

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

**KVANTIFIKACE EVAPOTRANSPIRAČNÍ
A OCHLAZOVACÍ FUNKCE VEGETACE
PROSTŘEDKY DPZ V OLOMOUCI A OKOLÍ**

Diplomová práce

Bc. Tereza NOVÁKOVÁ

Vedoucí práce: doc. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.

Olomouc 2021

Geoinformatika

ANOTACE

Diplomová práce se zaměřuje na kvantifikaci evapotranspirace a ochlazovací funkce jednotlivých typů povrchů ze satelitních multispektrálních a termálních snímků Landsat 8, doplněných o meteorologická data ze senzorové sítě a terénní kontrolní data ve formě sběru povrchové teploty vybraných typů ploch pomocí ruční termokamery. Prvním dílčím cílem je identifikace důležitých vlivů na ochlazovací funkci. Dalším dílčím cílem je vytvoření výpočtu pomocí počítačového skriptu, který kvantifikuje ochlazovací funkci. Poslední dílčí cíl je zaměřen na aplikační řešení na zájmovém území. Součástí posledního dílčího cíle je i interpretace výsledků a ověření správnosti výsledků. V teoretické části práce jsou rozebrány jednotlivé přístupy k výpočtu různých částí Indexu míry ochlazení (*Cooling Capacity Index*) a je zde popsána důležitost ochlazovací a evapotranspirační funkce vegetace. Praktická část práce sestává z vytvoření skriptu, který Index míry ochlazení, spolu se všemi komponentami, odhadne. Součástí práce je i srovnání odhadnutých hodnot s měřením v terénu. Výsledky práce potvrdily vyšší ochlazovací potenciál vegetace, zejména lesních porostů, a ukázaly tři klíčové komponenty, jež mají vliv na výsledek: povrchová tepla objektu, albedo a koeficient plodiny. Výsledky výzkumu odpovídají období od března 2020 do prosince 2020 a představují kompletní workflow, které je možné využít při řešení podobných úloh. V lednu 2021 byla zaznamenána porucha termálního senzoru satelitu Landsat 8, jež znemožnila přístup k snímkům, a tedy i podrobnější vyhodnocení snímků. Výsledný skript byl testován a zdokumentován na čistém virtuálním stroji s operačním systémem Windows 10 v prostředí Oracle VirtualBox, kde se prokázala jeho funkčnost. Konfigurace potřebných částí nutných ke spuštění je dostupná v přiloženém videonávodu.

KLÍČOVÁ SLOVA

kvantifikace; evapotranspirace; ochlazování; DPZ

Počet normostran práce: 51

Počet příloh: 12 (z toho 1 volná a 11 elektronických)

ANOTATION

This diploma thesis is focused on quantification of evapotranspiration and cooling functions of various types of surfaces. Those surfaces are determined by multispectral and thermal bands made by Landsat 8, supplemented by meteorological data, data from wireless sensors and last but not least by thermal observations made by thermal field camera. The first partial objective of this thesis is identification of important influences on cooling function of vegetation. The following goal is to create a computer script in Python, that would quantify the cooling function. The third and last partial objective is focused on application solution of the script in area of interest. Part of the last objective is centered on result interpretation. Theoretical part of the thesis discusses various approaches to calculation of different parts of Cooling Capacity Index and also describes the importance of cooling and evaporation functions of vegetation. Practical part of this study includes script creation that estimates Cooling Capacity Index and all its parts. This study also includes comparison of estimated values with field measurements made by handheld thermal camera. The thesis results confirmed higher cooling potential of vegetation, especially of forests and showed three main components that affect the results the most: land surface temperature, albedo and crop coefficient. This research was carried out in March 2020 and lasted December 2020. The thesis is a representation of a complete workflow that can be used to solve similiar tasks. A failure of Landsat 8 thermal sensor was announced in January 2021 which continues until this time (March 2021) and which also restricted access to the satellite images. Main thesis goal, the script, was tested on a virtual machine equipped with Windows 10 and was proven to be fully functional. The configuration of all necessary parts is available in attached video manual.

KEYWORDS

quantification; evapotranspiration; cooling effect; remote sensing

Number of pages: 51

Number of appendixes: 12

Prohlašuji, že

- diplomovou práci, včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.
- jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,
- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevydělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),
- souhlasím, aby jeden výtisk diplomové práce byl uložen v Knihovně UP k prezenčnímu nahlédnutí,
- souhlasím, že údaje o mé diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,
- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití výsledky a výstupy mé diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- použít výsledky a výstupy mé diplomové práce, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci dne

Bc. Tereza Nováková

Ráda bych poděkovala **doc. RNDr. Vilému Pechancovi, Ph.D.** za skvělé vedení, trpělivost a především za čas, který věnoval této práci. Děkuji také svým rodičům, **Martinovi a Marii**, za jejich podporu psychickou i materiální. Poděkování patří také mému dobrému kamarádovi a největšímu kritikovi **Tomáši Pourovi** za všechny rady, akademické i morální, které mi poskytuje. Děkuji také svým spolužákům a přátelům **Elišce Regentové, Petrovi Mužíčkovi a Martinu Sadílkovi** za všechno, co jsme společně během pěti let prožili, a za veškerou pomoc nejen během studií. V neposlední řadě patří poděkování mému příteli **Tomášovi**, jehož laskavá povaha a bezpodmínečná podpora zásadně přispívají ke zlepšení nejen mé práce.

Vevázaný originál **zadání** bakalářské/diplomové práce (s podpisem vedoucího katedry a razítkem katedry). Ve druhém výtisku práce je vevázána fotokopie zadání.

Zde je konec prvního oddílu, kde není číslování stránek. Následující strana patří již do druhého oddílu, který má nastaveno číslování stránek.

Vevázaný originál **zadání** bakalářské/diplomové práce (s podpisem vedoucího katedry a razítkem katedry). Ve druhém výtisku práce je vevázána fotokopie zadání.

Zde je konec prvního oddílu, kde není číslování stránek. Následující strana patří již do druhého oddílu, který má nastaveno číslování stránek.

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	12
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	13
SEZNAM POUŽITÝCH VZORCŮ	14
ÚVOD	15
1 CÍL PRÁCE	16
2 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ.....	17
2.1 Použité metody	17
2.2 Použité přístroje.....	19
2.3 Použitá data	19
2.4 Použité programy	21
2.5 Zájmové území.....	22
3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	23
3.1 Vegetační povrch z pohledu DPZ	23
3.2 Monitoring vegetace pomocí vesmírných misí.....	25
3.2.1 Mise Sentinel	25
3.2.2 Mise Landsat	26
3.2.3 Komerční satelitní snímky	27
3.2.4 Termální snímkování.....	29
3.2.5 Dostupné termální snímky	30
3.2.6 Fúze satelitních snímků	31
3.3 Možnosti zpracování obrazových dat.....	32
3.4 Vegetační indexy.....	33
3.4.1 LAI/RSR	33
3.4.2 LWCI	34
3.4.3 NDVI.....	34
3.4.4 NDWI.....	35
3.4.5 Red Edge	35
3.4.6 RVI	36
3.5 Teplotní jevy a procesy	36
3.5.1 Land Surface Temperature (LST).....	37
3.5.2 Albedo	38
3.5.3 Radiační teplota	39
3.5.4 Cooling Capacity Index (CCi)	40
3.5.5 Disipace sluneční energie	41

4	VÝSLEDKY	42
4.1	Technické řešení výpočtu CC_i	42
4.1.1	Vstupní a výstupní parametry	42
4.1.2	Požadavky na spuštění	46
4.1.3	Ověření funkcionality skriptu	47
4.2	Výsledné komponenty výpočtu CC_i	48
4.2.1	Odhad albeda.....	48
4.2.2	Odhad K_c	50
4.2.3	Odhad povrchové teploty objektů.....	54
4.2.4	Ostatní odhadované veličiny	57
4.3	Výpočet CC_i – Aplikace nástroje pro Olomouc a okolí.....	63
4.4	Výsledky terénního sběru dat.....	69
5	DISKUZE	71
	ZÁVĚR	73
	POUŽITÁ LITERATURA A ZÁVĚR.....	74

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
AE	aktuální evapotranspirace
API	Application Programming Interface
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
DPZ	dálkový průzkum Země
DKV	detailní konsolidovaná vrstva biotopů
CC _i	Cooling Capacity Index
CEPT	Centre for Environmental Planning and Technology
CLC	Corine Land Cover
CSV	Comma Separated Value
DMR	Digitální Model Reliéfu
EU	Evropská Unie
EPSG	European Petroleum Survey Group
ESA	European Space Agency
ET	evapotranspirace
GeoJSON	Geographical JavaScript Object Notation
GeoTIFF	GeoTagged Image Format
GeoPandas	GeoPython Data and Analysis
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GIS	geografický informační systém
GUI	Green Urban Infrastructure
JSON	JavaScript Object Notation
HSRMI	High Spectral Resolution Multispectral Image
HyTES	Hyperspectral Thermal Emission Spectrometer
ICAM	Integrated Climate Adaptation Model
IHS	Intensity-Hue-Saturation Analysis
InVEST	Integrated Valuation Ecosystem Services and Tradeoffs
JPEG	Joint Photography Expert Group
LAI	Leaf Area Index
LiDAR	Light Detection and Ranging
LST	Land Surface Temperature
LSRMI	Low Spectral Resolution Multispectral Image
LWCI	Leaf Water Content Index
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MRA	Multiresolutional Analysis
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Differential Vegetation Index

NDWI	Normalized Differential Wetness Index
NIR	Near Infrared
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NumPy	Numerical Python
OGR	OGR Simple Features Library
OLCI	Ocean and Land Color Instrument
OLI	Operational Land Manager
PET	Global Potential Evapotranspiration
Pandas	Python Data Analysis Library
RSR	Reduced Simple Ratio
RVI	Ratio Vegetation Index
SAR	Synthetic Aperture Radar
SEBCS	Spatial Computing of Surface Energy
SLSTR	Sea and Land Surface Temperature
SR	Simple Ratio
STARFM	Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model
SWIR	Shortwave Infrared
TIF	Tagged Image Format
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TOA	Top of Atmosphere
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UBF	Unmixing Based Fusion
UBL	Urban Boundary Level
UCL	Urban Canopy Layer
UHI	Urban Heat Island
USGS	The United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
WV	WorldView
YAML	YAML Ain't a Markup Language

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Ukázka dat z termokamer.....	17
Obrázek 2 Ukázka dat z termokamer.....	18
Obrázek 3 Srovnání vlastností pásem družic	27
Obrázek 4 Red Edge v porovnání s odrazivostí vegetace a OLI.	35
Obrázek 5 Distribuce energie na suchém povrchu a vegetaci	36
Obrázek 6 Levý: LST získaná z platformy Sentinel-3	38
Obrázek 7 Pravý: LST spočítaný z dat Landsat 8.....	38
Obrázek 8 Ukázka meteorologických dat pro výpočet CCI.....	43
Obrázek 9 Schéma výpočtu CCI	45
Obrázek 10 Komponenty albeda.....	48
Obrázek 11 Charakteristika albeda vybraných ploch DKV	50
Obrázek 19 Komponenty Kc.....	51
Obrázek 20 Koeficient plodiny odvozený pomocí DPZ	52
Obrázek 21 Koeficient plodiny odvozený pomocí terénního měření	53
Obrázek 22 Komponenty povrchové teploty	55
Obrázek 23 Charakteristika povrchové teploty vybraných ploch DKV	55
Obrázek 24 Povrchová teplota objektů.....	57
Obrázek 25 Komponenty ETO.....	57
Obrázek 26 Komponenty BT.....	58
Obrázek 27 Komponenty emisivity	58
Obrázek 28 Komponenty ETI.....	59
Obrázek 29 Komponenty G	59
Obrázek 30 Komponenty NDVI.....	60
Obrázek 31 Komponenty psychometrické konstanty	60
Obrázek 32 Komponenty TOA	61
Obrázek 33 Komponenty Rn	62
Obrázek 34 Komponenty Vc	63
Obrázek 10 Průměrné hodnoty CCI pro DKV	64
Obrázek 11 Průměrné hodnoty CCI pro CLC2018	64
Obrázek 12 Hodnoty CCI CLC208 za květen 2020.....	67
Obrázek 13 Hodnoty CCI CLC2018 za listopad 2020.....	67
Obrázek 14 Hodnoty CCI DKV za květen 2020	68
Obrázek 15 Hodnoty CCI DKV pro listopad 2020	68
Obrázek 16 Ukázka výsledku skriptu v programu QGIS.....	69
Obrázek 35 Místa terénního sběru dat – Sluňákov.....	70

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 Dny snímkování oblast Olomouce družicemi a Landsat 8	18
Tabulka 2 Konvence označování snímků Landsat	20
Tabulka 3 Vstupní parametry pro výpočet CCI v InVEST.....	21
Tabulka 4 Proměnné rovnice Penman-Montheith.....	25
Tabulka 5 Prostorová rozlišení pásem Sentinel 2	26
Tabulka 6 Prostorová rozlišení pásem Landsat 8	27
Tabulka 7 Srovnání prostorového rozlišení a cen vybraných satelitů.	28
Tabulka 8 Prostorová rozlišení pásem ASTER	30
Tabulka 9 Prostorová rozlišení pásem MODIS.....	30
Tabulka 10 Srovnání teplot vybraných povrchů	37
Tabulka 11 Albedo různých typů ploch	39
Tabulka 12 Přehled výsledných vrstev skriptu	44
Tabulka 15 Hodnoty albeda pro vybrané povrchy	49
Tabulka 16 Srovnání hodnot Kc	54
Tabulka 17 Charakteristika povrchová teploty vybraných ploch.....	56
Tabulka 13 Hodnoty CCI vybraných typů ploch – Kc z DPZ.....	65
Tabulka 14 Hodnoty CCI vybraných typů ploch – Kc z terénního měření	66
Tabulka 18 Teploty ploch terénního měření dne 1. 8. 2020 – Sluňákov.	70

SEZNAM POUŽITÝCH VZORCŮ

[1] Referenční evapotranspirace.....	24
[2] Reduced Simple Ratio Index.....	33
[3] Leaf Water Content Index.....	34
[4] Normalized Differential Vegetation Index	34
[5] Normalized Differential Water Index	35
[6] Red Edge Chlorophyl Index	35
[7] Ratio Vegetation Index	36
[8] Bowenův poměr	37
[9] Albedo	38
[10] Radiační teplota	39
[11] Cooling Capacity Index.....	40
[12] Energetická bilance, verze 1	41
[13] Koeficient plodiny, verze 1	51
[14] Koeficient plodiny, verze 2	52
[15] Povrchová teplota objektů	54
[16] Zjevná teplota na senzoru	58
[17] Emisivita povrchu	58
[18] Evapotranspirační index	59
[19] Půdní tok tepla	60
[20] Psychometrická konstanta	61
[21] Teplota bez atmosféry.....	61
[22] Energetická bilance, verze 2	62
[23] Frakce vegetačního krytu	63

ÚVOD

Teplota a jeho projevy jsou jedním z důležitých aspektů života na Zemi. Extrémní klimatické jevy související nejen s teplotou jsou projevem dlouhodobého globálního fenoménu způsobeného změnou podmínek v atmosféře, známým pod pojmem **klimatická změna** (Hollan, 2021). S růstem teploty bývá také často spojován pojem **globální oteplování**, které je jednou ze součástí klimatické změny.

Globální oteplování souvisí s velmi rychlým stoupaním teploty vzduchu, na kterém nese podíl i člověk především díky vysoké produkci **skleníkových plynů** související se **spalováním fosilních paliv** (Hollan, 2021). V posledních letech je zaznamenána vyšší intenzita **tání ledovců**, nebo **zvyšování hladiny moří**. V dlouhodobém horizontu deseti tisíců let jsou tyto změny z části přirozeně způsobené jevy, jež člověk neměl možnost ovlivnit. Těmito faktory jsou **změny ve vulkanické činnosti**, které mohou ovlivňovat **albedo atmosféry**, nebo **vývoj cyklů Slunce**, s čím souvisí kolísající množství slunečního záření dopadajícího na povrch Země.

Dnešní vědci jsou si částečné nepřírozenosti probíhající klimatické změny vědomi a díky tomu vzniká množství studií, jak tento efekt zmírnit. Předlohou podobných řešení se stal **udržitelný rozvoj**, který umožňuje další vývoj lidské populace, a zároveň se snaží o obnovu a zachování původních přírodních podmínek. K těmto zásadám se vyjadřují i světové společnosti, jako je **OSN** (Organizace spojených národů), která již v roce 1972 přijala životní prostředí jako lidské právo. OSN se také podílela na vytvoření **Pařížské dohody**, jež od roku 2015 zavazuje zúčastněné státy k ochraně klimatu a snižování emisí skleníkových plynů. Touto smlouvou je vázána i **Česká republika**.

Bylo představeno mnoho různých řešení pro zmírnění dopadů klimatické krize, které pokrývají různá odvětví. Z globálního pohledu se jedná hlavně o přechod na **obnovitelné zdroje energie** (vítr, solární energie a další) a podporu **alternativních způsobů dopravy** (jízda na kole, veřejná doprava a jiné). Zásadní je také využívání nových **stavebních materiálů**, které neoteplují své okolí. Díky **zastavování volné plochy** nepropustnými a nevhodnými materiály dochází k **výkyvům toků tepla** a jeho akumulaci. Tento jev je známý jako **Městský tepelný ostrov** (UHI – *Urban Heat Island*) a vyskytuje se ve zvýšené míře ve městech nebo oblastech s hustou a nevhodnou zástavbou. První zmínky o rozdílech teplot mezi zastavěnými a volnými plochami byly popsány v roce 1818 (Howard, 1818).

Kvůli využití ochlazovacího efektu vegetace dochází na budovách k výstavbě **zelených střech**, kdy je střecha pokrytá zelenou vegetací, včetně substrátu, a zároveň slouží jako způsob harmonizace městské zástavby a přírody. Tyto zelené střechy mohou sloužit jako **domovy pro živočichy**, kteří by mohli být z měst vytlačováni. Udržitelně se dnes staví i celé budovy tak, aby **efektivně využily půdu**, a aby stavba byla efektivní z hlediska **ekologického provozu**.

Tato diplomová práce si klade za cíl podat informace o potenciálu ochlazování typů ploch nacházejících se v Olomouci a jejím okolí. Součástí této práce je označení **důležitých aspektů**, jež mají vliv na distribuci tepla, a následné zpracování řešení, které je efektivní a může snadno posloužit pro další analýzy.

1 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je **kvantifikovat** míru **evapotranspirace** a **ochlazovací funkce** jednotlivých typů vegetace. Hodnocení uvedených ekosystémových funkcí je založeno na **analýze multispektrálních** a **termálních dat** pořízených bezkontaktním snímáním, k čemuž jsou využity zejména data z družice **Landsat 8**. Zájmovým územím je **Olomouc** a její okolí. Na základě rešerše jsou vybrány nejvhodnější algoritmy a ty jsou na obrazová data aplikovány. Analýza je prováděna **opakovaně** za účelem získání informace o míře plnění těchto funkcí v průběhu roku.

Hlavní cíl práce je rozdělen na tři dílčí cíle, které na sebe logicky navazují. Prvním dílčím cílem je **identifikace klíčových komponent** výpočtu pro odvození míry evapotranspirace a ochlazovací funkce. Jedná se především o výpočet albeda a povrchové teploty. Druhým dílčím cílem je **vytvoření skriptu** založeného na výsledcích předchozího dílčího cíle, jež odhadne **Index míry ochlazení** (*Cooling Capacity Index*). Třetí dílčí cíl je zaměřen na ověření správnosti a funkčnosti skriptu a interpretaci vypočtených výsledků.

Posledním dílčím cílem bude **vyhodnocení tepelných pochodů** jednotlivých typů ploch. V rámci práce bude provedeno **termální snímání** ruční termokamerou ve stanovené oblasti, jež poslouží jako **kontrolní datová sada** pro odhad teploty ze satelitního snímku.

2 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

Geoinformatické studie se snaží využívat **moderní metody**, jež umožňují **efektivní zpracování** dat, které je možné **reprodukovat** a **optimalizovat**. Tato práce není výjimkou. Kromě digitálních metod, jako je **skriptování** a vytváření prostředí na míru projektu, jsou do práce zapojeny i metody **terénního měření manuálního** i **automatického**, a to pomocí bezdrátového přenosu dat ze senzorů.

2.1 Použité metody

Miniconda3

Miniconda3 je odlehčená verze původní platformy **Anacondy**, vytvořené pro pohodlné využívání **Pythonu** a **R**. Miniconda obsahuje pouze Python a uživatelem vybrané **balíčky**. Pro každý projekt vytváří Miniconda **vlastní proměnné prostředí** (Conda, 2017).

Python

Python je skriptovací jazyk, který v roce **1991** navrhl Guido van Rossum. Jedná se o open-source projekt. V roce 2017 byl Python jedním z deseti nejpopulárnějších programovacích jazyků a zároveň jde o jeden z nejvíce geopozitivních jazyků disponující rozsáhlou komunitou orientovanou nejen na prostorové úlohy. Jeho obliba je dána jeho velkou **rychlostí** a **jednoduchostí** i širokou škálou použití. Pomocí Python lze vytvořit **interface** aplikací, analyzovat mnoho druhů dat nebo provádět matematické **výpočty**. V dnešní době je Python využitelný také pro **strojové učení** (YK Sugi, 2018).

Terénní termální měření

Tepelné měření v terénu probíhalo v oblasti **Sluňákov** v Horce nad Moravou během letních měsíců. Omezením při terénním měření byly nevhodné podmínky způsobené **oblačností** nebo **srážkami**. Měření probíhalo vždy v den (Tabulka 1) a v hodinu přeletu satelitu nad oblastí Olomouce v časech mezi **9:00 a 10:00**. Pro terénní sběr dat byla použita termální kamera **Flir E60** (Obrázek 1) s rozlišením senzoru pro termální snímky 320×240 px. Výstupní data jsou zobrazována ve formátu **JPEG** (Flir, 2021).

Česká republika disponuje poměrně **velkým počtem oblačných dní**, jež znehodnocují snímky i validační měření. Z tohoto důvodu bylo použito pouze **jedno měření z celkových tří** provedených, které byly silně ovlivněny oblačností.

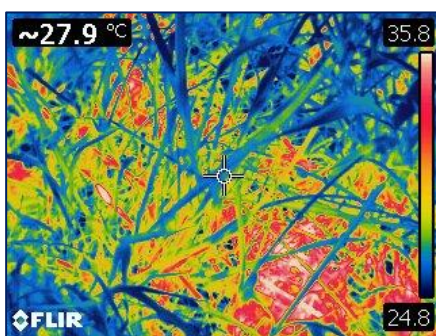
Terénní sběr byl realizován na začátku **června 2020 a trval do srpna 2020**, kdy se začala snižovat oblačnost na družicových snímcích (i přesto však značné množství snímků obsahuje vysokou oblačnost či stíny). Předem byly vytipovány dny, kdy družice Landsat 8 bude snímkovat oblast Olomouce (Tabulka 1). Zvýrazněné dny označují data, ve kterých je snímek k dispozici bez oblačnosti. Snímkování probíhalo s periodou **šestnácti dní**. Družice vždy snímkuje v podobný čas (mezi devátou a desátou hodinou dopoledne). O půl desáté také začalo ruční měření. Díky překryvu os je možné dosáhnout kratšího časového rozpětí mezi snímky (u Landsat 8 až na šest nebo devět dní).

Tabulka 1 Dny snímání oblast Olomouce družicemi a Landsat 8. (Zdroj: vlastní).

