

**Univerzita Karlova  
Přírodovědecká fakulta  
Ústav pro životní prostředí**

Studijní program: **Ekologie a ochrana prostředí**

Studijní obor: **Ochrana životního prostředí**



**Dominika Houdová**

**Využití satelitních snímků v environmentálním výzkumu pro identifikaci  
městských tepelných ostrovů a jejich souvislosti s okolním prostředím  
s případovou studií na území Prahy**

Using of satellite imagery in environmental research for urban heat islands identification  
and its relationship with surrounding environment with case study in Prague locality

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce: **Ing. Luboš Matějček, Ph.D.**

Praha, 2018

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 30. 4. 2018

Dominika Houdová

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala Ing. Luboši Matějčkoví, Ph.D. za vstřícnost při konzultacích a cenné rady při zpracování případové studie, Bc. Martinu Indrovi za ochotu pomoci s odbornými termíny a Mgr. Josefu Laštovičkovi za trpělivost a čas, který mi věnoval, aby mi poskytl informace o programech GIS.

# Abstrakt

Práce je rozdělena do dvou částí, na rešeršní část a případovou studii.

Rešeršní část má za cíl uvést do problematiky městských tepelných ostrovů a shrnout poznatky o vztahu městských tepelných ostrovů s okolním prostředím. Popisuje, jak se chovají městské tepelné ostrovy v odlišných biomech a s různými typy zemském pokryvu.

Druhá část práce se zabývá detekcí městského tepelného ostrova na území Prahy a jeho vztahu s vegetačními indexy ze satelitních dat Landsat 8. Cílem případové studie je najít vztah mezi teplotou zemského povrchu a její vliv na vegetaci. Studie dokazuje přímou korelaci mezi teplotou zemského povrchu, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) a Normalized Difference Water Index (NDWI). V porovnání s venkovskými oblastmi byly uvnitř měst nalezeny nižší hodnoty NDWI pro stejné hodnoty NDVI mimo město.

Klíčová slova: dálkový průzkum Země, environmentální výzkum, městské tepelné ostrovy, vegetační indexy, Praha

# Abstract

The thesis is divided into two parts: literature review and case study.

The aim of recherche part is an introduction to issue of urban heat islands and summarization of knowledge of relationship between urban heat islands and surrounding environment. It describes effect of urban heat islands in different biomes and with different land cover.

Second part solves detection of urban heat island in city of Prague in the Czech republic locality and its relationship to vegetation indices by using satellite data Landsat 8. The aim of case study is to find a relationship between land surface temperature and its impact on vegetation. The study proves linear correlation between Normalized Difference Water Index (NDWI) and measured land surface temperature in areas with Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) above a threshold. It was found city area vegetation to be in worse condition as compared to rural area vegetation.

Key words: remote sensing, environmental research, urban heat islands, vegetation indices, Prague

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk</b>	<b>6</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>7</b>
<b>2 Rešeršní část</b>	<b>7</b>
2.1 Charakteristika městských tepelných ostrovů	7
2.2 Příčiny vzniku tepelných ostrovů	9
2.3 Vztah mezi tepelným ostrovem povrchu města a městské atmosféry	10
2.4 Tepelný ostrov Prahy	12
2.5 Využití GIS při studiu městských tepelných ostrovů	13
2.6 Dopady městských tepelných ostrovů na životní prostředí	14
2.6.1 Spotřeba energie	14
2.6.2 Kvalita ovzduší a skleníkové plyny	15
2.6.3 Lidské zdraví a komfort	15
2.6.4 Kvalita vody	15
2.7 Vztah mezi tepelnými ostrovy a zemským pokryvem	16
2.8 Vztah mezi MTO a propustností zemského povrchu	17
2.9 Vztah mezi MTO a okolními ekosystémy	18
2.9.1 MTO v lesním biomu mírného pásma	18
2.10 Vztah mezi MTO a hojností vegetace	19
<b>3 Případová studie</b>	<b>20</b>
3.1 Metodologie	20
3.2 Studovaná oblast	21
3.3 Data Landsat 8	23
3.3.1 Technické parametry dat Landsat 8	23
3.3.2 Použitá data	25
3.4 Poměrové indexy	25
3.4.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	26
3.4.2 Normalized Difference Water Index (NDWI)	27
3.4.3 Normalized Difference Built-up Index (NDBI)	27
3.4.4 Normalized Difference Bareness Index (NDBal)	27
3.5 Měření teploty zemského povrchu ze satelitních snímků	28
3.6 Výsledky	29
3.6.1 Teploty zemského povrchu	29
3.6.2 Vztah mezi teplotou zemského povrchu, NDVI a NDWI	31
<b>4 Diskuze</b>	<b>34</b>
<b>5 Závěr</b>	<b>35</b>
<b>Bibliografie</b>	<b>36</b>

Knižní zdroje a články	36
Internetové zdroje	38
<b>Seznam obrázků a tabulek</b>	<b>39</b>

## Seznam použitých zkratk

GIS - Geoinformační systémy

LST - Land Surface Temperature, teplota zemského povrchu

MTO - Městský tepelný ostrov

OLI - Operational Land Imager

THIS - Tool for Heat Islands Simulation, nástroj pro simulace tepelných ostrovů

TIRS - Thermal InfraRed Sensor, termální infračervený senzor

TOA - Top of atmosphere

# 1 Úvod

Městské tepelné ostrovy jsou oblastí zájmu více než 50 let, jejich existence je ovšem známa mezi odbornou veřejností téměř dvě století. Jedna z prvních studií byla zpracována v roce 1964 v Singapuru (Nieuwolt, 1966). S příchodem nových technologií, konkrétněji dálkového průzkumu Země, je možno městské tepelné ostrovy zkoumat nejen na lokální úrovni, ale i v globálním měřítku. P.K. Rao (1972) byl prvním, kdo demonstroval, že městské oblasti se dají identifikovat pomocí analýzy infračervených termálních dat ze satelitních dat. Městské tepelné ostrov mají negativní dopady na kvalitu vody, zvyšují polutanty v ovzduší a skleníkové plyny a narušují lidské zdraví a komfort. Vzhledem k tomu, že se nacházíme v době Antropocénu a obyvatel planety stále přibývá, můžeme předpokládat, že se budou rozšiřovat i městské oblasti, a tím i městské tepelné ostrovy.

Práce je zaměřena na popis městských tepelných ostrovů a objasnění jejich vztahu s okolními ekosystémy. Součástí práce je případová studie detekující městské tepelné ostrovy na území Prahy pomocí dat Landsat 8 a zkoumající vztah mezi teplotou zemského povrchu a vegetačními indexy. Cílem práce je shrnutí metodiky zpracování satelitních snímků pro detekci městských tepelných ostrovů a jejich vztahu s okolními ekosystémy a aplikovat tyto poznatky v případové studii na území Prahy.

## 2 Rešeršní část

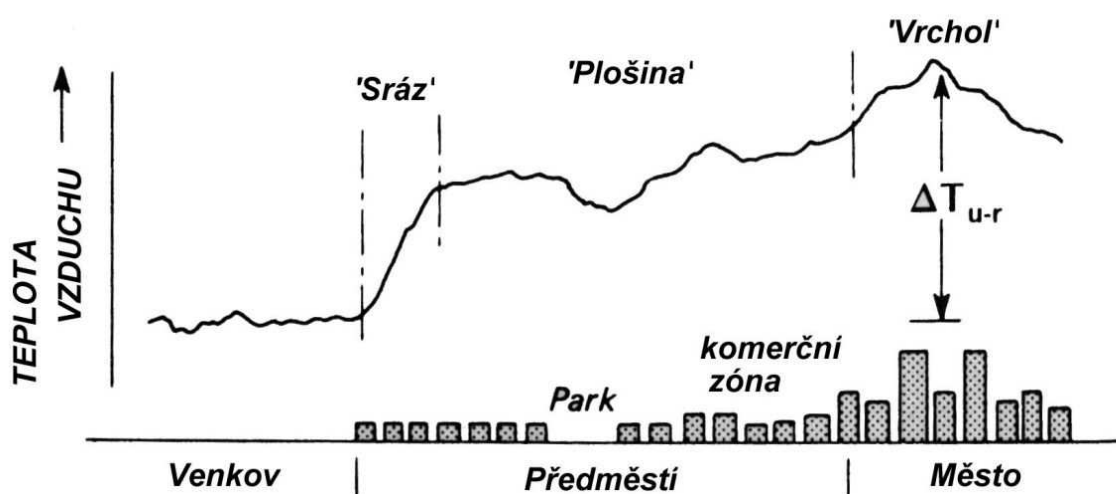
### 2.1 Charakteristika městských tepelných ostrovů

Městský tepelný ostrov (MTO) se projevuje jako oblast města, která je výrazně teplejší oproti okolní krajině. Jde především o zvýšenou teplotu vzduchu v mezní a přízemní vrstvě atmosféry nad průmyslovou aglomerací nebo nad městem (Bednář, 1993). Více urbanizované oblasti mívají zpravidla i větší tepelný ostrov (Bednář, 1985). V noci se jádra měst projevují jako teplé a vlhké ostrovy, zatímco v době slunečního svitu jako teplé a suché, proto jejich sílu můžeme pozorovat spíše v nočních či časných ranních hodinách. Mají tendenci projevovat pomalejší chladicí vzorec oproti okolní venkovské krajině (Deosthali, 2000; Nakata-Osaki a kol., 2018). Tepelné ostrovy bývají také výraznější v zimním období oproti letnímu, za klidného



anticyklonálního počasí při velmi slabém proudění nebo za bezvětří. Ovšem výzkumy MTO pomocí satelitních snímků používající termální infračervené senzory ukázaly opak, kdy se MTO projevují nejvíce během denní doby teplého ročního období a nejméně v noci – opak ke studím MTO měřených z teploty vzduchu (Roth a kol., 1989). Běžné teplotní rozdíly mezi městem a okolní krajinou se pohybují v rozpětí 1–5 °C, ovšem za jasných zimních nocí mohou být teplotní rozdíly mezi okolní krajinou a centrem města i mnohem větší, např. 10 °C a i více (Bednář, 1985).

