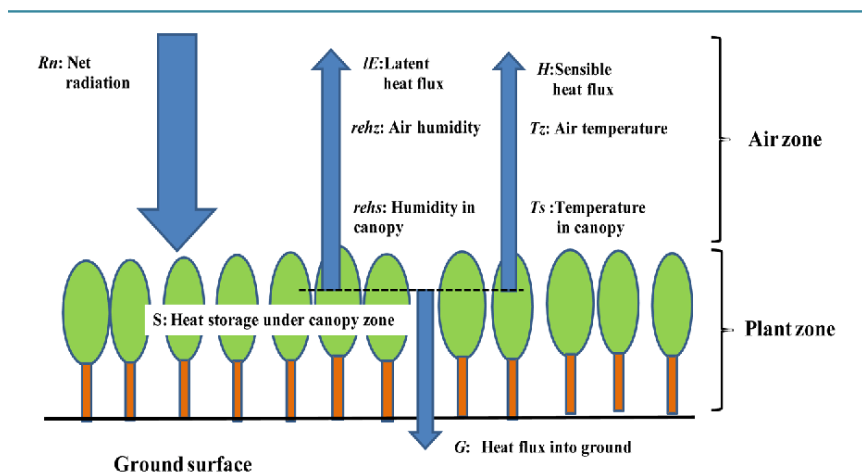
### **Latentní teplotní proudění (Latent Heat Flux)**

Latentní tepelné proudění je tok tepla ze zemského povrchu směrem vzhůru do atmosféry. Toto proudění je spojeno s vypařováním vody ze zemského povrchu a rostlin a následnou kondenzací vodní páry v troposféře. Tento druh teplotního proudění se například měří technikou Bowenova poměru nebo pomocí vířivé kovariance. (ESCWA 2015)

Bowenův poměr se používá k popisu přenosu tepla mezi vlhkými povrchy. Přenos latentního tepla může být popsán i jako energie vyžadovaná během změny skupenství, bez změny teploty. Bowenův poměr se obecně používá k výpočtu ztraceného nebo získaného tepla v látce, je to poměr energetického toku z jednoho stavu do druhého za pomoci citelného a latentního tepla. (Bowen 1926)

### **Bilance teplotního proudění**

Obrázek 2 vyobrazuje energetický model, znázorňuje chování dopadající energie ( $R_n$ : *Net radiation*) na zemi a zároveň zohledňuje výskyt korun stromů. Čisté záření se pohybuje od svého zdroje (nejčastěji Slunce) přes koruny stromů až na povrch půdy. (Maruyama a Segawa 2016)



Obrázek 2 - Ilustrace půdního a citelného teplotního proudění

kde  $T_z$  je teplota vzduchu nad korunami stromů ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_s$  je teplota povrchu koruny včetně rostlinné zóny (*Plant zone*) ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $rehz$  je relativní vlhkost vzduchu nad korunami stromů (%),  $rehs$  je relativní vlhkost povrchu koruny včetně zóny rostlin (%).

Tento model splňuje následující známý vztah tepelné bilance viz Rovnice 6. S tímto vztahem úzce souvisí věta o zachování energie (energií nelze vytvořit ani zničit - pouze přeměnit z jedné formy energie na jinou. To znamená, že pokud se energie nepřidá od dalšího zdroje má vždy stejné množství jako na začátku) (University Of Calgary 2023). Tato věta popisuje základní fungování energie v přírodě, která musí být zajištěna mezi jakýmkoli tělesy, kdekoli a kdykoli na zemi.

### Vzorec bilance teplotního proudění

$$Rn = G + H + LE$$

Rovnice 6 - bilance teplotního proudění

kde  $Rn$  je čisté záření ( $\text{W}\times\text{m}^{-2}$ ),  $G$  je pozemní teplotní proudění od koruny stromu až do země ( $\text{W}\times\text{m}^{-2}$ ),  $H$  je citelné tepelné proudění ( $\text{W}\times\text{m}^{-2}$ ) a  $LE$  je latentní teplotní proudění ( $\text{W}\times\text{m}^{-2}$ ). (Maruyama a Segawa 2016)

### Teplota povrchu

Teplota závisí na poměru vstřebané a ztracené energie (Deardorff 1978). Povrchová teplota je závislá na nadmořské výšce, ve které se povrch nachází a také na měsíci nebo sezóně ve které se teplota měřila. (Hursh et al. 2017) Povrchová teplota je teplota půdy od povrchu do hloubky 10 cm (Zemek 2014). Teplota povrchu má významný vliv na monitorování zemědělského sucha, přenosu energie v ekosystémech a hodnocení globálního cyklu uhlíku. (NASA 2023)

Teplotu lze zaznamenávat za pomoci meteorologických stanic nebo ručních přístrojů, jedním z těchto ručních přístrojů je např. infračervený teploměr VOLTcraft 800-20C nebo meteorologická stanice Solinst Barologger, která byla využita se sběru dat do této bakalářské práce. Více informací o přístrojích jsou k nalezení v kapitole Použitá data.

## 2.3 Termální data

Množství energie a spektrální vlastnosti závisí na teplotě (musí být vyšší než teplota absolutní nuly = 0 °K) (Brom et al. 2014) daného objektu a jeho emisivité. Většina objektů, které je možné zaznamenat pomocí technik DPZ dosahují teplot v rozmezí 270–330K (-3,15 – 56,85 °C). Tudiž podle Planckova zákona, jsou zde dvě atmosférická okna. První z nich je ve vlnových délkách 3–5 μm, a zaznamenává se převážně v nočních hodinách, protože obsahuje jak informace emitované zemským povrchem, tak také malé množství odraženého slunečního záření. Druhé atmosférické okno souvisí s Wienovým zákonem posuvu (viz Wienův zákon posuvu) a slouží k získávání podrobných informací o emitované energii zemským povrchem. (Brom et al. 2014)

### Charakteristika termálních dat

Termální data jsou informace o tepelném záření, které objekty emitují. Tato data popisují infračervené záření, které je neviditelné lidskému oku, a jsou klíčová pro analýzu teplotních vlastností objektů a prostředí. Tato termální data jsou tzv: „tepelné obrazy“, které jsou zaznamenány termokamerou, která je dokáže zachytit a kvantifikovat, podle jejich teploty. Výstupem termálních kamer jsou například grafické výstupy objektů zbarvených, podle jejich teploty. (NASA 2019) Termální data hrají klíčovou roli při výpočtech teplotních rozdílů mezi různými objekty a povrchy. Pomáhají také určit, kde se nacházejí významné teplotní rozdíly, které mohou být důležité při monitorování teploty povrchu nebo detekci teplotních anomálií. (Meier 1980)

Termální data lze získat pomocí různých přístrojů. Jedním z nejčastějších jsou termální kamery. Tyto kamery mohou být přenášeny na družicích, leteckých nebo pozemních vozidlech. Dále se v dnešní době využívají i jiné přístroje jako pozemní sensorové stanice s čidly nebo aktuálně atraktivnější varianta a tou jsou UAV (Unmanned Aerial Vehicle – bezpilotní systém). (DronPro 2023)

Termální data, lze získat z různých zdrojů, ať už od vládních agentur a organizací tak také od soukromých komerčních společností viz *Tabulka 3*. Jedná se například o data od meteorologických služeb, výzkumných organizací a satelitních misí. (FLIR 2019)

Tabulka 3 - příklady služeb, které poskytují termální data (zdroj: vlastní tvorba)

SLUŽBA	POPIS	ODKAZ
meteorologické služby	Český hydrometeorologický ústav - aktuální data o počasí, teplotě a ovzduší. Snímky jsou poskytovány z družic MSG (Meteosat Second Generation) a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)	<a href="https://www.chmi.cz/">https://www.chmi.cz/</a>
výzkumné organizace	ESA (European Space Agency) - díky vesmírným misím, zaznamenávají přírodní aktivity na zemi a snaží se bojovat s globálním oteplováním	<a href="https://www.esa.int/">https://www.esa.int/</a>
	USGS (United States Geological Survey) - krom správy satelitních misí, se také zaměřují na predikce vulkanických jevů	<a href="https://www.usgs.gov/">https://www.usgs.gov/</a>
satelitní mise	LandSat - jsou osazeny spektrálními senzory pro práci ve výzkumu a predikci globálních změn, zemědělství, vřdělání apod.	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a>
	Sentinel - zahrnují radarové a spektrální snímkování pro monitorování pevniny, oceánů a atmosféry	<a href="https://dataspace.copernicus.eu/">https://dataspace.copernicus.eu/</a>
soukromé komerční společnosti	Vlastní satelity FOREST I a II a zachycuje kontinuální termální snímky Země s vysokým rozlišením	<a href="https://ororatech.com/">https://ororatech.com/</a>

Na Katedře geoinformatiky na Univerzitě Palackého v Olomouci se tématem termálních dat, zabývalo pouze pár lidí. Jedním z nich je například Tomáš Purket ve své diplomové práci, který se zabýval tvorbou termální mozaiky ze snímků pořízených širokopásmovou termální kamerou a zhotovení přesné ortofoto mozaiky ze snímků pořízených fotogrammetrickou kamerou. (Purket 2017) Dále diplomová práce Petry Ďuriančikové, která se zabývala analýzou teplotních charakteristik vybraných ploch města Olomouce za použití termálního mapování vč. vlastního teplotního měření za pomoci ruční termální kamery. (Ďuriančiková 2022) A v poslední řadě také disertační práce Tomáše Poura, který navazoval na své předešlé vysokoškolské kvalifikační práce, ve kterých se zabýval vnitřní urbanizací s využitím družicových dat a analýzou měst, které mají těžební nebo důlní historii. (Pour 2019)

## 2.4 Satelitní snímky

Satelity lze zařadit do dvou hlavních kategorií: přírodní a umělé. V této práci se budeme zabývat těmi umělými, které jsou zařízení vytvořená lidmi a následně vyslaná do vesmíru na pevně určenou orbitální dráhu za účelem zjišťování nějakých informací.

### 2.4.1 Satelitní mise Landsat 8 a Landsat 9

#### Landsat 8

Landsat 8 (L8) odstartoval 11. února 2013 z Vandenbergovy letecké základny v Kalifornii. Náklad družice L8 se skládá ze dvou vědeckých přístrojů - operačního snímače půdy (OLI) a termálního infračerveného senzoru (TIRS). Tyto dva senzory zajišťují sezónní pokrytí globální pevniny. Jejich pásma a rozlišení jsou popsána níže v Tabulce 4. (NASA 2021a)



## Landsat 9

V září roku 2021 byl vypuštěn nový satelit s názvem Landsat 9 (L9). Souběžně s tímto vypuštěním byl nahrazen satelit Landsat 7, který byl vypuštěn v roce 1999. Rozlišení tohoto satelitu zůstalo stejné jako na předchozí generaci Landsat viz. *Tabulka 4*. Senzor OLI-2 má interní kalibrační zdroje pro zajištění radiometrické přesnosti a stability a dokáže také solární a lunární kalibrace. (NASA 2021b)

Tabulka níže (*Tabulka 5*) popisuje technické parametry satelitu L8 a L9. Satelit L8 je osazen senzory OLI, TIRS, zatímco jeho novější verze má již senzory OLI-2 a TIRS – 2. Oba dva satelity létají v párech ve výšce 705 km, na orbitě, která je polární/blízko polární a hlavně je synchronní se Sluncem (satelit navštíví vždy stejné místo ve stejný místní čas) (Boldt-Christmas 2020), jejich orbitální náklon je 98.2°. Data, která zaznamenává L9 obsahují 4x více informací, než ty, které jsou pořízeny satelitem L8 (NASA 2021b). Doba než satelity nasnímají stejné území je 16 dní, s tím, že mezera mezi L8 a L9 je 8 dní.

Během tvorby této bakalářské práce, budou využívány právě snímky ze satelitů L8 a L9, o jejich aktuálnost se postará již zmiňovaný interval 8 dní. Snímky je možné stáhnout přes webovou aplikaci na oficiálních stránkách této společnosti: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (NASA 2021a; 2021b)

*Tabulka 4 - pásma satelitů Landsat 8 a 9 a jejich rozlišení*

PÁSMO	PROSTOROVÉ ROZLIŠENÍ
B1-B7	30 m
B8 PAN	15 m
B9	30 m
B10-11	100 m

*Zdroj: Upraveno z (NASA 2021b) a (NASA 2021a)*

*Tabulka 5 - porovnání L8-L9*

	LANDSAT 8	LANDSAT 9
Senzory	OLI, TIRS	OLI-2, TIRS-2
Výška	705 km	705 km
Orbitální náklon	98.2°	98.2°
Orbita	polární, synchronní se sluncem	blízko-polární, synchronní se sluncem
Čas průletu	10:00 +- 15 minut lokálního času	10:00 +-15 minut lokálního času
Doba mezi 2 průlety	16 dní	16 dní
Data:	12-bit 4 096 shades	14-bit, 16 384 shades
Datum startu	11.02.2013	27.09.2021

*Zdroj: Upraveno z (NASA 2021b) a (NASA 2021a)*

## 2.4.2 Další satelitní mise

### Sentinel 2

Mise Copernicus SENTINEL-2 se skládá ze soustavy dvou polárních družic umístěných na stejné dráze, která je synchronní ke Slunci. Družice jsou vzájemně rozfázované v úhlu 180°. Jejím cílem je sledovat proměnlivost podmínek na zemském povrchu. Snímkuje plochu o velikosti hrany 290 km a doba přeletu je 10 dní na rovníku s jednou družicí a 5 dní se dvěma družicemi za čistých observačních podmínek bez oblačnosti. (ESA 2015)

### Sentinel 3

Misi Copernicus SENTINEL-3 společně provozují European Space Agency (ESA) a European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), aby poskytovaly operativní služby pozorování oceánů a pevniny.

Hlavním cílem mise Sentinel-3 je měřit topografii mořské hladiny, teplotu mořské plochy, pevniny s vysokou přesností a spolehlivostí pro podporu systémů předpovědi stavu oceánů, monitorování životního prostředí a klimatu. (ESA 2016)

### ECOSTRESS

Radiometr ECOSTRESS byl rozmístěn na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS) na místě japonského experimentálního modulu – externího zařízení (JEM-EF) 10. (ECOSTRESS 2018)

Předmět měření: Albedo, sněhová pokrývka, teplota, vegetace, typ mraků

Senzory: SWIR, TIR, VNIR

### LSTM (Land Surface Temperature Monitoring)

Mise společnosti ESA ve spolupráci s Airbus Defense and Space. Satelit bude nést senzor schopný snímat TIR nad pevninou a pobřežními oblastmi. Snímky budou sloužit na podporu služeb řízení zemědělství. LSTM mise je rozdělena do dvou částí (LSTM-A a LSTM-B). Část LSTM-A má plánovaný start v roce 2028, část LSTM-B je naplánovaná na rok 2030. (ESA 2020)

Předmět měření: měření povrchové teploty

Senzory: TIR

## Komerční satelitní mise

### ALBEDO

Satelit je součástí konstelace „Albedo Space Corporation“, která nabízí zákazníkům z průmyslu, energetiky, zemědělství vysokorychlostní elektrooptické satelitní snímky s rozlišením 10 cm. (Albedo 2023)

Předmět měření: mapování uhlíku a metanu, projekty týkající se lesních požárů, inspekce solárních panelů

Senzory: LWIR, SWIR, NIR

### Orora Technologies

Mise FOREST I, byla vypuštěna do vesmíru v roce 2022. Druhý satelit s názvem FOREST II, byl vypuštěn v roce 2023. Satelity slouží k zachycení kontinuálních termálních snímků Země s vysokým rozlišením. Data jsou analyzována přímo v oběžné dráze za pomoci algoritmů a umělé inteligence. (Cam 2022)

Předmět měření: detekce rizik, které se snaží zabránit vznikům požárů

Senzory: TIR

### **Satellite VU**

Londýnský start-up, který připravuje konstelaci sedmi kosmických sond MWIR (Mid Wave InfraRed). Tato konstelace bude schopna několikrát denně měřit tepelnou stopu jakékoli budovy kdekoli na Zemi. Což umožní získat informace o emisích, spotřebě energie, izolace budov. (SatelliteVU 2023)

Předmět měření: teplota, emise, tepelná stopa, spotřeba energie

Senzory: MWIR

### **TRISHNA**

V roce 2025 je plánovaný start satelitu TRISHNA (*Thermal InfraRed Imaging Satellite for High-resolution Natural resource Assessment*), který je součástí vývoje Francouzské vesmírné agentury (CNES) a Indické organizace pro výzkum vesmíru. (ISRO). Satelit se připojí k Francouzsko-Indické flotile při monitorování klimatu a provozních aplikací. (Lagouarde et al. 2018)

Předmět měření: Albedo a odrazivost záření, sněhová pokrývka, teplota, vegetace, typ mraků

Senzory: SWIR, TIR, VNIR

## 3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

V této části bakalářské práce budou prezentovány metody, které byly použity k vypočtení jednotlivých termálních charakteristik. Budou popsány jejich obecné rovnice a stručný popis k dané metodě. Dále zde budou popsány použitá data a jejich sběr, použité programy a v poslední části také celý postup práce.

### 3.1 Použité metody

#### 3.1.1 Metody pro výpočet albeda

**Liang Method:** Tato metoda zahrnuje měření a analýzu odrazivosti povrchu v různých vlnových délkách a umožňuje určit albedo pro daný povrch. (Liang et al. 1999) K výpočtům využívá úzkopásmová pozorování v určitém vlnovém rozsahu. Předpovídá celkovou intenzitu vzestupného i sestupného záření. Tato metoda je zvláště užitečná pro družicová pozorování. (Liang 2001) Do výpočtu vstupují jednotlivé pásma  $B_{X_{TOA}}$ , která jsou vypočtena k vrcholu jejich atmosféry s jejich konstantami.

$$Albedo = \left( (0,356 \times B_{2_{TOA}}) + (0,130 \times B_{4_{TOA}}) + (0,373 \times B_{5_{TOA}}) + (0,085 \times B_{6_{TOA}}) + (0,072 \times B_{7_{TOA}}) \right) - \frac{0,0018}{1,016}$$

Rovnice 7 - výpočet albeda za pomoci Liang metody

**Tasumi Method:** Tato metoda využívá atmosférické korekční funkce upravené tak, aby obsahovaly pouze obecné informace o vlhkosti. Tyto korekční funkce mají redukovanou strukturu, aby se zvýšila jejich použitelnost při odhadu evapotranspirace a výpočtu jejich energetické bilance. Použití této metody je vhodné pro zemědělské a hydrologické vědce a inženýry, protože k ní není potřeba vysoké znalosti atmosférické fyziky. (Tasumi et al. 2008)

$$\alpha_s = \frac{\alpha_t - \alpha_a}{\tau_{bb}^2}$$

Rovnice 8 - výpočet albeda za pomoci Tasumi metody

kde  $\alpha_t$  je satelitní širokopásmové obousměrné albedo (Top-of-atmosphere ; TOA),  $\alpha_a$  je albedo vyvolané atmosférickou dráhou (Atmospheric Reflectance),  $\tau_{bb}^2$  je obousměrná širokopásmová propustnost atmosféry (Broadband Atmospheric Transmittance), která předpokládá stejnou propustnost pro přicházející a odcházející záření.

#### 3.1.2 Metoda pro výpočet teploty půdy

**Povrchová teplota:** Do této metody vstupují data z termálního senzoru TIRS, přesněji pásmo 10 a slouží k vypočtení povrchové teploty z teploty záření. (Avdan a Jovanovska 2016)

$$LST = \frac{BT}{\{1 + [(\frac{\lambda BT}{p}) \ln \varepsilon_\lambda]\}}$$

Rovnice 9 - výpočet povrchové teploty

kde  $BT$  je teplota záření ve °C,  $\lambda$  je vlnová délka emitovaného záření a  $\varepsilon$  je emisivita povrchu. Podrobné vysvětlení se nachází v kapitole 5.4

### 3.1.3 Metody pro výpočet tepelného proudění

**SEBS:** Tato metoda využívá jako vstupní data meteorologická data, dále data z DPZ. Výsledkem je denní evapotranspirační rastrová matice s rozlišením 1×1 km. (Liu et al. 2022). Pro potřeby Pythonu je klasický model trochu upravený a výsledný raster je v takovém rozlišení v jakém jsou vstupní data.

$$G_0 = R_n \times [\Gamma_c + (1 - V_c) \times (\Gamma_s - \Gamma_c)]$$

Rovnice 10 - výpočet tepelného proudění za pomoci SEBS metody

kde  $R_n$  je čisté záření,  $\Gamma_c$  je poměr tepelného toku půdy k čistému záření v podmínkách celkového vegetačního krytu ( $\Gamma_c = 0,05$ ) a  $\Gamma_s$  je poměr tepelného toku půdy k čistému záření v podmínkách holé půdy ( $\Gamma_s = 0,315$ );  $V_c$  je vegetační kryt.

**Baastiansen SEBAL:** Tato metoda je založena na spektrálních družicových měřeních. (Bastiaanssen 2000). Do této metody vstupují viditelná, blízko-infračervená a termální pásma.

$$G = T r_0 (0,0038 r_0 + 0,0074 r_0^2) \times (1 - 0,98 \times NDVI^4)$$

Rovnice 11- výpočet tepelného proudění za pomoci SEBAL metody

kde  $T$  (°C) je povrchová teplota,  $r_0$  povrchové albedo a NDVI normalizovaný diferenční vegetační index stanovený z pásem 4 a 5 (kapitola 5.4 *Normalized Difference Vegetation Index*).

**Net Radiation:** Tato metoda je založena na odvození teplotního proudění z čistého záření. (Hsieh et al. 2023) viz. Rovnice 21

## 3.2 Použitá data

### Satelitní snímky

Hlavním zdrojem dat jsou satelitní snímky ze satelitů Landsat 8, Landsat 9 ve vybrané dny. Využívaná pásma a další podrobné informace se nacházejí v předešlé kapitole 2.4.1.

### Přístroje potřebné k vlastnímu terénnímu měření dat

VOLTCRAFT SLX-300 – je všestranný přístroj pro měření intenzity světla, vlhkosti a teploty Konkrétně intenzitu světla měří ve W/m<sup>2</sup> a teplotu ve stupních Celsia (°C) nebo Fahrenheita (°F). Tento přístroj je vhodný pro použití v oborech jako je ochrana životního prostředí, průmyslové prostředí a ke komplexnímu sledování a analýze prostředí. (VOLTCRAFT 2020)



Obrázek 3 - VOLTCRAFT SLX-300 při měření dat

*Zdroj: vlastní tvorba*

VOLTCRAFT IR 800-20C – Jedná se o pistolový infračervený teploměr, který dokáže měřit v rozsahu  $-40 - +800$  °C. Nastavení vhodné emisivity dovolí změřit teplotu jakéhokoli povrchu, ať už se jedná o černý asfalt, sníh nebo plechovou střechu.