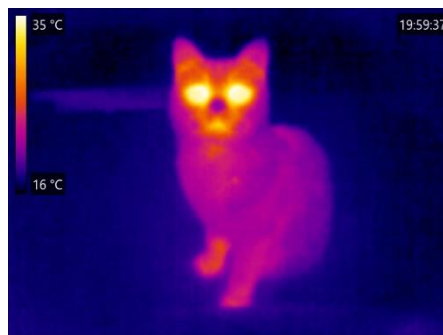
	Datумы snímání			
Březen	1.3	10.3.	17.3*	26.3
Duben	2.4	11.4	18.4	27.4
Květen	4.5	13.5	20.5	29.5
Červen	5.6	14.6	30.6	
Červenec	7.7	16.7	23.7	
Srpen	1.8	8.8	17.8	24.8
Září	2.9	9.9	18.9	25.9
Říjen	4.10	11.10	20.10	27.10
Listopad	5.11	12.11	21.11	28.11

*Zvýrazněné datumy označují dny, z nichž bylo snímání použito pro diplomovou práci.

Jako nejvhodnější lokalita pro ruční měření bylo vybráno **Centrum ekologických aktivit města Olomouce – Sluňákov**. V této oblasti se nacházejí všechny typy vegetačních povrchů, které bylo třeba ručně zhodnotit. Díky poloze blízko Olomouce se tato oblast nachází na stejném snímku jako celé město Olomouc a nedochází tedy k časové prodlevě mezi jednotlivými snímky. Z důvodu několika výskytů **špatného počasí** nebylo ruční měření prováděno při každém přeletu satelitu nad městem Olomouc.



Obrázek 1 Ukázka dat z termokamery



Obrázek 2 Ukázka dat z termokamery

(Zdroj: vlastní).

Pro optimální výsledky je třeba měření v terénu provádět v době **malého** nebo **žádného** množství oblačnosti. Měřené místo by nemělo být ve stínu (např. pod stromy, zastíněno člověkem při měření apod.) a kamera by měla být vzdálena přibližně **jeden metr** od měřené plochy. Objektiv kamery by měl mířit **kolmo** na měřenou plochu. Nutností je také **zaostření** obrazu pro zachycení detailů.

Snímáno bylo několik typů ploch:

- zastavěná plocha (silnice, střechy),
- stromy (olistěné),
- vodní plocha,
- posekaný travní porost,
- neposekaný travní porost.



Obrázek 3 Snímání plochy pomocí ruční termokamery (Zdroj: vlastní).

2.2 Použité přístroje

FLIR E60

Sběr termálních dat byl realizován příruční kamerou **FLIR E60**, která umožňuje zachycení teploty povrchu v **termálním a viditelném spektru**. Výsledný formát pro přenos je **JPEG** (*Joint Photographic Expert Group*).

Libelium Sensirion SHT75

Data o **teplotě** [°C] a **vlhkosti vzduchu** [%] byla získána z čidla Sensirion SHT75 na senzoru od firmy Libelium. Měření probíhá **každých patnáct minut**, data jsou následně ukládána do **databáze** (PostgreSQL 10.7) nacházející se na serveru Katedry geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci. Pro potřeby diplomové práce byla data exportována ve **formátu CSV** (*Comma Separate Value*).

2.3 Použitá data

Hlavní datovou sadu tvoří družicové snímky satelitu **Landsat 8** ve vybraném období. Snímky jsou pořizovány s časovým rozlišením maximálně šestnácti dní. Využita jsou primárně **červená, blízká infračervená a termální pásma ve formátu TIF** (*Tagged Image File Format*).

Satelitní snímky pocházejí z **EarthExplorer**, archivu Americké geologické společnosti (USGS), kde si registrovaný uživatel může vybrat z široké škály družicových snímků, včetně radarových nebo komerčních.

Jednotlivé snímky družic Landsat jsou označeny pomocí složeného názvu, který zároveň popisuje typ produktu (Tabulka 2).

LXSS_LLLL_PPPRRR_YYYYMMDD_yyyymmdd_CC_TX
LC08_L1TP_189026_20200801_20200807_01_T1

Tabulka 2 Konvence označování snímků Landsat (Zdroj: USGS, 2021).

Označení	Hodnota
L	Landsat
X	Senzor (O – OLI, M-MSS, T-TM, T – TIRS, C- OLI+TIRS)
SS	Satelit (08 – Landsat 8)
LLLL	Úroveň předzpracování (L1TP/L1GT/L1GS)
PPP	Označení sloupce
RRR	Označení řádku
RRRRMMDD	Datum snímání
rrrrmmdd	Datum zpracování
CC	Číslo kolekce (01, 02 a dále)
TX	Kategorie kolekce (RT, T1, T2)

Jako kontrolní data slouží výsledky **pozemního terénního měření** pomocí ruční **termokamery** v oblasti Sluňákov. Terénní měření probíhalo v časech přeletu satelitu nad oblastí Olomouce.

Meteorologická data (teplota vzduchu, vlhkost vzduchu) jsou získány pomocí měření pocházející ze senzorů vlastněných a provozovaných Katedrou geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci.

Corine Land Cover 2018

Vrstva CLC2018 je nejnovější vrstvou v sérii Corine Land Cover obsahující 44 tříd, je vytvářena v rámci programu Copernicus Land Monitoring Service. Minimální rozlišovací jednotka pro plošný prvek je 25 ha, pro liniový 100 m. Vrstva vychází ze satelitních dat družice Sentinel-2 a je doplněna o data ze snímků Landsat 8 popisující období mezi roky 2017 až 2018. Jedná se o volně dostupnou vrstvu v rastrové i ve vektorové verzi (Copernicus, 2021).

Detailní konsolidovaná vrstva biotopů

DKV je vrstva biotopů České republiky v měřítku 1 : 10 000, která byla vytvořena Ústavem výzkumu globální změny AV ČR v. v. i. (CzechGlobe) ve formátu Esri shapefile (EPSG: 5514). Kombinuje se zde mapování biotopů České republiky (AOPK ČR) a konsolidovaná vrstva ekosystémů (AOPK ČR a CzechGlobe). Částečně zde byla využita i předchozí verze CLC z roku 2016. Vrstva pokrývá celou Českou republiku, poslední aktualizace pochází z prosince 2017 (Pechanec, 2021).

2.4 Použité programy

ArcGIS Pro v.2.7.1

Program Esri ArcGIS Pro byl využíván pro vizuální kontrolu výsledků a také pro vytvoření zón z funkčních ploch pomocí nástroje *Zonal Statistics*. Tyto zóny byly exportovány do formátu .xlsx a dále zpracovány programem Microsoft Excel. Jedná se o komerční software, jehož licenci vlastní Katedra geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci.

Microsoft Excel 365

Excel je tabulkový a statistický software, který je součástí balíku Microsoft Office. V tomto programu byly vytvářeny grafy zobrazující výsledky diplomové práce. Jedná se o komerční software, licenci zapůjčila Katedra geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci.

InVEST

InVEST (*Integrated Valuation Ecosystem Services and Tradeoffs*, podrobněji v kapitole **3.5.4 Cooling Capacity Index**) v současné době poskytuje několik různých **environmentálních výpočtů**, mezi nimi i Model ochlazení města (*Urban Cooling Model*). S jeho pomocí lze **odhadovat ochlazovací kapacitu** vegetace. Vstupem je **CSV** (*Coma Separated Value*) soubor (Tabulka 3), (Sharp et al., 2020).

Tabulka 3 Vstupní parametry pro výpočet CCI v InVEST. (Upraveno podle Sharp et al., 2020).

Označení	Proměnná	Škála
LUCODE	Typ využívané půdy	kategorie <1;25>
Shade	Procento zastínění povrchu	<0;1>
Kc	Koeficient rostliny (Allen et al., 1998)	<0;1>
Albedo	Albedo	<0;100>[%]
GreenArea	Procento nezastavěné plochy	<0;1>
BuildingIntensity	Procento intenzity zástavby	<0;1>

SEBCS

Modul pro prostorový výpočet energetické bilance a vodního stresu vegetace (*Spatial Computing of Surface Energy Balance and Crop Water Stress*) původně pro **IDRISI** vyvinul Jakub Brom ze Zemědělské fakulty Jihočeské Univerzity v Českých Budějovicích. Program je napsán v jazyce **Python** a je spustitelný jako **samostatný skript** nebo ve

formě doplňku pro QGIS. Je díky němu možné sledovat vodní stres vegetace a také toky energie na povrchu (Brom, 2014).

Visual Studio Code

Freeware odlehčená verze původního Visual Studia od Microsoftu umožňuje editaci a vývoj zdrojových kódů. Podporuje široké spektrum programovacích jazyků nebo Git.

2.5 Zájmové území

Zájmovým územím je město Olomouc (219 m n. m.) v České republice a její okolí. Zpracovávané území má rozměry 320 km². Nachází se zde několik druhů funkčních ploch, mezi nejvýrazněji zastoupené patří orná půda (177 km²), hospodářské louky (30,3 km²) a městská zástavba (22,6 km²). Podle Českého hydrometeorologického úřadu byla v roce 2020 průměrná teplota této oblasti přibližně 10 °C (ČHMÚ, 2021).

3 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Teplotní pochody v atmosféře jsou způsobeny mnoha **environmentálními** i **antropogenními procesy** a jejich **kvantifikace** může být složitá díky širokému množství okolních vlivů (Santer et al., 2013). Dlouhodobě zvýšená teplota ovzduší může mít za následek **zdravotní rizika**, ale i **zpomalení ekonomiky** a **poškození krajiny** (např. požáry). Významnou funkcí ve vztahu regulování teploty klimatu zastává vegetace (Pokorný et. al, 2018). Díky **fotosyntéze** zbavuje vegetace atmosféru CO₂ nebo **zadržuje vodu** v krajině. V neposlední řadě vytváří potřebné zastínění a díky evapotranspiračním procesům má ochlazující efekt na krajinu. Aby rostliny fotosyntézu mohly provádět, musí dojít k několika biochemickým procesům, na které má vliv **disipace energie** ze Slunce umožňující přeměnu energie, čehož jsou schopny všechny **živé systémy**.

Další z důležitých funkcí vegetace je funkce **ochlazování okolí**. Za tímto účelem byl vyvinul *Cooling Capacity Index*, který umožňuje **určit intenzitu ochlazení** daného typu povrchu. Tento index byl odvozen ze dvou výzkumů a v současnosti je stále **rozvíjen** a **zpřesňován**.

Na Katedře geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci se tematikou kvantifikace ochlazování vegetace dosud nikdo nezabýval. Nejnovější výzkum v příbuzné oblasti provedl **Tomáš Pour** ve své dizertační práci, která se věnuje termografii (Pour, 2019). V České republice se touto problematikou zabývá skupina výzkumníků v rámci společnosti **ENKI, o.p.s.** v čele s **Janem Pokorným**. Tato společnost se zaměřuje na aplikovaný výzkum i osvětu veřejnosti. V oblasti evapotranspirace a ochlazování vegetace probíhá také dlouholetý akademický výzkum. Potřebné hodnoty jsou měřeny téměř deset let a do budoucna bude měření dále probíhat (Pechanec et al., 2021). Roli vegetace v hydrologickém cyklu a její úlohu v transformaci sluneční energie dlouhodobě studuje i **Jakub Brom**, jenž vyvinul program SEBCS (viz kapitola 2.4), (Brom, 2015). Různými aspekty globální změny klimatu se zabývá také Ústavu výzkumu globální změny –AV ČR v. v. i. **CzechGlobe**, který má několik tematicky zaměřených oddělení, kde se mimo jiné zabývají kvantitativními odhady parametrů vegetace nebo studiem teplotních charakteristik povrchů a teplotními režimy měst. Nejvýznamnější světové výzkumy v tomto oboru byly vytvořeny na **Univerzitě ve Standfordu** v rámci projektu **Natural Capital Project**, pod který spadá i modul využívající *Cooling Capacity Index* (podrobněji kapitola 3.5.4).

3.1 Vegetační povrch z pohledu DPZ

Vegetační povrch lze v různých disciplínách vnímat mnoha způsoby a lze u něj pozorovat **různorodé charakteristiky**. Výzkum klimatu v DPZ (dálkový průzkum Země) si mimo jiné žádá práci s **hydrometeorologickými procesy**, především **transpirací**, **evaporací** a **evapotranspirací (ET)**. Intenzita těchto procesů přímo **ovlivňuje život** na Zemi a samotné procesy jsou **ovlivňovány kvalitou a množstvím vegetace**.

Hustota a zápoj vegetace

Hustota vegetace označuje **počet jednotlivých rostlin** vztažené k jednotce plochy. V závislosti na typu vegetace **nemusí korelovat** s množstvím biomasy. Informace o hustotě vegetace lze získat využitím **vegetačních indexů** (Lima-Cueto et al., 2019).

Kromě hustoty vegetace lze také určit **zápoj vegetace**, jenž vyjadřuje míru, se kterou se překrývají koruny stromů nebo keřů. Zápoj vegetace má vliv na množství propuštěného a posléze odraženého světla. Podle míry zápoje klasifikujeme dva druhy vegetace, **zapojenou** a **nezapojenou**.

Zapojený les tvoří **souvislý pokryv** a díky tomu les odráží velké množství záření. Nezapojený **les nemá vzájemně se dotýkající koruny**. Odražené záření poté přichází primárně z nižších pater.

Evaporace, transpirace, evapotranspirace

Evaporace označuje fyzikální proces odpařování vody z různých povrchů. Transpirace je termín pro fyziologický proces výparu z povrchu vegetace (Liou & Kar, 2014). Protože evaporace a transpirace jsou dva významné procesy ovlivňující okolní teplotu a jen těžko je lze oddělovat, slouží k popisu celkového výparu pojem **evapotranspirace (ET)**. Evapotranspirace představuje významnou část celkového **hydrologického cyklu** (Liou & Kar, 2014).

Existuje široké spektrum ukazatelů, které mají vliv na intenzitu ET (**atmosférické podmínky**, stav **půdy**, **druh rostlin**, **celkový stav rostlin...**) (Kešner, 1977). Podle Šarapatky (2010) však existují dvě hlavní skupiny faktorů ovlivňující míru ET:

- **vlastnosti porostu a jeho stav**
 - věk, pokryvnost listů, intenzita vedení vody od kořenů a další;
- **vliv vnějšího prostředí**
 - množství vody v půdě, množství energie dodané pro výpar vody a další.

ET se uvádí v a) **milimetrech nebo litrech na metr čtverečný**; b) wattech na metr čtverečný (**W/m²**), nebo je možné použít označení ET jako množství energie potřebné k odpaření vody (latentní teplo odpařování – λ) (Allen et al., 1998).

Aktuální evapotranspirace nasycených par (AE) představuje množství vody, které se skutečně odpaří z povrchu procesy evaporace a transpirace (Pidwirny, 2006). Ačkoliv se jedná o velmi významnou komponentu ve vztahu k zemskému klimatu, je velmi složité AE měřit přímými metodami.

Potenciální evapotranspirace (ET₀) představuje množství vody, jež by se odpařilo (pomocí evaporace a transpirace), pokud by bylo dostupné dostatečné množství vody na referenční ploše (optimálně zásobená vodou, plně zapojený porost). Díky využití ET₀ lze evapotranspiraci používat nezávisle na typu půdy či vegetace. Jedním ze způsobů výpočtu ET₀ je rovnice *Penman-Monteith* [1] (Tabulka 4). Do rovnice vstupují meteorologická data (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273,15} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad [1]$$

Tabulka 4 Proměnné rovnice Penman-Montheith. (Zdroj: Allen a Nations, 1999).

Označení	Proměnná	Jednotky
ET_0	Potenciální evapotranspirace	mm/den
Rn	Energetická bilance	MJ/den
G	Tok tepla do půdy	MJ/den
T	Teplota vzduchu ve 2 m nad povrchem	°C
u_2	Rychlost větru ve 2 m nad povrchem	m/s
e_s	Tlak nasycených par na povrchu	kPa
e_a	Skutečný tlak vzdušných par	kPa
γ	Kalibrační (psychometrická) konstanta	kPa/°C
Δ	Tlak par odvozený z křivky	kPa/°C

3.2 Monitoring vegetace pomocí vesmírných misí

Výzkum klimatu je možné provádět v **lokálním** i **globálním** měřítku. V obou případech je vhodné využít družicových snímků, které jsou poskytovány **volně** i pod **komerční licenci**. Snímky stejného místa vznikají v téměř **pravidelné periodě** a poskytují tím základ pro sestavení a analýzu časové řady. Dva největší poskytovatelé volně dostupných družicových snímků jsou v dnešní době **Evropská kosmická agentura**, která zaštiťuje misi **Sentinel**, a **Geologická společnost Spojených států amerických** (USGS – *The United States Geological Survey*) poskytující snímky historicky vůbec nejdelší družicové mise **Landsat**.

3.2.1 Mise Sentinel

Sentinel-2

Mise Sentinel-2 byla zahájena v roce 2015 vypuštěním satelitu Sentinel-2A a o rok později vypuštěním satelitu Sentinel-2B. Mise Sentinel 2 je jedním z projektů Copernicus pod záštitou **ESA** a **EU** (Evropská unie). Zaměřuje se na monitoring **využití půdy** a detekci **změn klimatu**. Snímá z výšky 786 km s periodou **5 dní** pro dva satelity (Tabulka 5).

Mise Sentinel-2 produkuje několik typů dat v rozměru 100×100 km²:

- **LEVEL-1C**
 - reflektance horní vrstvy atmosféry,
 - převzorkován podle rozlišení pásem,
 - obsahuje masky oblačnosti.
- **LEVEL-2A**
 - zemský povrch,
 - převzorkován podle rozlišení pásem.

Kromě LEVEL-1C a LEVEL-2A produkuje Sentinel-2 další tři typy dat (LEVEL0, LEVEL1A, LEVEL1B), které nejsou uživatelům volně přístupné. Obsahují především metadata, primární data nebo pouze částečně korigovaná data (ESA, 2021a).

Tabulka 5 Prostorová rozlišení pásem Sentinel 2 (Upraveno podle ESA, 2021).

Pásmo	Prostorové rozlišení
B1	60 m
B2 až B4	10 m
B5 až B7	20 m
B8	10 m
B8a	20 m
B9 a B10	60 m
B11 a B12	20 m

Sentinel-3

Třetí řada satelitů Sentinel je primárně určena pro monitoring oceánů, povrchové teploty a výšky hladiny světových oceánů. Na palubě nese dva senzory: a) OLCI (*Ocean and Land Color Instrument*), multispektrální senzor, který data sbírá v 21 pásmech s prostorovým rozlišením 300 m; b) senzor SLSTR (*Sea and Land Surface Temperature*), jenž snímá v devíti pásmech v prostorovém rozlišení 500 m (ESA, 2021a).

Sentinel-7

Jednou z dalších vesmírných družic, která by v budoucnosti měla zajišťovat monitoring **antropogenního CO₂** je Sentinel-7. Každá družice ponese **spektrometr**, díky kterému bude možné zjistit obsah CO₂ v atmosféře. Bude proto možné monitorovat dodržování **Pařížské dohody** členskými státy a jejich vliv na klimatickou změnu (Copernicus, 2018).

Ostatní mise Sentinel

Mimo tři uvedené typy Sentinelu momentálně existují i další družice. Dvojice družic **Sentinel-1** snímá zemský povrch pomocí **radaru** (zejména pobřežní oblasti). **Sentinel-4** je připravovaná mise orientovaná na **monitoring plynů** v atmosféře (momentálně v provozu jeden ze dvou satelitů). **Sentinel-5** by se měl mimo jiné orientovat na monitoring **kvality vzduchu** a předpovědi znečištění (ESA, 2021b).

3.2.2 Mise Landsat

Landsat 8

Satelit Landsat 8 z roku 2013 je jedním z pokračovatelů spolupráce **USGS** a **NASA** (*National Aeronautics and Space Administration*) monitorujícím zemský povrch.

Landsat 8 Zemi obíhá ve výšce 705 km na dráze synchronní se Sluncem. Snímky poskytuje v rozměru **180×185 km²**. Sběr dat probíhá pomocí dvou senzorů **OLI** (*Operational Land Manager*) pro multispektrální snímky ve viditelné části spektra a **TIRS** (*Thermal Infrared Sensor*) pro termální snímkování. Informace o prostorovém rozlišení jsou uvedeny v Tabulce 6 (USGS, 2017).

Tabulka 6 Prostorová rozlišení pásem Landsat 8. (Upraveno podle USGS, 2017).

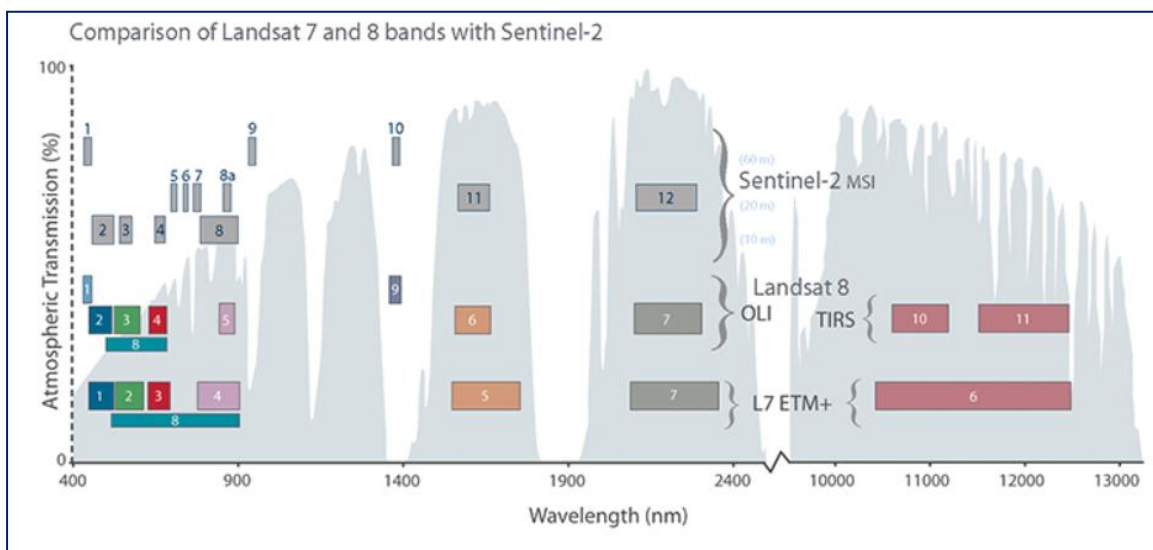
Pásmo	Prostorové rozlišení
B1 až B7 (OLI)	30 m
B8 (OLI)	15 m
B9 (OLI)	30 m
B10 a B11 (TIRS)	100 m

Snímky jsou poskytovány ve třech verzích s radiometrickými korekcemi (USGS, 2021):

- **L1TP** – *Terrain Precision Correction*
 - ortorektifikace (digitálních model terénu);
- **L1GT** – *Systematic Terrain Correction*
 - geometrická korekce (efemeridy, digitální model terénu);
- **L1GS** – *Geometric Systematic Correction*
 - geometrická korekce (efemeridy).

Landsat 9

Na podzim roku 2021 by měla být vypuštěna nová družice Landsat 9. Oproti svým předchůdcům bude mít **vyšší snímací kapacitu** a zachycené snímky budou tedy detailnější. Landsat 9 v budoucnu fyzicky i datově **nahradí družici Landsat 7** (z roku 1999), (NASA, 2020).



Obrázek 3 Srovnání vlastností pásem družic. (Zdroj: NASA).

3.2.3 Komerční satelitní snímky

Kromě volně dostupných satelitních snímků lze pořídit také **komerční snímky**. Nejvyužívanější a nejznámější satelity vypustila na oběžnou dráhu firma **DigitalGlobe**, jejichž snímky je možné za poplatek pořídit. Výhody komerčních snímků jsou zejména v jejich **prostorovém rozlišení** a v některých případech i **rychlost** pořízení. Na druhou stranu však **cena** snímku závisí na **velikosti území nebo počtu snímků**. Rozlišení, pásma a ceny snímků jednotlivých satelitů popisuje Tabulka 7.