Obr. 1 zobrazuje typickou morfologii městského ostrova, teplota uvnitř tepelného ostrova je mnohem větší v porovnání s venkovským pozadím, strmý sráz pak ohraničuje přechod město-venkov. Převážná plocha města je charakterizována nevýrazným gradientem, oblasti s odlišným teplotním gradientem jsou způsobeny různě vysokou či nízkou hustotou zástavby. Mezi ty chladnější oblasti patří místa jako jsou parky, lesíky či vodní plochy, naproti tomu průmyslové oblasti a centra měst jsou mnohem teplejší (Oke, 1987).



Obr. 1 - Řez typickým městským tepelným ostrovem (Oke, 1987).

## 2.2 Příčiny vzniku tepelných ostrovů

Tepelný ostrov je jev vzniklý působením více faktorů. Faktory ovlivňující výskyt a intenzitu městských tepelných ostrovů (MTO) mohou být obecně rozděleny do dvou kategorií, první kategorií jsou meteorologické faktory zahrnující rychlost a směr větru, vlhkost a oblačnost. Druhou kategorií tvoří architektura města, jako je hustota zástavby, poměr stran budov, stavební

materiály a výhled na oblohu; obecně tuto kategorii můžeme nazvat geometrií města (Nakata-Osaki a kol., 2018).

Jednou z hlavních příčin městských tepelných ostrovů je intenzivní uvolňování odpadního tepla do ovzduší v městských a průmyslových aglomeracích, např. transformace mechanické energie na teplo, vytápění, automobilová doprava apod. (Bednář, 1985). Intenzita MTO se mění s teplotou vzduchu, což bylo prokázáno vyšší intenzitou MTO 14. září 2000 v porovnání s 1. listopadem 2000 ve studii prováděné v Číně, obojí na regionální i lokální úrovni (Chen, Xiao-Ling a kol., 2006).

Mezi další příčiny vzniku tepelných ostrovů patří výše zmíněná geometrie města. Geometrie otevřených prostorů patří k nejdůležitějším parametrům při utváření mikroklimatu, geometrie města je formována přesně pro rozvoj faktorů MTO. Příčinou je velká členitost terénu, kdy mnohonásobný odraz slunečního záření zvětšuje míru pohlcování tepla, tzv. efekt kaňonů, který též působí zeslabení větru či změnu jeho směru. Velké množství vertikálních ploch absorbuje záření již dříve odražené od horizontální plochy, a tím dochází k akumulaci tepla např. na sídlištích. Teoreticky, čím vyšší je poměr výšky k šířce v geometrii města, tím menší je oblast viditelné oblohy a rozptylu dlouhovlnného záření; tedy velký poměr výšky k šířce redukuje míru ochlazování snížením turbulentního transportu způsobeným větrem a množstvím uvolněného tepla. Nakata-Osaki a kol. využili svého nástroje pro simulaci MTO (popsáno níže, viz kapitola “Využití GIS při studiu městských tepelných ostrovů”) a došli k závěru, že zvýšení výšky budovy vede ke snížení maximální intenzity MTO. Při zvýšení poměru výšky ku šířce dojde k mírnému snížení rychlosti záření ( $W^{-1}m^{-2}$ ) v kaňonu. Změnou parametru šířky, tedy jeho zvětšením, naopak dojde ke zvýšení záření v kaňonu, z čehož vyplývá, že nejproblematictějšími jsou města s velkou rozlohou a příliš variabilními výškami budov (Bednář, 1985; Nakata-Osaki a kol., 2018).

Existuje také mnoho studií, které spojují souvislost mezi drsností povrchu a změnami směru větru. Problematice drsnosti povrchů a jejich vlivů na vývoj MTO se věnoval i Nakata-Osaki a kol. (2018) ve své studii zabývající se nástrojem pro simulaci MTO. Výsledky jejich studie ukazují, že větší drsnost povrchů nezpůsobuje nárůst MTO.

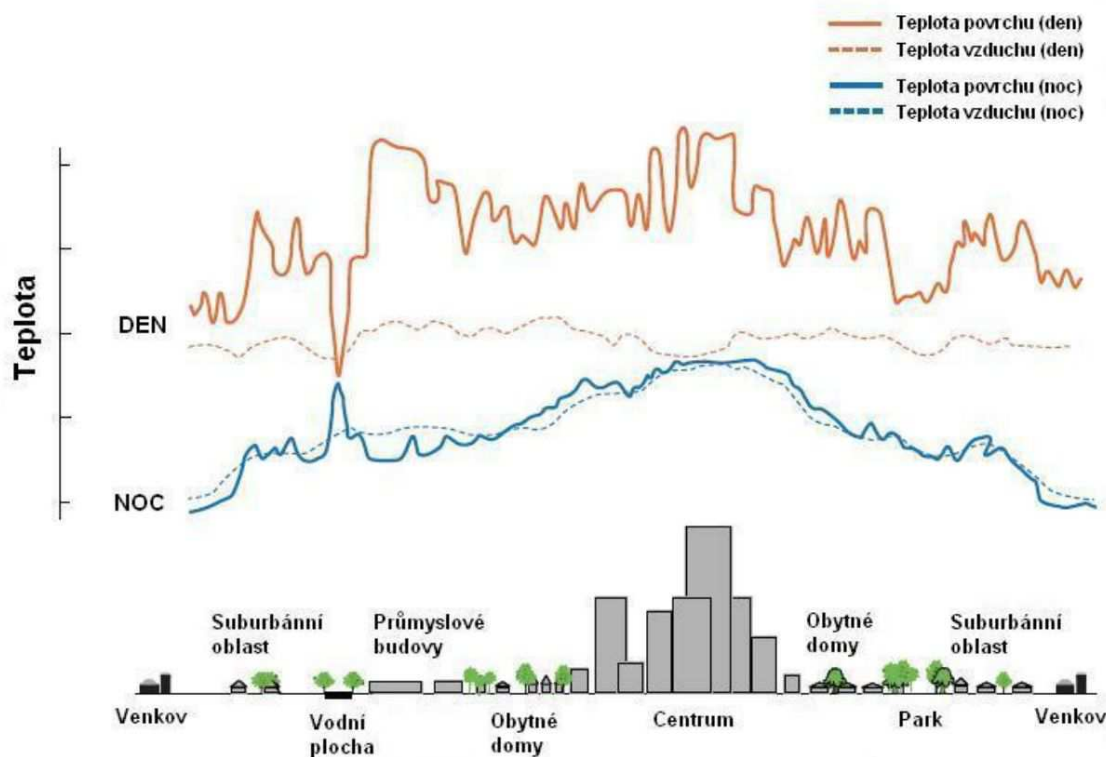
Obrovskou zásluhu má změna energetické bilance země, jež je vyvolaná nahrazením umělých materiálů, jako je asphalt nebo beton, místo přirozených povrchů. Umělé materiály mají odlišné vlastnosti, mají tendenci dopadající tepelné záření absorbovat, což je zapříčiněno nižším albedem. V případě asfaltových a terových silnic absorpci ještě více prohlubuje tmavá barva těchto komunikací (Oke, 1987).

V důsledku urbanizace také ubývá vegetačních ploch, které ochlazují městský ekosystém. Menší podíl zastoupené vegetace v městských ekosystémech a odvody dešťové vody kanalizací mají za následek zmenšení intenzity vypařování vody (Oke, 1987).

Nad městy se ve větší míře vyskytují částice atmosférických aerosolů, které zesilují zpětný odraz záření od atmosféry, což má za následek zmenšení efektivního vyzařování (Bednář, 1985).

## 2.3 Vztah mezi tepelným ostrovem povrchu města a městské atmosféry

Teplota povrchu ovlivňuje teplotu atmosféry, a to zejména v přízemní vrstvě. Vodní plochy, přírodní povrchy a povrchy kryté vegetací mají relativně chladnější teplotu aktivního povrchu, a to především v období insolace. Přírodní povrchy tedy zvyšují teplotu okolního vzduchu oproti urbánním oblastem, jež jsou tvořeny antropogenními materiály, mnohem méně. Akumulované teplo se v urbánních oblastech v období negativní energetické bilance dostává zpět na povrch a dále do atmosféry, což vysvětluje největší maximum intenzity tepelného ostrova v nočních hodinách. V atmosféře se vzduch působením větru promíchává, a tím dochází k výměně teploty, tzn. že vztah mezi teplotou aktivního povrchu a teplotou v přízemní vrstvě atmosféry není konstantní (Akbari, 2008).