Obrázek 4 – VOLTCRAFT IR 800-20C při měření dat

*Zdroj: vlastní tvorba*

FLIR E60 – Sběr termálních dat byl realizován příruční kamerou FLIR E60, která umožňuje zachycení teploty povrchu v termálním a viditelném spektru. Výsledný formát dat je JPEG což usnadňuje ukládání, přenos a analýzu dat. Kamera je ideální pro zjišťování úniků tepla, identifikace elektrických poruch. (FLIR 2013)



Obrázek 5 - FLIR E60

*Zdroj: (ITM 2023)*

### **Tvorba mapových výstupů**

Vrstva využití krajiny obsahující biotopy, které byly pro území Olomouce agregovány do 6 skupin, na základě jejich ekofyziologických vlastností a měřítka. Agregace proběhla na základě konzultace s Vilémem Pechancem. Habitaty menší než pixel Landsat 8/9 byly sloučeny s nejbližšími habitaty většími než 1px satelitního snímku. Tyto data vypůjčil Vilém Pechanec a jsou součástí článku *Assessing Habitat Vulnerability and Loss of Naturalness: Applying the GLOBIO3 Model in the Czech Republic* (Pechanec et al. 2021)

## Použité programy

### Python

Python je skriptovací jazyk. Byla využita verze 3.11.5. Tento skriptovací jazyk byl využit pro automatizaci výpočtů v jednotlivých metodách. Poskytován je pod licencí Python Software Foundation License (PSFL) a GNU General Public License (GPL). (Python 2023)

### Visual Studio Code

Je bezplatný editor kódu s otevřeným zdrojovým kódem vyvinutý společností Microsoft a vydaný v dubnu 2015. Podporuje více programovacích jazyků a nabízí funkce, jako je ladění a inteligentní doplňování kódu. VS Code je k dispozici na platformách Windows, macOS a Linux a je šířen pod licencí MIT. Použitá verze programu byla 1.88. (Microsoft 2015)

### QGIS

Jedná se o bezplatná a open-source multiplatformní desktopová aplikaci geografického informačního systému (GIS), která podporuje prohlížení, editaci a analýzu geoprostorových dat. Verze programu byla 3.16 Hannover, pod licencí GNU GPL v2. (QGIS 2023)

### Inkscape

Inkscape je bezplatný vektorový grafický editor s otevřeným zdrojovým kódem, který byl poprvé vydán v listopadu 2003. Byl vyvinut v rámci projektu GNU a je šířen pod licencí GNU General Public License (GPL). Je široce kompatibilní s různými formáty. Inkscape funguje na různých platformách, včetně Windows, macOS a Linuxu. Verze programu byla 1.3.2. (Inkscape 2003)

## Postup zpracování

Pro splnění cílů bakalářské práce bylo potřeba nejprve se seznámit s řešenou problematikou a uděláním potřebné rešerše. Po úspěšné rešerši byla potřeba vybrat lokalitu a vhodné povrchy pro sběr terénních dat. Následovala fáze sběru ručních dat a sehnání potřebných satelitních dat. Po úspěšných předešlých fázích zbývalo zpracovat a zanalyzovat všechny data, na základě žádaných termálních charakteristik. Proběhly všechny potřebné výpočty pro dané termální charakteristiky. V neposlední řadě, byla potřeba celý proces zautomatizovat za pomoci scriptu. Následně se vytvořily mapové výstupy z výsledných dat a na závěr byl vyhotoven web a poster k bakalářské práci.



## 4 SBĚR TERÉNNÍCH DAT

Lokality pro sběr terénních dat byly vybrány podle toho zda se v nich nacházejí potřebné povrchy a také podle jejich strategického rozmístění (povrchy s velkou plochou nedaleko od sebe).

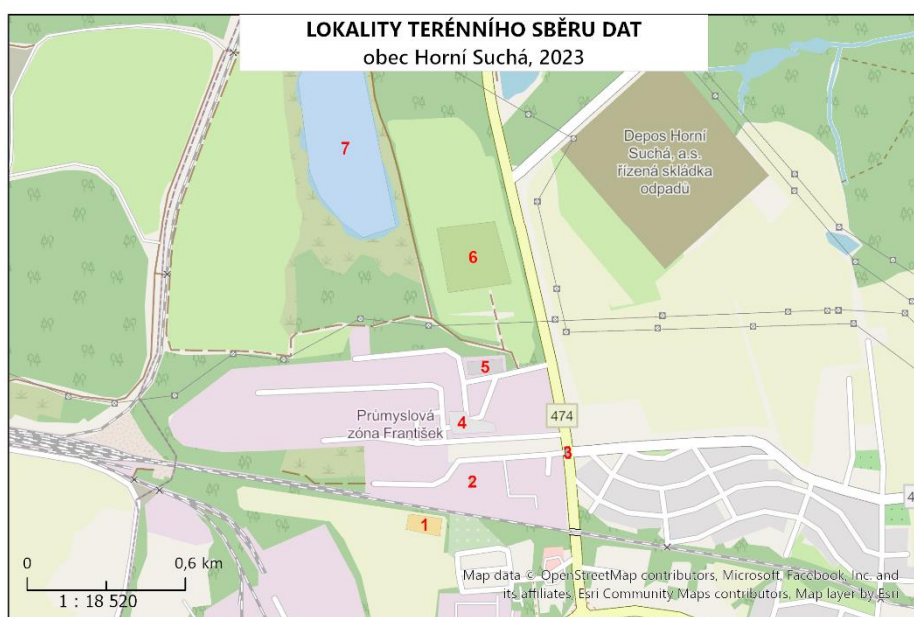
Prvotní rozdělení povrchů pro lokalitu v obci Horní Suchá bylo složeno ze 3 kategorií (vodní plocha, travnatá plocha, zástavba), ale kvůli zpřesnění výsledků se rozhodlo, že celkový počet povrchů bude 7 (viz *Tabulka 6*). K tomuto rozdělení došlo z důvodu, že bylo potřeba více rozlišit jednotlivé povrchy mezi sebou, protože každý povrch má jiné vlastnosti. Vodní plocha zůstala stejná, travnatá plocha se rozdělila na trvalou zeleň a ornou půdu a zástavba se rozdělila do kategorie štěrk, asfalt, zástavba a dlažební parkoviště. Vysokou vegetaci v tomto případě nebylo možné měřit a to z důvodu nedostačujících přístrojů a podmínek.

V lokalitě Olomouc se více zaměřilo na travnaté povrchy, proto se zde vybraly pouze 3 kategorie (travnatá plocha, vodní plocha a dlažební parkoviště). Jako travnaté plochy byly vybrány 3 lokace, vodní plocha i parkoviště měly lokaci pouze jednu.

### 4.1 Sběr dat

Terénní sběr dat probíhal od půlky července roku 2023 do půlky ledna roku 2024. Během tohoto období probíhalo měření pouze ve dny s výraznou změnou teploty. Celkový počet měření byl 9 včetně jednoho za úplně sněhové pokrývky, ten byl 17.1.2024. Z důvodu, že satelity L8 a L9 se střídají a snímají stejnou průletovou řadu jednou za 8 dní a zároveň bylo třeba, aby obloha byla jasná a bez oblačnosti, bylo možné měřit terénní data pouze v některé dny.

Vybrané lokality pro měření byly dvě, jedna se nacházela v obci Horní Suchá, kde probíhala většina měření a druhá byla v centru Olomouce. Obě dvě lokality se nacházejí ve stejné průletové řadě a tudíž nebyl problém s jejich následným zpracováním. Časový interval, kdy bylo potřeba měřit data byl mezi devátou a desátou hodinou ranní, protože satelit prolétal nad oblastí v čase 9:30–9:35 (UTC +2).



Obrázek 6 - lokalita sběru Horní Suchá (zdroj: vlastní tvorba)

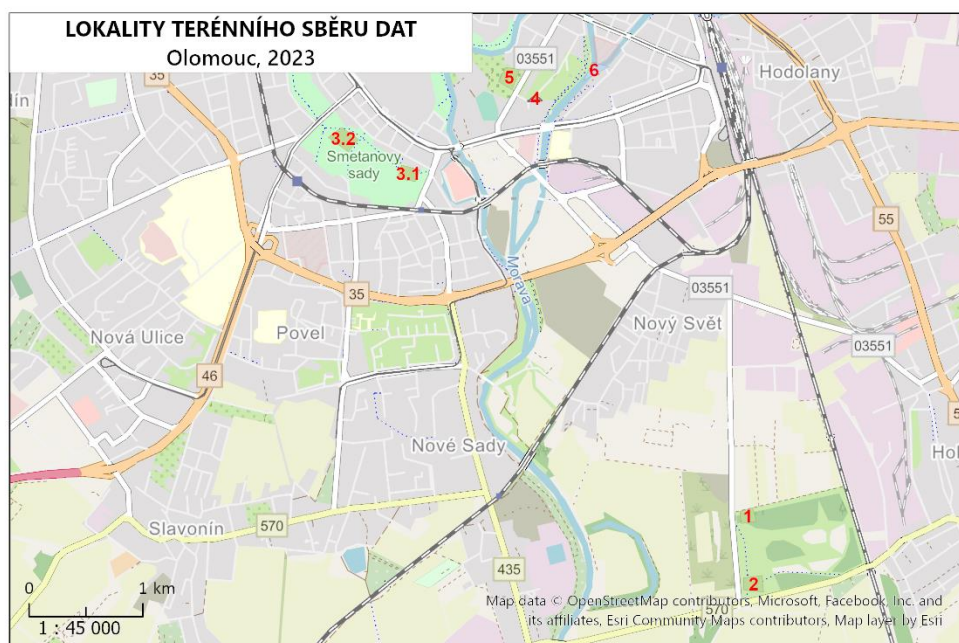


Jako plochy zájmu v lokalitě Horní Suchá byly vybrány následující povrchy: *orná půda, štěrk, asphalt, zastavěná oblast, parkoviště, trvalá zeleň a vodní plocha*. V tabulce níže (Tabulka 6), lze vidět příklad dat, které byly v této lokalitě naměřeny. V tabulce se nachází název daného povrchu, jeho číselné označení, pro lepší zpracování. Následně množství přijatého a odraženého záření ve  $W/m^2$  a teplotu povrchu ve  $^{\circ}C$ . Dále je zde napsán den, kdy probíhalo měření a název satelitu, který v ten den měřil.

Tabulka 6 - příklad dat z terénního měření (zdroj: vlastní tvorba)

POVRCH	ID	PŘÍCHOZÍ	ODCHOZÍ	TEPLOTA	DATUM
		$W/m^2$	$W/m^2$	$^{\circ}C$	9.8.23
orná půda	1	206,1	27,41	17,2	
štěrk	2	304,9	50,56	22,9	
asfalt	3	322,9	44,44	23,1	
zástavba	4	402	82,25	22	
parkoviště	5	348,2	46,23	24,3	
parkoviště - 2	5.2	383,9	59,53	20,8	
trvalá zeleň	6	554,7	207,3	19	
trvalá zeleň - 2	6.2	627,5	241,4	18,7	
vodní plocha	7	566,9	27,64	17,8	SATELIT:
vodní plocha - 2	7.2	529,5	25,23	18,6	Landsat 8

Druhou vybranou lokalitou bylo město Olomouc. Zde byly vybrány následující povrchy: travnatá plocha v Holickém lese, zde probíhalo měření na 2 místech. Dále travnatá plocha ve Smetanových sadech, parkoviště u Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého, travnatá plocha v Rozárium Olomouc a vodní plocha na řece Moravě.



Obrázek 7 - lokalita sběru Olomouc (zdroj: vlastní tvorba)

V tabulce níže (*Tabulka 7*), lze vidět příklad dat, které byly měřeny v lokalitě Olomouc. Tato tabulka je velmi podobná s tabulkou z Horní Suché (*Tabulka 6*), jediný rozdíl je v jiných měřených površích.

*Tabulka 7 - příklad dat z terénního měření (zdroj: vlastní tvorba)*

povrch	ID	PŘÍCHOZÍ	ODCHOZÍ	TEPLOTA	DATUM
		W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	°C	5.10.2023
trav_Ho-1.1	1.1	538,1	130,4	15,3	
trav_Ho-1.2	1.2	474,4	140	10,4	
trav_Ho-2.1	2.1	423,9	94,09	13,5	
trav_Ho-2.2	2.2	447,3	95,32	18,7	
trav_Sm-3.1	3.1	462,1	142,7	13,6	
trav_Sm-3.2	3.2	488,3	163,9	20,1	
parkoviště	4	573	116,4	20,3	
trav_PřF	5	544,7	155,3	18,5	SATELIT:
vodní plocha	6	286,6	42,59	13,6	Landsat 9

V následující tabulce (*Tabulka 8*) se objevují datумы, ve kterých probíhalo terénní měření. Červeně zvýrazněné datумы značí měření v lokalitě Horní Suchá, zatímco modré značí lokalitu Olomouc.

*Tabulka 8 - datумы terénního měření*

DATUM MĚŘENÍ	SATELIT	LOKALITA
17.07.2023	L9	Horní Suchá
10.08.2023	L8	Horní Suchá
26.08.2023	L8	Horní Suchá
03.09.2023	L9	Horní Suchá
11.09.2023	L8	Horní Suchá
05.10.2023	L9	Olomouc
29.10.2023	L8	Horní Suchá
14.11.2023	L8	Olomouc
17.01.2024	L8	Horní Suchá

Všechna měření proběhla úspěšně, nicméně při následném zpracovávání snímků v zimě roku 2023, byly zjištěny nesrovnalosti s výsledky z terénního měření. Při tvorbě rešerše a zjišťování času, byl zjištěn průlet satelitu okolo 9:30, nicméně při zjištění nesrovnalostí a po dalším zkoumání se zjistilo, že se nejedná o letní čas nýbrž zimní. Naměřená data byla tudíž všechna změřena o hodinu dříve, než byl skutečný průlet satelitu. Z tohoto důvodu tato data nebylo možné využít. Jediným dnem, který bylo možné využít data z terénního měření byl den 29.10.2023 a to z důvodu již posunutého času z letního na zimní a tudíž i přesných výsledků. Z tohoto důvodu byla provedena validace tento den a ostatní data nebyly v práci využity.

## 5 POSTUP ŘEŠENÍ

V této kapitole se zabýváme konkrétním provedením programového kódu za účelem porovnání vybraných termálních charakteristik krajiny. Dále sběrem pozemních terénních dat, jejich lokalitou a obsahem samotných dat.

Ve výpočtech se zaměříme primárně na tři klíčové charakteristiky: albedo, teplotu zemského povrchu (LST) a tepelný tok půdy.

Zpočátku nastíníme, jak spustit samotný skript a co vše je potřebné udělat, před jeho spuštěním. Dále se zaměříme na proces sběru dat a v poslední části na popis výpočetních metod použitých k získání a zpracování těchto dat.

### 5.1 Spuštění skriptu

Spouštění skriptu je možné buď přes příkazový řádek nebo pomocí programu sloužícího k programování (např. Visual Studio Code, PyScripter). Pro správné spuštění, je potřeba mít nainstalovaný skriptovací jazyk Python.

#### **EarthPy v.0.9.2**

*EarthPy* je balíček pythonu, který usnadňuje vykreslování a práci s prostorovými rastrovými a vektorovými daty pomocí nástrojů s otevřeným zdrojovým kódem.

#### **Fiona v.1.8.13**

Balíček Fiona pracuje s prostorovými daty a dokáže načíst jak GeoPackage tak také Shapefile. Zpracovávat data dokáže jak interně přímo v PC tak také cloudově.

#### **GDAL v.3.8.3**

GDAL je knihovna pro rastrové a vektorové formáty geoprostorových dat, vydávaná pod licencí MIT. Jedná se o knihovnu, díky které je možné zpracované data převádět do formátů GeoTIF a případně prostorová data ořezávat.

#### **GeoPandas v.0.8.1**

GeoPandas je projekt, který usnadňuje práci s geoprostorovými daty v pythonu. GeoPandas umožňuje prostorové operace s geometrickými typy. Souvisí s Shapely a Fiona, které byly využity pro ořez oblasti zájmu.

#### **NumPy v. 1.26.4**

Knihovna NumPy byla využita kvůli její schopnosti práce s vícerozměrnými maticemi (array) a pokročilými matematickými funkcemi.

#### **Pandas v. 2.2.0**

Pandas slouží pro manipulaci s daty a jejich analýzou. Využívá se pro operace s číselnými tabulkami a časovými řadami.

### **Rasterio v.1.1.3**

Geografické informační systémy využívají GeoTIFF a další formáty k organizaci a ukládání rastrových datových sad, jako jsou satelitní snímky a modely terénu. Rasterio pracuje s rastrovými prostorovými daty jako např. GeoTIFF nebo GeoJSON. Souvisí s balíčkem NumPy.

### **SciPy v.1.12.0**

Balíček SciPy obsahuje moduly pro matematické operace a je distribuována pro licenci BSD. Její vývoj je sponzorován a podporován otevřenou komunitou vývojářů.

### **Shapely v.1.8**

Shapely je balíček s licenci BSD, který slouží k práci a analýze rovinných objektů. Shapely se primárně nezaměřuje na souřadnicové systémy.

### **Tifffile v. 2024.2.12**

Slouží ke čtení a zapisování obrazových dat do souborů kompatibilních s TIFF/GeoTIFF. Je potřebný pro načtení samotných satelitních snímků. Dále dokáže načíst metadata ze souborů a použít je při následné práci s nimi.

### **JSON**

Knihovna JSON (JavaScript Object Notation) je odlehčený textový formát pro výměnu dat, který je nezávislý na jazyce. V kódu byl využit pro načtení geometrie, se kterou následně pracovalo Rasterio při oříznutí snímku.

### **PPRINT**

Díky modulu pprint je možné vypsát libovolné datové struktury ve formě, kterou lze použít jako vstup pro interpret. Formát zaručuje udržení objektů na jednom řádku, pokud je to možné, a rozdělí je na více řádků, pokud se nevejdou do povolené šířky

### **OS**

Os je vestavěný modul, který interaguje s operačním systémem. Dokáže vytvářet soubory a adresáře, ovládat vstupy a výstupy souborů a spravuje procesy.

## 5.2 Výpočty na vrchní části atmosféry

### Top of Atmosphere Reflectance

Výsledná hodnota ukazuje množství odraženého a dopadajícího záření na vrchní části atmosféry bez vlivů samotné atmosféry a typu materiálu na zemi. Vypočtení TOA bývá jako první krok při zpracování satelitních snímků. (Avdan a Jovanovska 2016)

Do výpočtu vstupují všechny pásma jednotlivě po sobě a k nim se přidává hodnota *Reflectance Add Band (ADD)* a *Reflectance Multi Band (MULT)*, které jsou obsaženy v metadatech jednotlivých snímků a mění se pro jednotlivé dny.

$$TOA_{Ref} = MULT \times BAND_x + ADD$$

Rovnice 12 - výpočet Top of Atmosphere Reflectance

### Top of Atmosphere Radiance

Vypočtení TOA\_Rad je shodné jako při počítání TOA\_Ref, pouze namísto odrazivosti se počítá radiace. (Avdan a Jovanovska 2016)

Do výpočtu vstupuje termální pásmo B10 (TIRS), ke kterému se přidává hodnota *Radiance Add Band (ADD)* a *Radiance Multi Band (MULT)*, které jsou obsaženy v metadatech jednotlivých snímků a mění se pro jednotlivé dny.

$$TOA_{Rad} = (MULT \times TIRS) + ADD$$

Rovnice 13 - výpočet Top of Atmosphere Radiance

## 5.3 Výpočty Albeda

### Metoda podle Lianga

Do výpočtu Albeda metodou podle Lianga (Liang 2001) vstupují pásma B2, B4, B5, B6 a B7, které je potřeba prvně nechat projít výpočtem TOA\_Ref viz *Top of Atmosphere Reflectance*.

$$Alb_{Liang} = ((0,356 \times B2_{TOA}) + (0,130 \times B4_{TOA}) + (0,373 \times B5_{TOA}) + (0,085 \times B6_{TOA}) + (0,072 \times B7_{TOA})) - \frac{0,0018}{1,016}$$

Rovnice 14 - výpočet Albeda Liangovou metodou

### Tasumi's Method

Výpočet Albeda podle Tasumiho metody (Tasumi et al. 2008) je podobný jako výpočet podle Liangovy metody. Do výpočtu vstupují pásma B2, B4, B5 a B7, které jsou prvně vloženy do výpočtu TOA\_Ref, stejně jako v metodě předešlé.

$$Alb_{Tasumi} = ((0,149 \times B2_{TOA}) + (0,311 \times B4_{TOA}) + (0,103 \times B5_{TOA}) + (0,036 \times B7_{TOA})) - \frac{0,0018}{0,599}$$

Rovnice 15 - výpočet Albeda Tasumiho metodou

## 5.4 Ostatní výpočty

### Normalized Difference Vegetation Index

Výsledné hodnoty NDVI nabývají hodnot mezi -1 a +1. Záporné hodnoty, blíží se k -1 odpovídají vodě (např. oceány). Hodnoty, které jsou blízké nule (-0,1 až 0,1) odpovídají neplodným oblastem (kamení, písek, sníh). Nízké kladné hodnoty odpovídají křovinám a pastvinám (cca 0,2 až 0,4) a vysoké kladné hodnoty označují zdravé až velmi zdravé plodiny, nacházejících se nejčastěji v mírné oblasti a oblasti s deštnými lesy. (Avdan a Jovanovska 2016)

Do výpočtu NDVI vstupují 2 pásma, první z nich je B5 (blízké infračervené) pásmo a druhé B4 (červené) pásmo.

$$NDVI = \frac{(B5 - B4)}{(B5 + B4)}$$

Rovnice 16 - výpočet NDVI

### Vegetation Cover

Vegetační kryt je klíčovým faktorem při zjišťování zhoršení kvality půdy, slouží k ochraně povrchu půdy a indikuje případný nástup desertifikace (rozšiřování pouště). Hodnota vegetačního krytu udává velikost plochy zakryté listy v m<sup>2</sup> odpovídající ploše jednoho m<sup>2</sup> půdy. (Constantinos 2004)

Do výpočtu vegetačního krytu vstupuje vypočtené NDVI.

$$VC = 0,5 \times NDVI + 0,5$$

Rovnice 17 - výpočet Vegetation cover

### Brightness Temperature

Teplota záření nebo-li Brightness Temperature (BT) ukazuje další způsob měření množství energie pocházející z nějakého zdroje. Teplotu záření je možné měřit např. pomocí pyrometru. (Lewis Center 2024)

$$BT = \left( \frac{K2}{\log\left(\frac{K1}{(MULT \times B10 \times ADD)} + 1\right)} \right) - 273,15$$