GeoEye

Satelit poskytující data pro **armádu Spojených států amerických** v prostorovém rozlišení 41 cm a 50 cm pro komerční účely. Produkuje **panchromatické** a **multispektrální** snímky (LandInfo, 2018b).

IKONOS

První satelit, který dosáhl vysokého prostorového rozlišení a vytvářel **multispektrální** a **panchromatické** snímky v modrém, zeleném, červené a blízkém infračerveném pásmu. Činnost satelitu IKONOS byla **ukončena** v roce 2015 (LandInfo, 2018b).

Pléiades

Dvojice satelitů Pléiadas-1A a Pléiadas-1B byly vypuštěny v roce 2011 a 2012. Původní účel satelitů představoval **využití při krizovém řízení**. Snímky je možné objednat méně než šest hodin před jejich pořízením (LandInfo, 2018b).

QuickBird

Další z řady satelitů vypuštěných společností DigitalGlobe je QuickBird. Sestával ze dvou satelitů QuickBird-1 a QuickBird-2, jež pořizovaly **panchromatické** a **multispektrální** snímky. V roce 2015 byla mise **ukončena** (LandInfo, 2018b).

WorldView

Satelity **WorldView** (WV-1, WV-2, WV-3, WV-4) se soustředí na **panchromatické** a **multispektrální** snímky. V současnosti fungují pouze tři ze čtyř satelitů, WV-4 je po problémech s gyroskopem nefunkční (LandInfo, 2018b).

Tabulka 7 Srovnání prostorového rozlišení a cen vybraných satelitů. (Upraveno podle: LandInfo, 2018).

	WV-1	WV-2	WV-3/4	IKONOS	Pléiades	Geoeye	QuickBird
Panchrom.	46 cm	46 cm	31 cm	82 cm	50 cm	41 cm	61 cm
<i>Cena</i>	24 \$	24 \$	24 \$	X	21,5 \$	24 \$	X
<i>Archiv*</i>	14 \$	14 \$	14 \$	10 \$	12,5 \$	14 \$	14\$
Multispekt.	X	1,84 m	1,24 m	3,2 m	2 m	1,65 m	2,4 m
<i>Cena</i>	X	27,5 \$	27,5 \$	X	21,25 \$	27,5 \$	X
<i>Archiv*</i>	X	17,5 \$	17,5 \$	10 \$	12,5 \$	17,5 \$	17,5 \$

*Cena za snímky starší 90 dní.

3.2.4 Termální snímkování

Informace o teplotě objektů lze získat i pomocí satelitních snímků. Některé družice jsou již vybaveny **teplotními čidly** a snímají v termálním spektru (Landsat – pásma 10 a 11). Jiné satelity tato teplotní čidla neobsahují a **teplotu je nutné počítat** nepřímou (Sentinel 2 – nemá žádná termální pásma, oproti tomu Sentinel 3 již termální pásmo obsahuje) (Prikaziuk a van der Tol, 2019).

Princip tepelného záření je popsán **Planckovým zákonem**. Max Planck navrhl kvantové uspořádání energie, atomy tedy mohly nabývat pouze diskretních hodnot. Díky tomu bylo možné popsat záření absolutně černého tělesa a následně i **emisivitu**, kterou se rozumí poměr intenzity vyzařování objektu a absolutně černého tělesa (Kuenzer & Dech, 2013).

Termální snímkování probíhá většinou v **atmosférických oknech**. První okno (3–5 μm) zaznamená záření emitované zemským povrchem a také odražené sluneční záření. Pro eliminaci vlivu slunečního záření probíhá toto snímkování převážně v noci. Druhé atmosférické okno (8–12 μm) umožňuje zachycení energie vyzářené zemským povrchem bez výraznějšího vlivu sluneční energie (Zemek, 2014).

Termální snímky, podobně jako multispektrální, vyžadují přípravu před samotnou analytikou. Jedná se o **atmosférické a radiometrické korekce**, jež umožní získat teploty ze snímku.

Radiometrické korekce mohou být prováděny **výrobcem senzoru** nebo mohou být provedeny dodatečně. Způsobů provedení korekce je několik, Zemek (2014) využívá dvou **naměřitelných extrémů** (dvou absolutně černých těles o známých teplotách).

Atmosférické korekce zbavují snímky chyb způsobené **ztrátou signálu** při jeho průchodu atmosférou a také **vlivu vlhkosti** nebo **teploty vzduchu** (Pour, 2019). Pro korigování obrazu existují automatické metody. Jednou z možností je balíček **Thermimage** dostupný v jazyce R (Tattersall, 2017). Kromě jazyka R jsou dostupné balíčky také v jazyce Python, mezi nejpoužívanější patří **rpy2** (Lgautier, 2014).

Termální snímky jsou důležité nejen pro zjišťování teplotních poměrů, ale také pro další **výzkum klimatu**. Jedním ze způsobů využití je monitorování evapotranspirace rostlin a stavu vodních zdrojů (Anderson et al., 2012). Z meteorologických dat družice **NOAA** (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) byla v rámci výzkumu z roku 2006 odhadována intenzita evapotranspirace (Sobrino et al., 2007). Několik modelů evapotranspirace vegetace bylo **testováno** také v **Rakousku** v rámci výzkumu z roku 2018 (Brenner et al., 2018).

3.2.5 Dostupné termální snímky

Kromě multispektrálních snímků je vhodné pro klimatické studie využívat i snímky zachycující povrch v **termální části** elektromagnetického spektra. Termální pásmo má standardně **horší prostorové rozlišení**, ale najdeme jej na širokém spektru družic.

ASTER

ASTER je jedním z pěti senzorů na palubě satelitu Terra. Obrazová data poskytuje ve 14 pásmech (NIR – *Near Infra Red*, SWIR – *Shortwave Infrared*, TIR – *Thermal Infrared*), od roku 2008 však kvůli závadě chybí data pásma SWIR (Shimoda & Kimura, 2018).

Tabulka 8 Prostorová rozlišení pásem ASTER. (Upraveno podle Satellite Imaging Corporation, 2021).

Pásmo	Prostorové rozlišení
B1 až B3 (NIR)	15 m
B4 až B9 (SWIR)	30 m
B10 až B14 (TIR)	90 m

HyTES

Hyperspectral Thermal Emission Spectrometer (HyTES) je primárně hyperspektrální senzor vyvíjený NASA pro sběr dat, poprvé byl testován v roce 2012. Sestává ze dvou částí (Kramer, 2012):

- Hyperspektrální senzor:
 - obsahující 256 kanálů širokých od 7 do 12 μm ;
- Termální senzor:
 - s prostorovým rozlišením 60 m.

Landsat

Podrobné informace o misi jsou uvedeny v kapitole **3.2.12. Landsat**.

MODIS

MODIS je jedním ze senzorů družic Terra a Aqua s časovým rozlišením jednoho až dvou dní. Prostorové rozlišení je však nedostačující pro studie na menších územích (Tabulka 9). Data jsou sbírána ve 36 pásmech. Primární využití MODIS je pro studium dynamiky oceánu a pevniny.

Tabulka 9 Prostorová rozlišení pásem MODIS. (Upraveno podle: NASA, nedatováno).

Pásmo	Prostorové rozlišení
B1 a B2	250 m
B3 až B7	500 m
B8 až B36	1000 m

Sentinel

Podrobné informace o misi jsou uvedeny v kapitole **3.2.1 Sentinel**.

3.2.6 Fúze satelitních snímků

Obrazová fúze představuje **kombinaci dvou nebo více informací** z různých zdrojů do jednoho obrazu. Často dochází ke kombinaci radarových dat (**SAR** – *Synthetic Aperture Radar*) a laserového měření (**LiDAR** – *Light Detection and Ranging*), (Korosov et al., 2016). Fúzování by se dalo také v některých případech označit jako **pansharpening**, tedy kombinování obrazu s vyšším a nižším rozlišením.

Ačkoliv jsou v dnešní době dostupné satelity s poměrně dobrým časovým rozlišením (MODIS má časové rozlišení 1-2 dny) jejich prostorová přesnost je mnohem menší (MODIS – 1×1 km). Pomocí fúze lze tyto nedostatky zlepšit nebo zcela odstranit.

Korosov a Pozdnyakov ve svém článku z roku 2016 prezentují vybrané způsoby, jakými lze provádět fúze satelitních snímků:

- MRA – *Multi Resolution Analysis*.
- LSRMI + HSRMI – *Low Spectral/High Spectral Resolution Multispectral Image*,
 - Metoda vhodná pro data snímána jedním typem senzoru.
- UBF – *Unmixing Based Fusion*,
 - Metoda vhodná pro snímky pobřežních oblastí.
- STARFM – *Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model*,
 - Vyvinuto speciálně pro fúzi dat Landsat a MODIS.

Fúze Sentinel-2 a Sentinel-3

Dnes již existuje několik způsobů, jak fúzi provést. Jedním z používaných algoritmů pro snímky Sentinel je **MultiResolution Analysis (MRA)**, který rozkládá jednotlivé části signálu na menší části. Dalším příkladem může být **Intensity-Hue-Saturation Analysis (IHS)**. IHS je schopný během krátkého času zpracovat velké množství dat, nicméně v jeho výsledcích se často vyskytovaly distorze obrazu. Postupně byly navrhovány nové formy algoritmu, které tyto chyby eliminovaly, nebo alespoň identifikovaly (T. M. Tu et al., 2004).

Úskalí fúzování snímků

Ačkoliv existuje řada algoritmů pro fúzi snímků pořízených družicemi, téměř vždy se jedná o algoritmy vytvářené pomocí **pokročilých technik** (neuronové sítě, různé úrovně strojového učení). Úspěšnost fúze závisí nejen na kombinaci typů senzorů a prostorových rozlišení, ale také na **heterogenitě zobrazovaného území**, a zda je v takovém případě náročnost procesu přijatelná.

Důležitým faktorem fúze je také **účel**, pro který je fúze vytvořena. Výsledkem může být zlepšení prostorového rozlišení na výsledném snímku, avšak existuje riziko **spektrální degradace kontrastu** mezi jednotlivými typy objektů na snímku (Mazaheri et al., 2015).

Dalším problémem kvality fúzování satelitních snímků je **lidský faktor**. Kvalita a úspěšnost samotné fúze silně závisí na zkušenostech výzkumníka. Z tohoto důvodu je možné využít i aritmetických kombinací pásem snímků, často se však jedná pouze o **zvýrazňování daného objektu (Broveyho transformace** zvýrazňuje kontrast mezi stíny a vysoce odrazovým povrchem, ale silně **potlačuje původní radiometrické rozlišení**). Shrnutí úskalí i výhod fúzování snímků, včetně

různých typů výpočtu a srovnání kvality výstupů, bylo přehledně zpracováno v článku *Image Fusion for Remote Sensing Applications* (Fonseca et al., 2011).

3.3 Možnosti zpracování obrazových dat

V závislosti na poskytnutém typu korekce obrazu vyžadují obrazová data obecně další zpracování. Jelikož je často pracováno s větším počtem satelitních snímků či větším objemem vedlejších dat, stává se efektivní **způsob zpracování** stále více probíraným tématem. V dnešní době nabírají na popularitě **cloudové nástroje**, jež umožňují nejen **zpracování** dat, ale také jejich **vyhledání** a **filtraci** a mnohdy i **uložení**. Výhoda tohoto řešení spočívá především v tom, že si uživatel množstvím dat **nezahlčí vlastní hardware**.

Díky cloudu je možné zpracovávat **velké množství dat**, aniž by byla stažena na lokálním disku, nedochází tedy k zahlcování stroje uživatele. Výhodou je také možnost **sdíleného přístupu několika uživatelů**.

Nevýhodou těchto systémů je **neschopnost uživatele přesně lokalizovat data** a zajistit jejich **ochranu**. Přístup k datům také **závisí na třetí straně**, která může přístup nebo operace s daty zpoplatňovat.

Google Earth Engine

Pro zpracování obrazových dat je dnes široce využíván *Google Earth Engine*, výpočetní platforma, díky které je možné provádět prostorové výpočty nad družicovými snímky. K dispozici jsou všechny snímky USGS/NASA (mimo **Landsat**), **MODIS**, snímky **ESA** (Sentinel) nebo předem připravené datasety s **teplotou** či **srážkami**. Možné je také nahrát svá vlastní data nebo využít již předem připravených skriptů pro výpočty. Výsledky je možné ukládat nebo exportovat do Google Drive.

V současné době je v provozu Code Editor, který pracuje s JavaScript, a nově vzniká také **Python API** (*Application Programming Interface*). Pro výzkumné, vzdělávací a nekomerční užití je platforma dostupná bezplatně. Komerční užití je zpoplatněno. Použití platformy podléhá registraci (Gorelick et al., 2017).

Ostatní platformy

Kromě Google Earth Engine lze využít i jiné cloudové platformy. **Amazon Elastic Compute Cloud** je zaměřen na aplikace **Linux**. Každý uživatel zde vytváří **Machine Image** – sklad obsahující data, knihovny a vizuální parametry pro danou aplikaci (GIS Cloud, 2021).

SunNetwork od Oracle je naopak orientován především na programování v **C** a **C++**. V SunNetwork uživatel programuje aplikaci, kterou následně nahraje na **SunGrid** a přes nativní portál aplikaci spouští nebo sdílí (Oracle, 2021).

ArcGIS Online patřící společnosti Esri je dalším typem cloudového nástroje, umožňuje vytvářet mapy, analyzovat prostorová data a sdílet výsledky a výstupy. Platforma poskytuje možnost práce s 3D daty, vytváření map s příběhem (story maps) nebo napojení na ArcGIS Notebooks, které umožňují analyzovat data pomocí Pythonu. Díky propojení

celého ArcGIS řešení je možné ArcGIS Online využít i v jiných aplikacích od Esri (Esri, 2021).

3.4 Vegetační indexy

Z obrazových dat lze jen obtížně extrahovat jednotlivé informace. Díky vegetačním indexům je možné tento problém částečně vyřešit. Vegetační indexy představují **matematické kombinace** jednotlivých spektrálních pásem, které mohou danou informaci pro každý pixel **zvýraznit nebo potlačit**. S postupem času vznikly nové indexy, jež kromě vegetace dokáží pracovat také se spektrální informací o **půdě** nebo **atmosféře** (Lukeš et al., 2018).

V rámci diplomové práce byl využit index **NDVI** (*Normalized Differential Vegetation Index*) (viz kapitola 3.4.3) a **RVI** (*Ratio Vegetation Index*), (viz kapitola 3.4.6), které vedly k výpočtu několika dalších veličin, jako je LST, míra vegetačního pokryvu nebo půdní tok tepla a další. Níže jsou uvedeny indexy, jež jsou v rámci výzkumů na podobné téma **často využívány**.

3.4.1 LAI/RSR

Leaf Area Index je jedním z **nejpoužívanějších** vegetačních indexů. Hojně se využívá nejen pro **studium vegetace**, ale i pro **monitoring hydrologického cyklu** ve vegetaci. Díky tomu lze zjišťovat informace o stavu a **stresu vegetace**. Díky své univerzálnosti je využitelný i ve výzkumu kanop nebo odrazivosti vegetace a vlivu na celkové klima (Yu et al., 2019).

Jeho výpočet sestává pouze z **poměru plochy listů na jednotku povrchu**, jedná se o bezrozměrnou jednotku (Jonckheere et al., 2004). V současnosti se však k LAI alternativně počítá také **RSR** (*Redused Simple Ratio*), který se pohybuje v hodnotách $<-1;1>$, a jenž by na rozdíl od LAI měl být **vhodnější pro jehličnaté stromy** (Stenberg et al., 2004).

$$RSR = \frac{NIR}{RED} \times \frac{SWIR2_{max} - SWIR2}{SWIR2_{max} - SWIR2_{min}} \quad [2]$$

RED ... červené pásmo

NIR ... blízké infračervené pásmo

SWIR ... střední infračervené pásmo

3.4.2 LWCI

LWCI (*Leaf Water Content Index*) popisuje **množství vody obsažené v listech**. Pomocí indexu LWCI lze také sledovat suchost vegetace. LWCI vykazuje **korelaci** také s jinými vegetačními indexy, zejména s LAI nebo NDVI. Kromě **lesního porostu** lze LWCI aplikovat i na vegetaci vyskytující se na **zemědělské půdě** (Hunt & Rock, 1989).

$$\text{LWCI} = \frac{-\ln[1 - (R_{0,82} - R_{1,6})]}{-\ln[1 - (R_{0,82} - R_{1,6}^{\text{FT}})]} \quad [3]$$

R_x ... odrazivost v dané vlnové délce,

$R_{1,6}^{\text{FT}}$...faktor odrazivosti v dané vlnové délce (lze použít konstantu 0,2).

3.4.3 NDVI

Normalized Differential Vegetation Index byl jeden z **prvních vegetačních indexů**. Ačkoliv je využíván například **farmáři pro monitoring** stavu vegetace na polích, poskytuje spíše obecné informace o stavu vegetace (Precision Agriculture, 2018).

Od použití pouze NDVI se pomalu upouští kvůli několika problémům, jež se při výpočtu vyskytují. Při intenzivně zapojené vegetaci jeho **hodnota neroste** a od určité prahové hodnoty zůstává index konstantní (Lukeš et al., 2018).

Index nabývá hodnot od **<-1;1>**. Hodnoty v intervalu přibližně **<-1;0>** indikují mrtvou vegetaci. Od 0 do 0,3 se jedná o nezdravou nebo poškozenou vegetaci. Hodnoty nad 0,4 značí zdravé a velmi zdravé plodiny.

Interpretace výsledků NDVI může být **zavádějící**, pro každý typ plodiny je totiž ideální **jiná hodnota** odvíjející se od obsahu biomasy, odrazivosti plodiny, fenologických fází apod. Ideální je tedy **kombinovat NDVI** s jinými analytickými technikami nebo s dalšími vegetačními indexy (EOS, 2019).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad [4]$$

RED ... červené pásmo

NIR ... blízké infračervené pásmo

3.4.4 NDWI

Normalized Differential Water Index využívá NIR a SWIR (*Short Wave Infrared*) kanálů. Je vhodný pro výpočet **intenzity sucha a degradace půdy** a nabývá hodnot od $\langle -1; 1 \rangle$. Kromě vegetačních charakteristik je možné NDWI využít i pro zjišťování informací **o vodních párách v atmosféře**. Občas se vyskytuje jako náhrada NDVI, nicméně jeho původní účel bylo **doplnění a upřesnění výsledků NDVI** (Gao, 1996).

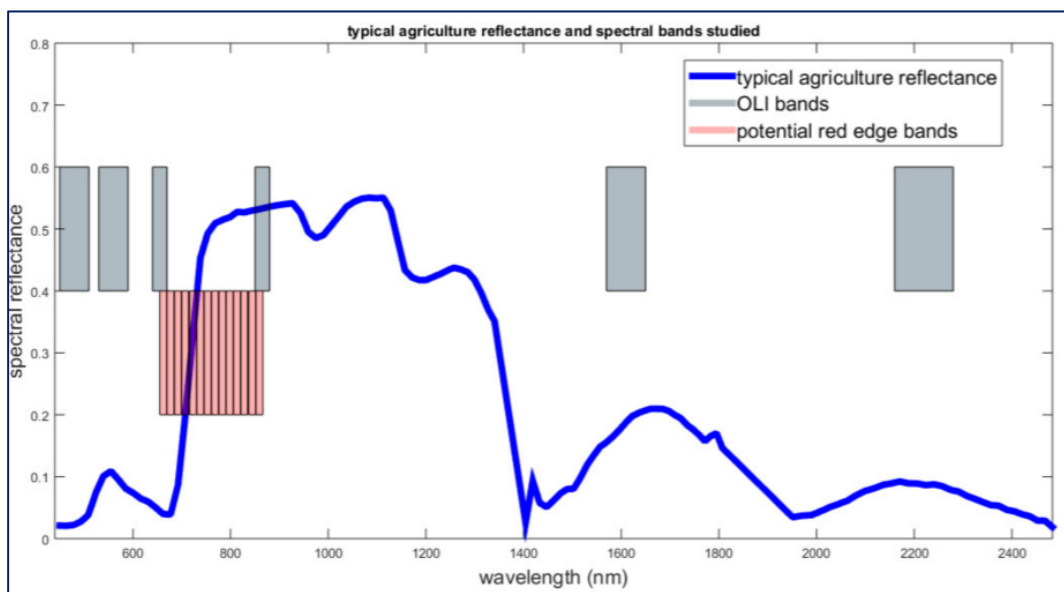
$$\text{NDWI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad [5]$$

SWIR ... krátkovlnné infračervené pásmo

NIR ... blízké infračervené pásmo

3.4.5 Red Edge

Red Edge (Obrázek 4) označuje ostrou změnu v odrazivosti zelené biomasy mezi přibližně **680 a 750 nm**. Tato vlnová délka je jedním z **důležitých ukazatelů**, jenž je široce využíván v DPZ pro studium stavu vegetace (Cui & Kerekes, 2018).



Obrázek 4 Red Edge v porovnání s odrazivostí vegetace a OLI. (Zdroj: Cui, 2018).

Studie z roku 2003 vyvrací korelaci mezi amplitudou *Red Edge* a množstvím chlorofylu (Tang et al., 2004). Pro detailnější monitoring stavu vegetace je *Red Edge* využíván často v kombinaci s vegetačními indexy. Pro Sentinel-2 byl dokonce v roce 2017 vytvořen vegetační index **Red Edge Chlorophyll Index (CI_{RE})**, (Clevers et al., 2017).

$$\text{CI}_{\text{RE}} = \frac{R_{780}}{R_{705}} - 1 \quad [6]$$

R_x ... odrazivost v dané vlnové délce

3.4.6 RVI

Další alternativou odhadu zdraví vegetace je RVI *Ratio Vegetation Index* (v literatuře označovaný také jako SR – *Simple Ratio*). Vyšší hodnoty indexu naznačují zdravější vegetaci, nízké hodnoty vegetaci pod stresem, případně také označují holou půdu nebo vodní plochu.

$$RVI = \frac{NIR}{RED} \quad [7]$$

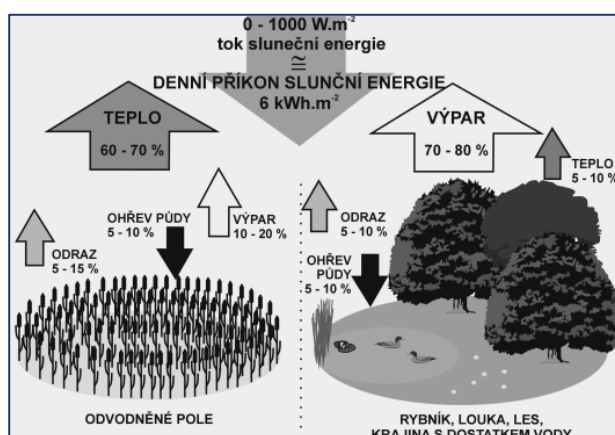
RED ... červené pásmo
NIR ... blízké infračervené pásmo

Výpočet může být problematický ve chvíli, kdy je **odrazivost červeného pásma nulová**, v tento okamžik není možné RVI spočítat. Z toho důvodu byl vytvořen index NDVI, který tento problém řeší (Major et al., 1990).

3.5 Teplotní jevy a procesy

Při výzkumu klimatické změny bývá často zmiňována **teplota vzduchu**. Zapomíná se však na další veličiny, jež mají výrazný vliv na okolní teplotu. Jsou jimi *Land Surface Temperature* (**povrchová teplota**), **albedo** a **radiální teplota**. Intenzitu těchto tří jevů lze získat **výpočtem z družicových snímků**, ačkoliv jsou součástí větších celků, poskytují částečný náhled na stav tepelných chodů na různých površích.