Obr. 2 - Denní chod intenzity městského tepelného ostrova atmosféry a povrchu za anticyklonálního počasí ve dne a v noci (Akbari, 2008, upraveno).

Tab. 1 - Shrnutí základních charakteristik povrchového městského tepelného ostrova a atmosférického tepelného ostrova (Akbari, 2008, upraveno).

	<b>Tepelný ostrov zemského povrchu</b>	<b>Atmosférický tepelný ostrov</b>
<b>Vývoj teploty</b>	- přítomen neustále - nejintenzivnější během dne a v létě	- může být menší, či vůbec nemusí existovat během dne - nejintenzivnější v noci či za rozbřesku a v zimě
<b>Průměrná intenzita za příznivých podmínek</b> <i>(radiační typ počasí -bezvětrné, bezoblačné)</i>	Vyšší teplotní, prostorová a časová proměnlivost: Den: 10 až 15 °C Noc: 5 až 10 °C	Nižší proměnlivost: Den: -1 až 3 °C Noc: 7 až 12 °C
<b>Identifikační metoda</b>	Nepřímá měření: - dálkový průzkum Země (DPZ) - ruční pozemní termální kamery	Přímá měření: - stacionární meteorologické stanice a účelová meteorologická měření
<b>Typické znázornění</b>	Termální snímky	Isotermické mapy Grafy průběhu teploty

## 2.4 Tepelný ostrov Prahy

Intenzitu tepelného ostrova města Prahy lze vyjádřit jako průměrný rozdíl teploty mezi městskou stanicí Praha Klementinum a tří stanic na venkově: Dobřichovice, Brandýs nad Labem a Tuhaň. Alternativně můžeme provádět měření pomocí více-spektrálních satelitních dat, která se zaměřují na teplotu povrchu země, jak bylo popsáno výše.

Celková denní minima teploty mezi červnem a zářím jsou v centru Prahy až o 2 °C větší v porovnání s venkovskými oblastmi. Srovnání údajů pro období 1961–1990 a 1991–2013 ukazuje na výrazné zesílení intenzity tepelného ostrova až o 0,5 °C v posledních desítkách let. Maxima teplot centra Prahy se příliš neliší od těch venkovských, obzvláště mezi červnem až zářím jsou dokonce nižší. V zimě mírně větší maxima teploty v centru souvisí s teplem uvolňovaným z antropogenních zdrojů, vytápění (<http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty>).

Tab. 2 - Průměrné změny vybraných klimatických charakteristik urbanizovaných oblastí o velikosti Prahy v porovnání s rurálním okolím v letním období (ČHMÚ, Moravčík, 2016).

Parametr	Změna	Velikost / Poznámka
intenzita turbulence	větší	10–50 %
rychlost větru	redukováná	5–30 % v 10 m při silném proudění
	zesílená	v slabém proudění s tepelným ostrovem
směr větru	pozměněný	1–10 stupňů
ultrafialové záření	mnohem menší	25–90 %
globální záření	menší	1–25 %
tepelné vyzařování	větší	5–40 %
viditelnost	menší	
výpar	menší	cca 50 %
akumulace tepla	větší	cca 200 %
teplota vzduchu	větší	1–3 °C / 100 let, 1–3 °C roční průměr, až 12 °C hodinový průměr
vlhkost	menší	přes den v létě
	větší	přes noc v létě, v zimě celodenně
oblačnost	větší zákal	v centru a po směru větru
	větší oblačnost	obzvláště na závětrné straně města
mlha	větší i menší	v závislosti na aerosolech ve vzduchu a

		okolí města
srážky sněhové	menší	část v podobě deště
srážky celkové	větší	na závětrné straně, než ve městě samotném
vegetační doba	delší	delší o 0–10 dní
pravděpodobnost výskytu mlh	větší	30 %

Poznámka: hodnoty jsou počítány pro města o velikosti Prahy, jedná se ovšem o průměrné hodnoty, reálné odchylky meteorologických prvků závisí na konkrétní velikosti daného města (velikost zastavěné plochy, počet obyvatel), geografické poloze, povětrnostní situaci apod.

## 2.5 Využití GIS při studiu městských tepelných ostrovů

Geoinformační systémy (GIS) mají schopnost ukládat topologické vztahy mezi geografickými objekty (reprezentovanými ve vektorovém modelu body, liniemi či oblastmi) a převádět tato data do alfanumerických (tabulárních) dat obsahující nejrůznější charakteristiky. GIS obsahují řadu analytických nástrojů, existuje mnoho možností jejich využití: rozpoznávání městských oblastí, detekce nebo predikce teploty zemského povrchu a tepelných ostrovů.

S.J. Quan a kol. (2015) vyvinuli model energie městské budovy v systému GIS, přičemž počítání bylo zaměřeno na tak malé oblasti jako jsou jednotlivé budovy. Peeters a Etzion (2012) představili parametrický model GIS vyvinutý pro automatické rozpoznávání městských objektů, využili schopnost GIS rozpoznat kontextuální vztahy mezi objekty. První část rozpoznávání objektů (segmentace) byla zpracována v softwaru pro zpracování obrazu (Matlab®), skutečná klasifikace již byla uskutečněna v GIS (ArcGIS). Parametry městské geometrie, jako je poměr výšky ku šířce budov, byly vypočteny podle rozpoznání stínových ploch budov pomocí satelitních snímků. Výpočet výšky budovy byl založen na délce stínu a byl proveden pomocí techniky vyvinuté v GIS (Nakata-Osaki a kol., 2018). Mezi platformami GIS představujícími potenciál pro vývoj vlastních úkolů je ArcGIS nástrojem nabízející různé možnosti prostorové analýzy.

Studie provedená Balázsem a kol. z roku 2009 představila metodu určující očekávanou průměrnou roční intenzitu MTO. Hlavní výhodou této regresní metody je jednoduchost

vstupních dat (dálkový průzkum Země), kdy není zapotřebí znát detailně informace o dané lokalitě. Pro získání charakteristik zemského povrchu byly využity metody GIS v kombinaci s analýzou Landsat snímků (Nakata-Osaki a kol., 2018).

Nakata-Osaki a kol. (2018) vyvinuli nástroj pro simulaci tepelných ostrovů (THIS, z anglického Tool for Heat Islands Simulation). Tento nástroj rozšiřuje GIS pro výpočet intenzity MTO na základě městské geometrie. Velkou výhodou je zjednodušený způsob zadávání dat. THIS algoritmus umožňuje uživateli vložit nové korekční rovnice pro nové validace, je-li to potřeba. Poskytuje ověření potenciálu městské geometrie na vliv vývoje MTO. Navrhovaný nástroj může pomoci pochopit problémy měst způsobené formacemi MTO, zlepšit plánovací strategie při stavbě nových budov a budování nových měst.

## 2.6 Dopady městských tepelných ostrovů na životní prostředí

I přesto, že některé dopady městských tepelných ostrovů se mohou zdát jako pozitivní, například prodloužení rostlinné vegetační sezóny, stále převládají negativní dopady. Rozsáhlé urbanizované plochy pozměňují procesy energetické a vodní bilance a ovlivňují dynamiku pohybů vzduchu (Oke, 1987). Zvyšují spotřebu energie, zhoršují kvalitu vod, zvyšují polutanty v ovzduší a skleníkové plyny a zhoršují lidské zdraví a pohodlí (Akbari, 2008).

Jako jednu z výhod MTO bychom mohli brát oteplování městského ekosystému v zimním období, kdy lidé obývající město nemusí tolik topit a sníh a led na silnicích rychle roztává. Zmírňující opatření proti MTO, jako je výsadba stromů, zeleň na střeších apod., obecně poskytují celoroční výhody (Akbari, 2008).

### 2.6.1 Spotřeba energie

Zvýšené letní teploty ve městech zvyšují potřebu ochlazování a vyvíjejí tak větší tlak na spotřebu elektrické energie. Ta je přitom největší v době horkých letních odpoledních během pracovního týdne, kdy všechny kanceláře a domy využívají klimatizace, světla a spotřebiče naplno. Zvýšení letní teploty o 0.6°C odpovídá vzrůstu poptávky po elektrické energii o 1,5 až 2 %. Neustálé zvyšování teploty center měst v posledních desetiletích znamená zvýšení o 5 až 10 % celosvětové poptávky elektřiny na kompenzaci efektů tepelných ostrovů (Akbari, 2008).

## 2.6.2 Kvalita ovzduší a skleníkové plyny

Vyšší teploty zapříčiňují vyšší poptávku po energiích, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, což zpravidla způsobuje vyšší úroveň znečištění ovzduší a emise skleníkových plynů. V České republice se většina elektrické energie vyrábí ze spalování fosilních paliv (k roku 2014 to je 45 %) (Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015), proto znečišťující látky z většiny elektráren zahrnují oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ ), oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ), prachové částice (PM), oxid uhelnatý (CO) a rtuť (Hg). Tyto látky jsou nejen škodlivé pro lidský organismus, ale také způsobují kyselé deště. Zařízení spalující fosilní paliva vypouštějí velké množství skleníkových plynů, především oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ), což má za následek globální změnu klimatu (Akbari, 2008; Chen a kol., 2006).