Rovnice 18 - výpočet Brightness Temperature

kde  $K2$  a  $K1$  jsou konstanty z termálního pásma B10,  $MULT$  je Radiance Multi Band,  $B10$  je termální pásmo,  $ADD$  je Radiance Add Band

### Land Surface Emissivity

Emisivita povrchu ukazuje fakt, že neexistují žádné materiály, které by byly dokonalá černá tělesa, neboť vyzařují záření v souladu se svými vlastnostmi. Schopnost materiálu vyzařovat záření lze vyjádřit jako poměr spektrální zářivosti materiálu a zářivosti černého tělesa při stejné teplotě. (Sobrino et al. 2004)

Do výpočtu emisivity vstupuje vypočtený vegetační kryt.

$$LSE = (0,004 \times VC) + 0,986$$

Rovnice 19 - výpočet Land Surface Emissivity (emisivita povrchu)

## Land Surface Temperature

Teplota povrchu nebo-li Land Surface Temperature (LST) je vypočtena jako podíl teploty záření a rovnice s využitím termálního pásma. Do této obecné rovnice vstupuje termální pásmo B10. Celý tento výpočet je následně vynásoben logaritmem vypočtené emisivity. (Avdan a Jovanovska 2016)

$$LST = \frac{BT}{1 + \frac{0,00115 \times B10}{1,4388}} \times \log(LSE)$$

Rovnice 20 - výpočet Land Surface Temperature (povrchová teplota)

## Net Radiation

Čisté záření je se rozumí jako rovnováha mezi energií přicházející a odcházející na určitém povrchu. Zahrnuje krátkovlnné i dlouhovlnné slunečního záření. Měření přímého záření pomáhá pochopit výměnu energie a má zásadní význam pro studie týkající se energetické bilance povrchu, evapotranspirace a fotosyntézy rostlin. (Ritter 2021)

$$Rn = RadShortIn - RadShortOut + RadLongOut - RadLongIn$$

Rovnice 21 - výpočet Net Radiation (čisté záření)

kde  $RadShortIn$  je hodnota přijatá ze senzoru,  $RadShortOut$  je vypočteno jako  $Albedo \times RadShortIn$ ,  $RadLongIn$  vypočteno jako  $EmisivityConstant (0,78) \times StefanBoltzmannConstant (0.0000000567) \times LST^4$ ,  $RadLongOut$  vypočteno jako  $LSE \times StefanBoltzmannConstant (0.0000000567) \times LST^4$

## Ground Heat Flux v.1

Prvním výpočtem G je pomocí metody SEBS. Více o této metodě v kapitole 3.1.3. Vzorec níže je upravený pro potřeby Pythonu. Koeficienty ve výpočtu jsou použity podle studie ze které tento model vychází. (Liu et al. 2022)

Dále do výpočtu vstupuje vypočtené čisté záření (Rn) a vegetační kryt (VC)

$$G_1 = Rn \times (0,05 + (1 - VC) \times (0,315 - 0,05))$$

Rovnice 22 - výpočet GHF (metoda SEBS)

## Ground Heat Flux v.2

Druhým způsobem výpočtu je za pomocí metody SEBAL. Více o této metodě v kapitole 3.1.3. Vzorec byl stejně jako u první metody výpočtu upraven pro potřeby Pythonu a koeficienty jsou použity také podle studie ze které vychází. (Bastiaanssen 2000)

Dále do výpočtu vstupují již vypočtené proměnné,  $LST$  (povrchová teplota),  $Alb$  (albedo vypočteno za pomocí Liangovy metody) a  $NDVI$ .

$$G_2 = \frac{LST}{Alb} \times ((0,0038 \times Alb) + (0,0074 \times Alb^2)) \times (1 - (0,98 \times NDVI^4))$$

Rovnice 23 - výpočet GHF (metoda SEBAL)

### Groung Heat Flux v.3

Posledním způsobem výpočtu G je způsob zjištění z přímého záření ( $R_n$ ). Povrch plně pokrytý zelení má obecně nižší hodnoty přímého záření než 10%. Z toho důvodu je vhodné vybrat právě těch 10%, jelikož tato hodnota funguje poměrně dobře bez ohledu na typu povrchu. (Santanello a Friedl 2003) Do výpočtu vstupuje vypočtené  $R_n$  a násobí se 10%.

$$G_3 = R_n \times 0,1$$

Rovnice 24 - výpočet GHF (metoda 10% z  $R_n$ )

## 5.5 Automatizace

Další část práce byla zaměřena na vytvoření programového kódu, který zautomatizuje výpočty, aby bylo následně potřeba pouze připojit složku se satelitními daty a celý proces se udělá na pozadí.

Skript se skládá ze 2 souborů **STCH.py** a **cal\_STCH.py**. První soubor slouží ke správnému načtení dat, a zjištění zda se v input složce (složka pro vstupní data) nacházejí nějaká data. Po zjištění, že se ve vstupní složce nacházejí data, proběhne ořezání dat o zájmovou oblast a následně prohledávání složky a hledání potřebných dat k průběhu skriptu. Předposlední část kódu slouží k načtení metadat jednotlivých snímků. Po správném načtení metadat jednotlivých snímků následuje část kódu, která slouží k vyvolání funkcí, které jsou definovány ve druhém souboru (**cal\_STCH.py**). Pokud vše proběhlo správně, ve složce output (složka s výstupními daty) se objeví vypočtené charakteristiky.

Výstupní snímky jsou pojmenovány jako *funkce\_DatumSnímkovacíhoDne* (příklad: NDVI\_20230709) ve formátu **.TIF**. Způsob jakým jsou pojmenovány výstupní snímky je z důvodu snazší orientace při zpracování více snímkovacích dní najednou.

Druhým souborem je soubor **cal\_STCH.py**, který slouží jako výpočetní část skriptu, ve kterém se nacházejí definované výpočty jednotlivých funkcí. Struktura a funkčnost tohoto skriptu je z větší části inspirována podle kódu, který vytvořila Nováková ve své diplomové práci s názvem KVANTIFIKACE EVAPOTRANSPIRAČNÍ A OCHLAZOVACÍ FUNKCE VEGETACE PROSTŘEDKY DPZ V OLOMOUCI A OKOLÍ. (Nováková 2021) Přesněji inspirované části jsou způsob, jakým jsou definovány funkce, struktura funkce (viz Obrázek 8), částečně i výpočet některých charakteristik a následné volání funkcí, které se nacházejí v druhém souboru s názvem **STCH.py**.

Script **cal\_STCH.py** začíná funkci k nalezení cesty k požadovaným souborům. Poté je zde funkce, která ořízne snímek na předem definovanou oblast zájmu. Dále obsahuje funkci, která výsledky georeferencuje podle předem nastavených kritérií a souřadnicového systému. Následuje vypočtení a převedení pásu do TOA\_Ref. Od tohoto bodu už probíhají pouze výpočty potřebné k finálním termálním charakteristikám. První termální charakteristikou je vypočtení albeda. Do obou metod vstupují vypočtené TOA\_Ref a jejich konstanty. Následuje vypočtení TOA\_Rad a NDVI podle obecné rovnice. Vypočtený NDVI dále vstupuje do výpočtů VC a LSE, kde je nedílnou součástí rovnice. Další zkoumanou termální charakteristikou byla povrchová teplota, do níž vstupuje již vypočtené LSE a BT a termální pásmo B10. Pro výpočet půdního termálního proudění je nezbytný také výpočet  $R_n$ , do kterého vstupují dvě konstanty (Stefan-Boltzmannova konstanta a konstanta emisivity). Za pomoci všech již vytvořených součástí skriptu bylo možné vytvořit části pro výpočet půdního teplotního proudění (GHF). První metodou byla metoda SEBS, do které vstupuje  $R_n$ ,  $V_c$  a obecné



konstanty. Druhou metodou, která byla složitější na výpočet byla metoda SEBAL, do které vstupuje Albedo, LST, celková přijatá radiace načtena z metadat, NDVI a termální pásmo B10. Poslední a zároveň i nejjednodušší metodou na script byla metoda Rn, do které vstupuje Rn a vynásobí se 10%.

Autor této práce vytvořil části scriptu, které počítají následující termální charakteristiky: LST, Albedo metodou podle Lianga i Tasumiho metodou, GHF metodou SEBS a Rn.

Na obrázku níže (Obrázek 8), lze vidět náhled programového kódu. Součástí každého výpočtu je prvně potřeba si definovat novou funkci, do které se vloží potřebné proměnné. Následuje načtení jednotlivých proměnných a samotný výpočet pro danou charakteristiku.

V poslední části kódu je již převedení výsledku do souboru **.TIF** (Tagged Image File Format) a následné georeferencování do správného souřadnicového systému. Poté už je výpočet hotov a následuje další část kódu v pořadí.

```
def LST(Emiss,Bright,B10_l1, out_folder, name = "LST"):
    Emiss_arr = np.array(tf.imread(Emiss))
    Bright_arr = np.array(tf.imread(Bright))
    B10_arr = np.array(tf.imread(B10_l1))

    calc_LST = (Bright_arr / (1 + ((0.00115 * B10_arr) / 1.4388) * log(Emiss_arr)))

    result_LST = os.path.join(out_folder, name + ".TIF")

    GeoRef(calc_LST, B10_l1, result_LST)

    return result_LST
```

Obrázek 8 – část programového kódu, výpočet LST (zdroj: vlastní tvorba)

## 6 VÝSLEDKY

Tato kapitola obsahuje podrobnou prezentaci zjištění, podpořenou vizuálními pomůckami, jako jsou mapy a grafy, které ilustrují prostorovou variabilitu termálních vlastností v různých krajinách. Rozhodným dnem pro výsledky jednotlivých metod byl vybrán den 9. 7. 2023 z důvodu čistých a jasných satelitních snímků a také z důvodu, že se jedná o teplejší letní den, ve kterém jsou přehlednější výsledky.

### 6.1 Výsledky výpočetních metod

Výstupem této bakalářské práce je soubor několika map zobrazujících výsledky jednotlivých funkcí, které jsou součástí celkových výpočtů vybraných termálních charakteristik. Plně rozlišení map se nachází jako Příloha 1 - Mapové výstupy

Výsledky jsou znázorněny za pomoci základních statistických ukazatelů, spojnicových grafů a tabulek, pro jednotlivé metody a termální charakteristiky. Analýzy změn jednotlivých termálních charakteristik v průběhu roku 2023 jsou provedeny pro 7 povrchů (asfalt, parkoviště, pole, šterk, travnatý povrch, zástavba, voda) a jsou znázorněny spojnicovými grafy. Zatímco výsledky pro rozhodný den jsou kategorizovány do povrchů (louky, ostatní, umělý povrch, vegetace, vodní povrch, zemědělství), jejich základní statistické ukazatele (minimální a maximální hodnoty, rozsah, průměr, medián a směrodatnou odchylku) jsou znázorněny v tabulkách pod nimi. Mapové výstupy jsou vytvořeny pro agregované povrchy v rozhodný den.

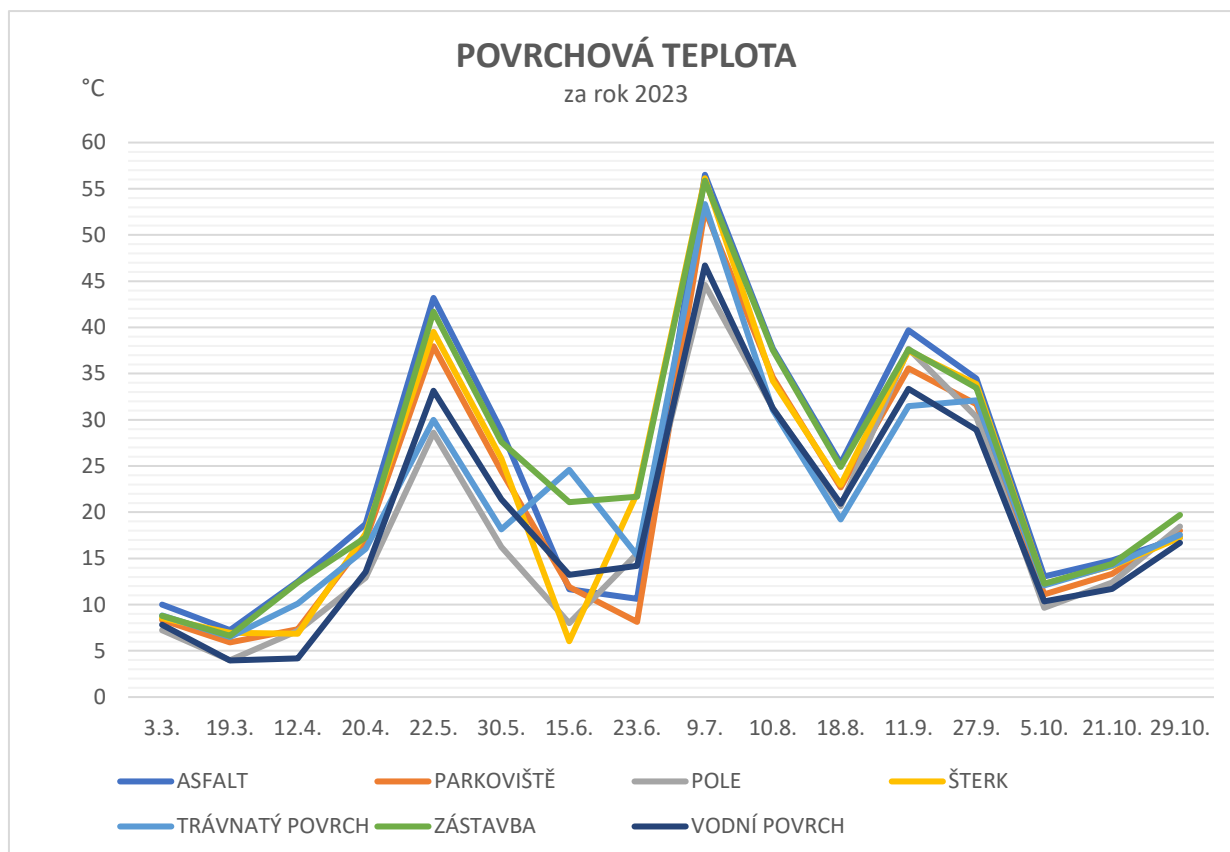
#### 6.1.1 Povrchová teplota – Land Surface Temperature (LST)

Graf výsledné povrchové teploty zobrazuje časový průběh povrchové teploty pro různé typy povrchů. Na ose  $x$  jsou zobrazeny dny, ve kterých proběhlo měření a na ose  $y$  je zobrazena povrchová teplota ve °C.

Z grafu níže (*Graf 1*) lze vyčíst, že povrchová teplota všech zkoumaných povrchů v průběhu roku se mění přibližně stejně a nenacházejí se zde žádné větší teplotní výkyvy. Jediným dnem, kdy se povrchová teplota výrazně změnila byl den 15. 6. 2023 a to pro povrchy: TRAVNATÝ POVRCH, ŠTĚRK a POLE, což mohlo být způsobeno sezonními trendy. Povrchové teploty během podzimu klesají. VODA a TRAVNATÝ POVRCH mají méně výrazné poklesy teplot než asfalt a parkoviště.

Nejvyšší povrchové teploty dosáhly povrchy ASFALT a PARKOVIŠTĚ, letních měsících, což může být způsobeno jejich fyzikálními vlastnostmi (nízké albedo a vysoká tepelná absorpce). VODA v průběhu roku dosahovala nízké a stabilní povrchové teploty, díky její schopnosti akumulovat teplo a pomalé změně teploty. Mírné sezónní výkyvy se objevily u povrchů TRAVNATÝ POVRCH a POLE.

Graf 1 - teplota povrchů v průběhu roku 2023 (zdroj: vlastní tvorba)



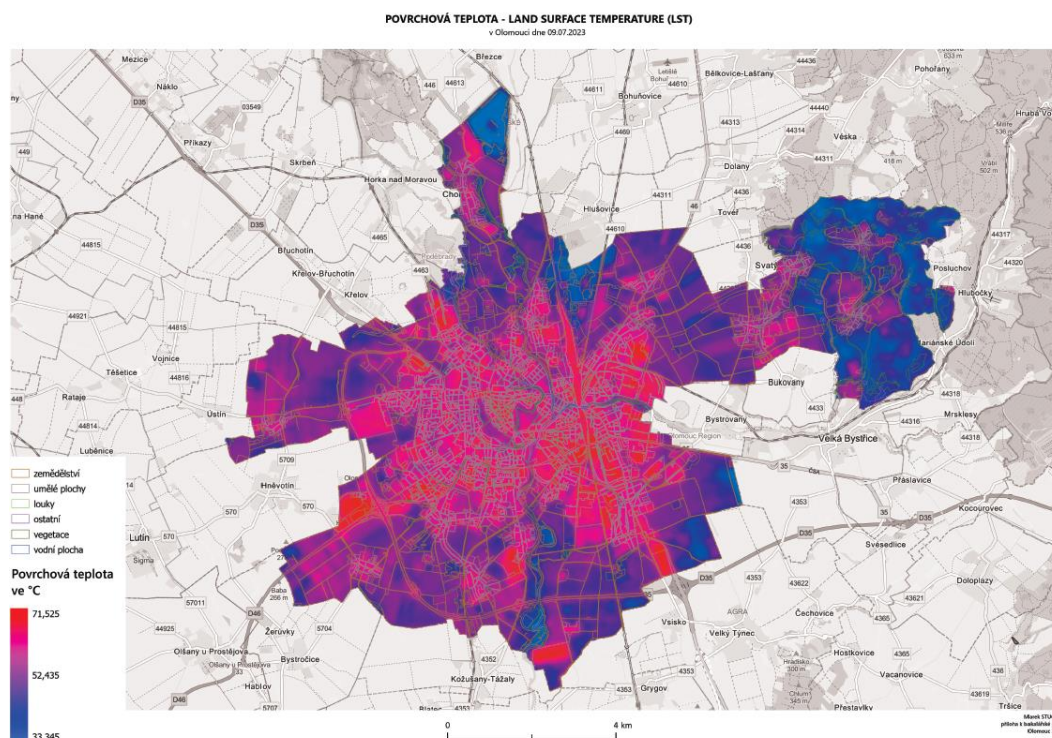
Z tabulky níže (Tabulka 9), která ukazuje statistické ukazatele povrchové teploty pro dané povrchy ke dni 9. 7. 2023 je patrné, že průměrná povrchová teplota většiny povrchů v letních měsících se pohybovala okolo 40°C. Nejvyšší průměrnou teplotu dosáhly povrchy umělé, které narozdíl od všech ostatních měly průměrnou teplotu větší než 50°C. Rozsah teplot je u většiny povrchů vyšší, v rozmezí 20-30°C, jedinou výjimkou je povrch LOUKY, který má rozsah teplot pouze 12,5°C, to může značit, že se louky ohřívají skoro rovnoměrně stejně a neobjevují se na nich výrazné teplotní výkyvy. Hodnota medián u všech povrchů je velmi blízká hodnotě průměrné teploty, to značí že rozdělení dat je symetrické, nebo-li není v nich výrazné zkreslení ani doleva ani doprava. Zároveň tyto výsledky značí, že se v datech pravděpodobně neobjevují extrémní hodnoty.

Povrchy UMĚLÝ POVRCH, VEGETACE, ZEMĚDĚLSTVÍ měly svou maximální teplotu podobnou a to okolo 70°C, zatímco OSTANÍ, VODNÍ POVRCH okolo 60°C. Jediným povrchem, který má výrazně nižší maximální teplotu a zároveň i nejnižší rozsah byl povrch LOUKY.

Směrodatná odchylka je u všech povrchů vyšší, to může vypovídat o vyšší variabilitě nebo rozmanitosti dat. Nejvyšší směrodatnou odchylku má povrch VODNÍ POVRCH, což indikuje, že hodnoty jsou vzdálenější od průměrné hodnoty oproti jiným povrchům. To mohlo být způsobeno tím, že do této kategorie zapadají jak stojaté tak i tekoucí vodní plochy. Tekoucí proud svou teplotu rychleji mění oproti na rozdíl od povrchu stojatého.

Tabulka 9 - statistické ukazatele výsledné povrchové teploty (zdroj: vlastní tvorba)

POVRCH	MINIMUM	MAXIMUM	ROZSAH	PRŮMĚR	MEDIAN	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA
louky	35,249	47,812	12,563	39,212	38,836	2,382
ostatní	34,467	59,328	24,861	41,291	40,192	4,206
umělý povrch	37,153	69,215	32,062	51,531	51,442	4,373
vegetace	33,830	67,944	34,114	40,151	38,884	3,917
vodní povrch	33,475	59,626	26,150	39,635	38,634	5,228
zemědělství	33,345	71,525	38,180	44,410	43,801	3,877



Obrázek 9 - náhled mapy povrchové teploty (zdroj: vlastní tvorba)

Na mapě povrchové teploty viz přílohy nebo náhled (Obrázek 9) je možné vidět, že povrchy vegetace mají výrazně nižší (odstíny modré) teplotu než povrchy umělé (odstíny červené). Velmi nízké teploty se nacházely na jihu města, kolem povodí řeky Moravy. Lze tedy říci, že povrchy, které v sobě obsahují vyšší množství vody se zahřívají pomaleji a jejich teplota je tedy nižší než na površích, které mají velmi nízký až nulový obsah vody (např. umělé plochy). Umělé povrchy se z velké části vyskytují v centru města. Tato informace je potvrzena i tím, že se zde nacházejí mnohem vyšší teploty a vyskytují se zde i teplotní ostrovy. To bude způsobeno vyšší absorpcí a udržitelností tepla jednotlivých umělých povrchů. Velmi vysokou teplotu má také plocha jihovýchodě města u dálnice D35, protože se zde nachází velké logistické centrum plné hal a je zde vyšší koncentrace kamionové dopravy, která povrch zahřívá rychleji.

### Závěr:

Zkoumání povrchových teplot různých typů povrchů poskytuje vhled do teplotní dynamiky městského a přírodního prostředí. Asfalt a parkoviště dosahují nejvyšších teplot, což může být důsledek vzniku teplotních ostrovů v centru města. Vodní povrchy vykazují stabilní a nižší teploty, což může být způsobeno prouděním vody. Travnaté povrchy a pole vykazují střední hodnoty teplot s mírnými výkyvy, což může být výhodné pro udržení příjemného mikroklimatu. Znalost povrchové teploty je nezbytná pro plánování a správu městského prostředí.