Rozdíl mezi plochou s vegetací a holou plochou činí **několik stovek wattů**. Evapotranspirace rostlin umožňuje **ochlazení výparem** a zároveň **oteplení chladných míst pomocí kondenzace** (Obrázek 5). Odraz různých typů vegetace, ačkoliv odlišný, nedosahuje příliš velkých rozdílů. Voda, kterou rostliny vypařují, dále kondenzuje na chladných místech a vyrovnává tím teplotní rozdíly (**ranní rosa**). Na rozdíl od umělých systémů pro vyrovnání teplot zde **nedochází k produkci odpadního tepla** (Pokorný et al., 2018).



Obrázek 5 Distribuce energie na suchém povrchu a vegetaci. (Zdroj: Pokorný, 2001).

Jakým způsobem se teplo přenáší, je přímými metodami většinou obtížné stanovit. Tento úkol však velmi usnadňuje použití **Bowenova poměru**, který umožňuje **identifikaci**, zda se jedná o **latentní teplo** (teplota okolí se nezmění, díky evapotranspiraci) nebo **pocitové teplo** (teplota okolí se změní)

Bowenův poměr

Jedná se o poměr množství tepla, jež se předává na povrch, a molekulární vodivosti atmosféry ku množství tepla, které se spotřebuje vypařením vody do atmosféry. Jeho hodnoty však **nejdou příliš přesné** pro velké vodní plochy (ČMeS, 2017).

$$\beta = \gamma \times \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad [8]$$

ΔT ... Rozdíl teplot

Δe ... Rozdíl tlaku vzduchu

γ ... Psychometrická konstanta

Bowenův poměr je **přímo měřitelná veličina**. Jeho přesnost kolísá pouze s menší vlhkostí vzduchu nebo při výrazné advekci vzduchových hmot v atmosféře. Díky tomu je Bowenův poměr **často používán** jako kontrolní měření nebo jako součást praktických studií (Buttar et al., 2018).

3.5.1 Land Surface Temperature (LST)

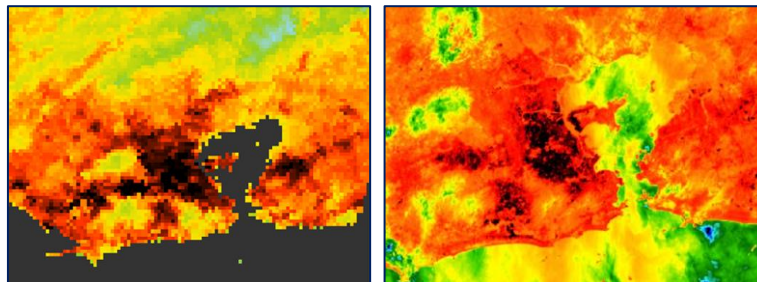
LST [°C] popisuje termodynamický stav povrchu objektu a je přímým důsledkem energetických přeměn objektu (Tabulka 10). Jedná se o jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňující energetickou bilanci Země (Li & Duan, 2017). Pro změření LST v terénu (bodově) se využívá **pyrometr** – infračervený teploměr. Pokud je potřeba zachytit plochu, lze využít **termokameru** (maticový systém) nebo **snímkování** (družice, letadla/UAV – *Unmanned Aerial Aircraft*), (Pokorný et al., 2018).

Tabulka 10 Srovnání teplot vybraných povrchů. (Převzato: Pokorný et. al., 2018).

Typ povrchu	Rozpětí teplot
Skupiny stromů	22–24 °C
Sečené trávníky	29–35 °C
Silnice	35–38 °C
Parkoviště	40–55 °C

Pro získání informací o LST ze skenu lze využít volně **dostupné družicové snímky**. ESA (*European Space Agency*) nabízí již upravené snímky se spočítanou **LST** ze snímků z platformy **Landsat**. Obrázek 6 a Obrázek 7 níže ukazují patrný rozdíl LST zástavby (tmavě červená až černá barva) dosahující teplot až 41 °C a okolní husté vegetace a oceánu (zelená a žlutá barva), která má teplotu přibližně 30–33 °C. Problémem tohoto produktu je absence skutečných hodnot teploty, po stažení a otevření produkt obsahuje pouze barevné kódy, ne záznamy o teplotě.

Další možností je LST odhadnout. Pomocí **termálních, červených a infračervených** pásem produkovaných družicí Landsat 8 je možné LST vypočítat (Avdan & Jovanovska, 2016).



Obrázek 6 Levý: LST získaná z platformy Sentinel-3

Obrázek 7 Pravý: LST spočítaný z dat Landsat 8.

(Zdroj: ESA).

Mimo družice Landsat 8 lze data o LST získat i z jiných družic. Družice MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) poskytuje data o **emisivitě** a **povrchové teplotě** v rozlišení 1×1 km. K dispozici je také **denní** a **noční** povrchová teplota (Wan & Li, 2010).

3.5.2 Albedo

Albedo [% nebo <0;1>] označuje množství **krátkovlnné sluneční energie**, která se odrazí od zemského povrchu. Pokud by celá Země byla pokryta souvislou vrstvou ledu, albedo by odpovídalo přibližně 84 %. Avšak pokud bychom povrch pokryli vegetací, albedo by kleslo na 14 % (Carlowicz & Simmon, 2012). Zjednodušeně lze říci, že čím světlejší povrch je, tím vyšší albedo má (Luz & Toro, 2015).

Pro zjišťování hodnot albeda lze využít laboratorně testované hodnoty odrazivosti ze spektrofotometru (Sen & Roesler, 2016) nebo je možné provést terénní měření pomocí **albedometru**. Albedometr se obvykle skládá ze **dvou pyranometrů**. To jsou přístroje, které jsou schopny zaznamenat příchozí a odražené záření (jeden otočený směrem k obloze, kde snímá přímé sluneční záření a druhý, otočený směrem k povrchu snímající množství odraženého záření). **Poměrem** slunečního a odraženého záření je získána hodnota albeda.

Výpočet albeda je možné provést několika způsoby. Pro účely diplomové práce byla vybrána metoda vyvinutá pro snímky Landsat. Tuto metodu představil v roce 2000 **Shunlin Liang**, kromě Landsat vyvinul také výpočet albeda pro MODIS nebo ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), (Liang, 2001). Výpočet je původně sestaven pro **Landsat 5**, ale po dosazení patřičných pásem z Landsat 8 se tato metoda ukázala jako vhodná.

$$\alpha = \frac{0,356\rho_1 + 0,130\rho_3 + 0,373\rho_4 + 0,085\rho_5 + 0,072\rho_7 - 0,0018}{0,356 + 0,130 + 0,373 + 0,085 + 0,072} \quad [9]$$

ρ_x ... vybrané pásmo Landsat 8

Hodnoty albeda pro jednotlivé povrchy se mohou **napříč literaturou lišit**, albedo ovlivňuje široké množství **faktorů (citlivost** přístroje, doba **snímání**, typ vegetace...). U povrchu také záleží na **okamžité situaci**, rozdílné albedo má čerstvě napadený sníh oproti sněhu s nečistotami nebo ledu (Tabulka 11). Níže jsou uvedeny hodnoty albeda vybraných povrchů uvedených v článku z roku 2015 (Kotak Beng et al., 2015).

Tabulka 11 Albedo různých typů ploch. (Upraveno podle: Kotak Beng et al., 2015).

Typ povrchu	Albedo [%]
Vlnité střechy	10–15
Barvy	15–35
Koruna stromu	15–18
Asfalt	5–20
Beton	25–70
Travní porost	25–30
Led	30–50
Červené střešní tašky	10–35
Cihly/Kameny	20–40
Povrch oceánu	5–10
Starý sníh	65–81
Bílá barva	50–90
Čerstvý sníh	81–88

3.5.3 Radiační teplota

Hodnota radiační teploty [°C] udává střední (průměrnou) **teplotu okolních objektů**, podle toho, zda energii přijímají nebo vydávají (Vorálek, 2008). Díky tomu lze radiační teplotu považovat za jeden z ukazatelů **teplotního stavu objektů/organismů**.

Vztah mezi teplotou objektu a množstvím vydané energie popisuje **Stefan-Boltzmannův zákon**. Lze odvodit, že celková intenzita vyzařování energie roste se čtvrtou mocninou teploty objektu.

$$E = \sigma T^4 \quad [10]$$

σ ... Stefan-Boltzmannova konstanta

T ... teplota [K]

3.5.4 Cooling Capacity Index (CCI)

Schopnost objektů nebo vegetace snižovat teplotu okolního vzduchu můžeme označit jako ochlazovací funkci. Její intenzita závisí na typu povrchu nebo druhu vegetace (Zardo, 2017). Toky tepla, jež se vyskytují v atmosféře, můžeme zaznamenávat a monitorovat **pomocí Indexu ochlazení (CC_i – Cooling Capacity Index)**. Původní metodika výpočtu CC_i vychází ze dvou výzkumů.

Prvním z nich je studie z roku 2017 z univerzity v Trentu (Itálie), kterou vedli **Linda Zardo** a **Davide Geneletti**. Ve své práci se zaměřují na výpočet ochlazovací kapacity **GUI** (*Green Urban Infrastructures*). GUI představují hybridní infrastrukturu, jejíž účelem je zakomponování zelených ploch a vegetace do urbánní architektury (Cosme, 2016). Jejich výzkum identifikoval tři hlavní vlivy na výpočet ochlazovací kapacity: **zápoj vegetace, druh půdního pokryvu** a jeho **velikost** (Zardo, 2017).

Druhým výzkumem je práce z roku 2018 vedená **Joshparem Kunapo** z CEPT (*Centre for Environmental Planning and Technology*) v Ahmenabadu v Indii. Díky jeho studii vznikl **ICAM** (*Integrated Climate Adaptation Model*), web-GIS (geografický informační systém), nástroj, který umožňuje **identifikaci rizikových ploch**. Kromě ploch, které by mohly být problematické z pohledu teploty, lze také identifikovat plochy ohrožené záplavami nebo suchem (Kunapo et al., 2018).

V současnosti metodiku výpočtu CC_i dále rozvíjí Standfordská univerzita v USA s projektem **InVEST** (*Integrated Valuation Ecosystem Services and Tradeoffs*). InVEST je open-source program umožňující vytvoření modelu popisujícího vybranou tematiku. V současné verzi 3.9.0 je k dispozici momentálně **osmnáct modelů** (např. povodňové riziko, monitoring mořských živočichů, produkce plodin...). Pro účely diplomové práce je nejdůležitější model **Urban Cooling**, jenž vychází z předcházejících dvou studií, a dále je doplňuje o vliv **albeda**, zastínění **povrchu** a **evapotranspiraci**.

$$CC_i = 0,6 \times S + 0,2 \times \alpha + 0,2 \times ETI \quad [11]$$

(Sharp et al., 2020)

S ... zastínění

α ... albedo

ETI ... evapotranspirační index

3.5.5 Disipace sluneční energie

Pojem disipace označuje **přenos energie** nebo její **přeměnu** na jinou energetickou formu. Živé systémy jsou schopné přijatou sluneční energii dále distribuovat a využívat. Nejvýznamnější komponentou disipačního procesu představuje **vegetace**. Díky schopnosti vegetace **evapotranspirovat** dokáží rostliny velmi efektivně přeměnit sluneční energii na **latentní teplo** ve formě vodní páry (Hesslerová, 2008).

Disipace sluneční energie je jedním ze **zásadních ukazatelů** teplotních poměrů. Díky její přímé vazbě na vodu ovlivňuje celou řadu jevů, jež mají dále vliv na celkové **klima** (Hesslerová, 2008). Míra disipace je také závislá na celkovém **charakteru aktivního povrchu**. Podle Pokorného (2001) v horkých letních dnech dopadá na povrch až 4,6 kWh/m². Takovéto množství uvolněné energie, v případě dopadu na 100 ha holé půdy, představuje energii 750 až 1 000 t spálení hnědého uhlí. Pokud však energie dopadne na zdravou vegetaci, je většina přeměněna na latentní teplo, které nezpůsobuje zvyšování teploty okolí. Při teplotě 20 °C je spotřebováno 2,45 MJ (tedy přibližně 0,68 kW sluneční energie), (Šarapatka B., 2010).

Míru disipace lze odvodit pomocí vztahu míry **latentního výparu** (L), míry **evapotranspirace** (E), **toku tepla do atmosféry** (H) a **toku tepla do půdy** (G). Latentní výpar označuje množství tepla, jež je potřebné pro přeměnu látky z jednoho skupenství do jiného (Pokorný et al., 2017).

$$R_n = LE + H + G \quad [12]$$

LE ... Latentní tok tepla

H ... Zjevný tok tepla

G ... Pozemní tok tepla

Jedná se o **zkrácenou formu výpočtu** bez některých složek celkové radiační bilance. Vynechané složky radiační bilance mají minimální vliv na celkový tok energie (např. energie z fotosyntézy).

4 VÝSLEDKY

Kapitola výsledky je rozdělena do několika logických částí: první představuje **výsledky samotného řešení výpočtu CC_i**, včetně technických parametrů, schématu výpočtu a aplikaci na zájmovém území. Druhá část obsahuje **přehled odvozených komponent**, vzorce pro odhad a stručnou charakteristiku. Poslední část se zabývá **výsledky terénního sběru dat**.

V této kapitole se nachází několik ukázek výsledků dat ve formě tabulky. Z důvodu většího počtu snímkovacích dnů jsou v tabulkách uvedeny pouze vybrané dny. Průměrná hodnota uvedená vždy v posledním sloupci představuje průměr za všechny snímkovací dny. Předložené boxploty hodnotí vybrané typy funkčních ploch za všechny snímkovací dny. Kompletní tabulky pro všechny funkční plochy jsou uvedeny v přílohách této práce.

4.1 Technické řešení výpočtu CC_i

Hlavním výsledkem diplomové práce jsou dva skripty v jazyce Python:

- **funkce_cci.py**,
- **CCi.py**.

První skript obsahuje samotné funkce, jež jsou importovány do druhého, hlavního skriptu. Druhý skript (CCi.py) obsahuje v první části (po importování balíčků a stanovení konstant) **zpracování meteorologických dat**. Jedná se o **extrakci hodnot** mezi časy 9:30 a 9:55 pro každý měřený den. Tyto hodnoty jsou postupně vkládány do příslušných funkcí pro zpřesnění údajů o teplotě vzduchu.

Ve druhé části skript CCi.py **extrahuje data z metadat** Landsat 8. Ze souborů s koncovkou MTL.txt jsou vybírány hodnoty **REFLECTANCE_MULT** (pro pásma B1, B3, B4, B5, B7 a B10) **REFLECTANCE_ADD** (pro pásma B1, B3, B4, B5, B7 a B10) a **KELVIN_CONSTANT** (pro pásmo B10).

Poslední část skriptu sestává z postupného **volání funkcí** ze skriptu funkce_cci.py. Vzhledem k tomu, že funkce na sebe **navazují** a výstupy předchozí funkce jsou vstupními parametry funkce následující, mají dáno **pořadí**, které lze měnit pouze do určité míry.

4.1.1 Vstupní a výstupní parametry

Skript akceptuje tři druhy vstupních parametrů: **konstanty**, **obrazová data** a **meteorologická data**. Konstanty tvoří číselné hodnoty (celá čísla – *integer* nebo desetinná čísla – *float*). Obrazová data představují **satelitní snímky** ve formátu **TIF**. Všechny snímky musí být ve **stejném souřadnicovém systému** a musejí překrývat stejné území. Prvotní vstup obrazových dat tvoří satelitní snímky z Landsat 8, následně se pracuje s opravenými snímky. Pro správné fungování je nutná znalost souřadnic tvořících hranici obrazu (*bounding box*) a ideálně také **EPSG** (European Petroleum Survey Group) kód souřadnicového systému pro výsledný obraz.

Pro větší přehlednost je vhodné vytvoření **kořenového adresáře**, který bude obsahovat podložky s daty snímků. Obsahem těchto podložek jsou samotná pásma.

Vstupní data představují vybraná pásma a metadata satelitních snímků Landsat 8:

- B1 – Aerosol [30 m/pixel],
- B2 – Modré pásmo [30 m/pixel],
- B3 – Zelené pásmo [30 m/pixel],
- B4 – Červené pásmo [30 m/pixel],
- B5 – Blízké infračervené pásmo [30 m/pixel],
- B7 – Krátkovlnné infračervené pásmo [30 m/pixel],
- B10 – Termální pásmo 1 [100m/pixel],
- MTL – Formát TXT obsahující metadata a konstanty družic.

Prohlížení TIF souborů je možné docílit **pomocí nástrojů třetích stran**, pro pouhé zobrazení snímků lze využít **prohlížeče obrázků** (IRFAN, JPEG View). Další analýza, pokročilá vizualizace nebo práce s hodnotami snímku může být provedena v **GIS** nástrojích nebo dalším **skriptováním**.

Meteorologická data se generují pro každý snímání den z přiloženého CSV souboru, ve kterém jsou obsaženy čtyři sloupce (Obrázek 8):

- sensor – HUMB (vlhkost vzduchu [%]), TCB (teplota vzduchu [°C]),
- value – naměřená hodnota,
- time – datum a čas snímání, měření by mělo probíhat každých patnáct minut,
- id – identifikátor měření.

```
"sensor", "value", "time", "id"  
"HUMB", 69.00, "2020-03-01 09:23:13", 529059  
"HUMB", 68.00, "2020-03-01 10:38:13", 529149  
"TCB", 9.40, "2020-03-01 09:23:13", 529151  
"TCB", 8.20, "2020-03-01 10:38:13", 529061
```

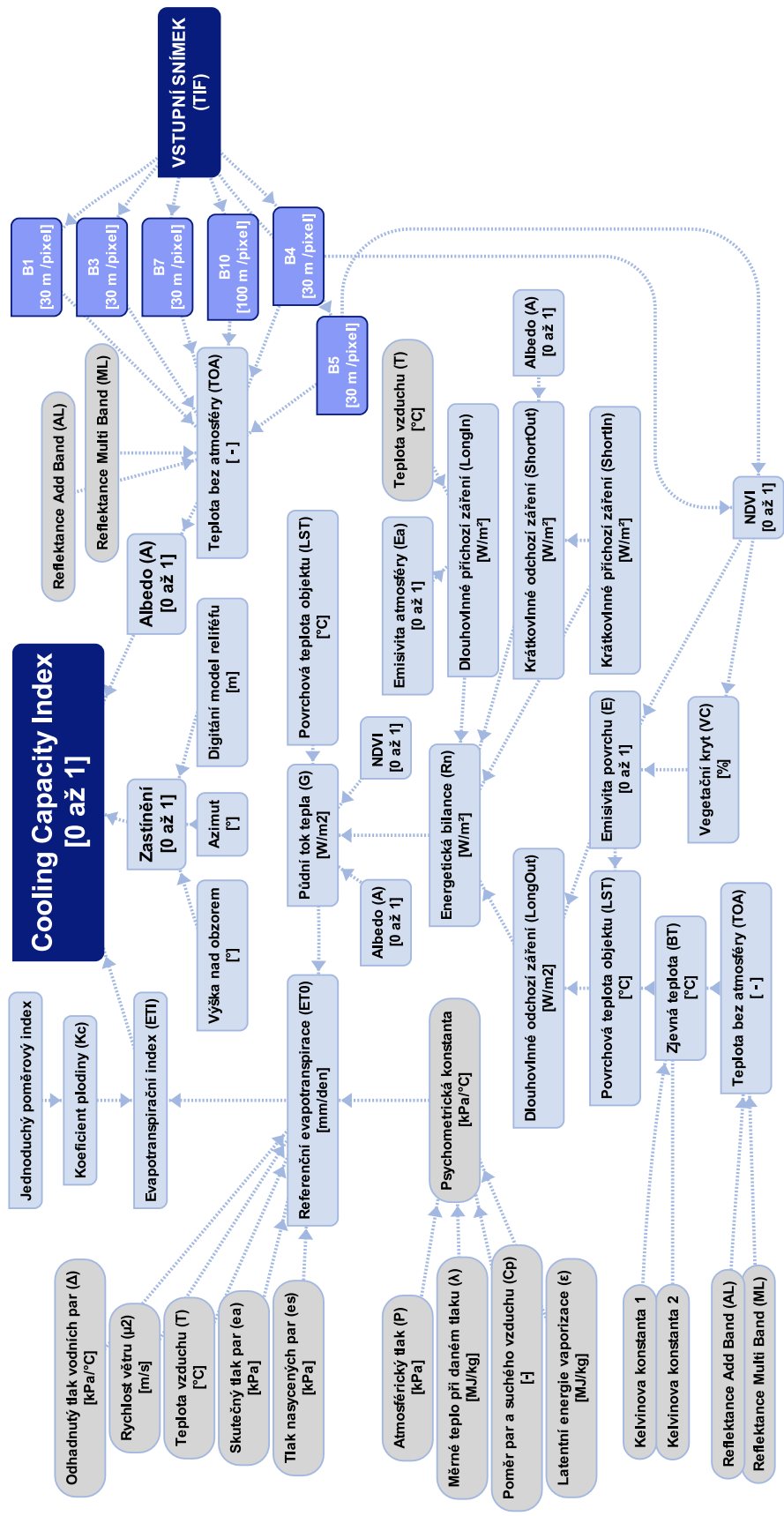
Obrázek 8 Ukázka meteorologických dat pro výpočet CCI (Zdroj: vlastní).

Po spuštění skriptu jsou vytvořena nová obrazová data, opět ve formátu **TIF**, pro každý den měření. Každý snímek je pojmenován pomocí **názvu komponenty** a **data snímání** ve formátu RRRRMMDD.

Tabulka 12 Přehled výsledných vrstev skriptu (Zdroj: vlastní).

Proměnná	Vrstva	Zkratka	Jednotka*	Číslo rovnice
Albedo	Albedo_RRRRMMDD	A	[%]	[9]
Available Evapotranspiration	ET0_RRRRMMDD	ET0	[mm/den]	[1]
Brightness Temperature	BriTemp_RRRRMMDD	BT	[°C]	[16]
Cooling Capacity Index	CCi_RRRRMMDD	CC _i	[]	[11]
Crop coefficient	Kc_RRRRMMDD	K _c	[]	[13], [14]
Evapotranspiration Index	ETI_RRRRMMDD	ETI	[]	[18]
Ground Heat Flux	GroundHeatFlux_RRRRMMDD	G	[W/m ²]	[19]
Land Surface Temperature	LST_RRRRMMDD	LST	[°C]	[15]
Normal Differential Vegetation Index	NDVI_RRRRMMDD	NDVI	[]	[4]
Reduced Vegetation Index	RVI_RRRRMMDD	RSR	[]	[7]
Surface Emissivity	SurfEmis_RRRRMMDD	E	[%]	[17]
Shade	shade		[]	kapitola 4.2.4
Top of Atmosphere	TOA_RRRRMMDD	TOA	[]	[21]
Total Radiation	TotalRad_RRRRMMDD	R _n	[W/m ²]	[12], [22]
Vegetation Cover	VegCover_RRRRMMDD	V _c	[]	[23]

* [] odkazuje na bezrozměrné veličiny



Obrázek 9 Schéma výpočtu CCI. (Zdroj: vlastní).

4.1.2 Požadavky na spuštění

Spuštění skriptu je možné přes **příkazový řádek operačního systému** nebo pomocí **programu třetí strany** (PyCharm, Visual Studio...). Spuštění podmiňuje také instalace jazyka **Python3**. Virtuální prostředí během výpočtu skriptu využívá **nativních i externích balíčků** uvedených níže. Návod pro spuštění skriptu, včetně konfigurace použitých programů, je přiložen jako příloha k diplomové práci ve formě videa.