Kromě zvýšení znečišťujících emisí, vysoké teploty vzduchu způsobují rychlejší tvorbu přízemního (troposférického) ozonu, který je produkován reakcemi s  $\text{NO}_x$  a těkavými organickými sloučeninami (VOC) za přítomnosti slunečního záření. Pokud jsou všechny ostatní proměnné stejné, jako je úroveň emisních prekurzorů nebo rychlost a směr větru, emise přízemního ozonu budou vyšší za slunečného a teplejšího počasí. Vyšší koncentrace přízemního ozonu jsou pak stresovým faktorem pro městskou vegetaci a zároveň mohou být škodlivé i pro člověka. Vyšší teplota ovlivňuje také tvorbu VOC a rychlost rozptylu částic (Akbari, 2008).

## 2.6.3 Lidské zdraví a komfort

Jedním z hlavních problémů MTO na lidské zdraví je negativní vliv na respirační obtíže, obecné nepohodlí, tepelné křeče a vyčerpání, úpaly a úmrtnost související s vysokými teplotami.

MTO také mohou zhoršit dopad tepelných vln, které jsou obdobím abnormálně horkého a velmi často i vlhkého počasí. Citlivá část populace, jako jsou děti, senioři a nemocní jsou obzvláště ohroženi těmito událostmi (Akbari, 2008).

## 2.6.4 Kvalita vody

Povrchové MTO degradují kvalitu vod, především v důsledku tepelného znečištění. Povrchy chodníků a střech, které dosahují teplot vyšších, než je teplota okolního vzduchu, přenášejí toto přebytečné teplo do dešťové vody. Mohou dosahovat od 27 °C až do 50 °C. Studie ukázala, že odtok z městských oblastí během letních dnů byl přibližně o 11–17 °C teplejší, než odtok



z okolních venkovských oblastí, kdy teploty chodníků a střech v poledních hodinách dosahovaly přibližně o 11–19 °C více než teplota vzduchu. Když déšť přišel předtím, než se městské povrchy stačily ohřát, teplota odtokové vody z venkovských a městských oblastí se lišila přibližně pouze o 2 °C (Arrington a kol., 2004). Tato ohřátá dešťová voda se dostává do potoků, řek, jezer a rybníků a ohřívá tak celé vodní kontinuum. Studie ve Virginském Arlingtonu v USA zaznamenala teploty povrchové vody až o 4 °C vyšší, a to 40 minut po letních přivalových deštích (Akbari, 2008; Chen a kol., 2006).

Teplota vody ovlivňuje všechny aspekty vodního života, především metabolismus a reprodukci mnoha vodních druhů, rapidní změny teploty vody vyplývající z ohřátého odtoku dešťové vody mohou být velmi stresující. Například u pstruha potočního se dostaví termální stres a šok, když se teplota vody změní o 1–2 °C během 24 hodin (Akbari, 2008).

## 2.7 Vztah mezi tepelnými ostrovy a zemským pokryvem

Jak bylo popsáno v kapitole „Příčiny vzniku tepelných ostrovů“, velký podíl na rozvoji MTO má zemský povrch. Výsledky studie z amerického Indianapolis zobrazují termální gradient, jenž přechází z obchodní části města směrem k venkovu s klesající tendencí. Největší MTO byly pozorovány v centrální části industriální oblasti, dále v komerčních oblastech a v oblastech méně zastavěných se nevyskytovali žádné větší MTO s výjimkou větších dálnic. Nejnižší teplota byla zaznamenána pro oblasti lesa, pastvin a vodních ploch. Velké odchylky teplot byly pozorovány u komerčních a industriálních objektů, což je zapříčiněno použitím různých stavebních materiálů (Weng a kol., 2004).

Obytná půda vykazuje malé odchylky teplot, které jsou dány homogenitou oblasti (stejně barvy střech, zahrady, vzdálenost domů), na rozdíl od komerční a industriální oblasti, která je často zasazená mezi pole, pastviny a lesy (Deosthli a kol., 2000). Stejně tak bylo zjištěno, že když městský povrch či zástavba zabírají většinu území soustavně, teplota povrchu se homogenizuje a nevytváří velké teplotní gradienty.

Uměle vytvořená vegetační pokrývka (orná půda, často i pastviny) vykazuje střední hodnoty LST vzhledem k řídkému pokryvu vegetace těchto oblastí v době prováděné studie. Lesy vykazují značně nižší LST, hustá vegetace snižuje množství tepla uloženého v půdě a povrchu prostřednictvím transpirace. Veškerý vegetační kryt, bez ohledu na to, jestli byl vytvořený

člověkem nebo je přirozený, vykazuje extrémně malé teplotní změny. Ze studie vyplývá, že rozvoj města zvýšil teplotu v průměru o 5,94 K nahrazením přírodního prostředí (les, voda, pastviny) za nepropustné povrchy (kámen, kov, beton) (Weng a kol., 2004). Voda se má tendenci během léta zahřívát pomalu, teploty vody jsou ovlivněny vysokou tepelnou setrvačností, konvekcí, turbulencí, velikostí vodních ploch a také typem vodních ploch (tekoucí či stojaté). Z těchto důvodů můžeme u vody pozorovat velké odchylky LST u jednotlivých vodních ploch (Chen a kol., 2005; Gallo a kol., 2007).

Studie prováděná v Číně v oblasti delty Perlové řeky a Shenzenu se pokusila najít korelaci mezi městským tepelným ostrovem a změnami zemského pokryvu od regionálního měřítka až po lokální. Pro studii byla využita data Landsat za období 1990–2000, celkem šest snímků. Analýza ukázala, že vyšší teplota MTO byla lokalizována s rozptýleným vzorem, závislejícím na určitém zemském pokryvu. Výsledky studie ukazují přímý vliv mezi zastavěnou oblastí a nárůstem teploty. Distribuce tepelných ostrovů ve studované oblasti se změnila ze smíšeného vzorce na městské tepelné ostrovy v souvislosti s rychlou expanzí zastavěné plochy v oblasti delty Perlové řeky i Shenzenu. Změny zemského pokryvu / využití půdy přispěly ke globálnímu oteplení a ovlivnily intenzitu MTO, především prostřednictvím rozšiřování měst, degradací zemědělské půdy a mořskou rekultivací ve studované oblasti (Chen a kol., 2006).

## 2.8 Vztah mezi MTO a propustností zemského povrchu

Vlhkost je dalším důležitým faktorem ovlivňujícím intenzitu MTO. Městské tepelné ostrovy by byly slabší, když by studovaná oblast byla aridní (Chen a kol., 2006). Teplota mimo jiné vzrůstá s nepropustnými povrchy (Weng a kol., 2004). Až 70 % odchylek LST je dáno změnami propustnosti zemského povrchu. Vztah propustnosti zemského povrchu a LST je nejsilnější v lesních biomech (městské oblasti nacházející se v lesních biomech), kde jsou odchylky až 85 % (Zhang a kol., 2010).

Změna LST v závislosti na propustnosti povrchu je také rozdílná pro biomy s delší vegetační dobou a pro biomy s kratší vegetační dobou, tempo růstu teploty je ovlivněno nepropustným frakčním povrchem daným odpařovací schopností. Rostliny s kratší vegetační dobou zažijí tepelný stres snadněji, než-li lesy, což způsobí častější snížení transpirační rychlosti. Následkem toho se zvýší povrchová teplota v přízemní vrstvě a přispěje k útlumu tepelného kontrastu mezi městským jádrem a okolím (Zhang a kol., 2010; Zhao a kol., 2014).

## 2.9 Vztah mezi MTO a okolními ekosystémy

Městské tepelné ostrovy se projevují různě silně v závislosti na biomu, ve kterém se město nachází. MTO vykazují velký vliv ekologického kontextu na jejich sezónní a denní amplitudy.

Pouště a polopouště vykazují neobvyklý vzorec mezi NDVI a LST, kde nalezneme vyšší míru vegetace a latentní tepelný tok v řídkěji zastavěné oblasti a příměstských oblastech, což je dáno výskytem zdrojů vody v těchto oblastech. Pouště a polopouště napříč biomy vykazují největší rozdíly teplot během dne a letní tepelné ostrovy jsou větší, než zimní (Peng a kol., 2011). Městské oblasti obklopené pouští vytvářejí malý horizontální teplotní gradient mezi městským jádrem a venkovskou oblastí, někdy je tento teplotní kontrast dokonce záporný. Studie prováděná v USA zaznamenala pro pouštní oblasti letní MTO dokonce mírně negativní ( $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), to potvrzuje efekt odvodu tepla zaznamenaný u mnoha pouštních měst. Ale i přesto letní noční a zimní denní teploty vykazují pozitivní efekt MTO. Díky tomuto efektu ve městech pouštních oblastí (konkrétně Las Vegas) nalezneme více vegetace, než-li v okolní krajině, jelikož je město v noci prohřátější a vegetaci se tak daří lépe (Zhang a kol., 2010).

Největší průměrné denní letní MTO vykazují oblasti s širokolistými, smíšenými a jehličnatými lesy mírného pásma. Hustá a vysoká vegetace zachycuje a znovu odpařuje srážky a odvádí kořeny vodu z hluboké půdy do atmosféry během procesu fotosyntézy. Městské jádro s výrazně nižším podílem vegetace se tedy projevuje mnohem tepleji (Peng a kol., 2011). Naproti tomu městské oblasti s nižší vegetační biomasou, jako jsou pastviny, louky, křoviny a savany, produkují méně intenzivní MTO s amplitudami od  $4$  do  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Zhang a kol., 2010).