## 6.1.2 Albedo

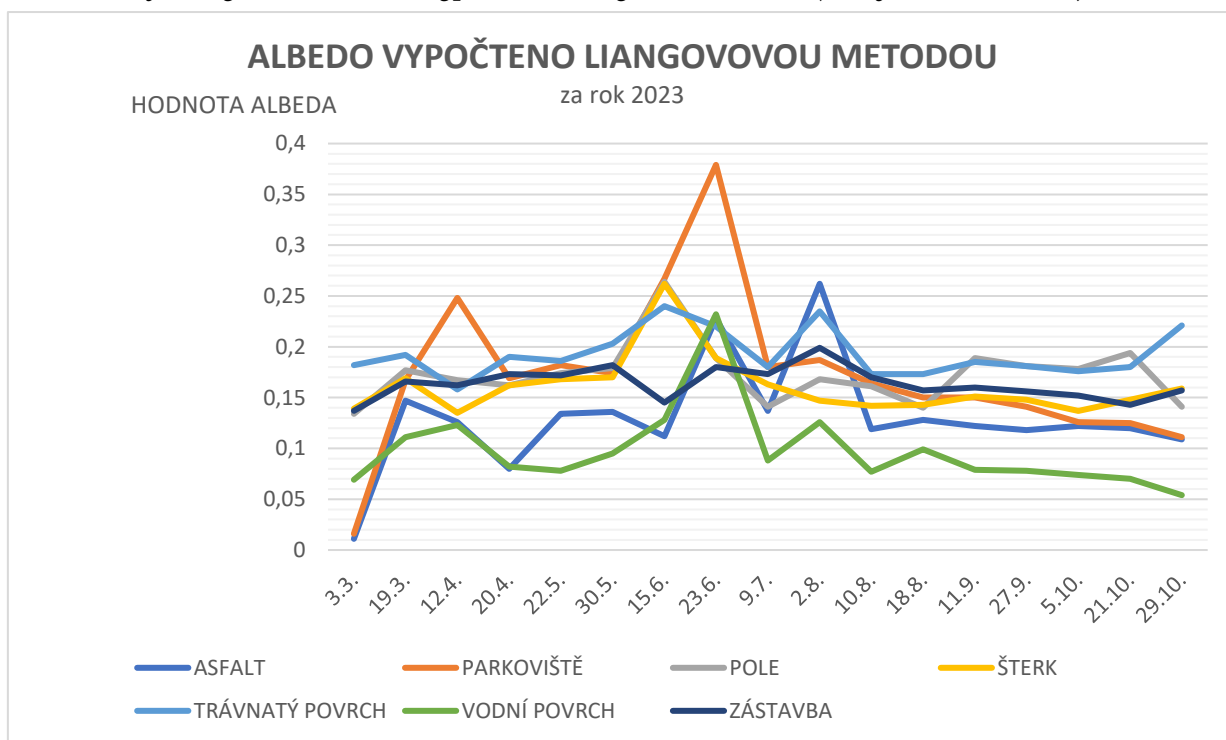
Grafy výsledného albeda povrchu zobrazují časový průběh změny albeda pro různé povrchy. Na ose  $x$  jsou zobrazeny dny, ve kterých proběhlo měření a na ose  $y$  je výsledná hodnota albeda.

### Liangova metoda

Výsledky výpočtu albeda Liangovou metodou jsou rozmanité, což je vidět na grafu níže (Graf 2). Výsledné hodnoty jednotlivých povrchů si nejsou podobné a lze z nich tedy vyčíst o jaký povrch se může jednat.

S vrcholem léta také výrazně stoupá hodnota albeda některých povrchů. Nejvyššího albeda 37,9 % dosáhl povrch PARKOVIŠTĚ ve dne 23.6., což může být způsobeno vysokou reflexivitou povrchu. Tento povrch je složen ze světlých stěrkových materiálů. Většina povrchů v tento den má výrazně vyšší hodnotu albeda, výjimkami jsou povrchy ŠTĚRK a TRÁVNATÁ PLOCHA, které hodnotu albeda mají nižší. Na podzim hodnoty klesají a objevují se pouze menší výkyvy. Povrchy ASFALT a VODA dosahují nižších hodnot albeda, což naznačuje vyšší absorpci slunečního záření a nižší odrazivost.

Graf 2 - výsledné albedo vypočteno Liangovou metodou (zdroj: vlastní tvorba)



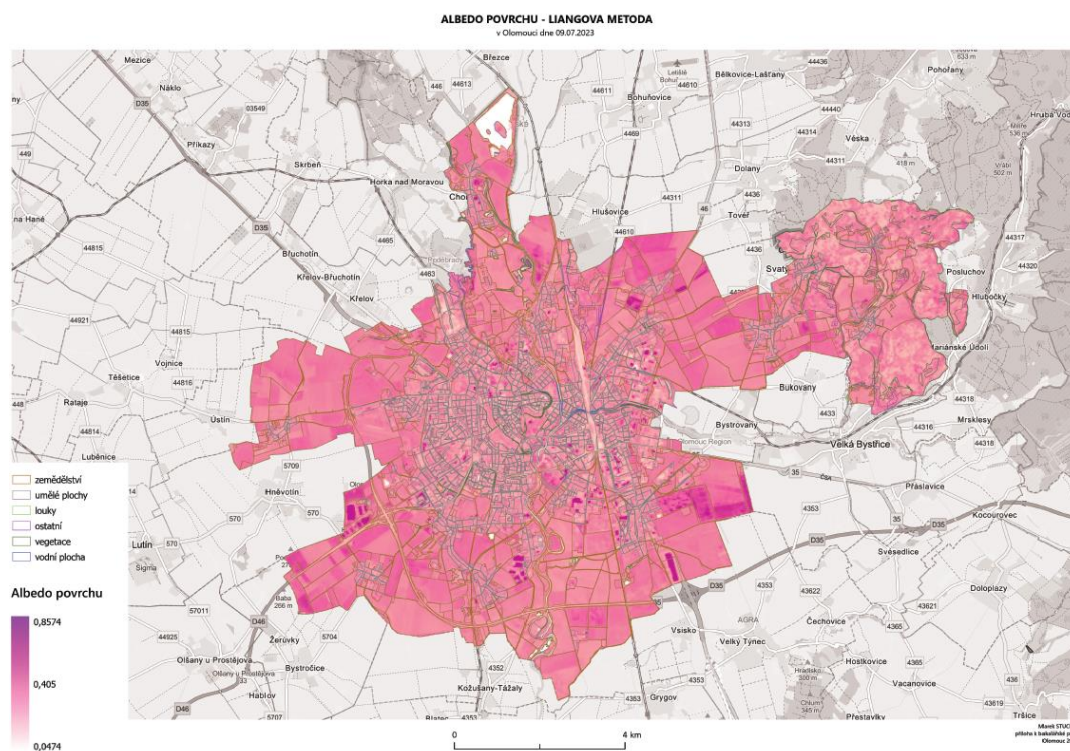
Z níže uvedené tabulky (Tabulka 10) je možné vyčíst, že nevegetační povrchy mají větší rozsah hodnot zatímco VEGETACE a LOUKY je mají nejmenší. To také značí, že mají nižší udržitelnost tepla, než povrchy umělé.

Směrodatné odchylky jsou decentně vyšší než u Tasumiho metody a mohou indikovat trochu vyšší rozptýlenost dat, to znamená že data jsou dále průměru. Zároveň, ale průměrné hodnoty jsou velmi blízké mediánu, což ukazuje symetrické rozdělení výsledných dat. Rozsah hodnot ve většině případů je malý, pouze u povrchu UMĚLÝ POVRCH je výrazně vyšší, což je způsobeno vysokou maximální hodnotou.



Tabulka 10 - statistické ukazatele výsledného albeda – Liangova metoda (zdroj: vlastní tvorba)

POVRCH	MINIMUM	MAXIMUM	ROZSAH	PRŮMĚR	MEDIAN	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA
louky	0,092	0,216	0,124	0,170	0,171	0,014
ostatní	0,084	0,282	0,198	0,176	0,176	0,015
umělý povrch	0,056	0,857	0,801	0,162	0,161	0,024
vegetace	0,104	0,259	0,155	0,166	0,167	0,018
vodní povrch	0,047	0,308	0,260	0,110	0,111	0,042
zemědělství	0,076	0,437	0,361	0,182	0,179	0,018



Obrázek 10 - náhled mapy albedo - Liangova metoda (zdroj: vlastní tvorba)

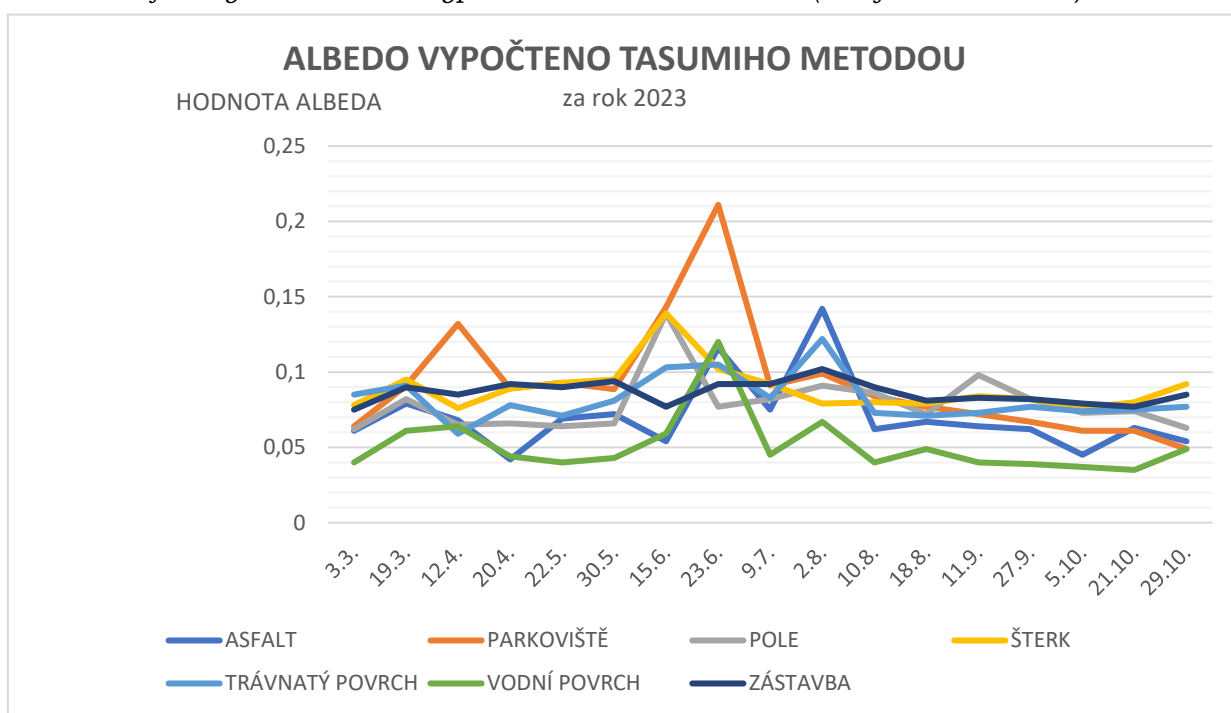
Na mapě albeda vypočteného metodou podle Lianga viz přílohy nebo náhled (Obrázek 10) lze vidět skoro až bílou plochu na severu města Olomouce. Jedná se o Chomoutovské jezero o čemž vypovídá i velmi nízká hodnota albeda, protože fyzikální chování vody je takové, že se chová skoro jako absolutně černé těleso a tak pohlcuje velkou většinu dopadajícího záření. Velmi vysokého albeda dosáhl povrch UMĚLÉ PLOCHY na jihovýchodě města u dálnice D35, kde se nachází velké logistické centrum. Toto je způsobeno velmi světlými plochami střech, parkovišť. Podobně vysoké albedo bylo také zaznamenáno na západě města, kde se taktéž nachází průmyslová oblast s velkou koncentrací hal se světlými střechami. Zároveň nižších hodnot dosáhlo centrum města, které je tvořeno převážně umělými plochami, ale na rozdíl od hal se zde nacházejí tmavší plochy a střechy, které záření více pohlcují. V severo-východní lokalitě okolo Svatého Kopečku je albedo různorodé, ale z výsledků lze vyčíst, kde se přibližně nacházejí plochy s vysokou vegetací, protože tato místa mají albedo nižší, na rozdíl od povrchu LOUKY případně ZEMĚDĚLSTVÍ.

## Tasumiho metoda

Z výsledků této metody, lze vyčíst, že tato metoda oproti metodě Liang, je více konstantní a nemá výrazné výkyvy hodnot. Dále výsledky této metody, které lze vidět v grafu níže (Graf 3) ukazují, že hodnoty jednotlivých povrchů si jsou podobné a rozdíly mezi nimi jsou minimální. Z výsledků lze usoudit, že tato metoda nebude příliš vhodná, pro výpočet albeda v podnebných podmínkách, ve kterých se nachází město Olomouc, ale že bude vhodnější pro jiné oblasti. Důvodem je fakt, že samotná metoda byla testována vůči produktu MODIS pouze ve státech střední Ameriky (Mexiko, Florida a Idaho) (Tasumi et al. 2008), které se nacházejí v subtropickém pásmu, zatímco Olomouc je v pásmu mírném.

Nejvyšší hodnoty albeda dosáhl stejně jako u předešlé metody povrch PARKOVIŠTĚ. Což může být důsledek reflexních materiálů použitého povrchu. Povrchy ASFALT a VODA dosáhly stejně jako u předešlé metody nižších hodnot oproti ostatním povrchům

Graf 3 - výsledné albedo vypočteno Tasumiho metodou (zdroj: vlastní tvorba)

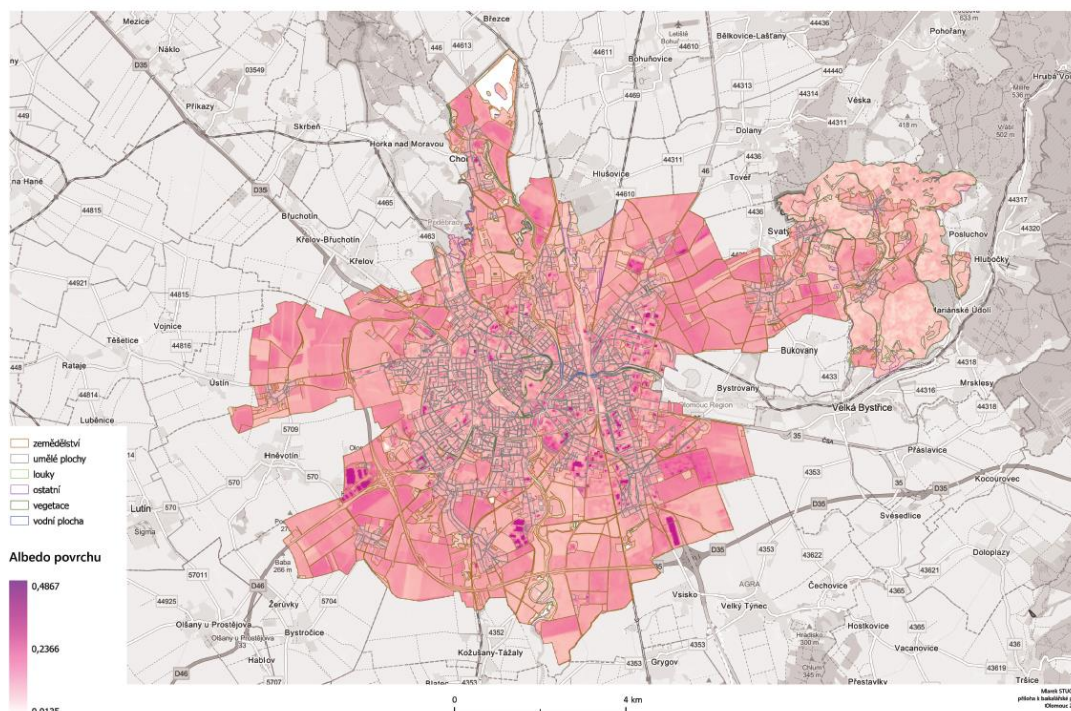


Z tabulky níže (Tabulka 11) je patrné, že směrodatné odchylky jsou velmi nízké, což indikuje nízkou variabilitu výsledných dat. Tato hodnota dále indikuje nižší rozptýlenost dat, to znamená, že data jsou blízka průměru. Zároveň také průměrné hodnoty jsou velmi blízké mediánu, což ukazuje symetrické rozdělení výsledných dat. Rozsah hodnot ve většině případů je malý, pouze u povrchu UMĚLÝ POVRCH je výrazně vyšší, což je způsobeno vysokou maximální hodnotou, stejně jako u předešlé metody.

Tabulka 11 - statistické ukazatele výsledného albeda – Tasumiho metoda (zdroj: vlastní tvorba)

POVRCH	MINIMUM	MAXIMUM	ROZSAH	PRŮMĚR	MEDIAN	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA
louky	0,042	0,089	0,047	0,065	0,065	0,005
ostatní	0,040	0,166	0,126	0,069	0,068	0,008
umělý povrch	0,014	0,487	0,473	0,079	0,076	0,015
vegetace	0,047	0,141	0,094	0,065	0,065	0,007
vodní povrch	0,028	0,173	0,146	0,050	0,050	0,015
zemědělství	0,039	0,254	0,216	0,084	0,083	0,013

#### ALBEDO POVRCHU - TASUMIHO METODA v Olomouci dne 09.07.2023



Obrázek 11 - náhled mapy albedo - Tasumiho metoda (zdroj: vlastní tvorba)

Na mapě albeda vypočteného Tasumiho metodou viz přílohy nebo náhled (Obrázek 11) lze vidět velká podobnost ve výsledcích jako u předešlé metody. Velmi nízké albedo na vodním povrchu na severu města Olomouc a kolem řeky Moravy. Velmi vysoké albedo v průmyslových oblastech se světlými plochami. Na rozdíl od předešlé metody má centrum města konzistentnější výsledky a není zde vidět takový rozdíl albeda oproti mimo městským oblastem. V lokalitě okolo Svatého Kopečku je narozdíl od předešlé metody výraznější albedo u umělých ploch a zároveň více rozpoznatelné jsou i vegetační plochy oproti plochám zemědělským. Na povrchu ZEMĚDĚLSTVÍ, které se nachází východně od centra u silnice 35 nejsou takové výkyvy hodnot jako u metody podle Lianga. Výsledky této metody mají sice nižší hodnoty albeda než u metody předešlé, nicméně mapové výsledky jsou u této metody čitelnější a lépe rozpoznatelné.

#### Srovnání použitých metod

Liangova metoda vykazuje širší rozsah hodnot albeda (až 0,39), zatímco Tasumiho metoda má užší rozsah (až 0,22). Obě metody ukazují podobné sezónní trendy, ale absolutní hodnoty se liší. Obě metody ukazují vyšší hodnoty albeda pro povrchy PARKOVIŠTĚ a ŠTĚRK, což může být důsledkem jejich vyšší reflexivity. ASFALT a VODA mají v obou případech nižší hodnoty albeda, což odpovídá jejich fyzikálním absorpčním vlastnostem. Vegetační povrchy střední hodnoty albeda s menšími sezónními výkyvy.

#### Závěr

Albedo vypočtené Liangovou a Tasumiho metodou poskytují důležitý vhled do reflexních vlastností vybraných povrchů. Výsledné hodnoty se mezi metodami výrazně neliší, sezónní trendy a relativní rozdíly mezi povrchy jsou konzistentní. Tyto informace jsou důležité pro výběr správné metody při analýze klimatických vlivů různých povrchů v daném regionu.



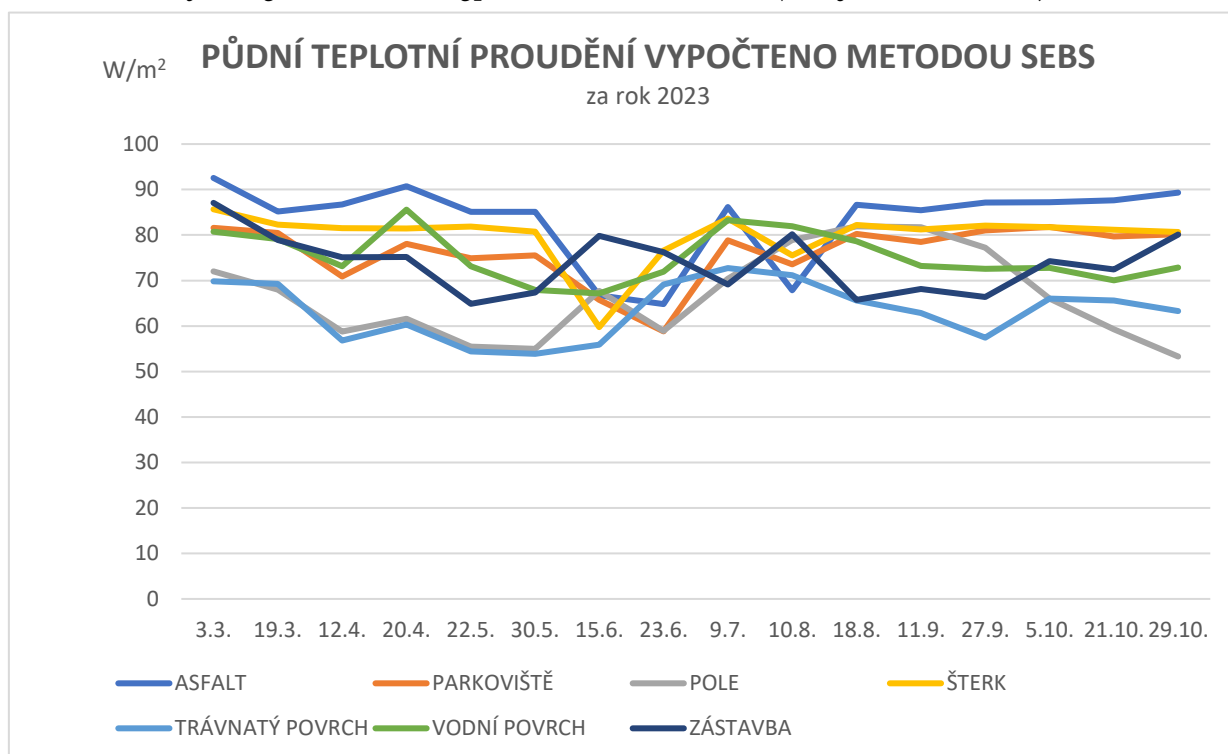
### 6.1.3 Půdní teplotní proudění – Ground Heat Flux (GHF)

Grafy výsledného Ground Heat Flux (GHF) zobrazují časový průběh teplotního proudění pro různé typy povrchů. Na ose  $x$  jsou zobrazeny dny, ve kterých proběhlo měření a na ose  $y$  je zobrazeno množství teplotního proudění ve  $W/m^2$ .