EarthPy v.0.9.2

EarthPy je balíček umožňující manipulaci a zobrazení **prostorových dat**. V rámci skriptu se podílí na výpočtu zastínění terénu pomocí metody *hillshade*, do které vstupuje pozice Slunce na obloze [°], výška Slunce nad terénem [°] a rastr digitálního modelu reliéfu.

CSV v.0.0.13

Comma Separated Value je interní knihovna Pythonu umožňující manipulaci se soubory typu CSV. V rámci skriptu se využívá pro správné čtení meteorologických dat, která jsou dále zpracovávána jako datový rámec.

Datetime v.4.3.0

Knihovna *datetime* umožňuje manipulaci s formáty času a konverze času mezi jednotlivými časovými zónami. Tento balíček také umožnil konverzi časového atributu v externím souboru meteorologických dat do datového formátu *datetime*.

Fiona v.1.8.13

Balíček Fiona pracuje s **vektorovými daty** a zjednodušuje funkcionalitu knihovny OGR (*OGR Simple Features Library*). Použita je pro převod souřadnic u hranic obrazu (*bounding box*) z původních desetinných stupňů na vybraný souřadnicový systém (v tomto případě UTM Zone 33N – *Universal Transverse Mercator Zone 33N*).

GDAL v.3.0.4

Geospatial Data Abstraction Library (GDAL) je knihovna, jež umožňuje práci s **rastrovými daty**. Balíček GDAL tvoří základní součást pro ořezání digitálního snímku. Díky GDAL je možné ořezané snímky ukládat opět jako TIF nebo GeoTIF přetransformovaný do zvoleného souřadnicového systému.

GeoPandas v.0.8.1

Knihovna GeoPandas (*GeoPython Data Analysis Library*) slouží pro vytváření **datových rámců pro georagicky lokalizovaná data**. Úzce spolupracuje s knihovnamí Shapely a Fiona. GeoPandas byly využity pro přehlednější zpracování ořezání digitálních snímků.

NumPy v. 1.18.3

Numerical Python, jeden z velmi důležitých balíčků pro práci s **maticemi** (*array*). Družicové snímky jsou po načtení převedeny na *numpy.array*, které umožňují pohodlnou manipulaci s daty. NumPy je také používáno pro početní operace nad maticemi (vyhledání maximální hodnoty apod.).

Pandas v.1.1.3

Python Data Analysis Library vytváří datové rámce, které jsou vhodné zejména při práci s maticemi nebo tabelárními daty. Pandas je využito při zpracování meteorologických dat, kdy jsou do datových rámců ukládány data formátu CSV.

Rasterio v.1.1.3

Rasterio umožňuje práci s prostorovými **rastrovými daty**, vychází z knihovny GDAL a NumPy. Efektivní práci poskytuje zejména při práci s daty typu GeoJSON (*Geographical JavaScript Object Notation*) a GeoTIFF (*GeoTagged Image Format*). Balíček je použit při ořezávání družicového snímku vybranými hranicemi obrazu (*bounding box*)

SciPy v.1.5.0

Balíček pro vědecké zpracování dat. Obsahuje funkci *ndimage*, jež umožňuje práci s multidimenzionálními daty. Mimo jiné je díky tomuto balíčku možné nahrazovat původní hodnoty různými filtry (např. mediánový filtr).

Shapely v.1.7.2

Knihovna pracující s **geografickými objekty v rovině**. Shapely obsahuje mnoho velmi používaných funkcí. Funkce *box* byla využita pro definici hranic obrazu.

Tifffile v.2020.10.1

Čtení, vytváření a manipulaci s **maticemi ve formátu (nejen) TIF/GeoTIFF** zabezpečuje Tifffile. Využití balíčku spočívá v prvotním načtení družicových snímků.

JSON

Knihovna JSON (*JavaScript Object Notation*) slouží ke zpracování textu ve formátu **JSON**. Protože JSON vychází z YAML (*YAML Ain't a Markup Language*), dokáže knihovna zpracovat i tento jazyk. Knihovna JSON byla použita pro extrakci souřadnic ze snímků, aby je dále mohlo zpracovat Rasterio.

PPRINT

Pprint, nebo také Data Pretty Printer, je užitečný balíček, pokud je třeba zobrazovat data, jež jsou obsáhlá nebo mají velké množství parametrů. Uživatel tím získá **přehlednější** a lépe **čitelný výsledek**.

OS

Os poskytuje **obecné funkce operačního systému**, jako je manipulace s cestami k souborům, otevírání a zavírání souborů nebo udávání pořadí procesům.

SYS

Zatímco co Os je spojen s operačním systémem, Sys je spojkou **mezi uživatelem a interpretem Pythonu**. Využívá se například při spojování nebo manipulaci s cestami souborů.

4.1.3 Ověření funkcionality skriptu

Funkcionalita byla testována pomocí virtuálního prostředí, jež poskytuje nástroj Oracle VirtualBox. Microsoft má vlastní dostupné vývojářské prostředí určené primárně pro testování Microsoft Edge. V rámci tohoto vývojářského prostředí (*Microsoft Edge Developer*) lze získat volnou a bezplatnou licenci na použití operačního systému Windows10 po dobu 90 dní pro vzdělávací a testovací účely.

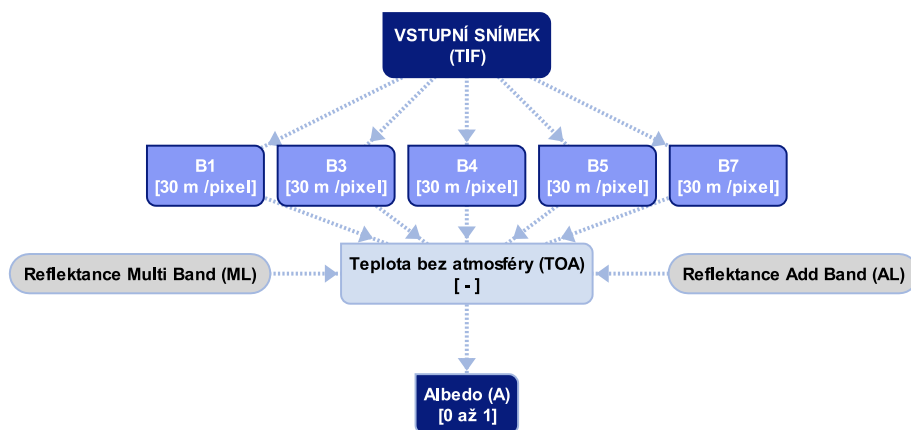
V tomto prostředí byla otestována celá konfigurace potřebných programů (Visual Studio Code, Miniconda3) a také stažení a zpracování snímků. Skript se v tomto čistém prostředí ukázal jako plně funkční. Ukázkou funkcionality skriptu je možno nalézt v přiloženém video návodu (příloha 1).

4.2 Výsledné komponenty výpočtu CCI

Výpočet sestává ze série vzájemně propojených funkcí, přičemž každá funkce má čtyři části: načtení vstupních parametrů, výpočet komponenty, georeferencování a uložení nového snímku. Celý výpočet sestává převážně z kombinace nástroje **SEBCS** (*Spatial Computing of Surface Energy Balance and Crop*), který vyvinul **Jakub Brom** z Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích v roce 2014, a výpočtu **InVEST** (podrobněji v kapitole **3.5.4. Cooling Capacity Index**). Každá z uvedených komponent je výsledkem části celkového skriptu jako TIF obrazová data.

4.2.1 Odhad albeda

Jedním ze stěžejních mezivýsledků při výpočtu CC_i byl odhad albeda. V rámci diplomové práce bylo rozhodnuto o výpočtu albeda podle přístupu představeného v roce 2001 (Liang, 2001), podrobně rozebraného v kapitole **3.5.2. Albedo**.



Obrázek 10 Komponenty albeda (Zdroj: vlastní).

Albedo je odvozeno z pásem B1, B3, B4, B5 a B7 v hodnotách **Top Of Atmosphere** satelitu Landsat 8 (Obrázek 10). Po načtení každého pásma dojde k převedení na **matici**.

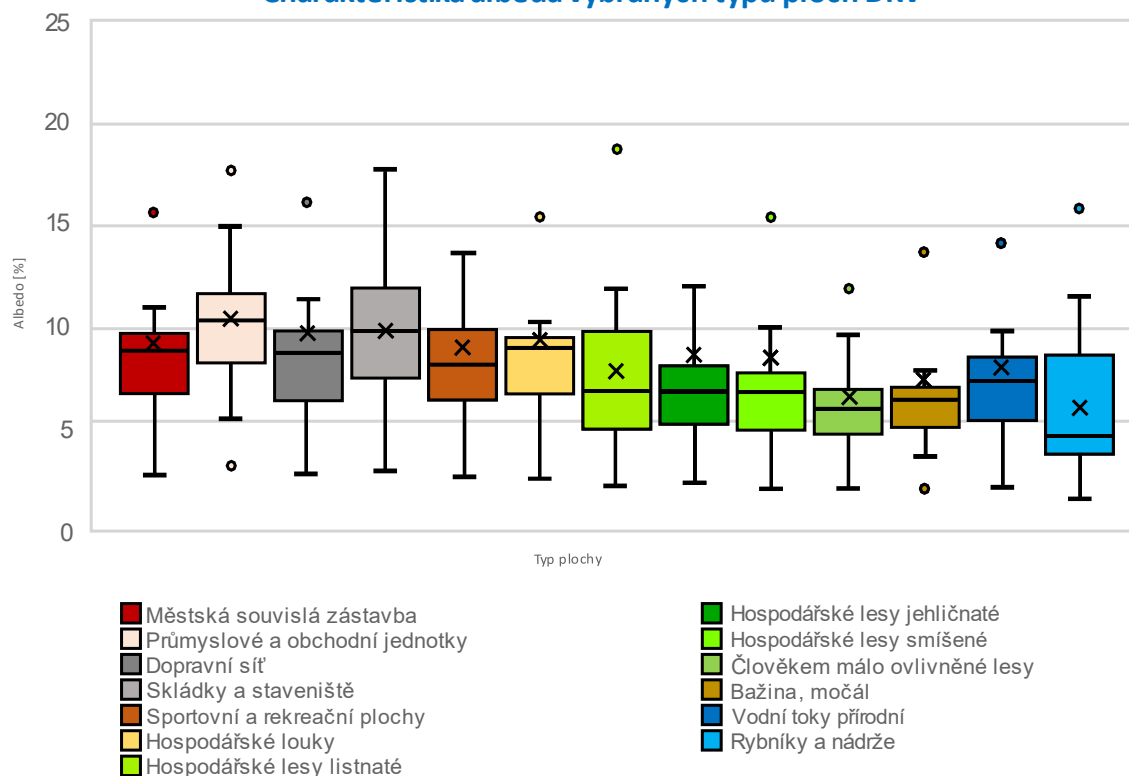
Tabulka 13 Hodnoty albeda pro vybrané povrchy. (Zdroj: vlastní).

Typ plochy	17. 3. 2020	14. 6. 2020	8. 8. 2020	20. 10. 2020	Průměr
Dopravní síť	7,820	16,703	10,854	6,079	10,239
Smišené lesy	6,609	12,570	10,448	4,988	8,850
Listnaté lesy	6,333	15,823	10,826	4,901	9,482
Jehličnaté lesy	6,578	12,637	8,182	5,040	9,509
Člověkem neovlivněné lesy	6,037	16,277	12,499	4,582	7,649
Rybníky, nádrže	5,609	12,388	7,200	4,515	7,367
Vodní toky	6,839	14,759	8,938	5,250	9,143
Bažiny, močály	6,339	14,179	7,943	5,003	8,420
Hospodářské louky	7,706	15,816	10,162	5,773	10,236
Průmyslové jednotky	8,784	17,835	11,960	6,687	11,268
Skládky a staveniště	8,341	17,914	10,804	6,230	10,696
Souvislá městská zástavba	7,572	16,056	10,583	5,918	10,135
Sportovní plochy	7,349	14,193	9,279	5,692	9,884

Vypočtené hodnoty albeda byly srovnány s dříve vytvořenými zónami funkčních ploch (Tabulka 15). U hodnot městské zástavby jsou obecně očekávané nižší hodnoty (tedy větší schopnost akumulace tepla), záleží však vždy na materiálu, barvě budovy, ale například i na prostorovém rozlišení. Z níže uvedených grafů je možné vyčíst, že plochy s vegetací (na grafu níže (Obrázek 11) v zelených barvách) mají **menší rozmezí v akumulaci tepla** (nižší rozmezí hodnot albeda)

Z grafu vyplývá, že nejvyšší rozsah hodnot albeda je u ploch, jež fungují jako skládky nebo staveniště. Nejvyšší hodnoty jejich albeda dosahují téměř 20 %, nejnižší se pohybují okolo 4 %. Zde se může jednat o velmi různorodou strukturu plochy v čase a mnoho různých menších povrchů, jež se na skládce nebo staveništi nacházejí, a které mají různé albedo.

Charakteristika albeda vybraných typů ploch DKV



Obrázek 11 Charakteristika albeda vybraných ploch DKV (Zdroj: vlastní).

Albedo vegetačních ploch je vzájemně velmi podobné, vymykají se pouze listnaté lesy. Největší rozsah hodnot albeda mají skládky a staveniště, jako jedna z urbanizovaných ploch.

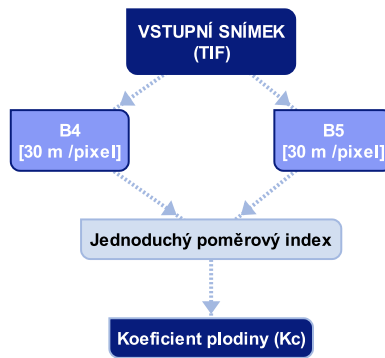
Nejnižší rozsah albeda během roku mají na základě dat člověkem málo ovlivněné lesy, bažiny a vodní plochy. I zde je však nutné opět přihlídnout k možnému vlivu oparu nebo oblačnosti.

4.2.2 Odhad K_c

Jako koeficient plodiny lze označit široké množství vegetačních ukazatelů (Bazální koeficient plodiny – K_{cb} nebo Koeficient hustoty plodin – K_d). Nejzákladnějším z nich je Jednoduchý koeficient plodiny (**Single Crop Coefficient – K_c**). K_c zobecňuje **charakteristiky jednotlivých typů** plodin ve vztahu k evapotranspiraci. Lze říci, že ukazuje na míru schopnosti plodiny evapotranspirovat (čím je koeficient vyšší, tím více může rostlina evapotranspirovat). Pro velmi přesné výpočty by K_c mělo být počítáno s přihlídnutím ke každému dni a každé fázi daného druhu plodiny.

Přístup s pomocí DPZ

Výpočet K_c je časově i zdrojově náročný, proto byly postupně vytvořeny alternativní výpočty, jež výpočet zjednodušují. InVEST nabízí výpočet pomocí vegetačního indexu LAI, *Reduced Simple Ratio* nebo RVI (Obrázek 12), (Allen, R. G. et al., 1998), (Project, 2021).



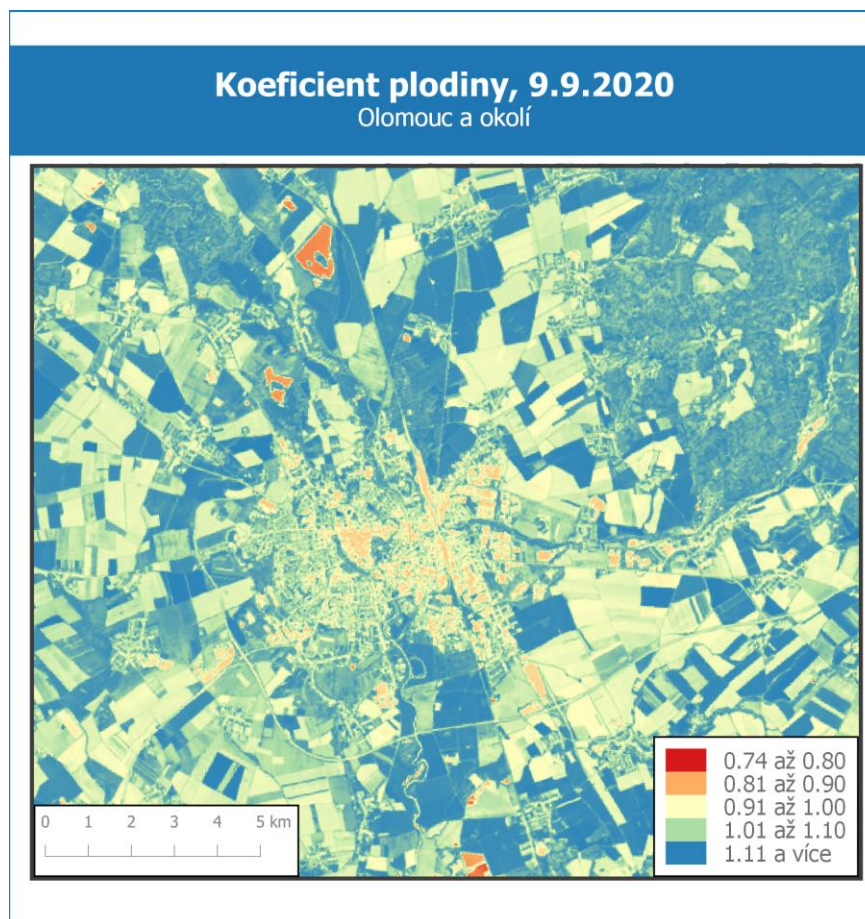
Obrázek 12 Komponenty K_c (Zdroj: vlastní).

$$K_c = 1,1 \times (1 - \ln(-1,5 \times RVI)) \quad [13]$$

RVI ... Jednoduchý poměrový index

Ukázku výsledku odhadu koeficientu za pomoci prostředků DPZ lze vidět na obrázku níže (Obrázek 13). Rozmezí hodnot koeficientu plodiny je **obecně úzké**, ale na první pohled lze vizuálně odvodit obecnou charakteristiku. Vodní plochy a zastavěné plochy vykazují **výrazně nižší hodnoty** (hodnoty kolem 0,7 až 0,8). Naopak pole nebo louky se zelenou vegetací, nebo oblasti lesů či větších parků, mají **hodnoty nejvyšší** (od 0,9 a výše). V obraze lze také rozeznat relativně přesnou strukturu městské zástavby a jednotlivých polí a luk.

Odchytky během odvozování K_c pomocí DPZ jsou způsobeny zejména přítomností **oblačnosti**, vliv má také velikost **prostorového rozlišení** snímku.



Obrázek 13 Koeficient plodiny odvozený pomocí DPZ. (Zdroj: vlastní).

Přístup s pomocí terénního měření

Druhým přístupem, který byl zkoumán, bylo použití **dlouhodobých průměrů z terénních měření a následného odhadu** K_c pro **skupinu biotopů** (na rozdíl od přístupu s DPZ, jenž obraz popisuje per pixel) pomocí následující rovnice:

$$K_c = \frac{AE}{PET} \quad [14]$$

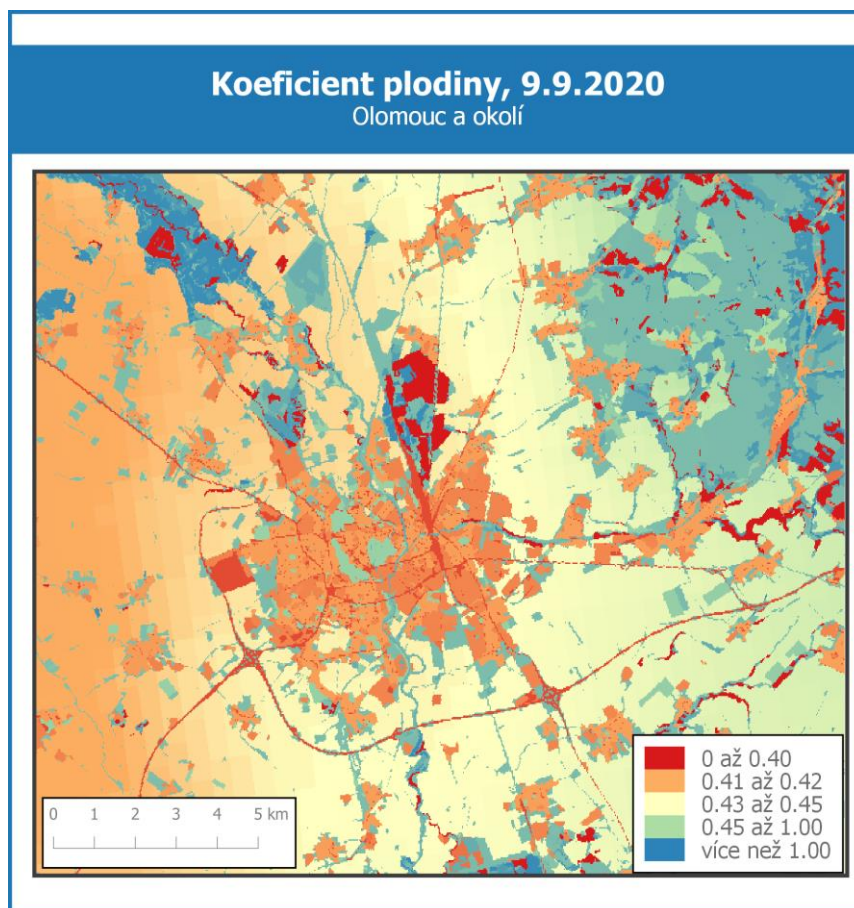
AE ... Potenciální evapotranspirace

PET ... Globální potenciální evapotranspirace

Pro výpočet K_c bylo uvažováno několik zdrojů (MODIS, TerraClim a další). Ukázalo se však, že data jsou pro tento účel příliš hrubá, a proto stírají rozdíly mezi jednotlivými biotopy.

PET (*Global Potential Evapotranspiration*) bylo převzato z neveřejné databáze PET pro ČR (prostorové rozlišení 500 m/pixel a průměry za 30 let pozorování). Autorem těchto dat je Petr Štěpánek z CzechGlobe, jenž data připravil v rámci projektu NHF Czech Adapt. Data byla poskytnuta vedoucím práce. Data AE byla použita z datové sady dlouhodobých průměru potenciální evapotranspirace vypracovaná pro jednotlivé skupiny biotopů v ČR (Pechanec et al., 2021).

Pro účely této diplomové práce byla data rasterizována na 30 m/pixel. Podle rovnice uvedené výše (vzorec [14]) byla data podělena a následně pomocí *Zonal Statistics*, nástroje poskytovaného v rámci ArcGIS Pro, byla data zprůměrována pomocí jednotlivých typů ploch. I na první pohled velmi rozdílná data je i zde patrné, že oblasti pokryté vegetací dosahují vyšších hodnot než oblasti zastavené nebo vodní plochy (Obrázek 14).



Obrázek 14 Koeficient plodiny odvozený pomocí terénního měření (Zdroj: vlastní).

Srovnání výpočtů K_c

Koeficient plodin nabývá v obou případech velmi podobných hodnot i přes vizuálně velmi rozdílné výsledky, zejména v nezastavěných plochách. Vždy je nutné přihlídnout také k velikosti objektu vzhledem k rozměru pixelu.

Tabulka 14 Srovnání hodnot K_c (Zdroj: vlastní).