### 2.9.1 MTO v lesním biomu mírného pásma

Pro města nacházející se v tomto biomu je letní denní MTO v silné korelaci s velikostí města (Nastran a kol., 2018). Průměrné MTO jsou okolo  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro oblasti menší než  $10\text{ km}^2$ , zatímco  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro oblasti větší než  $1000\text{ km}^2$ . To samé platí i v zimním období, ale s nižšími výkyvy, kdy se MTO oblastí menších než  $10\text{ km}^2$  pohybují kolem  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  a MTO oblastí větších než  $1000\text{ km}^2$   $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Zhang a kol., 2010). Rozdíl mezi letní a zimní amplitudou MTO indikuje vegetační funkce těchto smíšených lesů mírného pásma. V létě, kdy je vegetace fyziologicky aktivní, dochází během dne k silnému ochlazení výparem rostlin a vytvářejí se výrazné MTO mezi

nepropustnými a vegetovanými zónami. Během zimy je kontrast mezi městskou a venkovskou oblastí tlumen, když les ztrácí listy a fotosyntetická aktivita je potlačena (Zhao a kol., 2014).

## 2.10 Vztah mezi MTO a hojností vegetace

Výzkum teploty zemského povrchu ukazuje, že rozdělení toků specifického a latentního tepla, a tedy odezva vyzařování zemského povrchu, je funkcí měnícího se obsahu vody v půdě a vegetačního pokryvu (Owen a kol., 1998). U ploch s větší hojností vegetace byla nalezena vyšší úroveň výměny latentního tepla, zatímco u oblastí s řídkou se vyskytující vegetací, jako jsou městské oblasti, byla pozorována výměna specifického tepla (Oke, 1982).

Studie Wenga a kol. z roku 2004 aplikovala lineární spektrální smíšenou analýzu, což je fyzická metoda zpracování obrazu, kdy se předpokládá, že spektrum měřené senzorem je lineární kombinací spektra všech složek jednoho pixelu. Korelační analýzou byl zkoumán pixel po pixelu. Studie zjistila, že hodnoty LST negativně korelují s hodnotami NDVI pro všechny kategorie zemského povrchu. Čím je vyšší biomasa / vegetace, tím nižší je povrchová teplota.

Plošná míra výskytu vegetace v pixelech má přímou korespondenci se zářivými, termálními a vlhkostními vlastnostmi zemského povrchu, které určují LST. Je zřejmé, že zónování, jakožto nástroj městských plánovačů, má hluboký dopad na fyzikální vlastnosti městské krajiny, a proto se zavádějí taková opatření, jako je maximální výška budovy, vhodná hustota zástavby, rozsah nepropustného povrchu, pokryv, otevřené prostory, pokryv a činnosti (Nastran a kol., 2018). Tyto proměnné určují výměnu povrchové energie, povrchovou a podpovrchovou hydrologii, klimatické systémy a další environmentální procesy. Změny v zemském pokryvu nezpůsobí pouze změny ve fyzikálních veličinách jako je vegetativní hojnost a biomasa, ale také v tepelných vlastnostech zemského povrchu. Výsledky studií ukazují, že souhra mezi tepelnou a vegetační dynamikou vytváří unikátní podpisy těchto biofyzikálních parametrů v každém typu zemského pokryvu a dále vytváří korelace mezi NDVI, LST a vegetační frakcí (Weng a kol., 2004; Gallo a kol., 2007).

Efekt MTO má tendenci být závislý na přítomnosti vegetace v různých městských zónách. Studie Zhanga a kol. z roku 2010 ukázala, že nejchladnější teplota letního povrchu se nachází v předměstské zóně, kde je nejvyšší NDVI a vyšší propustnost zemského povrchu. Z této zóny

se LST zvyšuje oběma směry, směrem k městskému jádru a ven z města do venkovské oblasti, okolo 1 °C.

## 3 Případová studie

### 3.1 Metodologie

Pro získání vztahu mezi MTO a změnami zemského pokryvu musíme nejdříve zjistit teplotu vyzařování zemského povrchu ze satelitních snímků. U starších dat Landsat je postup složitější, než-li u nové řady Landsat 8, kde se dají využít pásma TIRS. U řady Landsat 7 ETM+ jsou zapotřebí dva kroky – nejdříve se využijí digitální čísla pásma 6, která se musejí konvertovat na radianci. Z radiance se dále vypočítá efektivní teplota zemského povrchu z pohledu satelitu, a to za předpokladu jednotné emisivity zemského povrchu. U řady Landsat 5 TM postup zahrnuje také dva kroky a navrhl ho v roce 2002 Yunhao Chen a kolektiv. V prvním kroku se digitální čísla pásma 6 musí konvertovat na jas záření (*radiation luminance*), ve druhém kroku je toto záření konvertováno na teplotu záření z pohledu satelitu v Kelvinech (Chen, Xiao-Ling a kol., 2006). Pro jednoduchost zpracování dat byla použita data Landsat 8, získání teploty zemského povrchu je popsáno níže v kapitole 3.5..

Dalším krokem je aplikace vhodně zvoleného indexu pro daný typ zemského pokryvu a získání jeho hodnot. Pro účely analýzy vztahu mezi MTO a změnami zemského pokryvu je nejvhodnější NDVI, NDWI, NDBaI a NDBI (Chen, Xiao-Ling, et al., 2006). V této studii byl aplikován index NDVI a NDWI. U obdržených hodnot daných indexů se dále zkoumají jejich změny napříč časem ve studovaném období. Známe-li teplotu a prostorový vzorec, můžeme začít nejen hledat vztah mezi těmito hodnotami a kvantitativně studovat vztah mezi intenzitou MTO a typem zemského pokryvu, ale rovněž to, k jakým změnám v průběhu času došlo (Chen, Xiao-Ling a kol., 2006).

Data Landsat 8 byla zpracována v programu Envi 5.4 a ArcMap.

## 3.2 Studovaná oblast

Pro studovanou oblast bylo vybráno město Praha, hlavní a zároveň i největší město České republiky s rozlohou 496 km<sup>2</sup> a 1,3 miliony obyvatel (ČSÚ, 2018). Praha leží mírně na sever od středu Čech ve Středočeském kraji a z hlediska geomorfologie se většina rozlohy rozprostírá na Pražské plošině, menší část pak na Středolabské tabuli a na jih Prahy zasahuje Hořovická pahorkatina a Brdská vrchovina. Centrum se nachází v údolí Vltavy a jejích přítoků, jejichž erozní činností vznikl členitý reliéf. Nejnižším bodem Prahy je hladina Vltavy u Suchdola (177 m.n.m.) a nejvyšším bodem je vrch Teleček u Sobína (399 m.n.m.) ([www.visitpraha.cz](http://www.visitpraha.cz)).

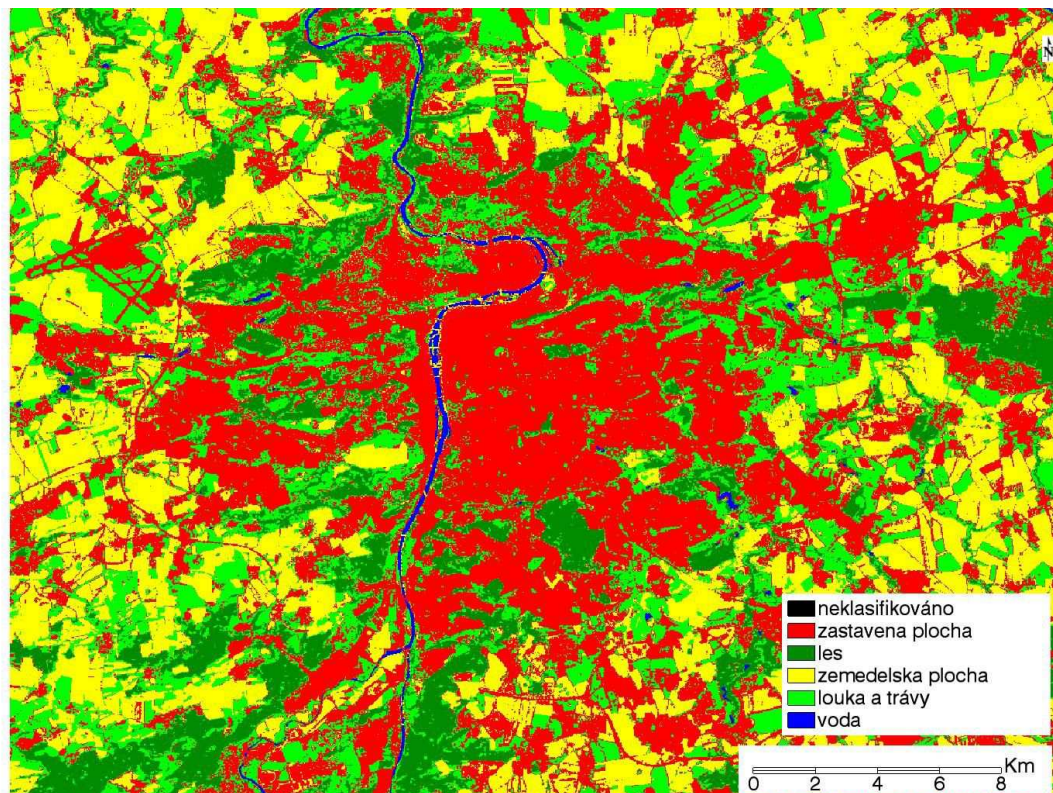
Dle dat Českého úřadu zeměměřického a katastrálního k roku 2017 většinu území Prahy zabírají zemědělské plochy, a to 39,7 % z celkové výměry, do nichž spadá orná půda, zahrady, chmelnice, vinice, ovocné sady a trvalé travní porosty. Lesní půdy tvoří 10,5 % a vodní plochy 2,2 % z celkové výměry Prahy. Zastavěné plochy zaujímají 10,1 %, ovšem ostatní plochy, do kterých spadají i staveniště, zabírají 37,5 % (ČÚZK, 2018).