#### Metoda SEBS

Výsledky výpočtu půdního teplotního proudění metodou SEBS jsou rozmanité, což je vidět na grafu níže (Graf 4). Výsledné hodnoty ukazují značné sezónní výkyvy s propadem na začátku letních měsíců, ale během léta se také vyskytl vzrůst hodnot. Během podzimu nastává ustálení a stabilizace podobná jako je na jaře. Vyšších hodnot teplotního proudění dostaly povrchy ASFALT a PARKOVIŠTĚ, což naznačuje vysokou schopnost akumulace tepla. Nejnižších hodnot dosáhl povrch TRÁVNATÝ POVRCH, který během celého roku nevykazoval výrazné výkyvy krom letních měsíců. Jeho nižší hodnoty mohou naznačovat menší schopnost akumulace tepla. VODNÍ POVRCH zaznamenal stabilnější a střední hodnoty, ale objevil se zde vzrůstající výkyv v měsíci duben a stejně jako všechny ostatní povrchy v letních měsících.

Graf 4 - výsledné GHF, vypočteno SEBS metodou (zdroj: vlastní tvorba)

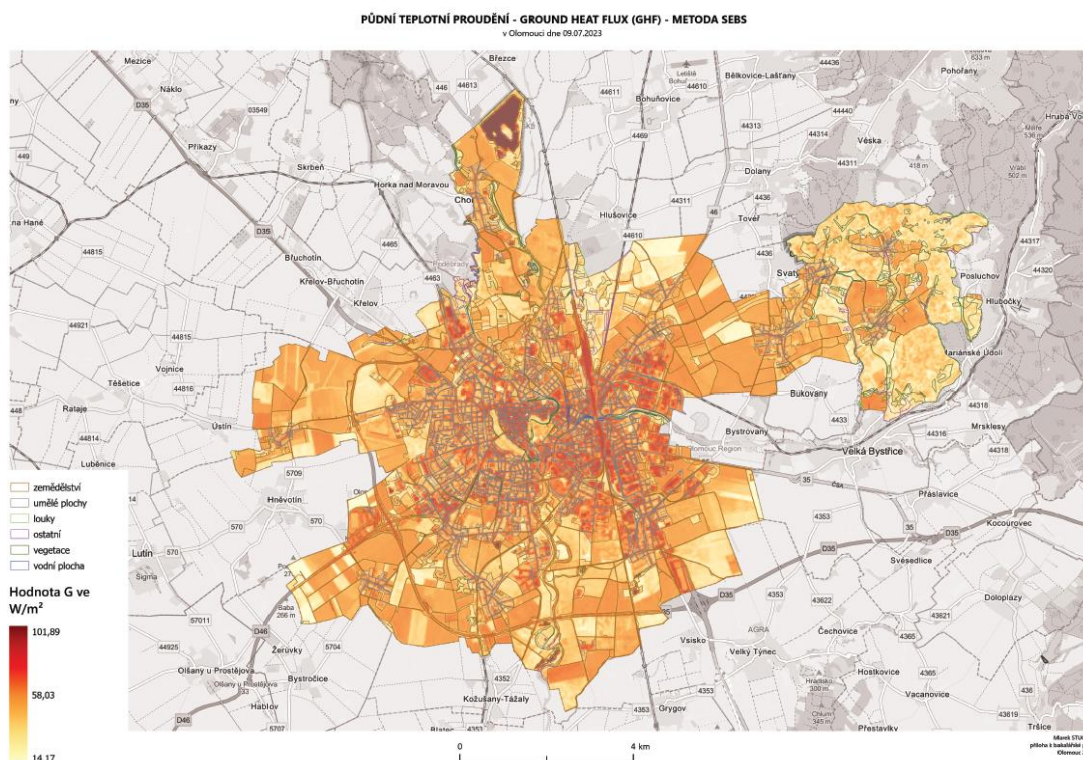


Základní statistické ukazatele teplotního proudění, vypočteny metodou SEBS se nacházejí v tabulce níže (Tabulka 12). Z tabulky je patrné, že nejnižšího minimálního teplotního proudění dosáhl povrch UMĚLÝ POVRCH, ten ale zároveň dosáhl taky skoro nejvyššího maximálního teplotního proudění. Nejvyšší půdní teplotní proudění bylo naměřeno na povrchu VODNÍ POVRCH, jehož hodnota byla větší než  $100 W/m^2$ . Rozsah hodnot ve většině případů je větší. Největší rozsah se objevuje u povrchu UMĚLÝ POVRCH, což je způsobeno nízkou minimální hodnotou a zároveň vysokou maximální hodnotou. Zároveň také průměrné hodnoty jsou podobné mediánu, což ukazuje

symetrické rozdělení výsledných dat. Směrodatné odchylky jsou vyšší než u metody Rn, ale zároveň nižší než u metody SEBAL. Největší směrodatná odchylka byla naměřena u povrchu VODNÍ POVRCH, což indikuje vysoké rozptýlení dat okolo průměru a jednotlivé hodnoty dat se výrazně liší od průměru.

Tabulka 12 - statistické ukazatele výsledného GHF – SEBS metoda (zdroj: vlastní tvorba)

POVRCH	MINIMUM	MAXIMUM	ROZSAH	PRŮMĚR	MEDIAN	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA
louky	52,456	80,621	28,165	59,925	59,260	3,300
ostatní	49,721	85,298	35,577	61,404	60,520	5,026
umělý povrch	14,174	97,469	83,295	75,062	75,323	6,484
vegetace	50,074	89,985	39,911	62,525	62,009	4,965
vodní povrch	51,053	101,890	50,837	80,637	78,422	13,818
zemědělství	47,256	94,079	46,824	68,252	70,121	6,534



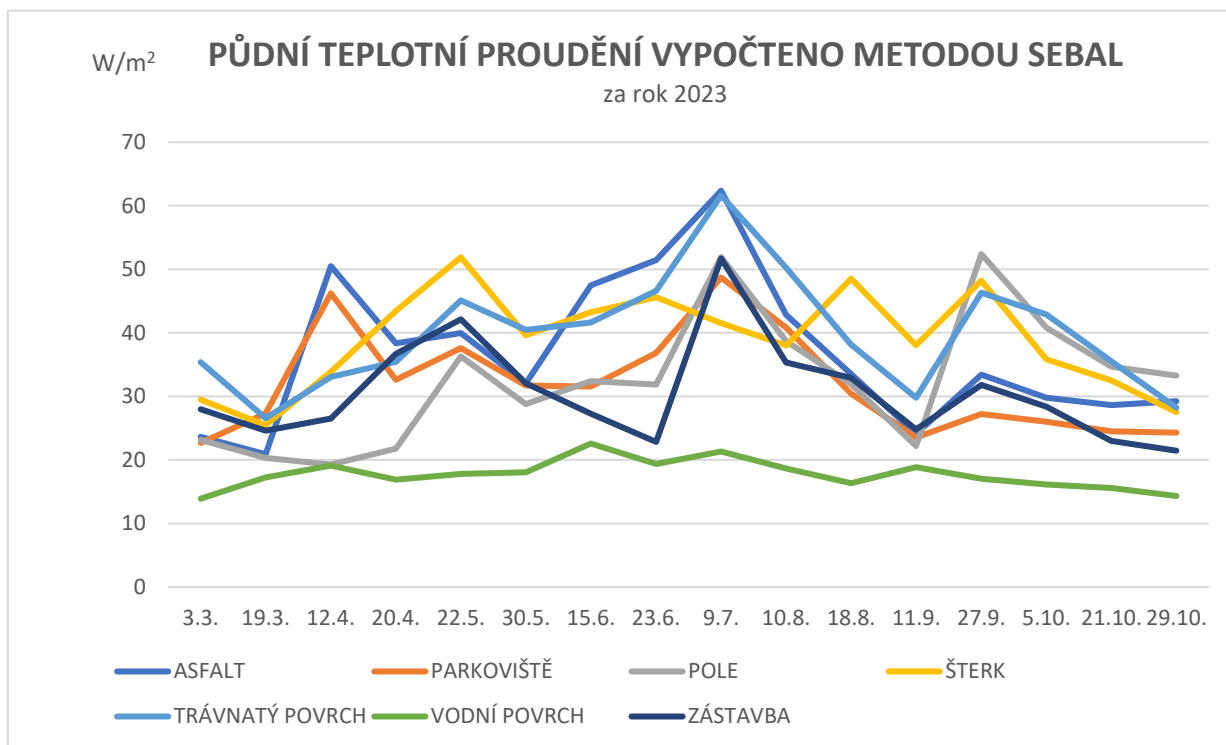
Obrázek 12 - náhled mapy GHF - SEBS metoda (zdroj: vlastní tvorba)

Na mapě půdního teplotního proudění vypočteno metodou SEBS viz přílohy nebo náhled (Obrázek 12) lze vidět extrémní hodnoty na vodních plochách a výrazně vyšší půdní teplotní proudění v centru města a na železnici. Jako jediná metoda má zvýšené G průmyslových oblastech, ale ne na střechách, ale na plochách kolem nich. To může značit, že silnice a podobné plochy (asfalt, dlažební kostky,...) mají vyšší teplotní absorpci oproti střešní krytině na halách. Celkově výsledky touto metodou mají vyšší hodnoty G na povrchu UMĚLÉ PLOCHY oproti zbylým metodám. Půdní teplotní proudění na plochách ZEMĚDĚLSTVÍ je různé a tudíž poukazuje na důležitost znalosti plodiny, která se na dané ploše nachází, protože každá plodina má jiné nároky na půdu a jinak udržuje teplo. Vegetační plochy mají výsledné G také různé a záleží, zda je G měřeno pro vysokou vegetaci nebo plochu, která je pokryta pouze nízkou vegetací případně travnatým povrchem. Toto tvrzení je také potvrzeno oblastí u Svatého Kopečku, kdy místa s vysokou vegetací mají větší výsledné G oproti zbylým místům.

## Metoda SEBAL

Na grafu níže (Graf 5) je možné vidět, že nejvyšší teplotní proudění metodou SEBAL bylo zaznamenáno v červenci pro všechny typy povrchů. Postupný pokles hodnot začal se začátkem podzimu, ale nejnižší teplotní proudění bylo zaznamenáno v měsíci březen. Povrchy ASFALT, PARKOVIŠTĚ a ŠTĚRK zaznamenaly vyšší hodnoty půdního teplotního proudění, což naznačuje vyšší absorpci a následný tepelný tok. VODNÍ POVRCH zaznamenal nejnižší a nejstabilnější hodnoty bez výrazných výkyvů.

Graf 5 - výsledné GHF, vypočteno SEBAL metodou (zdroj: vlastní tvorba)



Rozdílnost oproti ostatním metodám může být způsobena tím, že metoda SEBAL je přizpůsobená na letní měsíce pro jiné podnebné podmínky, přesněji byla vyvinuta pro měření teplotního proudění v dolním povodí řeky Gediz v západním Turecku. (Bastiaanssen 2000) K potvrzení této informace také pomáhá fakt, že v letních měsících výsledné G dosahuje mnohem vyšších hodnot, než v průběhu roku.

Z tabulky (Tabulka 13) lze vyčíst základní statistické ukazatele půdního teplotního proudění, vypočteny metodou SEBAL. Minimální hodnoty půdního teplotního proudění jsou výrazně nižší než u zbylých dvou metod. Nejnižšího minimálního teplotního proudění dosáhl povrch VODNÍ POVRCH, což může ukazovat nižší absorpci tepla. Zároveň většina povrchů má mnohem vyšší maximální hodnoty, než u jiných metod. Pouze dva povrchy mají maximální hodnoty okolo 70.

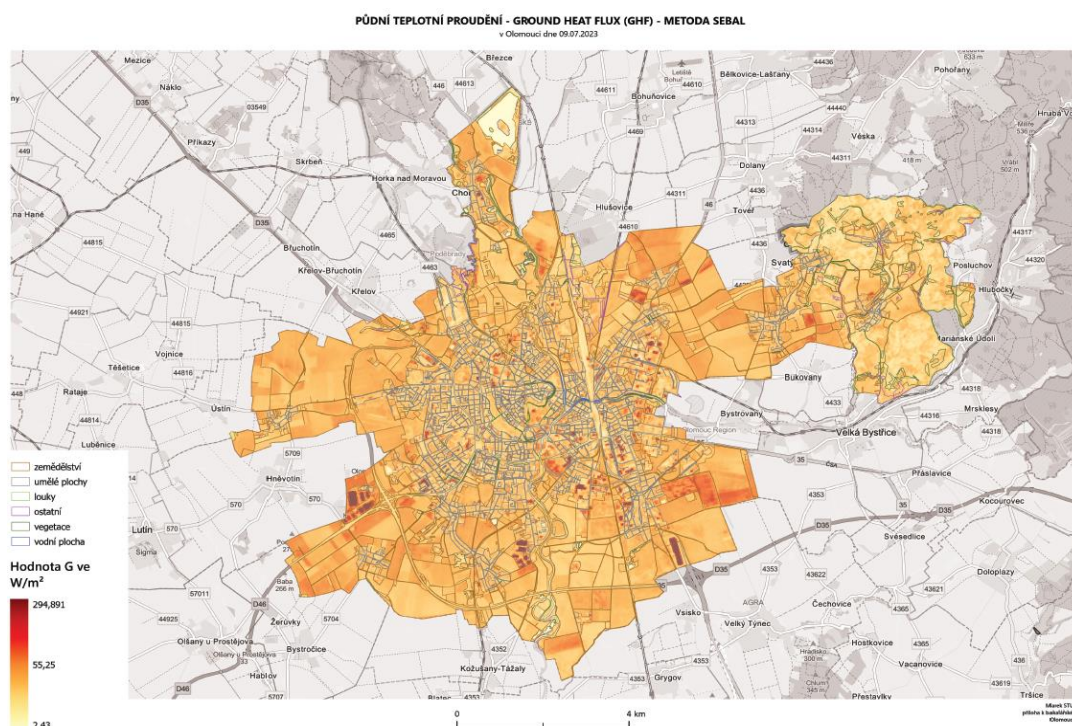
Rozsah hodnot ve většině případů je velký. Největší rozsah je u povrchu UMĚLÝ POVRCH, což je způsobeno velmi nízkou minimální hodnotou a zároveň velmi vysokou maximální hodnotou. Průměrné hodnoty jsou u většiny povrchů velmi blízké mediánu, což ukazuje symetrické rozdělení výsledných dat. Povrchy VODNÍ POVRCH a ZEMĚDĚLSTVÍ mají větší rozdíl mezi mediánem a průměrem, což může indikovat, že data nemají normální rozdělení a jejich průměr není tak robustní jako u zbylých



povrchů. Směrodatné odchylky jsou vyšší, což indikuje vysoké rozptýlení dat okolo průměru, což znamená, že jednotlivé hodnoty se výrazně liší od průměru.

Tabulka 13 - statistické ukazatele výsledného GHF – SEBAL metoda (zdroj: vlastní tvorba)

POVRCH	MINIMUM	MAXIMUM	ROZSAH	PRŮMĚR	MEDIAN	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA
louky	10,296	70,856	60,560	41,551	41,641	7,299
ostatní	9,162	178,847	169,685	46,589	46,636	10,071
umělý povrch	4,290	294,891	290,619	48,343	44,934	27,930
vegetace	14,103	134,285	120,181	40,483	40,651	10,143
vodní povrch	2,425	213,753	211,327	20,136	16,885	16,164
zemědělství	7,063	72,253	65,189	54,167	51,381	15,155



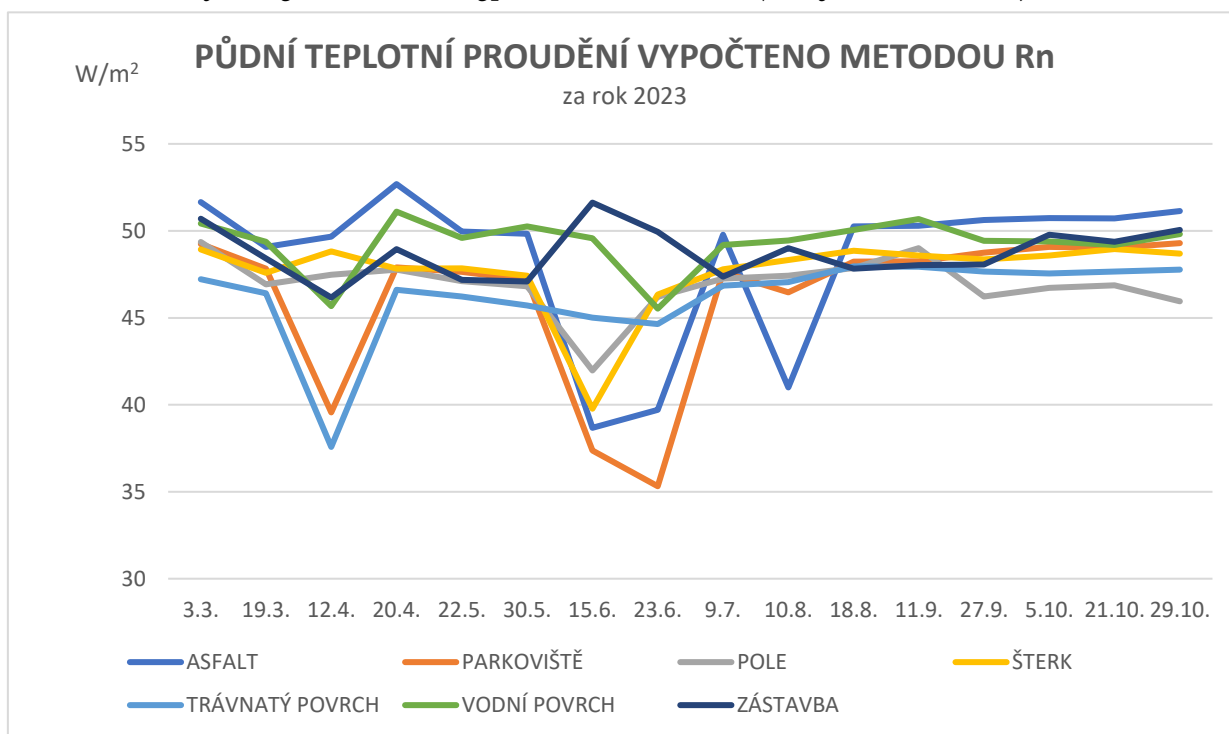
Obrázek 13 - náhled mapy GHF - SEBAL metoda (zdroj: vlastní tvorba)

Na mapě půdního teplotního proudění vypočteno metodou SEBAL viz přílohy nebo náhled (Obrázek 13), lze vidět výrazný rozdíl oproti zbylým metodám. Jako jediná metoda má výrazně nižší hodnoty G na vodní ploše u Chomoutovského jezera a na železnici v centru města. Jako jediná metoda zvýrazňuje a má extrémní hodnoty v průmyslových oblastech. Umělé plochy v centru města neobsahují extrémy a jsou velmi podobné. Výsledky ve vegetační oblasti na severovýchodě u Svatého Kopečku jsou podobné jako u metody SEBS. Některá zemědělská místa např. u silnice 35 mají vyšší půdní teplotní proudění, než u metody SEBS, to může znamenat, že tato metoda je vhodnější například na jiný druh plodin než metoda SEBS. Výsledky jsou zároveň na jednotlivých plochách poměrně konzistentní a nevyskytují se na nich žádné extrémy, což může značit souměrné teplotní proudění na celé ploše daného povrchu. Umělé plochy jako asfaltové silnice mají nízkou hodnotu G oproti zbylým metodám. Tato informace by znamenala, že teplotní proudění v asfaltové silnici je nižší než např. ve vegetaci, což vzhledem k výsledkům zbylých dvou metod je nepravděpodobné.

## Metoda Rn

Průběh půdního teplotního proudění za rok 2023 vypočtené metodou Rn, jsou uvedeny v grafu níže (Graf 6). Během roku 2023 se objevily 3 dny (12.4.;15.6.;23.6.) ve kterých mají povrchy (ASFALT, PARKOVIŠTĚ a TRAVNATÝ POVRCH) výrazně nižší půdní teplotní proudění než ostatní povrchy. Povrch ASFALT ještě jednou během roku vykazoval nižší půdní teplotní proudění než všechny ostatní zkoumané povrchy. Zároveň také vykázal nejvyšší půdní teplotní proudění ze všech povrchů a to dne 20.4. Ostatní povrchy nevykazují žádné výrazné změny a jejich průběh během roku je spíše konstantní.

Graf 6 - výsledné GHF, vypočteno Rn metodou (zdroj: vlastní tvorba)



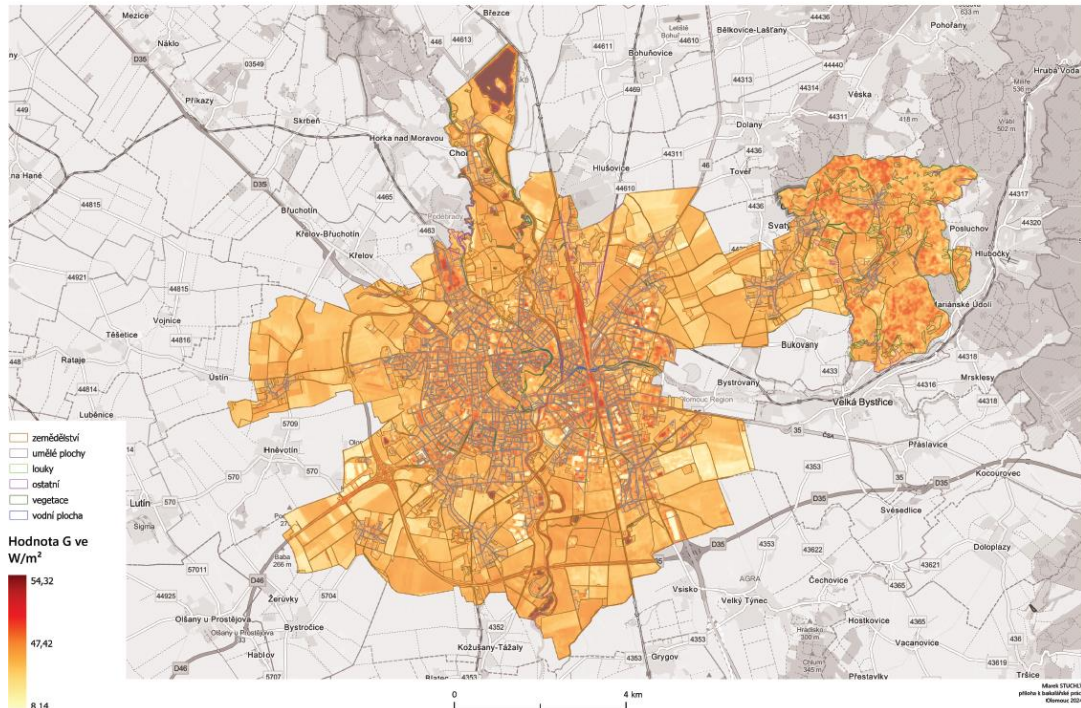
Tabulka níže (Tabulka 14) ukazuje statistické ukazatele výsledného půdního teplotního proudění vypočteno metodou Rn. Nejnižší půdní teplotní proudění se objevilo na povrchu UMĚLÝ POVRCH. Dále je z výsledků patrné, že povrch VODNÍ POVRCH má nejvyšší průměrné teplotní proudění, ale zároveň i největší směrodatnou odchylku, což indikuje vyšší variabilitu než u jiných povrchů. Směrodatné odchylky jsou velmi nízké, což indikuje nízkou variabilitu celkových výsledných dat. Tato hodnota dále indikuje nižší rozptýlenost dat. Zároveň také průměrné hodnoty jsou velmi blízké mediánu, což ukazuje symetrické rozdělení výsledných dat. Rozsah hodnot ve většině případů je malý, pouze u povrchu UMĚLÝ POVRCH je výrazně vyšší, což je způsobeno velmi nízkou minimální hodnotou, stejně jako u předešlé metody.