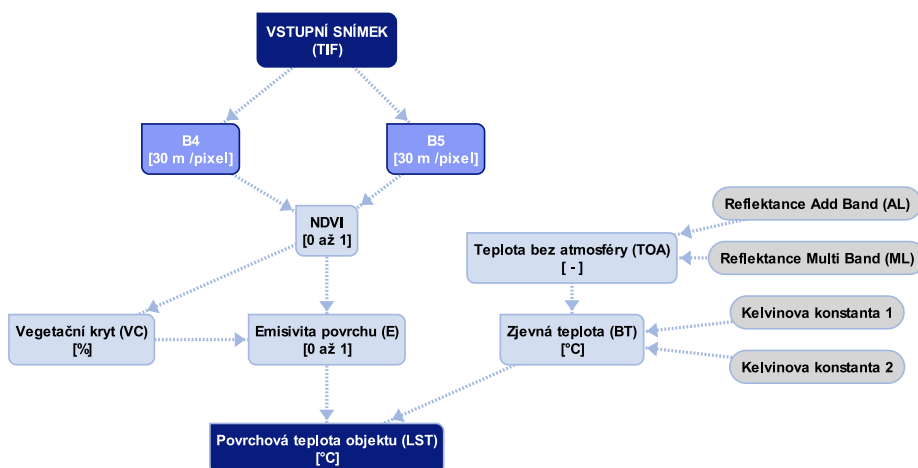
Typ plochy	K_c terénní měření	K_c z DPZ	Rozdíl
Dopravní síť	0,281	0,989	0,708
Smišené lesy	0,875	1,058	0,183
Listnaté lesy	0,968	1,062	0,094
Jehličnaté lesy	0,724	1,053	0,329
Člověkem neovlivněné lesy	1,139	1,062	0,077
Rybníky, nádrže	0,851	0,900	0,049
Vodní toky	0,728	1,035	0,307
Bažiny, močály	1,139	1,074	0,065
Hospodářské louky	0,697	1,037	0,340
Průmyslové jednotky	0,312	0,964	0,652
Skládky a staveniště	0,331	0,997	0,666
Souvislá městská zástavba	0,385	1,007	0,622
Sportovní plochy	0,576	1,045	0,469

4.2.3 Odhad povrchové teploty objektů

$$LST = \frac{BT}{\left(1 + \left(\frac{0,0015 \times BT}{1,4488}\right) \times \ln(E)\right)} \quad [15]$$

BT ... zjevná teplota
 E ... emisivita povrchu

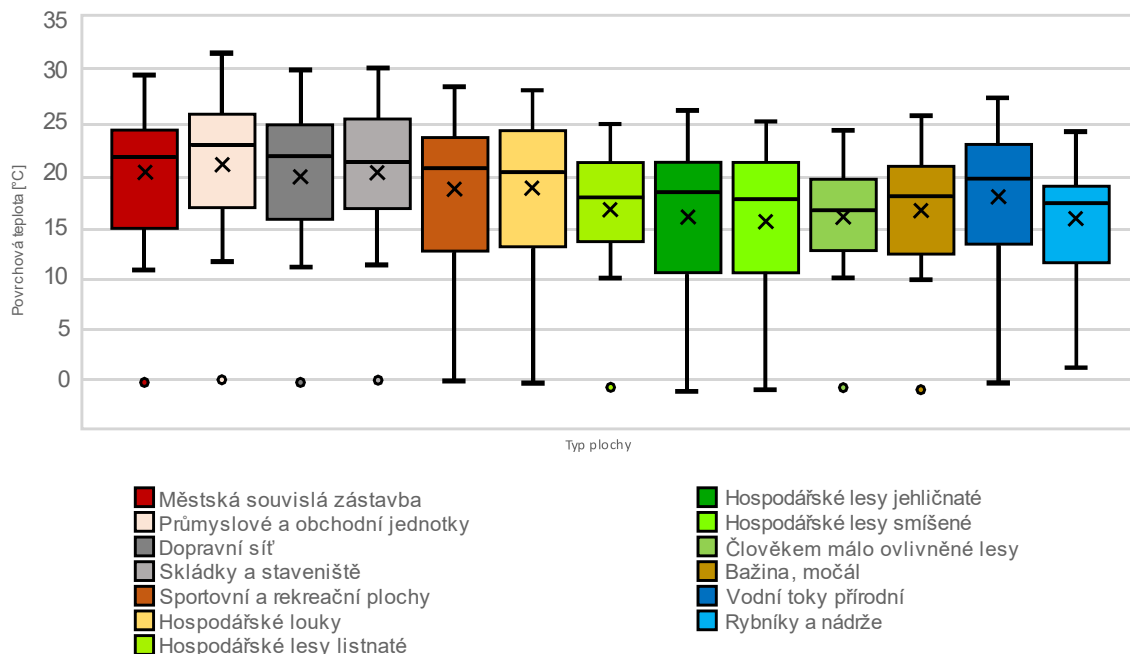
Podrobné teoretické informace o LST jsou k nalezení v kapitole **3.5.1 LST**. *Land Surface Temperature* byla vypočítána pomocí vztahů, jež představil Jakub Brom v rámci modulu **SEBCS** pro **IDRISI** a pomocí rovnic, které poskytuje **USGS** pro práci s daty Landsat (Obrázek 18).



Obrázek 15 Komponenty povrchové teploty (Zdroj: vlastní).

Velkého rozdílu mezi terénními daty a odhadnutými daty ze snímku dosahuje **vysoká vegetace**. Zde se může jednat o vliv **způsobu měření**, vysokou vegetaci nebylo možné změřit kolmo a pojmout širší část koruny. Nelze také opomenout možnost **lidské chyby** při měření (nedostatečné zaostření apod.). Povrchová teplota **zastavěné oblasti je mnohem vyšší**, než povrchová teplota lesních porostů a větších ploch se zelenou vegetací. Velký vliv zde mají i **plochy, na kterých je holá půda** nebo vegetace ve špatném stavu. Rozdíl teploty ploch (i ploch nacházejících se v těsné blízkosti, např. park a přilehlé náměstí) může být **až několik desítek stupňů** (Obrázek 17).

Charakteristika povrchové teploty vybraných typů ploch DKV

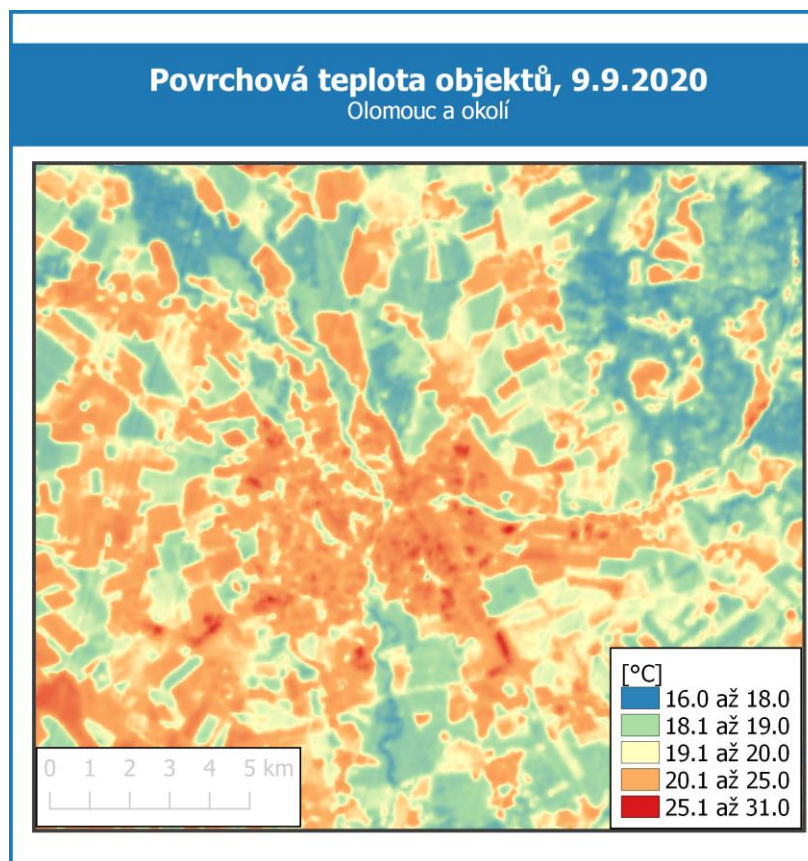


Obrázek 16 Charakteristika povrchové teploty vybraných ploch DKV (Zdroj: vlastní).

Funkční plochy vykazují výrazné rozdíly mezi jednotlivými plochami. **Vegetace a vodní** plochy mají ve většině případů **široký rozsah povrchových teplot** v závislosti na okolním počasí. Oproti tomu **urbanizovaná plocha** se **stabilně drží ve vyšších teplotách** a v čase pořízení snímků povrchová teplota těchto ploch neklesla pod 10 °C. Teploty však mohou v některých případech u urbanizovaných ploch dosahovat hodnot i přes 30 °C (Obrázek 17).

Tabulka 15 Charakteristika povrchová teploty vybraných ploch (Zdroj: vlastní).

Typ plochy	17. 3. 2020	14. 6. 2020	8. 8. 2020	20. 10. 2020	Průměr
Dopravní síť	11,702	21,396	29,806	10,762	19,766
Smíšené lesy	8,431	17,817	25,065	9,383	15,766
Listnaté lesy	10,938	19,603	24,776	9,631	16,468
Jehličnaté lesy	9,423	19,890	26,264	9,085	15,900
Člověkem neovlivněné lesy	9,814	16,817	24,348	9,709	15,766
Rybníky, nádrže	9,149	18,233	24,764	9,439	16,131
Vodní toky	10,856	19,733	27,391	9,923	17,784
Bažiny, močály	10,729	20,215	25,697	9,579	16,372
Hospodářské louky	11,381	19,700	28,091	10,153	18,525
Průmyslové jednotky	12,129	22,363	30,946	10,955	20,552
Skládky a staveniště	12,013	20,947	30,078	10,790	19,874
Souvislá městská zástavba	11,060	21,878	29,376	10,499	19,272
Sportovní plochy	11,280	21,428	28,091	10,127	19,224



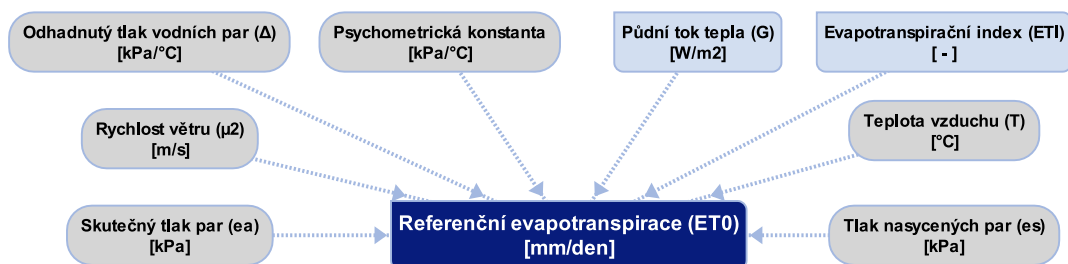
Obrázek 17 Povrchová teplota objektů. (Zdroj: vlastní).

4.2.4 Ostatní odhadované veličiny

Následující veličiny představují datové vrstvy, jež byly také odvozovány z dat popsanych v dostupné literatuře, představují však jen **částečné ukazatele** stavu klimatu a jsou v **literatuře dobře popsány**, včetně rovnic a vztahů. Pro každou veličinu je přiložen **obrázek ilustrující potřebná data** pro výpočet. Šedou barvou jsou označeny konstanty a tmavě modrou výsledná vrstva. Světle modrou barvou poté mezivrstvy.

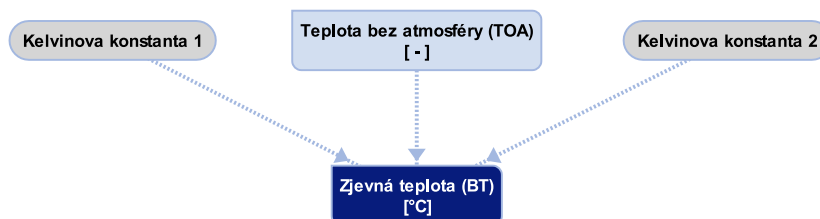
Referenční evapotranspirace (ET_0 , Available Evapotranspiration) [-]

Podrobné informace o Potenciální evapotranspiraci jsou k nalezení v kapitole **3.1 Vegetační povrch z pohledu DPZ**.



Obrázek 18 Komponenty ET_0 (Zdroj: vlastní).

Zjevná teplota (BT, *Brightness Temperature*) [°C]



Obrázek 19 Komponenty BT (Zdroj: vlastní).

Jedná se o **teplotu objektu**, u kterého se předpokládá **povrchová emisivita 1**, objekt by tedy měl odpovídat absolutně černému tělesu. V praktickém světě však toto neplatí, proto se výpočet nadále **koriguje o hodnotu emisivity** (Obrázek 19) (Alley, 2016).

$$BT = \frac{K2}{\left(\ln \frac{K1}{TOA}\right)} - 273,15 \quad [16]$$

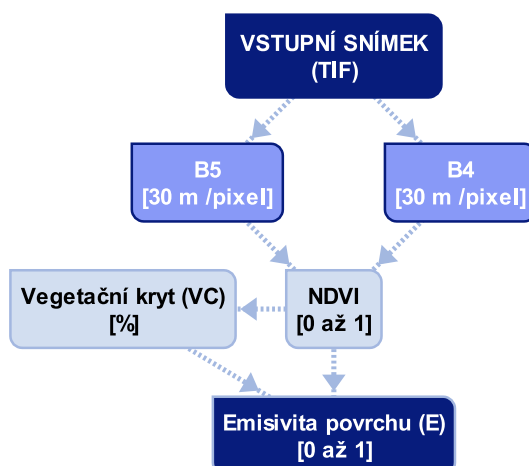
TOA ... Odrazivost na horní hranici atmosféry

K1 ... K1_CONSTANT_BAND_X (k nalezení v metadatech snímku)

K2 ... K2_CONSTANT_BAND_X (k nalezení v metadatech snímku)

Emisivita povrchu (E, *Emisivity of a surface*) [0 až 1]

Emisivita ovlivňuje energetickou rovnováhu objektu. Reálné objekty v porovnání s absolutně černým tělesem vždy **vyzařují menší množství energie**. Tento jev je popsán **Kirchhoffovým zákonem**, jenž definuje emisivitu jako poměr emitované energie reálného tělesa vůči absolutně černému tělesu (Hesslerová, 2008).



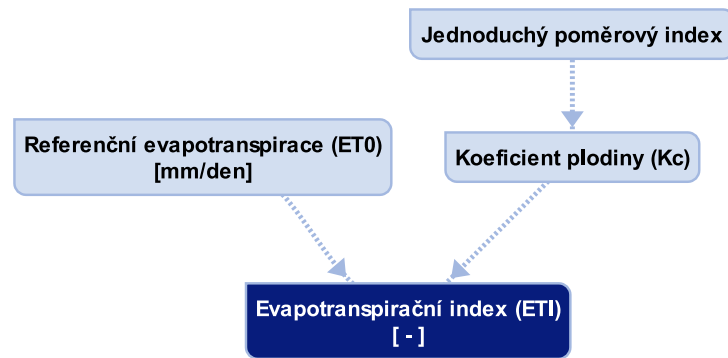
Obrázek 20 Komponenty emisivity (Zdroj: vlastní).

$$E = (0,004 \times VC) + 0,986 \quad [17]$$

VC ... Vegetační kryt

Evapotranspirační index (ETI, *Evapotranspiration Index*) [0 až 1]

Evapotranspirační index představuje normalizovanou hodnotu **potenciální evapotranspirace**. Počítá se pro **každý pixel** v obraze za pomoci *crop coefficient* a ET_0 (Obrázek 21). *Crop coefficient* představuje číslo, jež charakterizuje plodinu rostoucí v dané buňce a její vztah k využití území.



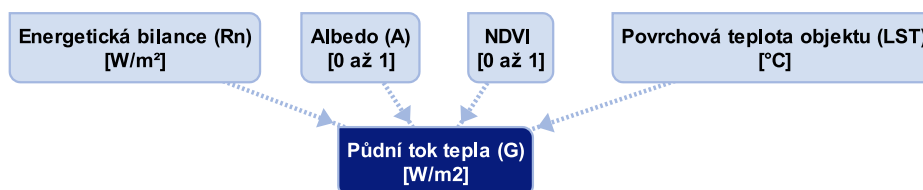
Obrázek 21 Komponenty ETI (Zdroj: vlastní).

$$ETI = \frac{K_c \times ET_0}{ET_{max}} \quad [18]$$

K_c ... Koefficient plodiny
 ET_0 ... potenciální evapotranspirace
 ET_{max} ... maximální evapotranspirace

Půdní tok tepla (G, *Ground Heat Flux*) [W/m^2]

Pozemní tok tepla je další součástí odvození evapotranspirační funkce. Představuje ztrátu energie povrchu způsobenou **vedením tepla** (Obrázek 22). Pokud energie míří od povrchu do atmosféry, nabývá kladných hodnot. Jeho vliv roste zejména, pokud je zkoumána suchá oblast nebo se výzkum pohybuje v denních periodách (Wang & Bras, 1999).



Obrázek 22 Komponenty G (Zdroj: vlastní).

$$G = \frac{LST}{\alpha \times (0,038 \times \alpha + 0,074 \times \alpha^2) \times (1 - 0,98 \times NDVI^4) \times R_n} \quad [19]$$

LST ... Teplota povrchu objektu

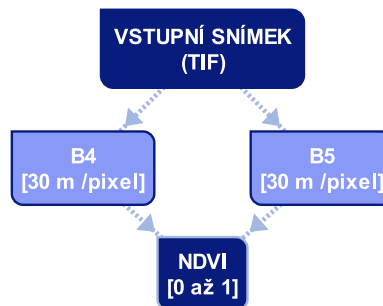
NDVI ... Norm. Dif. Vegetační Index

α ... Albedo

R_n ... Energetická bilance ekosystému

NDVI [0 až 1]

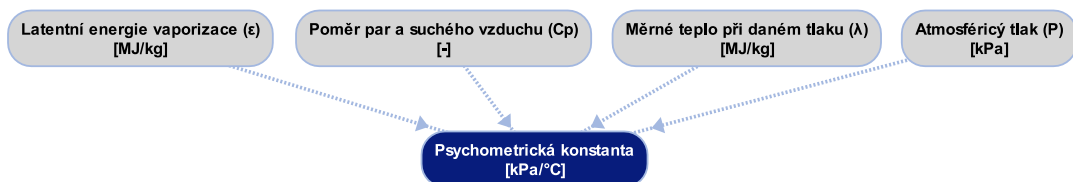
Podrobné informace o NDVI jsou uvedeny v kapitole **3.4.3 NDVI**.



Obrázek 23 Komponenty NDVI (Zdroj: vlastní).

Psychometrická konstanta (γ , *Psychometric Constant*) [kPa/°C]

Psychometrická konstanta charakterizuje vztah mezi **tlakem vody** obsažené v atmosféře a **teplotou vzduchu** (Obrázek 24). Díky tomu lze interpolovat skutečný tlak par v atmosféře.



Obrázek 24 Komponenty psychometrické konstanty (Zdroj: vlastní).

$$\gamma = \frac{C_p \times P}{\varepsilon \times \lambda} \quad [20]$$

C_p ... měrné teplo při daném tlaku, 1 013,10-3 [MJ/kg/°C]

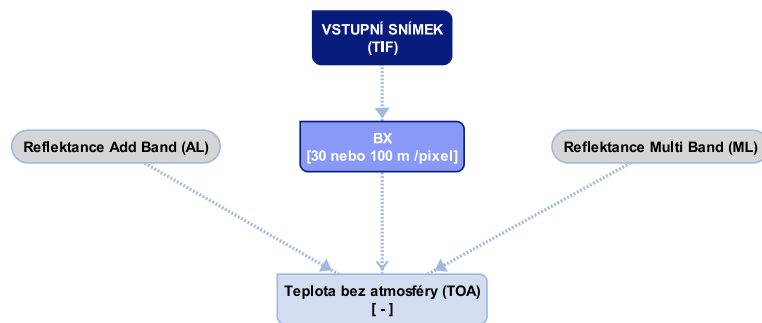
P ... atmosférický tlak [kPa]

ε ... poměr molekulové hmotnosti vodní páry a suchého vzduchu, 0,622

λ ... latentní teplo při vypařování, 2,45 [MJ/kg]

Odrazivost na vrcholu atmosféry (TOA, *Top of Atmosphere*) [-]

Jedná se o bezrozměrnou jednotku popisující **množství odraženého a dopadajícího záření** bez vlivu atmosféry a vlivu daného materiálu (Obrázek 25). TOA si lze představit jako míru odrazivosti objektu **mimo zemskou atmosféru**. Jedná se o jednu z prvních úrovní úpravy satelitního snímku.



Obrázek 25 Komponenty TOA (Zdroj: vlastní).

Tuto veličinu lze dále dělit podle toho, zda se jedná o **odrazivost** (*reflectance*) nebo **vyzařování** (*radiance*). **Vyzařování** je proměnná **měřená přímo přístroji**, tedy kolik energie „vidíme“ vycházet z objektu. Je ovlivněna efektem atmosféry. **Odrazivost** je vlastnost **daná materiálem** a jedná se o **poměr** příchozího a odchozího záření objektu.

$$TOA_{rad} = (M_L \times Q_{cal}) + A_L \quad [21]$$

M_L ... *RADIANCE_MULT_BAND_x* (k nalezení v metadatech snímku)

A_L ... *RADIANCE_ADD_BAND_x* (k nalezení v metadatech snímku)

Q_{cal} ... vybrané pásmo v DN

Tlak nasycených par (e_s , Saturated Vapour Pressure) [kPa]

Tlak páry (ukázka Python zápisu níže) označuje **míru přechodu látky (kapaliny) do plynného stavu**, tedy látka může **existovat zároveň** ve více skupenstvích. S vyšší teplotou se tato míra zvyšuje. Tlak nasycených par označuje stav, ve kterém se mezi skupenstvími **vyměňuje stejné množství** částic.

```
SatVapPress = 0.61121 * np.exp(17.502 * T / (240.97 + T))
```

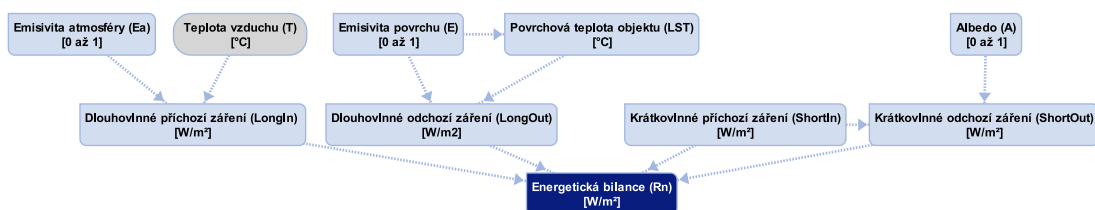
Zastínění terénu (shade, Shade) [0 až 1]

Rastr zastínění terénu v hodnotách **0 až 1**. Představuje **množství vegetačního krytu** (0 – žádné zastínění, 1 – úplné zastínění) nad danou buňkou (ukázka Python zápisu níže). Zastínění bylo počítáno pomocí funkce *hillshade* z modulu *EarthPy*. Vstupní data obsahují rastrový **DMR** (Digitální Model Reliéfu) obsahující nadmořské výšky, **azimut** (315°) a **výšku slunce nad terénem** (45°). Výsledkem je rastr, jenž obsahuje hodnoty od 0 do 255. Pro převod na hodnoty 0 až 1 byl tento rastr podělen hodnotou 255.

```
shade = earthpy.spatial.hillshade(elevation, azimuth, altitude)/255
```

Energetická bilance ekosystému (R_n , Net Radiation) [W/m^2]

Energetická bilance (R_n) představuje **poměr mezi příchozí a odchozí energií** povrchu (Obrázek 26). Příchozí energie pochází ze Slunce (krátkovlnná a dlouhovlnná), zatímco odchozí energie je vyzařována povrchem, oblačností a také atmosférou V dlouhodobém horizontu pozorování lze rozlišit **sezónní změny**. Distribuce energie na různých místech planety se střídá v závislosti na roční době a oblasti (polokoule, na které probíhá letní období, má výrazně vyšší příjem příchozí energie a naopak). Obecně lze říci, že na pólech se energie více vyzařuje, zatímco na rovníku převažuje příchozí energie. Tato nerovnost je také jedním z důvodů **cirkulace vzduchových hmot** v atmosféře Země. Již připravená data, týkající se bilance energie celé planety, poskytuje **NASA**.