Praha leží v oblasti mírného vlhkého podnebí s teplým létem. Převládá zde západní a jihozápadní proudění, nejméně fouká ze severovýchodu. Bezvětrí je na Ruzyni v 11,3 %, na Karlově v 25,3 % případů. Větší procento bezvětrí na Karlově oproti Ruzyni dokazuje, že velká část Prahy leží v mělké kotlině, kde často dochází k zastavení vzduchu. I průměrná rychlost větru je v nejnižších částech Prahy mnohem nižší než v okrajových částech města, a to dokonce ještě 40 m nad terénem vnitřního města. Relativní vlhkost vzduchu je v centru Prahy oproti ostatním regionům České republiky nižší. To je zapříčiněno rychlým odtokem vody kanalizacemi, málo propustným, či zcela nepropustným povrchem, vysokým obsahem prachu a kouře absorbující část vodní páry na kondenzačních jádrech a malou vertikální výměnou vzduchu (Červený, 1984).



0 4 8 12 16 Km

Obr. 3 - Satelitní snímek hlavního města Praha a jeho okolí s fialově zvýrazněnou zastavěnou plochou pomocí RGB syntézy (Landsat 8, 3. 8. 2013).



Obr. 4 - Klasifikace zemského pokryvu města Prahy a jeho okolí do šesti základních kategorií pomocí metody ROIS v programu ENVI (Landsat 8, 3. 8. 2013).

## 3.3 Data Landsat 8

Landsat 8 je americká družice vypuštěna 11. února 2013, jež je již osmou družicí v programu Landsat. První snímky byly shromážděny 18. března 2013. Původně byla nazývána jako Landsat data kontinuální mise (LDCM, z anglického Landsat Data Continuity Mission). Družice by měla navazovat na předchozí a snímat celý zemský povrch; svojí činností se připojuje na oběžné dráze k Landsat 7 a zajišťujeta větší pokrytí pro snímání (Irons a kol., 2010). První družice řady Landsat byla vypuštěna již v roce 1972, data pořízená tímto programem nám tedy poskytují širokou knihovnu snímků a lze je tak používat pro výzkumy napříč časem. Jejich další výhodou je jejich bezplatný přístup. Landsat 7 je schopný pořídit 250 snímků denně, Landsat 8 je již schopný zachytit více než 700 snímků denně (Irons a kol., 2010; USGS, Data Users Handbook).

Program Landsat je výsledkem spolupráce mezi United States Geological Survey (USGS) a NASA, přičemž NASA zajišťuje vývoj, inženýrské systémy a startovací raketu. USGS se stará o vývoj pozemních systémů a dohlíží nad průběhem celé mise a zpracováním dat. Družice Landsat 8 byla vyvinuta pro životnost 5,25 let, ale byla vybavena dostatečným množstvím paliva pro více než 10 let provozu (Irons a kol., 2010).

Landsat 8 má 3 hlavní záměry a vědecké cíle:

- sbírat a archivovat multispektrální obrazová data středního rozlišení (30 metrové prostorové rozlišení) poskytující sezónní globální pokrytí po dobu minimálně pěti let;
- zajistit konzistenci dat s daty z předchozích misí Landsat, z hlediska kalibrace senzorů, geometrie obrazových dat, pokrytí zemského povrchu, kvality výstupního produktu a dostatečnou dostupnost dat pro studie zabývající se změnami zemského pokryvu v průběhu času apod.;
- distribuovat data Landsat 8 i mezi širší veřejnost a to bezplatně a bez jakýchkoliv nákladů pro uživatele (Irons a kol., 2010).

### 3.3.1 Technické parametry dat Landsat 8

Data Landsat 8 patří mezi data se středním / vysokým rozlišením. Všechna data jsou optická, panchromatická (kanál pokrývající většinu viditelného spektra), mají rozlišení 15 metrů, jsou multispektrální (barevná a krátkovlnná infračervená) a jsou v rozlišení 30 metrů, přičemž tepelná



data poskytují rozlišení 100 metrů. Landsat 8 snímá ve viditelných, blízkých infračervených, krátkovlnných infračervených a dlouhovlnných infračervených spektrech. Létá na orbitě ve výšce 705 km s úhlem inklinace 98.2 ° a pokrytí celé zeměkoule trvá 16 dní (Irons a kol., 2010; Heavens Above, 2018). Družice je vybavena dvěma senzory – senzorem OLI (Operational Land Imager) a termálním infračerveným senzorem (TIRS, Thermal InfraRed Sensor). Tyto dva senzory shromažďují data pro devět krátkovlnných pásem a dvě dlouhovlnná pásma (viz tabulka 3). Sensory OLI a TIRS mají větší odstup signálu k šumu, umožňující 12-bitovou kvantizaci dat poskytující více bitů pro lepší charakterizaci půdního pokryvu (Storey a kol., 2014).

OLI senzor byl od předchozích řad vylepšen – využívá senzoru pushbroom, který současně sbírá jednotlivé obrazové řádky a vytváří obraz ze souboru sousedících řádků, jež jsou výsledkem činnosti senzoru ve směru pohybu nosiče, kdežto dřívější Landsat družice využívaly senzor whiskbroom, který pohybuje detektorem a vytváří obraz z velkého počtu řádků napříč směru pohybu nosiče senzoru. S více než sedmi tisíci detektory pro jedno spektrální pásmo senzor pushbroom zajišťuje větší citlivost, má méně pohybujících se částí a poskytuje lepší informace o zemském povrchu (Storey a kol., 2014; Harris Geospatial Solutions).

Senzor OLI pořizuje data z devíti spektrálních pásem, přičemž sedm z nich je konzistentních se senzory Thematic Mapper (TM) a Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), které najdeme na předchozích družicích Landsat. Tyto senzory zajišťují porovnatelnost s předchozími daty Landsat a je tak možné využívat při studiích stará i nová data a vzájemně je kombinovat. Přibyly dvě nová spektrální pásma, tmavě modré pobřežní / aerosolové spektrální pásmo umožňující měřit kvalitu vod a krátkovlnné infračervené pásmo Cirrus, jež zlepšuje detekci vysokých a tenkých mračen (USGS, Data Users Handbook, 2016).

Landsat 8, jako první ze všech Landsat, disponují termálním infračerveným senzorem (TIRS), který umožňuje zobrazení tepla a podporuje nové aplikace jako je například měření rychlosti evapotranspirace. TIRS stejně jako OLI využívá senzor pushbroom s šířkou záběru 185 km (USGS, Data Users Handbook, 2016).

Tab. 3 - Charakteristika spektrálních pásem dat Landsat 8 (USGS, Data Users Handbook, 2016, upraveno).

Spektrální pásma	Vlnová délka [ $\mu\text{m}$ ]	Rozlišení [m]
Pásma 1 - Pobřežní / Aerosol	0,433–0,453	30
Pásma 2 - Modrá	0,450–0,515	30
Pásma 3 - Zelená	0,525–0,600	30
Pásma 4 - Červená	0,630–0,680	30
Pásma 5 - Krátkovlnné infračervené	0,845–0,885	30
Pásma 6 - Krátkovlnné infračervené	1,560–1,660	30
Pásma 7 - Krátkovlnné infračervené	2,100–2,300	30
Pásma 8 - Panchromatické	0,500–0,680	15
Pásma 9 - Cirrus (mraky)	1,360–1,390	30
Pásma 10 - Dlouhovlnné infračervené	10,3 –11,30	100
Pásma 11 - Dlouhovlnné infračervené	11,50–12,50	100

### 3.3.2 Použitá data

Pro účely této případové studie byla vybrána data Landsat 8 OLI/TIRS (UTM) pořízená 3. srpna 2013 v 09:59 centrálního času a 30. srpna 2017 v 09:57 centrálního času. Data byla získána z databáze USGS na webové adrese <https://earthexplorer.usgs.gov> z LS collection 1 Level-1 pro TIRS pásma s rozlišením 100 metrů a LS collection 1 Level-2 pro OLI pásma s rozlišením 30 metrů, s výjimkou pásma 8, které má rozlišení 15 metrů. Data byla stažena s atmosférickými korekcemi. Nepřítomnost či nedostatky atmosférické korekce mohou způsobit teplotní chybu 4–7° C pro letní atmosféru ve středních šířkách (Weng a kol., 2004).