Tabulka 14 - statistické ukazatele výsledného GHF – Rn metoda (zdroj: vlastní tvorba)

POVRCH	MINIMUM	MAXIMUM	ROZSAH	PRŮMĚR	MEDIAN	SMĚRODATNÁ ODCHYLKA
louky	44,689	51,748	7,058	47,312	47,251	0,772
ostatní	40,947	52,241	11,294	47,012	46,977	0,851
umělý povrch	8,143	53,831	45,687	47,764	47,867	1,364
vegetace	42,269	51,086	8,817	47,562	47,510	1,032
vodní povrch	39,488	54,322	14,834	50,735	50,720	2,410
zemědělství	32,123	52,664	20,541	46,650	46,800	1,014

#### PŮDNÍ TEPLOTNÍ PROUDĚNÍ - GROUND HEAT FLUX (GHF) - METODA Rn

v Olomouci dne 09.07.2023



Obrázek 14 - náhled mapy GHF - Rn metoda (zdroj: vlastní tvorba)

Na mapě půdního teplotního proudění vypočteno metodou Rn viz přílohy nebo náhled (Obrázek 14), lze vidět, že jako jediná metoda má výrazně nízké hodnoty v průmyslových oblastech, ale stejně jako metoda SEBS má extrémní hodnoty na vodních plochách a vyšší hodnoty na železnici v centru města. Zároveň tato metoda oproti ostatním má vyšší hodnoty na vegetačních plochách, jako například v okolí Svatého Kopečku. Půdní teplotní proudění ve Smetanových sadech je nejvyšší touto metodou, zatímco v Holickém lese je G ve všech metodách velmi podobný. Plochy **ZEMĚDĚLSTVÍ** vykazují podobné chování půdního teplotního proudění jako metoda SEBS, akorát s nižšími hodnotami oproti SEBS metodě. **UMĚLÝ POVRCH** v centru města zaznamenal občasný výkyv teplotního proudění, ale převážně je zde půdní teplotní proudění velmi podobné. Asfaltové plochy mají stejně jako u metody SEBS nárůst G.

### Srovnání použitých metod

Všechny tři metody vykazují sezónní nárůst hodnot teplotního proudění během jara a léta, s vrcholy v červenci. Pokles půdního teplotního proudění přichází u všech metod s nástupem podzimu, přičemž metoda Rn je nejstabilnější a má nejmenší výkyvy hodnot.

Nejvyšší hodnoty teplotního proudění zaznamenaly povrchy **ASFALT** a **PARKOVIŠTĚ** u metod SEBAL a SEBS. Metoda Rn vykazuje nižší, ale za to stabilnější hodnoty. Nejstabilnějším povrchem se jeví povrch **VODNÍ POVRCH**, který má nízké hodnoty ve všech metodách, což je důsledek vysoké tepelné kapacity vody. Průměrných hodnot dosahují povrchy **TRAVNATÝ POVRCH** a **POLE** s menšími sezónními výkyvy. Metoda SEBS vykazuje větší variabilitu u těchto povrchů v průběhu roku než ostatní metody.

Metody SEBAL i SEBS vykázaly širší rozsah hodnot a větší sezónní výkyvy než metoda Rn, což může naznačovat jinou citlivost na dopadající záření a povrchové vlastnosti. Zároveň metoda Rn má tedy užší rozsah hodnot a je stabilnější, což může být vhodné pro konzistentní a méně variabilní data. Také oproti ostatním dvěma metodám má nejnižší směrodatné odchylky, což může značit nižší rozptýlenost dat od průměru.

## **Závěr**

Porovnání metod SEBS, SEBAL a  $R_n$  pro výpočet půdního teplotního proudění ukazuje, že všechny tři metody poskytují užitečné informace, ale liší se v rozsahu hodnot a sezónních výkyvech. Sezónní vlivy, materiálové vlastnosti a schopnost akumulace tepla ovlivňuje teplotní chování jednotlivých povrchů. Metody SEBAL a SEBS vykazují větší sezónní variabilitu, což může být užitečné při analýze sezónních změn. Zatímco metoda  $R_n$  poskytuje stabilnější hodnoty, což může být výhodné například pro dlouhodobé monitorování. Výběr vhodné metody závisí na konkrétním použití a potřebách analýzy.



## 6.2 Validace výsledků

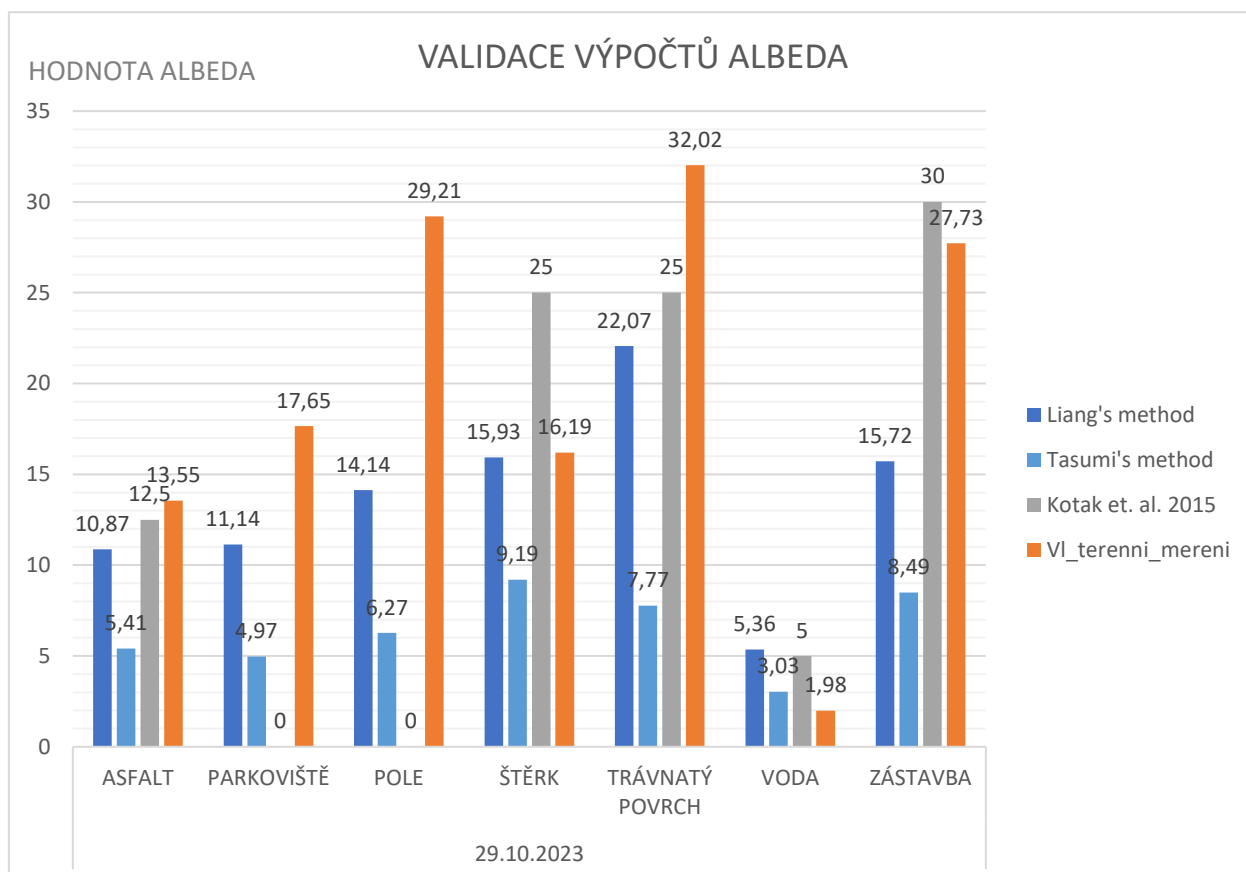
Validace výsledných dat je klíčovým krokem pro ověření spolehlivosti a přesnosti výsledků této práce. Validace se provádí srovnáním výstupních dat ze satelitních snímků s daty z již hotových produktů a nebo z vlastního měření. V této bakalářské práci se autor zaměřil na validaci tří klíčových termálních charakteristik krajiny: albeda, teploty zemského povrchu (Land Surface Temperature, LST) a půdního teplotního toku země (Ground Heat Flux, GHF).

Pro validační den byl vybrán datum 29. října 2023, poněvadž pro tento den byly změřeny jak terénní data tak také satelitní data.

### Albedo:

Validace albeda byla provedena porovnáním výsledků vlastního terénního měření a metod o kterých se píše v předešlé kapitole 5.4., dále s výslednými hodnotami, které se objevují ve článku „Investigating the Impact of Ground Albedo on the Performance of PV Systems“ (Kotak et al. 2015). Důvodem proč se použily již hotové hodnoty z tohoto článku nikoli nějaký vhodný produkt k validaci je ten, že ve validačním dni neexistuje vhodný produkt, který by byl možný získat na stránkách <https://earthexplorer.usgs.gov/> s dostatečným rozlišením. Tento problém je více popsán v kapitole 7.

Graf 7 - VALIDACE VÝPOČTU ALBEDA



Z výsledků jednotlivých metod, lze vidět nesrovnalosti u výpočtů Tasumiho metodou. Tato metoda sice poukazuje na rozdíly mezi jednotlivými povrchy, nicméně její výsledné hodnoty albeda nejsou srovnatelné s výsledky za pomoci jiných metod případně na výsledcích, které zveřejnil (Kotak et al. 2015). Dva povrchy ze všech ostatních nebylo



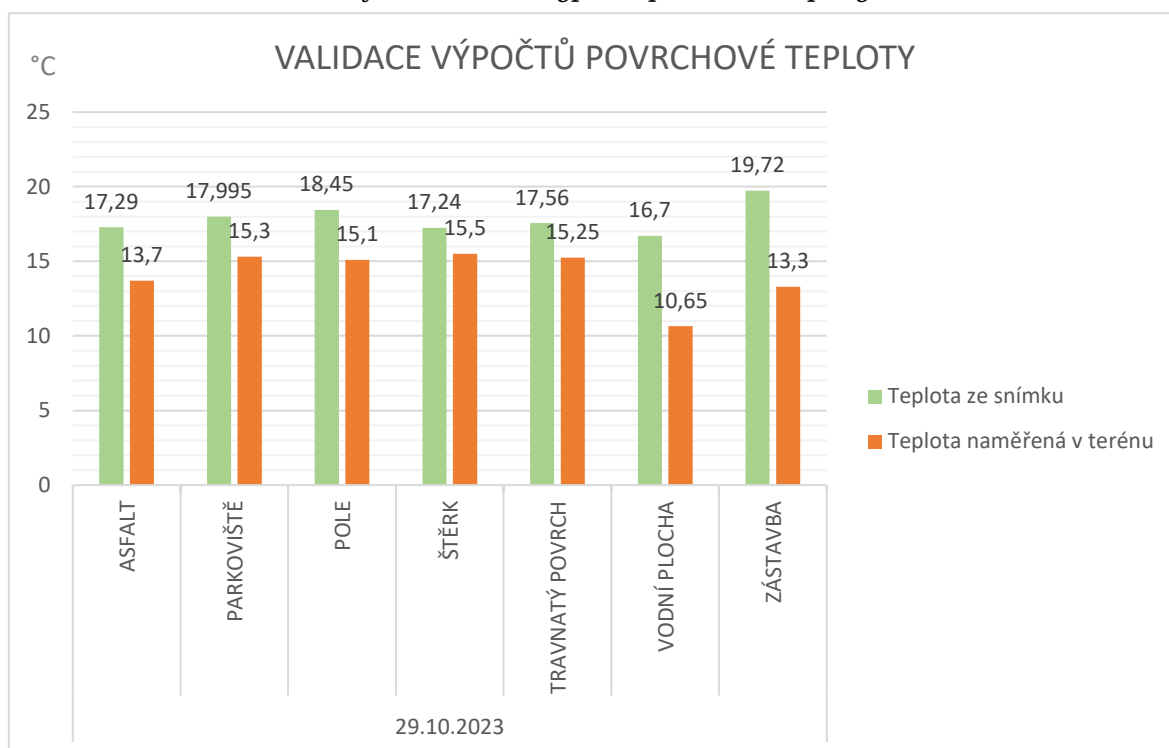
možné popsat podle Kotaka, jelikož v jeho tabulkách se neobjevují a ani povrchy jim podobné, proto se pro povrch „parkoviště“ a „pole“ objevuje hodnota 0. Z výsledků lze také poznat, že výstupy ostatních způsobů výpočtu jsou podobné, tudíž lze říci, že výpočty jsou nejpravděpodobněji správné a výsledky pravdivé.

Dále z grafu lze vyčíst, že vlastní měření má přesnější výsledky k hodnotám, které změřil Kotak, než například Liangova metoda. To může být také způsobeno rozlišením jednoho pixelu na snímku vůči reality. Jeden pixel má rozměry 100×100 metrů, to může způsobovat, že do výpočtu vstupují i jiné povrchy než pouze měřený. Tato nesrovnalost v terénním měření není, protože výsledné albedo je vypočteno přesně pro místo, kde se měřilo. Nejvhodnější metodou pro výpočet albeda se tedy jeví **Liangova** metoda.

### Teplota zemského povrchu (LST):

LST byla validována za pomoci satelitních snímků a vlastního terénního měření.

Graf 8 – validace výpočtů povrchové teploty



Tento graf porovnává teploty ze satelitního snímku a teploty naměřené v terénu. Jsou zde odhaleny zajímavé rozdíly napříč různými typy prostředí. Výsledky grafu ukazují, že největší teplotní rozdíl byl zaznamenán u vodních ploch a zástavby, kde průměrná odchylka v teplotě činila 6,24°C oproti ostatním typům povrchů, jako jsou asfalt, parkoviště, pole, štěrk a tráva, kde byl průměrný rozdíl teplot 2,74°C. Nejvyšší teplotu ze snímku vykázala zástavba, 19,72 stupňů, zatímco naměřené teplota v terénu byla pouhých 13,3 stupňů.

Výsledné teploty ze satelitních snímků jsou o něco vyšší než ze skutečného měření, nicméně v tomto případě to může být odchylka způsobena špatným výpočtem nebo tím, že reálná teplota je pro dané místo, zatímco satelitní snímek má danou velikost pixelu. Celkový průměrný rozdíl mezi všemi měřeními povrchy dosáhl hodnoty 3,74°C.

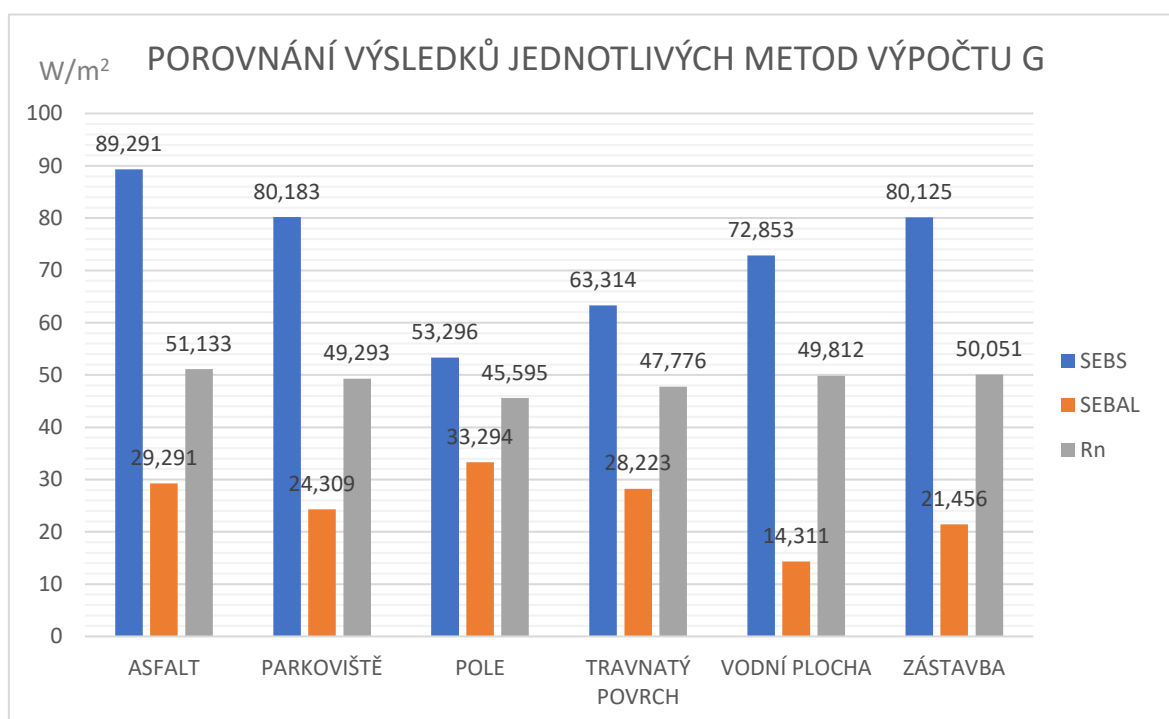
Tato data poskytují cenný pohled na variabilitu teplot mezi satelitními snímky a měřeními v terénu a zdůrazňují význam přesného sledování teploty v různých

prostředích. Zároveň z výsledků je patrné, že použitá metoda podle (Avdan a Jovanovska 2016) je velmi přesná a odchylky oproti reálné naměřené hodnoty jsou nízké. Zároveň tato odchylka může být způsobená vysokým rozlišením satelitních snímků.

### Půdní teplotní proudění (GHF):

Graf níže (Graf 9), znázorňuje porovnání výsledků jednotlivých metod výpočtu půdního teplotního proudění.

Graf 9 - validace výpočtů G



První metodou k validaci je metoda SEBS, u které jsou hodnoty G různorodé a výsledky rozmanité. Výsledné hodnoty vypočteny metodou SEBAL jsou si velmi podobné a rozdíly mezi jednotlivými povrchy jsou minimální. Zároveň z nich, ale lze také vyčíst o jaký povrch se jedná, například stejně jako u metody SEBS má výrazný výkyv hodnoty u povrchu voda. Po bližším zkoumání lze tedy říci, že na výsledcích této metody jsou pozorované rozdíly mezi jednotlivými povrchy sice malé, nicméně přibližně kopírují výsledky metody SEBS, tudíž se dají považovat za správné. Rozdíly mezi jednotlivými povrchy jsou znatelné. Jediným povrchem, jehož výsledky jsou rozdílné od metody SEBS je povrch „voda“. Tento povrch jako jediný nekopíruje graf metody SEBS.

Poslední metoda výpočtu G byla metoda vypočtena z čistého záření (Rn). Výsledky této metody ukazují vyšší hodnoty teplotního proudění, než metodou SEBAL, ale zároveň nižší než metodou SEBS. Zároveň, ale kopírují stejný trend jako ostatní dvě metody. Jediným povrchem, který se nedrží trendu, je travnatý povrch u kterého je pokles namísto růstu.

Z výsledků je možné konstatovat, že nejvhodnější z výše použitých metod pro měření G se jeví metoda **SEBS**. Bohužel toto tvrzení nelze ověřit, jelikož autor této práce nenalezl žádný vhodný referenční zdroj, podle kterého by s jistotou určil jaká použitá metoda je nejvhodnější. Tato metoda prokázala konzistentnější a přesnější výsledky ve srovnání s ostatními testovanými metodami a také ukazují lepší shodu s očekávanými hodnotami, které se objevují ve článku „Estimating Ground Heat Flux from Net Radiation“ (Hsieh et al. 2023).

## 7 DISKUZE

Během sepisování této bakalářské práce se objevilo nespočet problémů, které bylo třeba vyřešit. Naštěstí se většinu z nich podařilo vyřešit za pomoci jiných vědeckých prací a článků. Jedním z problémů bylo získání dat o krátkovlnném záření, jelikož terénní měření probíhalo v létě minulého roku a senzor, který toto záření dokáže měřit, byl nainstalován až na začátku prosince 2023. Tento problém byl vyřešen stažením dat, které poskytují družice *GOES* (Geostationary Operational Environmental Satellites). Tyto družice poskytují data o atmosférických podmínkách včetně radiačního záření.

Dalším z větších problémů byla validace výsledků s jinými zdroji. Přesněji se jednalo o validaci výsledků Albeda a půdního teplotního proudění (Ground Heat Flux - G). Pro validační den byl zvolen datum 29.10.2023, pro který existovaly výsledky jak z vlastního měření stejně tak snímky ze satelitu Landsat 8. Bohužel až po analýze výsledků a hledání vhodného poskytovatele dat se zjistilo, že neexistuje žádný produkt, který by byl v adekvátním rozlišení pro následnou analýzu. Protože např. produkt ECOSTRESS, který má výborné rozlišení a denní sběr dat, byl od září do prosince roku 2023 nefunkční a odstaven. Jiné produkty, které by bylo možné použít pro tento den, byly v nedostačujícím rozlišení, tudíž výsledky z nich jsou nevypovídající povrchu, který se pod daným bodem nacházel. Z tohoto důvodu bylo Albedo validováno podle již existujících studií a vlastního terénního měření viz kapitola 6.2 a výsledné G bylo pouze porovnáno mezi metodami samotnými.