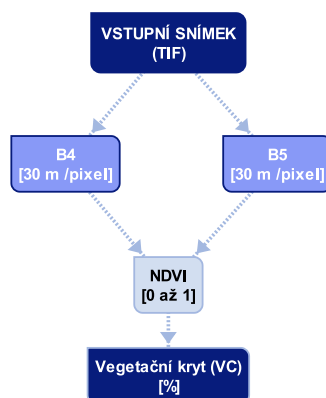
Obrázek 26 Komponenty R_n (Zdroj: vlastní).

$$R_n = (\text{ShortIn} - \text{ShortOut}) + (\text{LongIn} - \text{LongOut}) \quad [22]$$

ShortIn ... Příchozí krátkovlnné záření
ShortOut ... Odchozí krátkovlnné záření
LongIn ... Příchozí dlouhovlnné záření
LongOut ... Odchozí dlouhovlnné záření

Frakce vegetačního krytu (V_c , *Vegetation Cover*) [0 až 1]

Je míra množství vegetace na jednotku plochy. Výpočet ze snímků satelitu Landsat 8 se provádí pomocí NDVI (Obrázek 27). Pro využití jiných vstupních dat, zejména těch podrobnějších, se používají **dynamické modely** (Y. Tu et al., 2020).



Obrázek 27 Komponenty V_c (Zdroj: vlastní).

$$VC = \frac{NDVI^2}{0,3} \quad [23]$$

NDVI ... Norm. Dif. Vegetační Index

4.3 Výpočet CC_i – Aplikace nástroje pro Olomouc a okolí

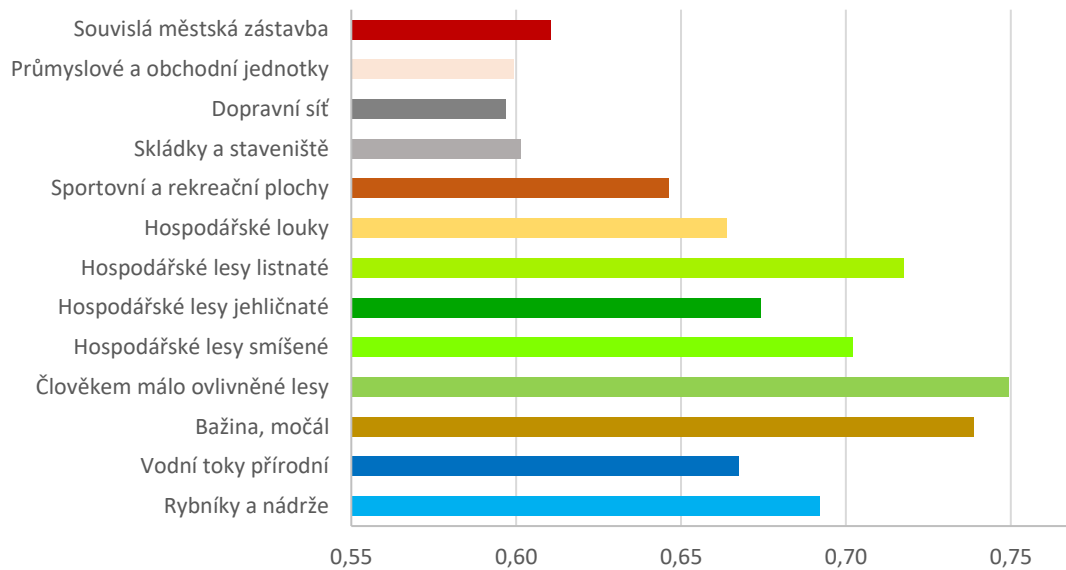
Po spuštění skript stanoví několik veličin, z nichž většinu **odhadne pro každý den**, ke kterému je dostupný družicový snímek. Poslední veličina je zastínění (*shade*), jež je počítána pouze jednou.

Výsledné rastry CC_i se pohybují v hodnotách mezi **0 až 1**. V tabulkách jsou uvedeny pouze vybrané hodnoty CC_i (Tabulka 16 a Tabulka 17), kompletní data jsou k dispozici v přílohách níže (průměrná hodnota je spočítána za celé sledované období). V první tabulce jsou uvedeny hodnoty CC_i , které byly odhadnuty pomocí K_c , jež bylo spočítáno pomocí metod DPZ. Podrobný výpočet K_c oběma způsoby je dále popsán v kapitole **4.2.2. Odhad K_c** .

Výpočet hodnot pro daný typ plochy vznikl jako **výsledek Zonal Statistics as Table**, který poskytuje program ArcGIS Pro 2.7.1. Pro srovnání byly vybrány **dvě vrstvy funkčních ploch: detailní konsolidovaná vrstva biotopů a CLC2018**. První jmenovaná vrstva je podrobná a představuje biotopovou úroveň, zatímco CLC2018 je hrubší z pohledu měřítka, ale reprezentuje známé a obecnější kategorie využití země.

Průměrné hodnoty vybraných ploch jsou zobrazeny níže (Obrázek 28). Lze usuzovat, že **nezastavěné plochy mají vyšší ochlazovací potenciál**, nicméně i v tomto případě by bylo vhodné analyzovat více snímků v bližších časových obdobích.

Průměrné hodnoty Cooling Capacity Index vybraných typů ploch DKV



Obrázek 28 Průměrné hodnoty CCI pro DKV (Zdroj: vlastní).

Průměrné hodnoty Cooling Capacity Index vybraných typů ploch Corine Land Cover 2018



Obrázek 29 Průměrné hodnoty CCI pro CLC2018 (Zdroj: vlastní).

Obě vrstvy funkčních ploch **nejsou totožné** (z pohledu měřítka i z pohledu kategorizace), nelze je proto vhodně srovnávat. Nicméně při porovnání na obecné kategorie můžeme pozorovat, že hodnoty CC_i u obou jsou velmi podobné.

Tabulka 16 Hodnoty CC_i vybraných typů ploch – Kc z DPZ. (Zdroj: vlastní).

Typ plochy	17. 3. 2020	14. 6. 2020	8. 8. 2020	20. 10. 2020	Průměr
Dopravní síť	0,048	0,471	0,432	0,940	0,705
Směšené lesy	0,174	0,551	0,515	0,888	0,698
Listnaté lesy	0,069	0,505	0,520	0,899	0,687
Jehličnaté lesy	0,130	0,499	0,491	0,873	0,691
Člověkem neovlivněné lesy	0,120	0,570	0,532	0,898	0,663
Rybníky, nádrže	0,179	0,539	0,519	0,853	0,648
Vodní toky	0,082	0,508	0,474	0,907	0,702
Bažiny, močály	0,079	0,494	0,503	0,902	0,682
Hospodářské louky	0,047	0,507	0,460	0,922	0,718
Průmyslové jednotky	0,037	0,451	0,416	0,942	0,701
Skládky, staveniště	0,031	0,482	0,427	0,944	0,709
Souvislá městská zástavba	0,068	0,458	0,439	0,931	0,699
Sportovní plochy	0,044	0,464	0,459	0,925	0,706

V tabulce výše lze pozorovat, že některé zastavěné plochy mají velmi podobné hodnoty jako nezastavěné a vegetační plochy. To může způsobovat množství faktorů, jež mohou být problematické při výzkumu v DPZ, jedná se především o **velikost skutečného objektu** vůči velikosti pixelu nebo **oblačnosti**.

Tabulka 17 Hodnoty CC_i vybraných typů ploch – K_c z terénního měření (Zdroj: vlastní).

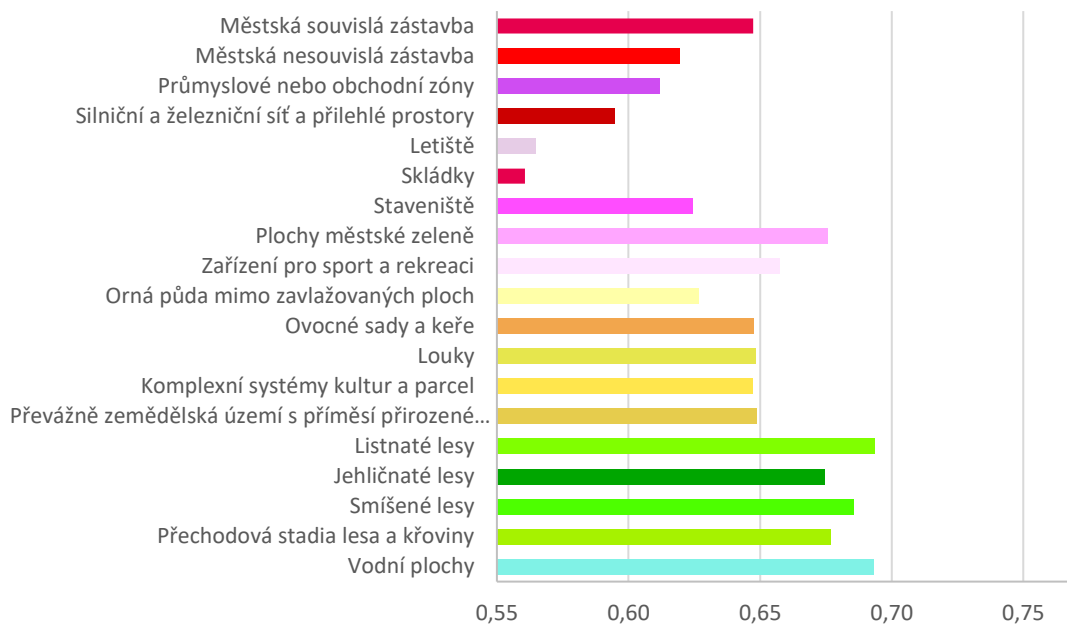
Typ plochy	17. 3. 2020	14. 6. 2020	8. 8. 2020	20. 10. 2020	Průměr
Dopravní síť	0,591	0,609	0,597	0,588	0,596
Smíšené lesy	0,695	0,714	0,704	0,692	0,702
Listnaté lesy	0,713	0,724	0,721	0,709	0,717
Jehličnaté lesy	0,668	0,680	0,671	0,665	0,674
Člověkem neovlivněné lesy	0,746	0,766	0,758	0,743	0,749
Rybníky, nádrže	0,688	0,702	0,691	0,686	0,692
Vodní toky	0,663	0,678	0,667	0,659	0,667
Bažiny, močály	0,734	0,750	0,737	0,731	0,738
Hospodářské louky	0,658	0,675	0,663	0,655	0,663
Průmyslové jednotky	0,594	0,612	0,600	0,590	0,599
Skládky a staveniště	0,596	0,615	0,601	0,592	0,601
Souvislá městská zástavba	0,605	0,622	0,611	0,602	0,610
Sportovní plochy	0,641	0,655	0,645	0,638	0,646

Z tabulek i grafu výše je vidět výrazný rozdíl mezi některými kategoriemi a na základě předchozích studií lze usuzovat, že výpočet CC_i druhým uvedeným způsobem je **přesnější**. Vyšších hodnot dosahují nezastavěné a vegetační plochy (jež mají vyšší potenciál pro ochlazení okolí). Ačkoliv je rozmezí hodnot na snímku úzké, lze na první pohled identifikovat plochy s **nižší** (červené až žluté plochy) a **vyšší kapacitou** (modré plochy) ochlazování okolního prostředí. Do první kategorie se řadí především plochy **nepokryté vegetací** (zastavěné plochy, holá pole...). Druhá kategorie obsahuje především **lesy**, **parky** nebo **ornou půdu** osetou **zelenými plodinami**. Všechny snímky, včetně mezivýsledků, jsou k dispozici jako digitální přílohy diplomové práce.

Detailní průběh vývoje CC_i je zobrazen pro vybrané měsíce níže. Kompletní přehled grafů pro funkční plochy je zobrazen v přílohách.

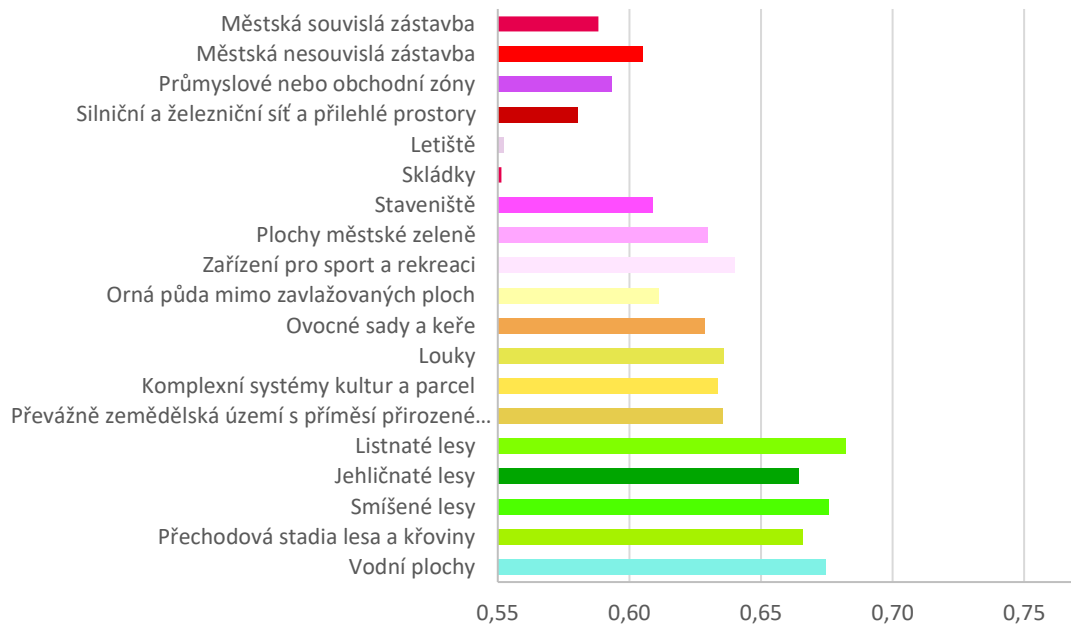
Ačkoliv se během roku hodnoty pro některé kategorie mění, jejich **obecný režim zůstává konstantní**. Ochlazovací **efekt vegetace převažuje** nad urbánními typy funkčních ploch. **Nejstabilněji se projevují vodní plochy**, výkyv jejich hodnot se pohybuje o 0,23. Jako **nejvíce variabilní se jeví ovocné sady a přechody lesů a křovin**. Zobrazeny jsou vybrané měsíce, kompletní přehled je přiložen jako příloha této práce (Obrázek 30, Obrázek 31, Obrázek 32, Obrázek 33).

Hodnoty CCI pro CLC2018 pro květen 2020



Obrázek 30 Hodnoty CCI CLC2018 za květen 2020 (Zdroj: vlastní).

Hodnoty CCI pro CLC2018 pro listopad 2020



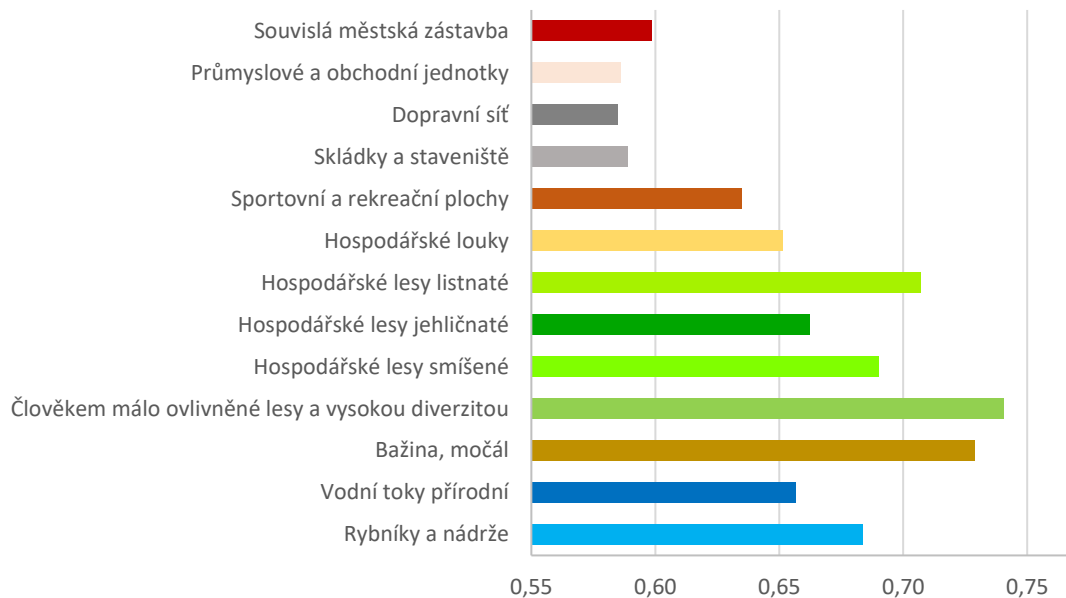
Obrázek 31 Hodnoty CCI CLC2018 za listopad 2020 (Zdroj: vlastní).

Hodnoty CCI pro DKV pro květen 2020

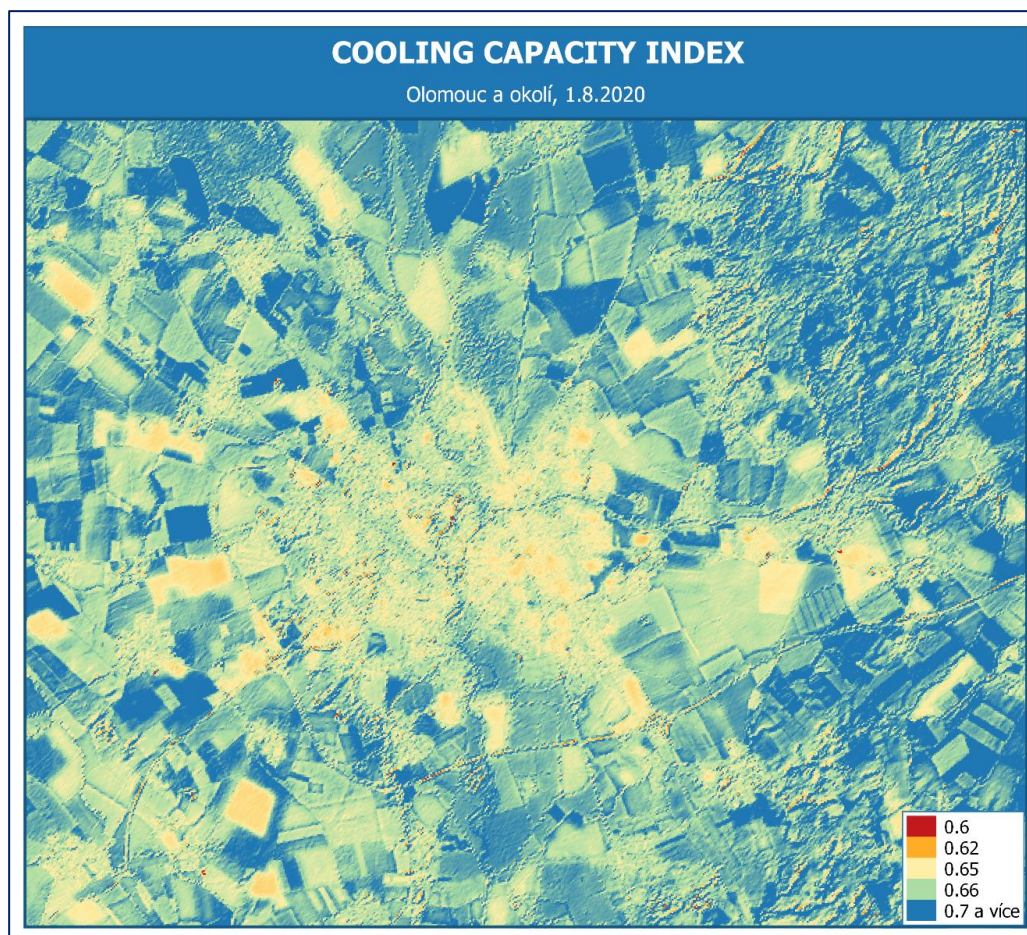


Obrázek 32 Hodnoty CCI DKV za květen 2020 (Zdroj: vlastní).

Hodnoty CCI pro DKV pro listopad 2020



Obrázek 33 Hodnoty CCI DKV pro listopad 2020 (Zdroj: vlastní).



Obrázek 34 Ukázka výsledku skriptu v programu QGIS (Zdroj: vlastní).

4.4 Výsledky terénního sběru dat

Terénní měření probíhalo od června do srpna roku 2020, celkově bylo provedeno pětkrát. Díky výskytu oblačnosti je však dále používána jedna datová sada. Tento počet je také způsoben nepředvídatelností délky periody mezi snímky díky překryvu os satelitu, kdy nebylo možné dopředu naplánovat snímkování.

V prosinci 2020 byla zaznamenána chyba na senzoru TIRS družice Landsat 8. Od tohoto data proto nejsou veřejnosti poskytovány žádné družicové snímky.

Data ve Sluňákově byla sbírána **1. 8. 2020** mezi **devátou a desátou** hodinou **dopoledne** ruční termokamerou **FLIR E60** (Obrázek 35). Bylo zaznamenáno celkem **13 míst** (Tabulka 18).



Obrázek 35 Místa terénního sběru dat – Sluňákov (Zdroj: vlastní).

Měření byly převážně plochy přírodního charakteru, v menší míře plochy antropogenního původu (Tabulka 18). Nejvyšší shody mezi odhadnutou LST a ověřovacími terénními daty byly na **travnatých, převážně nesečených plochách** a na **loukách porostlých travinami**. Nejvyšší rozdíly teplot jsou zaznamenány u **parkoviště** (které mělo menší rozměr než obrazový pixel) a posečeného pole, zde rozdíl teplot dosahuje přes 4,5 °C.

Tabulka 18 Teploty ploch terénního měření dne 1. 8. 2020– Sluňákov (Zdroj: vlastní).

Typ plochy	T_max [°C]	T_min [°C]	T_prum [°C]	T_snimek [°C]	T_rozdíl [°C]
Zelená louka	27,40	22,30	24,80	24,58	0,22
Zelená louka	28,40	20,30	24,35	23,40	0,9
Zelená louka	32,70	18,40	25,55	24,70	0,85
Pole sečené	44,30	21,10	32,65	29,65	3,00
Pole sečené	44,40	22,00	33,20	29,01	4,31
Vysoká vegetace	26,40	14,30	20,35	24,50	4,15
Vysoká vegetace	28,70	15,70	22,20	25,84	3,64
Vysoká vegetace	25,00	22,63	23,50	24,64	1,14
Vysoká vegetace	27,80	17,50	23,11	24,90	1,79
Tráva nesečená	28,40	19,90	24,15	24,30	0,15
Tráva sečená	31,90	23,40	27,65	26,40	1,25
Parkoviště	37,20	32,30	34,70	29,92	4,78
Vodní plocha	23,70	19,70	21,70	24,60	2,90

T_max ...maximální teplota snímku termokamery

T_min ...minimální teplota snímku termokamery

T_prum ...průměrná teplota snímku termokamery (z T_max a T_min)

T_snimek ...průměrná teplota na družicovém snímku

T_rozdíl ...rozdíl průměrné teploty kamery a družicového snímku

5 DISKUZE

Tato práce se zabývá možností kvantifikace evapotranspirace a ochlazovací funkce vegetace pomocí poloautomatického zpracování multispektrálních družicových snímků Landsat 8. Pro podobné studie je možné využít mnoho nástrojů, díky kterým je zpracování dat rychlejší nebo snazší. Jedná se především o populární **cloudové nástroje** typu **Google Earth Engine**. V raných stádiích práce byla vyvinuta snaha o zapojení tohoto nástroje. Pro snazší zpracování (ze strany autorky práce i pro případné navazující studie) byl nakonec zvolen jazyk **Python** místo JavaScript, který platforma Google podporuje ve svém **Code Editor**. Ačkoliv Google Earth Engine podporuje i **Python API**, v době zpracování práce nebyl dostatečně funkční a chyběla hlubší dokumentace. Formát Python skriptu (**.py**) se však dá velmi rychle a efektivně konvertovat do Python Notebook (**.ipynb**), který je zpracovatelný v Google Earth Engine nebo Jupyter Notebook, cloudové nástroje je tedy po konverzi možné využít. Samotné stahování snímků lze ošetřit pomocí skriptovacích nástrojů, nevýhodou tohoto řešení však stále zůstává zahlcení místa na disku uživatele.