### 3.4 Poměrové indexy

Vegetační indexy jsou založeny na hodnotách digitálního jasu, jejich cílem je měřit biomasu nebo vegetativní sílu. Vegetační index je tvořen kombinací několika spektrálními hodnotami, které jsou od sebe navzájem odčítány, přidávány, násobeny či děleny způsobem navrženým tak, aby indikoval množství nebo intenzitu vegetace v jednotlivých pixelech. Vysoké hodnoty

vegetačního indexu v pixelu nám udávají zdravou vegetaci. Nejjednodušší formou vegetačního indexu je poměr mezi dvěma digitálními hodnotami ze samotných spektrálních pásem. Některé pásmové poměry byly definované na základě znalostí o spektrálním chování živé vegetace. Vztahy mezi různými vegetačními indexy a procentuálním vegetačním pokryvem byly zjištěny pomocí regresní analýzy (Campbell, Wynne, 2011).

Poměrové indexy NDVI, NDWI, DVI, EVI, RVI, PVI, SAVI, a MSAVI.

### 3.4.1 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

*Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) je index rostlinné zeleně nebo fotosyntetické aktivity a je jedním z nejčastěji používaných vegetačních indexů. Může být použit například k odhadu produkce vegetace a srážek v semiaridních oblastech (Chen et al., 2004; Weng et al., 2004). NDVI lze použít k odvození všeobecných vegetačních podmínek v dané oblasti. Při odhadu teploty zemského povrchu je množství přítomné vegetace důležitým faktorem, a proto je využití NDVI důležité. Měření NDVI je funkcí viditelné a blízké infračervené odrazivosti od rostlinného pokryvu, odrazu stejných spekter z půdy a atmosférické odrazivosti, a může podléhat pozorovacím chybám. Variabilita NDVI může být dána druhem rostlin, půdním pozadím, plochou listu, rozstupem a směrem řádků u zemědělských rostlin, stínem a dostupností slunečního záření, sklonem, topografií a dalšími faktory (Weng a kol., 2004). Vztah mezi NDVI a dalšími měřeními hustoty vegetace (např. index listové plochy o hodnotě větší než 3) je znám jako nelineární. Tato nelineárnost a závislost NDVI na platformě naznačuje, že NDVI nemusí být dobrým indikátorem kvantitativních analýz vegetace. Také je potřeba zkoumat vztah mezi variabilitou NDVI a velikostí pixelů. I přesto je využití NDVI jako poměrové metody velmi užitečné, především díky inverznímu vztahu mezi září vegetace v červené a infračervené oblasti a jednoduchosti jejího výpočtu. Ovšem protože měření NDVI závisí na spektrální šířce viditelného a blízkého infračerveného pásma u konkrétního senzoru, je těžké extrapolovat výsledky z jedné studie na jinou (Weng a kol., 2004).

$$NDVI = \frac{(p(\text{pásma } 5) - p(\text{pásma } 4))}{(p(\text{pásma } 5) + p(\text{pásma } 4))} \quad (1)$$

kde proměnná  $p$  představuje záření v odrazových jednotkách, pásmo 4 reprezentuje červené spektrální pásmo Landsatu 8 a pásmo 5 krátkovlnné infračervené pásmo (viz tabulka 3).

### 3.4.2 Normalized Difference Water Index (NDWI)

Nazýván také *leaf area water-absent index* (index listů bez přítomnosti vody), udává obsah a stav vody ve vegetaci. Přestože má NDVI omezenou schopnost odhadnout obsah vody ve vegetaci, je ideální využít NDVI a NDWI pro určení stavu vegetace (Tran a kol., 2006).

$$NDWI = \frac{(p(\text{pásma } 5) - p(\text{pásma } 6))}{(p(\text{pásma } 5) + p(\text{pásma } 6))} \quad (2)$$

kde proměnná  $p$  představuje záření v odrazových jednotkách, pásma 4, 5 a 6 reprezentují spektrální pásma Landsat snímků (viz tabulka 3).

### 3.4.3 Normalized Difference Built-up Index (NDBI)

Index, jenž je citlivý na zastavěné plochy. Při detekci tepelných ostrovů a jejich efektu na zemský pokryv je v literatuře mnohokrát zmiňovaný a při studiích velmi často používaný (Chen a kol., 2004).

$$NDBI = \frac{(d(\text{pásma } 6) - d(\text{pásma } 5))}{(d(\text{pásma } 6) + d(\text{pásma } 6))} \quad (3)$$

### 3.4.4 Normalized Difference Bareness Index (NDBaI)

K zobrazení holé půdy z Landsat snímků byl navržen nový index, normalizovaný rozdílový index holosti (NDBaI), který vypadá následovně:

$$NDBaI = \frac{(d(\text{pásma } 6) - d(\text{pásma } 7))}{(d(\text{pásma } 6) + d(\text{pásma } 7))} \quad (4)$$

kde proměnná  $d$  reprezentuje digitální čísla příslušných pásem Landsat TM nebo ETM +. NDBaI byl navržen analýzou spektrálních vlastností různých typů využití / pokryvů půdy (Chen a kol., 2006).

Tab. 4 - Rozsahy indexových hodnot pro různé typy / pokrytí půdy (Chen et al., 2006)

	NDVI	NDWI	NDBI	NDBaI
Zastavěná plocha	< 0.2	< 0	0.10–0.30	< 0.2
Holá půda	< 0.2	< 0	> 0.25	> 0
Vegetace	> 0.2	> 0.05	< 0	<0.25
Voda	< 0	> 0	< 0	<0.65
Poloholá půda	> 0.2	< 0	> 0.25	- 0.1–0

Tyto indexy by mohly být využity ke klasifikaci různých typů využití / pokryvu půdy (vegetace, voda, zástavba atd.) při použití správných prahových hodnot.

Rozsahy indexových hodnot pro tyto typy zemského pokryvu nejsou konstantní, což může způsobovat drobné odchylky výsledků v různých regionech nebo při různých atmosférických podmínkách a srážkách.

### 3.5 Měření teploty zemského povrchu ze satelitních snímků

Teplota povrchu země (LST) je klíčovou proměnnou v klimatologických a environmentálních studiích, které souvisejí s energetickou bilancí zemského povrchu a integrovaným tepelným stavem mezní vrstvy atmosféry. Povrchové teplotě odpovídá tzv. radiační teplota (jasová). Pro reálný zemský povrch platí dle Stefan-Boltzmannova zákona:

$$G = \varepsilon\sigma T_g^4 \quad (5)$$

kde  $G$  reprezentuje množství radiace vyzářené za jednotku času jednotkou plochy povrchu černého tělesa o teplotě  $T_g$  ve stupních Kelvina;  $\sigma$  reprezentuje Stefan-Boltzmannovu konstantu ( $5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ );  $\varepsilon$  reprezentuje vyzařovací schopnost daného povrchu (emisivita) (bezrozměrná veličina). Každé těleso mající teplotu vyšší než absolutní nula ( $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) emituje záření, jehož intenzita a spektrální složení jsou funkcí typů materiálu a jeho teploty (Bednář, 1985).

Senzory TIRS měří záření horní části atmosféry (TOA), ze kterého můžeme pomocí Planckova zákona odvodit teplotu vyzařování (také známou jako vyzařování absolutně černého tělesa) (Storey a kol., 2014). Záření TOA je složeno ze tří energetických frakcí: (1) zpětného vyzařování zemského povrchu, (2) zvýšenou zářivostí atmosféry a (3) propadem záření z atmosféry. Rozdíl mezi TOA a teplotou zemského povrchu se pohybuje v rozmezí 1 až 5 K ve spektrální oblasti 10–12  $\mu\text{m}$  v závislosti na vlivu atmosférických podmínek (Prata a kol., 1995). Z tohoto důvodu je nutná korekce vlivů atmosféry zahrnující absorpci, zpětný odraz od zemského povrchu a stoupající emise, před získáním teploty zemského povrchu.

Pro získání povrchové teploty z termálních pásem satelitních snímků, u Landsat 8 to je pásmo 10 a 11, se musí provést měření hodnot emisivity zemského povrchu. Napříč literaturou se nejčastěji setkáváme s využitím metody NDVI pro odvození hodnot emisivity zemského povrchu (Chen, Xiao-Ling a kol., 2006). Jako základní východisko pro výpočet teploty zemského povrchu byl v této studii použit vzorec (6)