Během zpracování naměřených terénních dat byl zjištěn problém v podobě posunu letního času. Měření probíhalo pokaždé ve stejný čas tedy v období mezi 9-10 hodinou ránní, nicméně satelity létaly o hodinu později. Z tohoto důvodu nebylo možné využít data z terénního měření. Jediná data, které bylo možné využít byla data ze dne 29.10.2023, protože v tento den již satelity létaly ve správný čas a tudíž jsou výsledky správně a přesné. Z tohoto důvodu byla také validace provedena v tento den a ostatní data nebyly v práci využity.

Pro přesnější výsledky by bylo vhodné vlastní terénní měření provést ještě jednou v letních dnech za dobrých podnebných podmínek, kdy by prolétal satelit L8 nebo L9 a zároveň by v daný den byly výsledky i z jiných produktů. Pro případné nové měření bude stačit si zapůjčit přístroje použité při tvorbě této práce a již vytvořený kód, který je obsažen v příloze.

Další výzkum by se mohl zaměřit na jiné termální charakteristiky, případně rozšířit metody, které v této práci nebyly použity. Zároveň by bylo vhodné případnou budoucí práci rozšířit o více trénovací povrchů nebo pouze zvýšit množství měření na jednotlivých površích. Rozšíření práce o více měření by mohlo ověřit širší použitelnost programového kódu.

## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo srovnání vybraných termálních charakteristik (albedo, povrchová teplota, půdní teplotní proudění) za pomoci technik DPZ. Výsledkem práce bylo srovnání vybraných termálních charakteristik krajiny a za pomoci programového kódu zautomatizovat výpočty jednotlivých metod. Ze vstupních dat (satelitní snímky a data z pozemních senzorů) jsou vypočteny všechny potřebné veličiny. Výsledkem je rastrový soubor s příponou **.TIF**, který lze následně zobrazit v programu např. QGIS.

V teoretické části práce proběhla rešerše aktuálního stavu řešené problematiky, která sloužila jako základ při psaní této práce. V této části se také nachází základní fyzikální podstata, potřebná k práci s termálními daty, dále informace o termálních datech, sběrem dat a získáváním satelitních snímků.

Proces validace odhalil nízkou odchylku mezi vypočtenými hodnotami prostřednictvím vytvořeného programového kódu a hodnotami naměřenými přímo v terénu. Tyto odchylky byly v přijatelných mezích pro tuto bakalářskou práci, což naznačuje, že použité metody výpočtu jednotlivých termálních charakteristik jsou vhodné pro měření povrchů v různých krajinách. Toto zjištění má zásadní význam, protože nejen podporuje spolehlivost použitých metod, ale také zvyšuje důvěryhodnost DPZ jako nástroje pro monitorování životního prostředí. Provedené porovnání různých metod výpočtu ukázalo univerzálnost vyvinutého programu. Zkoumáním těchto výsledků bylo možné zjistit, které metody jsou nejefektivnější v různých podmínkách prostředí. Pro výpočet povrchové teploty se vybraná metoda osvědčila jako velmi přesná, pro půdní teplotní proudění je nejvhodnější metoda SEBS a pro albedo Liangova metoda.

Závěrem lze říci, že tato práce úspěšně dosáhla svého cíle. Programový kód je vhodným nástrojem pro další výzkumnou práci v odvětví termálních charakteristik. Pomáhá při výběru metody výpočtu dané termální charakteristiky pro určité území. Tato práce otevírá cestu k dalšímu výzkumu zaměřenému na zdokonalování technik DPZ a zkoumání jejich využití v různých oblastech.

## POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

- ALBEDO, 2023. *Albedo* [online] [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://albedo.com/>
- ARCTIC CLIMATE CONNECTION, 2023. *Measuring Albedo* [online]. 2023. Dostupné z: <https://cires.colorado.edu/outreach/sites/default/files/2018-11/Worksheets%20%28Module%201%29.pdf>
- AVDAN, Ugur a Gordana JOVANOVSKA, 2016. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. *Journal of Sensors* [online]. **2016**, e1480307. ISSN 1687-725X. Dostupné z: doi:10.1155/2016/1480307
- BASTIAANSEN, W. G. M, 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology* [online]. **229**(1), 87–100. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-1694(99)00202-4
- BENEŠ, Jiří, Jaroslava KYMPLOVÁ a František VÍTEK, 2015. *Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory* [online] [vid. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://www.bookport.cz/ukazka/zaklady-fyziky-pro-lekarske-a-zdravotnicke-obory-1036/>
- BOLDT-CHRISTMAS, L., 2020. Polar and Sun-synchronous orbit. *ESA* [online] [vid. 2023-11-22]. Dostupné z: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2020/03/Polar\\_and\\_Sun-synchronous\\_orbit](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/03/Polar_and_Sun-synchronous_orbit)
- BOWEN, I. S., 1926. The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from any Water Surface. *Physical Review* [online]. **27**(6), 779–787. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRev.27.779
- BROM, Jakub, Marek PIVOVARNÍK, Petra HESSLEROVÁ, Václav NEDBAL, Vladimír JIRKA, Hana VINCIKOVÁ, Jan PROCHÁZKA a Petr LECHNER, 2014. Termální data. [Thermal data] In: *Letecký dálkový průzkum Země. Teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů. [Airborne remote sensing. Theory and practice in assessment of terrestrial ecosystems]*. In: . s. 49–60. ISBN 978-80-87902-07-3.
- CAM, Mai Ton Nu, 2022. ORORA Technologies - Our Satellites Change The Game. *ORORA Technologies* [online] [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://ororatech.com/technology/>
- CONNOR, Nick, 2020. Thermal Properties of Materials. *Material Properties* [online] [vid. 2023-12-15]. Dostupné z: <https://material-properties.org/thermal-properties-of-materials-definition/>
- CONSTANTINOS, Kosmas, 2004. *Vegetation Cover* [online] [vid. 2024-03-17]. Dostupné z: [https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public\\_path/shared\\_folder/projects/DIS4ME/indicator\\_descriptions/vegetation\\_cover.htm](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/shared_folder/projects/DIS4ME/indicator_descriptions/vegetation_cover.htm)
- DEARDORFF, J. W., 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research: Oceans* [online]. **83**(C4), 1889–1903. ISSN 0148-0227. Dostupné z: doi:10.1029/JC083iC04p01889
- DON PALLUCONI, Frank, 1985. *Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS): An Investigator's Guide to TIMS Data* [online]. 1. červen 1985. B.m.: NASA. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19850019974/downloads/19850019974.pdf>

DRONPRO, 2023. Drony s Termovizí aneb Když Chceš Vidět Teplo! [ZKUŠENOSTI EXPERTŮ]. *DronPro* [online] [vid. 2023-12-06]. Dostupné z: <https://dronpro.cz/drony-s-termovizi-aneb-kdyz-chces-videt-teplo>

ĎURIANČÍKOVÁ, Petra, 2022. *TERMÁLNÍ MAPOVÁNÍ VYBRANÝCH PLOCH MĚSTA OLOMOUCE* [online]. Olomouc. Diplomova práce. Univerzita Palackého. Dostupné z: [https://theses.cz/id/2drhvx/duriancikova\\_dp.pdf](https://theses.cz/id/2drhvx/duriancikova_dp.pdf)

ECOSTRESS, 2018. *ECOSTRESS* [online] [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://ecostress.jpl.nasa.gov/mission>

ERB, Angela M., Zhan LI, Qingsong SUN, Ian PAYNTER, Zhuosen WANG a Crystal SCHAAF, 2022. Evaluation of the Landsat-8 Albedo Product across the Circumpolar Domain. *Remote Sensing* [online]. **14**(21), 5320. ISSN 2072-4292. Dostupné z: [doi:10.3390/rs14215320](https://doi.org/10.3390/rs14215320)

ESA, 2015. Sentinel-2 - Missions. *Sentinel Online* [online] [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2>

ESA, 2016. Sentinel-3 - Missions. *Sentinel Online* [online] [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3>

ESA, 2020. LSTM (Land Surface Temperature Monitoring) Copernicus. *eoPortal* [online]. Dostupné z: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/lstm#eop-quick-facts-section>

ESCWA, 2015. latent heat flux. *United Nations Economic and Social Commission for Western Asia* [online] [vid. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://archive.unescwa.org/latent-heat-flux>

FARAHAT, Ashraf, Harry D. KAMBEZIDIS a Styliani I. KAMPEZIDOU, 2023. Effect of the Ground Albedo on the Estimation of Solar Radiation on Tilted Flat-Plate Surfaces: The Case of Saudi Arabia. *Energies* [online]. **16**(23), 7886. ISSN 1996-1073. Dostupné z: [doi:10.3390/en16237886](https://doi.org/10.3390/en16237886)

FLIR, 2013. *FLIR E60 - manual* [online]. 5. listopad 2013. Dostupné z: <https://www.markertek.com/Attachments/Manuals/Flir/E60-Manual.pdf>

FLIR, 2019. *FLIR Thermal Studio - Image Management* [online] [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://www.infraredtraining.com/home/resources/itctutorials/flir-thermal-studio---image-management/>

HSIEH, Cheng-I, Cheng-Jiun CHIU, I-Hang HUANG a Supattra VISESSRI, 2023. Estimating Ground Heat Flux from Net Radiation. *Atmosphere* [online]. **14**, 1778. Dostupné z: [doi:10.3390/atmos14121778](https://doi.org/10.3390/atmos14121778)

HUKSEFLUX, 2023. *Albedometers | Market leading albedometers | Hukseflux* [online] [vid. 2023-12-08]. Dostupné z: <https://www.hukseflux.com/products/pyranometers-solar-radiation-sensors/albedometers>

HURSH, Andrew, Ashley BALLANTYNE, Leila COOPER, Marco MANETA, John KIMBALL a Jennifer WATTS, 2017. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale. *Global Change Biology* [online]. **23**(5), 2090–2103. ISSN 1354-1013, 1365-2486. Dostupné z: [doi:10.1111/gcb.13489](https://doi.org/10.1111/gcb.13489)

INKSCAPE, Inkscape Website, 2003. *Draw Freely | Inkscape* [online] [vid. 2024-04-17]. Dostupné z: <https://inkscape.org/>

ITM, 2023. *FLIR E60 Thermal Imaging Camera, 76800 Pixels (320 x 240)* [online] [vid. 2024-07-30]. Dostupné z: <https://www.itm.com/product/flir-e60-infrared-camera>

KOTAK, Yash, Mehreen GUL, T. MUNEEER a Stoyanka IVANOVA, 2015. *Investigating the Impact of Ground Albedo on the Performance of PV Systems*.

LAGOUARDE, J.-P., B.K. BHATTACHARYA, P. CREBASSOL, P. GAMET, S. S. BABU, G. BOULET, X BRIOTTET, K.M. BUDDHIRAJU, S. CHERCHALI, I. DADOU, G. DEDIEU, M. GOUHIER, O. HAGOLLE, M. IRVINE, F. JACOB, A. KUMAR, K. K. KUMAR, B. LAIGNEL, K. MALLICK, C.S. MURTHY, A. OLIOSO, C. OTTLE, M. R. PANDYA, P. V. RAJU, J.-L. ROUJEAN, M. SEKHAR, M. V. SHUKLA, S. K. SINGH, J. SOBRINO a R. RAMAKRISHNAN, 2018. The Indian-French Trishna Mission: Earth Observation in the Thermal Infrared with High Spatio-Temporal Resolution. In: *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium: IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* [online]. Valencia: IEEE, s. 4078–4081 [vid. 2023-11-08]. ISBN 978-1-5386-7150-4. Dostupné z: doi:10.1109/IGARSS.2018.8518720

LEWIS CENTER, 2024. *Lewis centrum pro vzdělávací výzkum - jednotky jasu* [online] [vid. 2024-04-08]. Dostupné z: <https://www.lewiscenter.org/Old-Content/Global-Programs/Tools/Data-FAQs/Brightness-Units/index.html>

LIANG, Shunlin, 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. *Remote Sensing of Environment* [online]. **76**(2), 213–238. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-4257(00)00205-4

LIANG, Shunlin, Alan H STRAHLER a Charles WALTHALL, 1999. Retrieval of Land Surface Albedo from Satellite Observations: A Simulation Study. *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY*. **38**.

LILLESAND, Thomas M., Ralph W. KIEFER a Jonathan W. CHIPMAN, 2015. *Remote sensing and image interpretation*. Seventh edition. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-1-118-34328-9.

LIU, Haipeng, Feng HUANG, Yingxuan LI, Pinpin REN, Gary W. MAREK, Beibei DING, Baoguo LI a Yong CHEN, 2022. Developing an Automated Python Surface Energy Balance System (PySEBS) Software for Calculating Actual Evapotranspiration-Software Development and Application Case in Jilin Province, China. *Remote Sensing* [online]. **14**(21), 5629. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs14215629

LIU, Zhaofei, 2022. Accuracy of five ground heat flux empirical simulation methods in the surface-energy-balance-based remote-sensing evapotranspiration models. *Hydrology and Earth System Sciences* [online]. **26**(23), 6207–6226. ISSN 1027-5606. Dostupné z: doi:10.5194/hess-26-6207-2022

MARUYAMA, Toshisuke a Manabu SEGAWA, 2016. Reciprocal Analysis of Sensible and Latent Heat Fluxes in a Forest Region Using Single Height Temperature and Humidity Based on the Bowen Ratio Concept. *Journal of Water Resource and Protection* [online]. **08**(07), 724–742. ISSN 1945-3094, 1945-3108. Dostupné z: doi:10.4236/jwarp.2016.87059

MEIER, M. F., 1980. Remote sensing of snow and ice. *Hydrological Sciences Bulletin*. **25**(3), 307–330.

MICROSOFT, 2015. *Visual Studio Code - Code Editing. Redefined* [online] [vid. 2024-04-17]. Dostupné z: <https://code.visualstudio.com/>

NASA, 2019. NASA, NOAA to Announce 2019 Global Temperatures, Climate Conditions. *Climate Change: Vital Signs of the Planet* [online] [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://climate.nasa.gov/news/2944/nasa-noaa-to-announce-2019-global-temperatures-climate-conditions>

NASA, 2021a. *Landsat 8 | Landsat Science* [online] [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/>

NASA, 2021b. *Landsat 9 | Landsat Science* [online] [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/>

NASA, 2023. *Land Surface Temperature* [online]. B.m.: NASA Earth Observatory [vid. 2023-12-17]. Dostupné z: [https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD\\_LSTD\\_M](https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MOD_LSTD_M)

NOVÁKOVÁ, Tereza, 2021. *KVANTIFIKACE EVAPOTRANSPIRAČNÍ A OCHLAZOVACÍ FUNKCE VEGETACE PROSTŘEDKY DPZ V OLOMOUCI A OKOLÍ* [online]. Olomouc. Diplomová práce. Univerzita Palackého. Dostupné z: [https://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/magisterske/novakova21/DP\\_Novakova21.pdf](https://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/magisterske/novakova21/DP_Novakova21.pdf)

PECHANEC, Vilém, Ondřej CUDLÍN, Miloš ZAPLETAL, Jan PURKYT, Lenka ŠTĚRBOVÁ, Karel CHOBOT, Elvis TANGWA, Renata VČELÁKOVÁ, Marcela PROKOPOVÁ a Pavel CUDLÍN, 2021. Assessing Habitat Vulnerability and Loss of Naturalness: Applying the GLOBIO3 Model in the Czech Republic. *Sustainability* [online]. **13**(10), 5355. ISSN 2071-1050. Dostupné z: [doi:10.3390/su13105355](https://doi.org/10.3390/su13105355)

PLANCK, Max a Morton MASIUS, 1914. *The theory of heat radiation* [online]. B.m.: Philadelphia, P. Blakiston's Son & Co [vid. 2023-11-09]. Dostupné z: <http://archive.org/details/theoryofheatradi00planrich>

POUR, Tomáš, 2019. *Airborne Thermal Remote Sensing in Urban Climate Research* [online]. 1. vyd. Křížkovského 8, 771 47 Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci [vid. 2023-11-17]. ISBN 978-80-244-5840-3. Dostupné z: [doi:10.5507/prf.20.24458403](https://doi.org/10.5507/prf.20.24458403)

PURKET, Tomáš, 2017. *TVORBA TERMÁLNÍ LETECKÉ MOZAIKY OLOMOCE* [online]. Olomouc. Diplomová práce. Univerzita Palackého. Dostupné z: [https://geoinformatics.upol.cz/dprace/magisterske/purket17/files/Purket\\_DP.pdf](https://geoinformatics.upol.cz/dprace/magisterske/purket17/files/Purket_DP.pdf)

PYTHON, 2023. Welcome to Python.org. *Python.org* [online] [vid. 2023-11-13]. Dostupné z: <https://www.python.org/>

QGIS, 2023. *Welcome to the QGIS project!* [online] [vid. 2023-11-13]. Dostupné z: <https://qgis.org/en/site/>

REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA, 2006. *Encyklopedie fyziky* [online]. B.m.: Jaroslav Reichl [vid. 2023-11-22]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/538-zareni-absolutne-cerneho-telesa>

RITTER, Michael E., 2021. Net Radiation. *Geosciences LibreTexts* [online] [vid. 2024-04-21]. Dostupné z: [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Geography\\_\(Physical\)/The\\_Physical\\_Environment\\_\(Ritter\)/04%3A\\_Energy\\_and\\_Radiation/4.03%3A\\_Radiation\\_and\\_Energy\\_Balance\\_of\\_the\\_Earth\\_System/4.3.01%3A\\_The\\_Radiation\\_Balance](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Geography_(Physical)/The_Physical_Environment_(Ritter)/04%3A_Energy_and_Radiation/4.03%3A_Radiation_and_Energy_Balance_of_the_Earth_System/4.3.01%3A_The_Radiation_Balance)

RUAIRUEN, Watcharee, Gilberto J. FOCHESSATTO, Elena B. SPARROW, William SCHNABEL, Mingchu ZHANG a Yongwon KIM, 2015. Evapotranspiration Cycles in a High Latitude Agroecosystem: Potential Warming Role. *PLOS ONE* [online]. **10**(9), e0137209. ISSN 1932-6203. Dostupné z: [doi:10.1371/journal.pone.0137209](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137209)

SANTANELLO, Joseph A. a Mark A. FRIEDL, 2003. Diurnal Covariation in Soil Heat Flux and Net Radiation [online]. [vid. 2024-07-30]. ISSN 1520-0450. Dostupné z: [https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/42/6/1520-0450\\_2003\\_042\\_0851\\_dcishf\\_2.0.co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/42/6/1520-0450_2003_042_0851_dcishf_2.0.co_2.xml)



SATELLITEVU, 2023. SatelliteVU - Imaging Specification. *SatVu* [online] [vid. 2023-11-08]. Dostupné z: <https://www.satellitevu.com/imaging-specification>

SOBRINO, José A., Juan C. JIMÉNEZ-MUÑOZ a Leonardo PAOLINI, 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment* [online]. **90**(4), 434–440. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2004.02.003

TASUMI, Masahiro, Richard G. ALLEN a Ricardo TREZZA, 2008. At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal of Hydrologic Engineering* [online]. **13**(2), 51–63. ISSN 1084-0699, 1943-5584. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(51)

TRAVERSA, Giacomo, Davide FUGAZZA, Antonella SENESE a Massimo FREZZOTTI, 2021. Landsat 8 OLI Broadband Albedo Validation in Antarctica and Greenland. *Remote Sensing* [online]. **13**(4), 799. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs13040799

ULLAH, Irfan, Rehan Ullah KHAN, Fan YANG a Lunchakorn WUTTISITTIKULKIJ, 2020. Deep Learning Image-Based Defect Detection in High Voltage Electrical Equipment. *Energies* [online]. **13**(2), 392. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13020392

UNIVERSITY OF CALGARY, 2023. *Law of conservation of energy - Energy Education* [online] [vid. 2023-12-15]. Dostupné z: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Law\\_of\\_conservation\\_of\\_energy](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Law_of_conservation_of_energy)

VOLTCRAFT, 2020. *VOLTCRAFT SLX 300 - manual* [online]. 2020. Dostupné z: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/gl/001970436ML01/manual-1970436-voltcraft-slx-300-slx-300-meric-solarni-energie-0-2000-wm.pdf>

ZEMEK, František, 2014. *Letecký dálkový průzkum Země: teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů*. 1. vyd. ISBN 978-80-87902-07-3.