Jedná se o první verzi **kompletního skriptu**, který poskytuje výpočet. V tuto chvíli obsahuje několik aspektů, jež jsou řešeny poněkud neobratně. Konkrétně se jedná o využívání **statických prvků**, jako je **pojmenování proměnných**, nutnost **existence vstupní složky** nebo odkazování na místa na disku a **ukládání mezivýsledků**. Úprava těchto parametrů by však znamenala **hluboké zásahy** do **celkového provedení**, které by byly časově náročné. Na druhou stranu se využívají Python moduly, jež jsou v rámci komunity známé a aktuální. Skript je orientován především na funkčnost a návaznost jednotlivých operací.

Nabízí se také úprava **zpracování senzorových dat**, které se nyní zpracovávají jako **CSV** soubor v **datovém rámci Pandas**. Propojit databázi s meteorologickými daty se skriptem je velmi **přímočaré** a existuje několik Python balíčků, jež dokáží toto propojení zajistit. Nicméně toto řešení by výrazně **uškodilo uživatelské přívětivosti** skriptu (nutnost zadat údaje o databázi a přihlášení uživatele do databáze), zvláště, pokud by data byla uložena ve více databázích.

Během zpracování práce se vyskytlo několik překážek. Hlavní problém spočíval v počtu **vhodných družicových snímků** a v množství k nim změřených terénních dat. Několik snímků bylo **znehodnoceno oblačností** a z tohoto důvodu k nim nebyla sbírána terénní data. Tento problém je způsobem především **klimatickými podmínkami** a **nižším časovým rozlišením družice**. Z části je řešitelný výběrem místa, jež má nižší průměr oblačných dní v roce. Nabízí se možnost **interpolace** více snímků pro vytvoření hutnější časové řady, nebo dokonce **predikce vhodnosti** snímků. Podobné řešení bylo uvažováno v rámci práce s daty družic Sentinel-2 a Sentinel-3. Ukázalo se, že takové řešení je **náročné** nejen časově. Fúze nebo interpolace snímků družic je v současnosti prováděna převážně pomocí **neuronových sítí** nebo **strojového učení** a její výsledná kvalita závisí na zkušenostech provádějícího.

Dalším problémem bylo získání dat **koeficientu plodiny**, tato data jsou sice dostupná, avšak **neobsahují typy plodin**, které jsou ve větším množství pěstované v České republice. Proto byla hledána **nová cesta** pro získání těchto dat. Podařilo se získat dvě datové

sady (pomocí výpočtu metodami DPZ a dlouhodobé terénní průměry), které se osvědčily. Po výpočtu CC_i bylo zjištěno, že **výpočet z terénních dat je přesnější**. Menší přesnost výpočtu z DPZ může být způsobena několika faktory: oblačnost, velikost objektu vzhledem k pixelu, chybovost na snímku a další. Zásadní překážkou pro pokračování výzkumu v roce 2021 se stala **havárie na družici Landsat 8**, kdy kvůli **poškození senzoru TIRS** nejsou snímky od prosince 2020 veřejnosti dostupné. Poslední vyjádření ze strany **USGS bylo v lednu 2021**, kde informují veřejnost o této události, a také upozorňují, že dokud nebude problém vyřešen a snímky opraveny, **nebudou data k dispozici**. Z tohoto důvodu zpracování dat v roce **2021 nepokračovalo** a **nebylo prováděno ani pozemní měření** nebo vyhodnocování dat. Jako náhradní varianta bylo zvoleno původní roční časovou řadu (březen 2020 až březen 2021) doplnit předcházejícími měsíci (prosinec 2019 až únor 2020). Ani v tomto období se však neobjevil žádný snímek, který by nebyl znehodnocen oblačností.

Mezi klíčová pozitiva této práce patří **reprodukovatelnost** na jiných družicových datech, zejména data ze série Landsat. Je třeba opatrnosti při zadávání vstupních pásem snímků, například pásma družic Landsat 5 a Landsat 8 nejsou totožná. Dále také **automatizace procesů** a jejich **otevřenost** a možnost jejich rychlého převedení do dnes populárních **cloudových nástrojů** pomocí konverze do Python Notebook. Výsledkem práce je **otevřený a veřejně dostupný skript**, který si jakýkoliv uživatel může **adaptovat** pro své vlastní potřeby.

Zpracovávání práce umožnilo **identifikaci několika klíčových veličin**, které nejenže přispívají k větší přesnosti výsledků, ale samy o sobě jsou důležitými (byť částečnými) **ukazateli současného stavu klimatu**. Zejména se jedná o hodnoty **povrchové teploty objektu, albeda a evapotranspiračního indexu**. Tyto hodnoty se částečně dají získávat přímým měřením (v případě albeda například **pyranometrem**, jenž byl k dispozici na pracovišti, ale bohužel se jej nepodařilo včas zprovoznit; míru evapotranspirace lze odvodit pomocí **Bowenova indexu** (přímo měřitelný v terénu) nebo odhadnout z jiných zdrojů.

Tento výzkum je pouze základním kamenem pro navazující studie, jež mohou tuto práci zpřesnit a rozšířit hned v několika rovinách, například: vytvoření **uživatelského prostředí, zahrnutí dalších meteorologických a terénních měření** nebo **zpracování více druhů družicových dat**. Další možností rozšíření této studie je způsob, jak efektivně docílit **lepšího časového a prostorového rozlišení**, zda využít existující možnosti fúzování nebo interpolace snímků. Potřeba tuto operaci provádět však záleží také na velikosti a heterogenitě území.

ZÁVĚR

Diplomová práce měla za cíl kvantifikovat evapotranspirační a ochlazovací funkce prostředky dálkového průzkumu země. Hlavním výsledkem diplomové práce byl skript v jazyce Python, který pomocí funkcí vypočítává jednotlivé veličiny, jež jsou součástí odvození **Cooling Capacity Index**. Tento index poskytuje informace o potenciálu ochlazení dané funkční plochy v daném čase.

K výpočtu tohoto indexu bylo využito satelitních snímků družice Landsat 8, které jsou volně dostupné. Největší překážkou ve výpočtu byl zisk dat **koeficientu plodiny**, jež nebyl pro plodiny pěstované ve větším množství v České republice dostupný. Koeficient se následně podařilo početně odhadnout, a to dvěma způsoby: pomocí DPZ a pomocí dlouhodobých průměrů hodnot evapotranspirace plodin. Oba způsoby byly srovnány a vyšlo najevo, že druhý jmenovaný způsob vykazuje přesnější výsledky.

Kromě koeficientu plodiny byly identifikovány další důležité faktory výpočtu CC_i a těmi jsou **albedo** a **povrchová teplota objektu**. Pro obě komponenty existují možnosti výpočtu vytvořené přímo pro snímky družice Landsat 8.

Výsledky byly podpořeny také terénním měřením povrchové teploty pomocí ruční termokamery. Zde se prokázala **závislost velikosti zkoumaného objektu vůči velikosti pixelu**. Louky, jež jsou prostorově výrazně větší než například silnice, dosahovaly daleko přesnějších výsledků povrchové teploty.

Práce potvrdila vyšší ochlazovací potenciál funkčních ploch s **vegetací** (zejména se jedná o plochy se smíšenými a listnatými lesy), kde CC_i dosahoval hodnot kolem 0,7. Naopak hodnoty pro **zastavěné plochy** nebo **silnice** se pohybovaly kolem 0,5. Rozsah těchto hodnot není příliš široký, i přesto lze při zobrazení snímku v barvě pozorovat **jasné rozdíly** mezi potenciálem ochlazení různých typů ploch.

Sama **velikost pixelu** snímku má vliv na přesnost výsledku. Volně dostupné snímky o mnoho lepší rozlišení, než poskytuje Landsat 8, nenabízí. Pro snímky družic mise Sentinel lze **pomocí fúze** kombinovat jednotlivá pásma, kvůli chybějícím termálním datům. Fúze snímků z několika různých senzorů je **náročná** a vyžaduje zkušené operátory.

Výpočet evapotranspirace a CC_i poskytuje dnes několik produktů, mezi nejrobustnější z nich patří **InVEST**, na jehož rovnicích staví i tato diplomová práce. Výhoda InVESTu spočívá v poskytování mnoha různých **předpovědních** i **analytických modelů** týkajících se environmentálních problémů. Hlavním přínosem práce je navázání na tento výzkum a především optimalizace výpočtů pro data Landsat 8.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation & Drainage Paper 56*. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 50. <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e04.htm#evapotranspiration> (et)
- Alley, R. (2016). Brightness Temperature at Sensor. In *Data Product Description*. https://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/01_Data_Products/BrightnessTemperatureAtSensor.pdf
- Anderson, M. C., Allen, R. G., Morse, A., & Kustas, W. P. (2012). Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, 122, 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.025>
- Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Brenner, C., Zeeman, M., Bernhardt, M., & Schulz, K. (2018). Estimation of evapotranspiration of temperate grassland based on high-resolution thermal and visible range imagery from unmanned aerial systems. *International Journal of Remote Sensing*, 39(15–16), 5141–5174. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1471550>
- Brom, J. (2014). *SEBCS*. <http://kkm.zf.jcu.cz/content/program-sebcs>
- Buttar, N. A., Yongguang, H., Shabbir, A., Lakhari, I. A., Ullah, I., Ali, A., Aleem, M., & Yasin, M. A. (2018). Estimation of evapotranspiration using Bowen ratio method. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 807–810. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.096>
- Carlowicz, M., & Simmon, R. (2012). *Measuring Earth's Albedo*. NASA Earth. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/84499/measuring-earths-albedo>
- ČHMÚ. (2021). *Průměrná roční teplota v roce 2020*. https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/ok/charakteristiky_klimatu/img/T_2020.gif
- Clevers, J. G. P. W., Kooistra, L., & van den Brande, M. M. M. (2017). Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop. *Remote Sensing*, 9(5), 405. <https://doi.org/10.3390/rs9050405>
- ČMeS. (2017). *Poměr Bowenův*. Elektronický Meteorologický Slovník Výkladový a Terminologický. <http://slovník.cmes.cz/heslo/2792>
- Conda. (2017). *Miniconda*. <https://docs.conda.io/en/latest/miniconda.html>
- Copernicus. (2018). *European Union's Copernicus programme is planning a monitoring capacity for anthropogenic CO2 emissions*. <https://atmosphere.copernicus.eu/european-unions-copernicus-programme-planning-monitoring-capacity-anthropogenic-co2-emissions>
- Copernicus. (2021). *CLC2018*. <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>
- Cosme, R. (2016). *Green Urban Infrastructure : Assessing Potential Ecosystem Services in Urban Cities* (Issue November). <http://climate.org/wp-content/uploads/2016/11/RCNovember.pdf>
- Cui, Z., & Kerekes, J. P. (2018). Potential of red edge spectral bands in future landsat satellites on agroecosystem canopy green leaf area index retrieval. *Remote Sensing*, 10(9), 1458. <https://doi.org/10.3390/rs10091458>
- EOS. (2019). *NDVI FAQ: All you need to know about NDVI*. <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/>
- ESA. (2021a). *Product Types*. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types>
- ESA. (2021b). *Sentinel Overview*. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/>
- Esri. (2021). *ArcGIS Online*. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview>
- Flir. (2021). *Termokamera FLIR E40, FLIR E50 a FLIR E60*. <https://www.termokamery-flir.cz/termokamera-flir-e40-e50-e60/>

- Fonseca, L., Namikawa, L., Castejon, E., Carvalho, L., Pinho, C., & Pagamisse, A. (2011). Image Fusion for Remote Sensing Applications. In *Image Fusion and Its Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/22899>
- Gao, B. C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- GIS Cloud. (2021). *Real-time Collaborative Mapping*. <https://www.giscloud.com/how-it-works/>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Hesslerová, P. (2008). *Hodnocení krajinných funkcí pomocí multispektrálních družicových dat Landsat*. Univerzita Karlova v Praze.
- Hollan, J. (2021). *Pojmy vztahující se ke globální změně*. <http://amper.ped.muni.cz/gw/pojmy.html>
- Howard, L. (1818). The Climate of London deduced from Meteorological Observations, made at different places in the neighbourhood of the metropolis. *Volume I*. Palala Press.
- Hunt, E. R., & Rock, B. N. (1989). Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, 30(1), 43–54. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90046-1)
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1–2), 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>
- Kešner, B. (1977). Agrometeorologie: určeno pro studenty oboru fyto technika a zemědělské meliorace. In *Agrometeorologie: určeno pro studenty oboru fyto technika a zemědělské meliorace* (2nd ed.). Státní pedagogické nakladatelství.
- Korosov, A. A., Environmental, N., Pozdnyakov, D. V., & Environmental, N. (2016). *Fusion of Data From Sentinel-2 / Msi and Sentinel-3 / Olci Fusion of Data From Sentinel-2 / Msi and Sentinel-3 / Olci*. August, 6.
- Kotak Beng, Y., Gul Beng, M. S., Muneer, T., & Ivanova, S. (2015). Investigating the Impact of Ground Albedo on the Performance of PV Systems. *CIBSE Technical Symposium, April*, 16–17.
- Kramer, H. J. (2012). *Observation of the Earth and Its Environment: Survey of Missions and Sensors*. Springer Verlag.
- Kuenzer, C., & Dech, S. (2013). Thermal remote sensing Sensors, Methods, Applications. In C. Kuenzer & S. Dech (Eds.), *Remote Sensing and Digital Image Processing* (Vol. 17). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6639-6>
- Kunapo, J., Fletcher, T. D., Ladson, A. R., Cunningham, L., & Burns, M. J. (2018). A spatially explicit framework for climate adaptation. *Urban Water Journal*, 15(2), 159–166. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1424216>
- LandInfo. (2018a). *Buying Satellite Imagery: Pricing Information for High Resolution Satellite Imagery*. <http://www.landinfo.com/satellite-imagery-pricing.html>
- LandInfo. (2018b). *LAND INFO High-Resolution Global Satellite Imagery*. http://www.landinfo.com/products_satellite.htm
- Lgautier. (2014). *rpy2*. <https://github.com/rpy2/rpy2>
- Li, Z. L., & Duan, S. B. (2017). Land surface temperature. In *Comprehensive Remote Sensing* (Vols. 1–9, pp. 264–283). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10375-6>
- Liang, S. (2001). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I. *Remote Sensing of Environment*, 76(2), 213–238. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00205-4)

- Lima-Cueto, F. J., Blanco-Sepúlveda, R., Gómez-Moreno, M. L., & Galacho-Jiménez, F. B. (2019). Using Vegetation Indices and a UAV Imaging Platform to Quantify the Density of Vegetation Ground Cover in Olive Groves (*Olea Europaea* L.) in Southern Spain. *Remote Sensing*, 11(21), 2564. <https://doi.org/10.3390/rs11212564>
- Liou, Y. A., & Kar, S. K. (2014). Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms—a review. *Energies*, 7(5), 2821–2849. <https://doi.org/10.3390/en7052821>
- Lukeš, P., Strejček, R., Krístek, Š., & Mlčoušek, M. (2018). *Hodnocení zdravotního stavu lesních porostů v České republice pomocí satelitních dat Sentinel-2* (1st ed.). Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem. http://www.uhul.cz/images/aktuality_doc/Methodika_-_final.pdf
- Luz, Y., & Toro, S. (2015). *Thermodynamics: Albedo*. <https://nsidc.org/cryosphere/seaice/processes/albedo.html>
- Major, D. J., Bsret, F., & Guyot, G. (1990). A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *International Journal of Remote Sensing*, 11(5), 727–740. <https://doi.org/10.1080/01431169008955053>
- Mazaheri, S., Sulaiman, P. S., Wirza, R., Dimon, M. Z., Khalid, F., & Moosavi Tayebi, R. (2015). Hybrid Pixel-Based Method for Cardiac Ultrasound Fusion Based on Integration of PCA and DWT. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2015, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2015/486532>
- NASA. (2020). *Landsat 9—Continuing the Legacy*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/landsat-9-continuing-legacy>
- NASA. (2021). *MODIS - Specifications*. <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>
- Oracle. (2021). *Oracle and Sun Microsystems*. <https://www.oracle.com/sun/>
- Pechanec, V. (2021). *ústní sdělení*.
- Pechanec, V., Machar, I., Kilianová, H., Vyvlečka, P., Seják, J., Pokorný, J., Štěrbová, L., Prokopová, M., & Cudlín, P. (2021). Ranking the Key Forest Habitats in Ecosystem Function Provision: Case Study from Morava River Basin. *Forests*, 12(2), 138. <https://doi.org/10.3390/f12020138>
- Pidwirny, M. (2006). *Actual and Potential Evapotranspiration*. Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8j.html>
- Pokorný, J., Hesslerová, P., Huryna, H., & Harper, D. (2017). Nepřímý a přímý termodynamický vliv mokřadů na klima, část 1. *Vodní Hospodářství*, 67(6), 2–5. <https://vodnihospodarstvi.cz/neprimy-a-primy-termodynamicky-vliv-mokradu-klima/>
- Pokorný, J., Hesslerová, P., Vladimír, J., Huryna, H., & Seják, J. (2018). Význam Zeleně Pro Klima Města a Možnosti Využití Termálních Dat V Městském Prostředí. *Urbanismus a Územní Rozvoj*, 21(1), 26–37.
- Pour, T. (2019). *Airborne Thermal Remote Sensing in Urban Climate Research*. Univerzita Palackého v Olomouci.
- Precision Agriculture. (2018). *NDVI in agriculture*. <http://precisionagriculture.re/ndvi-in-agriculture/>
- Prikaziuk, E., & van der Tol, C. (2019). Global Sensitivity Analysis of the SCOPE Model in Sentinel-3 Bands: Thermal Domain Focus. *Remote Sensing*, 11(20), 2424. <https://doi.org/10.3390/rs11202424>
- Project, T. N. C. (2021). *INVEST User Guide*. <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html>
- Santer, B. D., Painter, J. F., Mears, C. A., Doutriaux, C., Caldwell, P., Arblaster, J. M., Cameron-Smith, P. J., Gillett, N. P., Gleckler, P. J., Lanzante, J., Perlwitz, J., Solomon, S., Stott, P. A., Taylor, K. E., Terray, L., Thorne, P. W., Wehner, M. F., Wentz, F. J., Wigley, T. M. L., ... Zou, C.-Z. (2013). Identifying human influences on atmospheric temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(1), 26–33. <https://doi.org/10.1073/pnas.1210514109>

- Šarapatka B. (2010). *Agroekologie: východiska pro udržitelné zemědělské hospodaření* (p. 440).
- Satellite Imaging Corporation. (2021). *ASTER Satellite Sensor*.
<https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/aster/>
- Sen, S., & Roesler, J. (2016). Aging albedo model for asphalt pavement surfaces. *Journal of Cleaner Production*, 117, 169–175.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.019>
- Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., Chaumont, N., Denu, D., Fisher, D., & Glowinski. (2020). *InVEST*. InVEST User's Guide.
<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>
- Shimoda, H., & Kimura, T. (2018). Japanese Space Program. In *Comprehensive Remote Sensing*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10320-3>
- Sobrino, J. A., Gómez, M., Jiménez-Muñoz, J. C., & Oliso, A. (2007). Application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA-AVHRR images for the Iberian Peninsula. *Remote Sensing of Environment*, 110(2), 139–148.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.02.017>
- Stenberg, P., Rautiainen, M., Manninen, T., Voipio, P., & Smolander, H. (2004). Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands. *Silva Fennica*, 38(1), 3–14. <https://doi.org/10.14214/sf.431>
- Tang, Y. L., Wang, R. C., & Huang, J. F. (2004). Relations between red edge characteristics and agronomic parameters of crops. *Pedosphere*, 14(4), 467–474.
https://www.researchgate.net/publication/279908027_Relations_between_red_edge_characteristics_and_agronomic_parameters_of_crops
- Tattersall, G. J. (2017). *Thermimage: Thermal Image Analysis*.
<https://doi.org/http://doi.org/10.5281/zenodo.1069704>
- Tu, T. M., Huang, P. S., Hung, C. L., & Chang, C. P. (2004). A fast intensity-hue-saturation fusion technique with spectral adjustment for IKONOS imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1(4), 309–312.
<https://doi.org/10.1109/LGRS.2004.834804>
- Tu, Y., Jia, K., Liang, S., Wei, X., Yao, Y., & Zhang, X. (2020). Fractional vegetation cover estimation in heterogeneous areas by combining a radiative transfer model and a dynamic vegetation model. *International Journal of Digital Earth*, 13(4), 487–503.
<https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1531438>
- USGS. (2017). *Landsat 8*. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-8>
- USGS. (2021). *What are the processing levels for Landsat Level-1 data?*
<https://www.usgs.gov/faqs/what-are-processing-levels-landsat-level-1-data>
- Vorálek, D. (2008). Měření střední radiační teploty a její vliv na tepelnou pohodu [Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně].
https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/7713/voralek_2008_dp.pdf
- Wan, Z., & Li, Z.-L. (2010). MODIS Land Surface Temperature and Emissivity. In *Remote Sensing and Digital Image Processing* (Vol. 11, pp. 563–577).
https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7_25
- Wang, J., & Bras, R. L. (1999). Ground heat flux estimated from surface soil temperature. *Journal of Hydrology*, 216(3–4), 214–226. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00008-6)
- YK Sugi. (2018). *What exactly can you do with Python?*
<https://www.freecodecamp.org/news/what-can-you-do-with-python-the-3-main-applications-518db9a68a78/>
- Yu, Y., Wang, J., Liu, G., & Cheng, F. (2019). Forest Leaf Area Index Inversion Based on Landsat OLI Data in the Shangri-La City. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(6), 967–976. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-00950-6>
- Zardo, L. et al. (2017). Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning. *Ecosystem Services*, 26, 225–235.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.016>
- Zemek, F. et al. (2014). *Letecký dálkový průzkum Země: teorie a příklady hodnocení terestrických systémů* (1.). Centrum výzkumu globální změny AV ČR.

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Elektronické přílohy:

Příloha 1	Video manuál pro spuštění
Příloha 2	Grafy pro každý měsíc pro plochy CLC2018
Příloha 3	Grafy pro každý měsíc pro DKV
Příloha 4	Výsledné CC _i rastry (TIF)
Příloha 5	Výsledné rastry LST (TIF)
Příloha 6	Výsledné rastry K _c (TIF)
Příloha 7	Tabulky s hodnotami CC _i pro CLC2018
Příloha 8	Tabulky s hodnotami CC _i pro DKV
Příloha 9	Zdrojový kód CC _i
Příloha 10	Webové stránky
Příloha 11	Vstupní satelitní snímky

Volné přílohy

Příloha 12	Poster k diplomové práci
------------	--------------------------