## **PŘÍLOHY**

# SEZNAM PŘÍLOH

## **Vázané přílohy:**

Příloha 1 Mapové výstupy

Příloha 2 Programový kód

## **Volné přílohy**

Příloha 3 Poster ve formátu A2

Příloha 4 WEB

## **Popis struktury odevzdávaných digitálních dat na datové úložiště katedry**

Mapove\_vystupy

Poster

Programovy\_kod

Text\_prace

Web

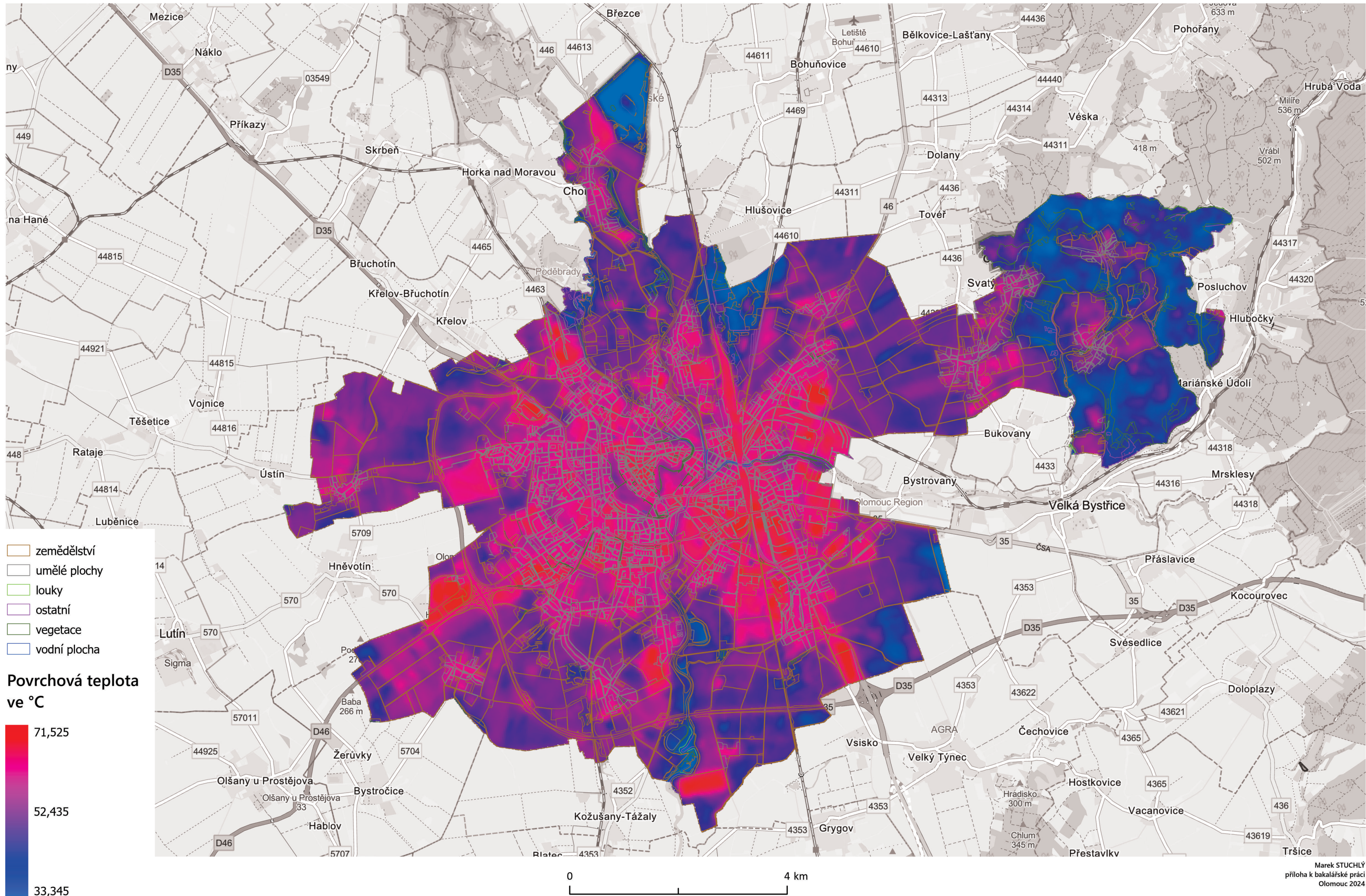
# **MAPOVÉ VÝSTUPY**

PŘÍLOHA K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI Č.1  
Marek STUHLÝ



# POVRCHOVÁ TEPLOTA - LAND SURFACE TEMPERATURE (LST)

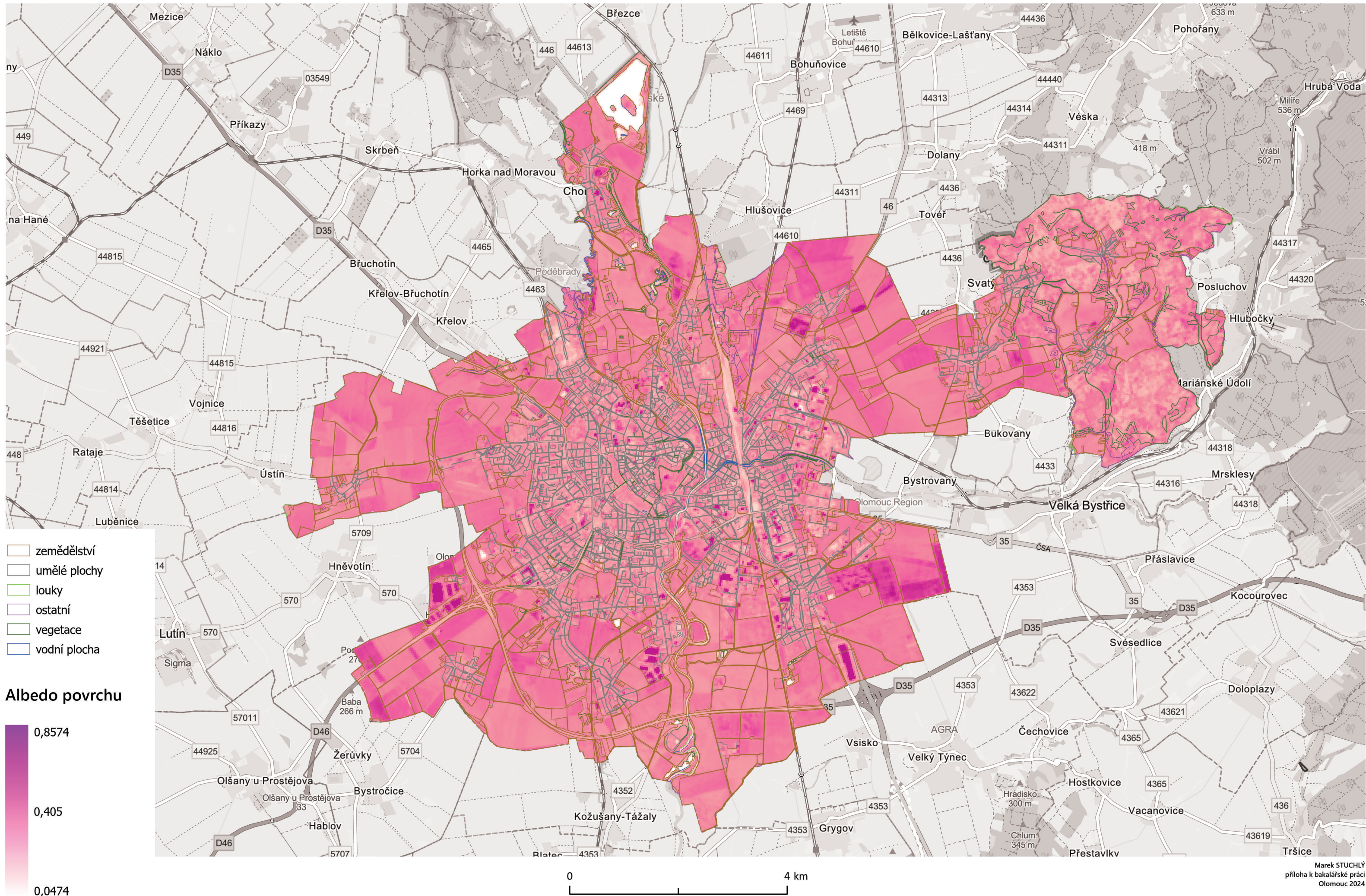
v Olomouci dne 09.07.2023





# ALBEDO POVRCHU - LIANGOVA METODA

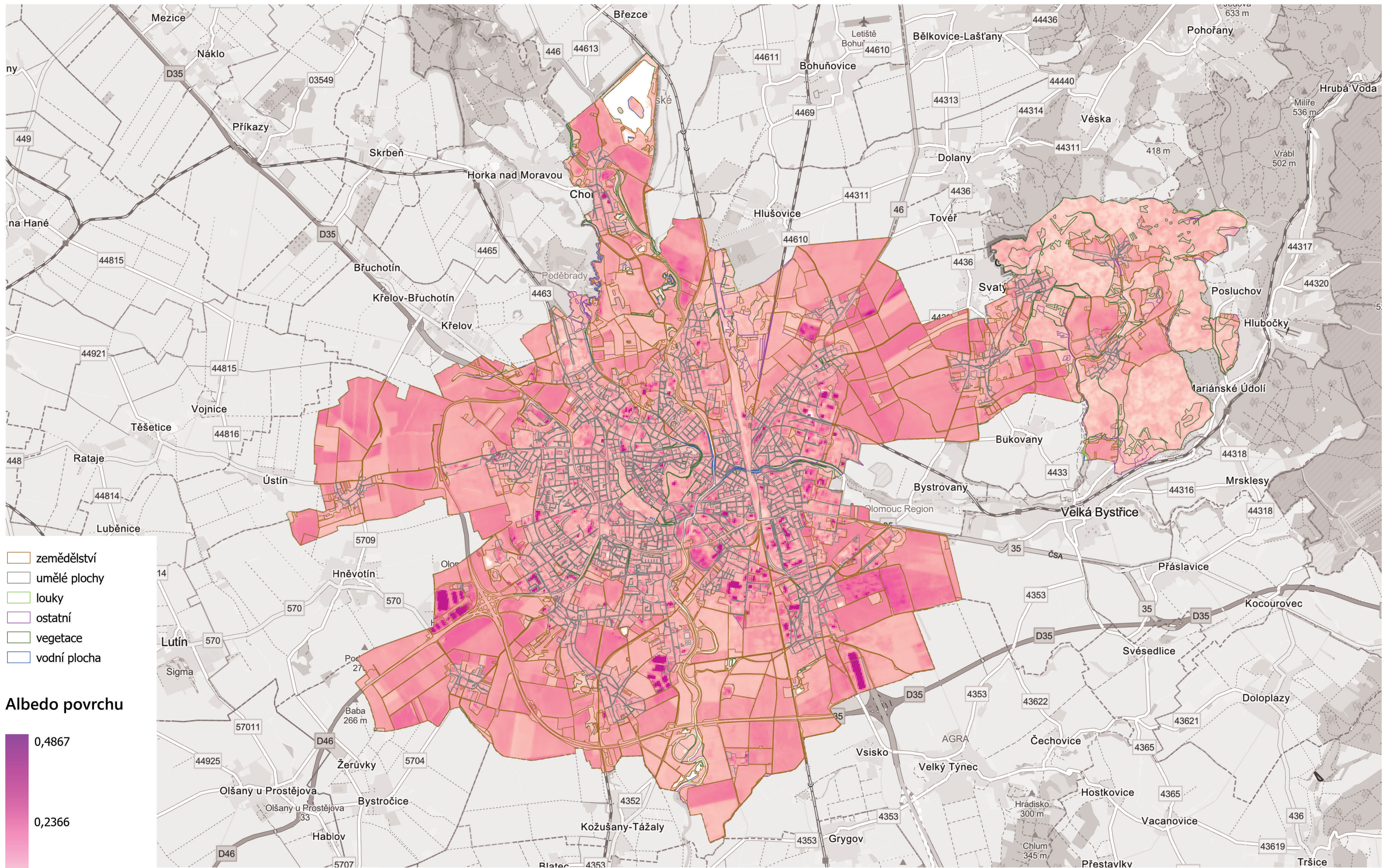
v Olomouci dne 09.07.2023





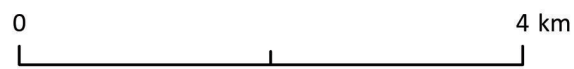
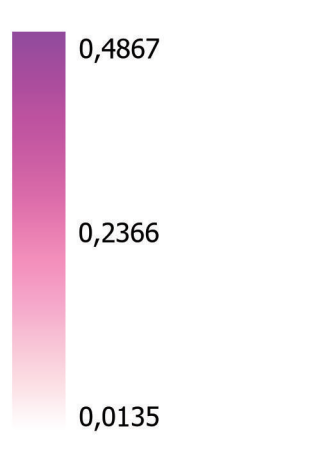
# ALBEDO POVRCHU - TASUMIHO METODA

v Olomouci dne 09.07.2023



- zemědělství
- umělé plochy
- louky
- ostatní
- vegetace
- vodní plocha

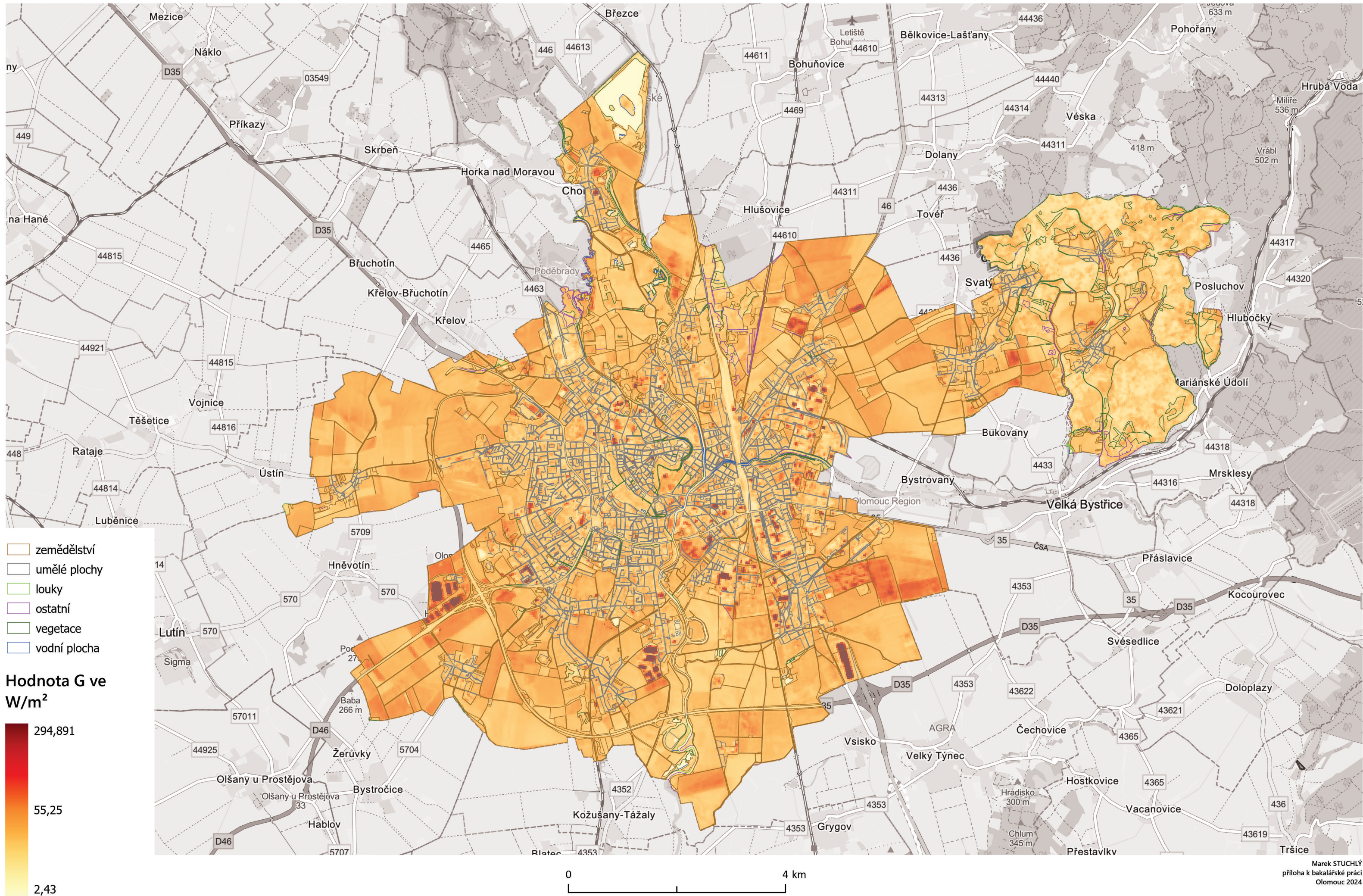
## Albedo povrchu





# PŮDNÍ TEPLOTNÍ PROUDĚNÍ - GROUND HEAT FLUX (GHF) - METODA SEBAL

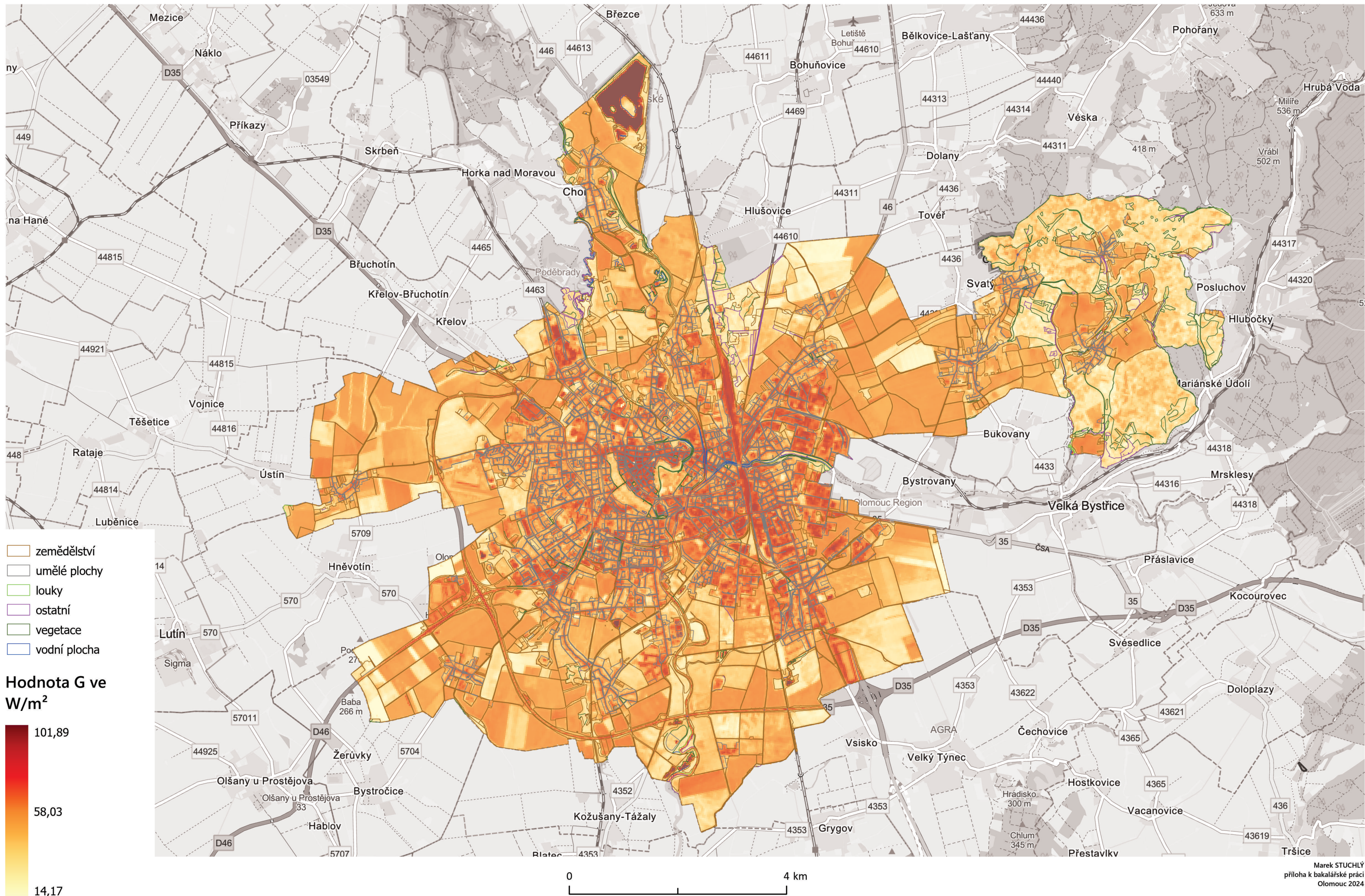
v Olomouci dne 09.07.2023





# PŮDNÍ TEPLOTNÍ PROUDĚNÍ - GROUND HEAT FLUX (GHF) - METODA SEBS

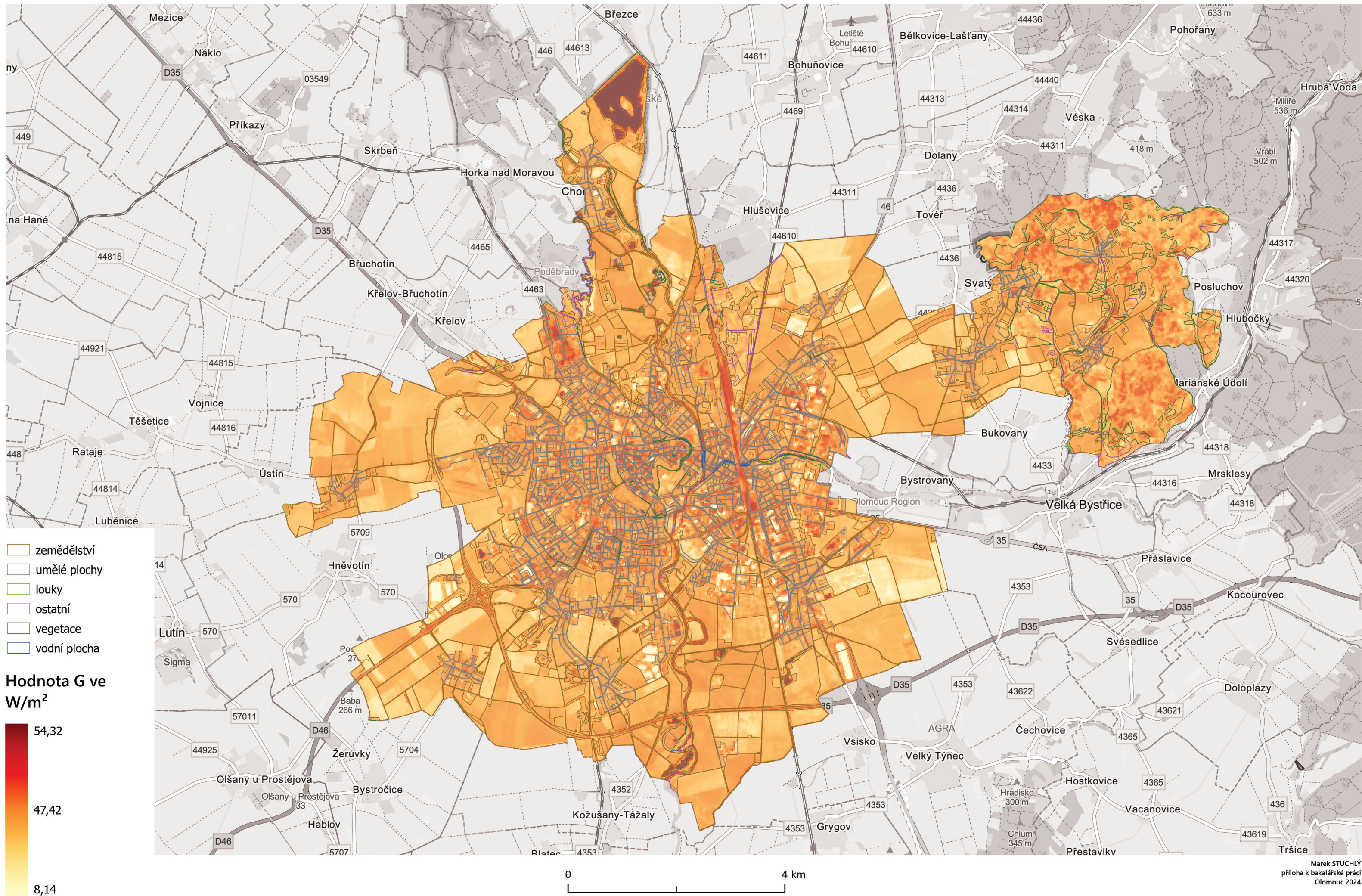
v Olomouci dne 09.07.2023





# PŮDNÍ TEPLOTNÍ PROUDĚNÍ - GROUND HEAT FLUX (GHF) - METODA Rn

v Olomouci dne 09.07.2023





## **Příloha 2 – Programový kód**

Programový kód je k dispozici na internetových stránkách GitHub:

<https://github.com/MrM1CK1/STCH>