$$LST = \frac{TB}{1 + (\lambda \times TB / c_2) \ln \varepsilon} \quad (6)$$

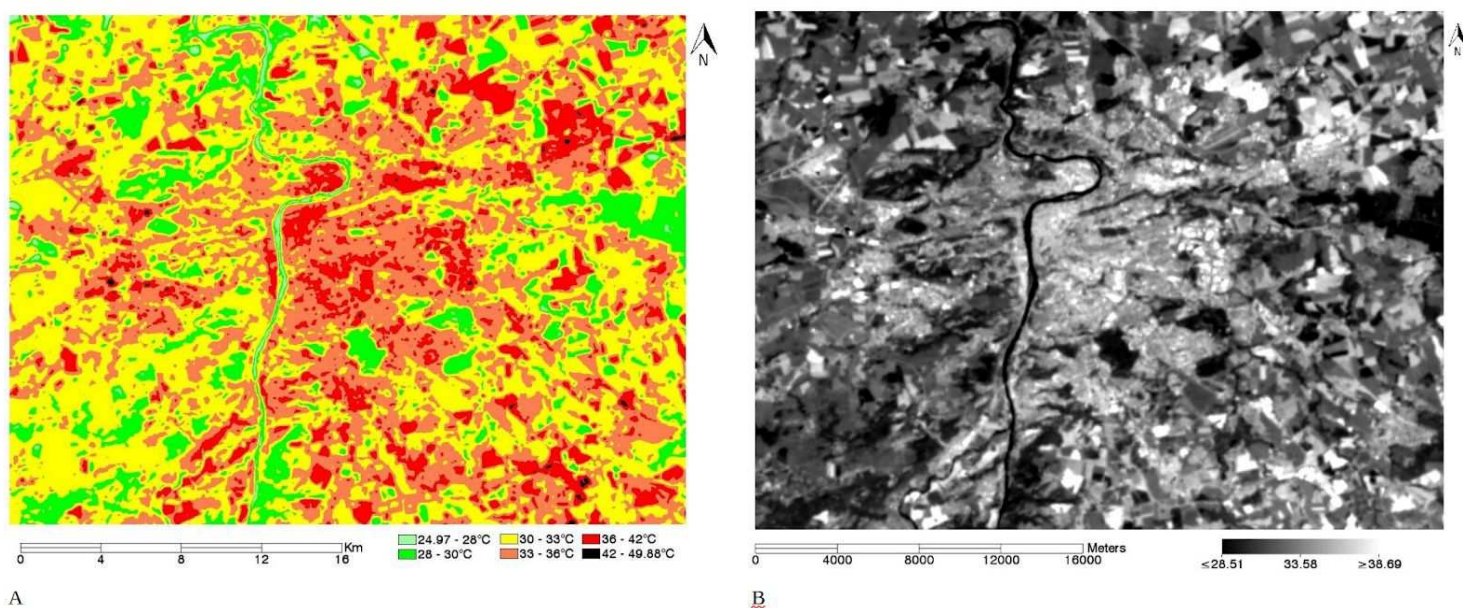
kde  $TB$  reprezentuje teplotu záření z pohledu satelitu v Kelvinech;  $\lambda$  je vlnová délka emitovaného záření ( $\lambda = 10,8 \mu\text{m}$  pro pásmo 10 satelitu Landsat 8);  $c_2 = h \times c / \sigma$  ( $1,438 \times 10^{-2} \text{ mK}$ ),  $\sigma$  = Boltzmanova konstanta ( $1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ),  $h$  = Planckova konstanta ( $6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ) a  $c$  = rychlost světla ( $2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$ );  $\varepsilon$  je povrchová emisivita odhadnuta za pomoci NDVI metody. Výsledná povrchová teplota (LST) je konvertována z Kelvinů (K) do stupňů Celsia ( $^{\circ}\text{C}$ ) (Weng a kol., 2004).

## 3.6 Výsledky

### 3.6.1 Teploty zemského povrchu

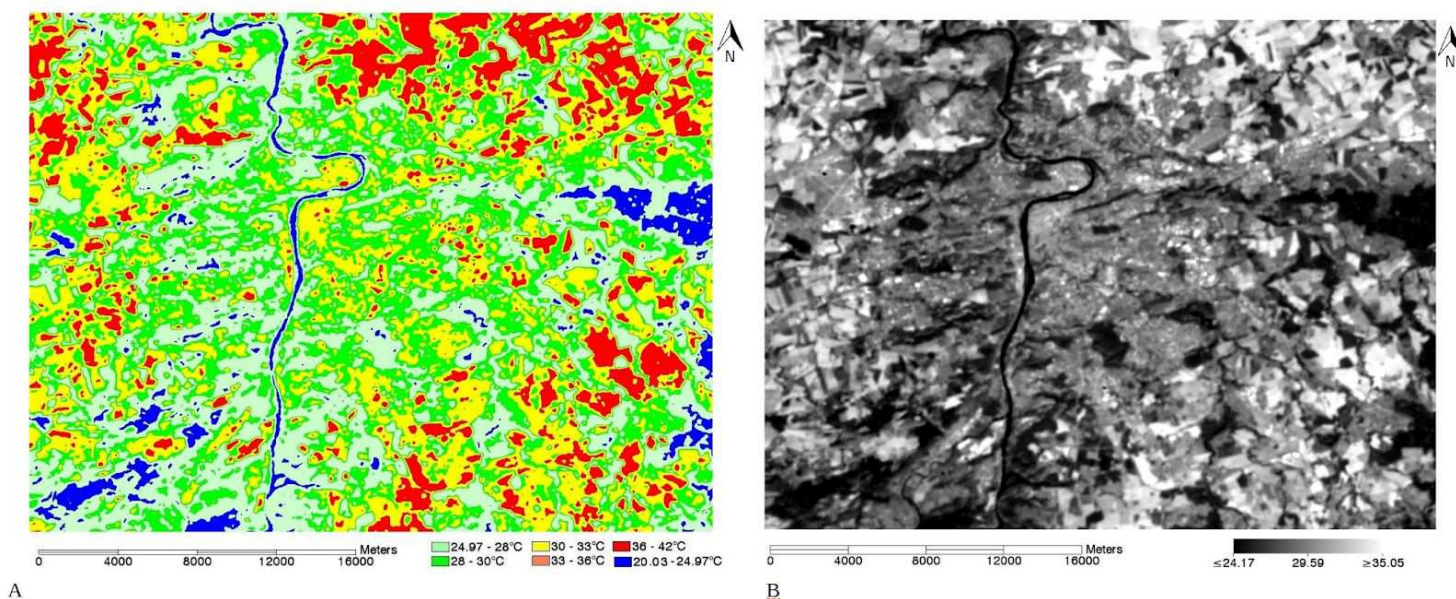
Teploty zemského povrchu na území Prahy a jejím okolí se v roce 2013 pohybovaly od  $23,96 \text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $49,88 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Průměrná hodnota činí  $32,94 \text{ }^{\circ}\text{C}$  se směrodatnou odchylkou  $2,51$ . V roce 2013 byla průměrná teplota vzduchu na území Prahy a Středočeského kraje  $18,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  s odchylkou od normálu (dlouhodobý normál teploty vzduchu 1981–2010)  $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nejvyšší hodnota byla zaznamenána pro skladiště v Jirnách,  $49 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , což je způsobeno lesklým kovovým povrchem

střech, který absorbuje sluneční záření ve zvýšené míře. Vysokých hodnot dosahují industriální oblasti v Holešovicích (42 °C), Letiště Václava Havla (41,42 °C) a nádraží Smíchov (38 °). Pole s řídkou vegetací mají vyšší teploty, v průměru okolo 40 °C, to je dáno barvou zemského povrchu. Pole, na nichž se již vyskytuje vegetace hojněji, mají teploty okolo 30 °C. Stejně tak další oblasti s vegetací vykazují nižší teploty, trávy a pastviny okolo 31 °C a nejnižších hodnot dosahují lesy, v průměru 28°C. Potvrzuje se homogenita teploty zemského povrchu u zastavěné oblasti, kdy obytná oblast dosahuje v průměru 35 °C.



Obr. 5 - Geografická distribuce teplot zemského povrchu v roce 2013, (A) barevná klasifikace, (B) teploty zemského povrchu na území Prahy.

V roce 2017 teploty zemského povrchu dosahovaly hodnot od 20,03 °C po 41,61 °C. Průměrná teplota na tomto území je 29,21 °C se směrodatnou odchylkou 2,82. V roce 2017 byla průměrná teplota vzduchu na území Prahy a Středočeského kraje 19,2 °C s odchylkou od normálu 1,2 °C. Průměrná LST v roce 2017 byla o 3,73 °C nižší oproti roku 2013. Teplota vzduchu nekoreluje přímo s teplotou zemského povrchu. Rozdíl může být dán výběrem snímku, kdy z roku 2013 je ze začátku srpna a z roku 2017 z konce srpna, či vlhkostí půdy a prouděním vzduchu. Faktorů ovlivňujících LST je mnoho. Hodnoty LST z roku 2017 vykazují stejný vzorec jako hodnoty z roku 2013. Nejvyšších teplot dosahuje skladiště v Jirnách (41 °C), skladiště obecně (39 °C), letiště Václava Havla (36 °C), industriální oblast v Holešovicích (36 °C) a pole s řídkou vegetací (35 °C). Lesy dosahují velmi nízkých hodnot, v průměru 24 °C. Opět se potvrzuje homogenita LST u obytných oblastí.



Obr. 6 - Geografická distribuce teplot zemského povrchu v roce 2017, (A) barevná klasifikace, (B) teploty zemského povrchu na území Prahy.

Hodnoty z roku 2013 i 2017 dokazují přítomnost městského tepelného ostrova, ovšem v roce 2017 byl zaznamenán MTO výrazně slabší až téměř nulový.

### 3.6.2 Vztah mezi teplotou zemského povrchu, NDVI a NDWI

Obr. 7 zobrazuje hodnoty NDVI, NDWI a teploty zemského povrchu v srpnu 2013. Hodnoty naznačují, že NDVI silně koreluje s teplotou zemského povrchu. Nejvyšší hodnoty NDVI byly zaznamenány v lesích u Jíloviště v okrese Praha-západ, mezi tokem Vltavy a Labe. Hodnota NDVI zde dosahuje až 0.9, stejně tak hodnoty NDWI jsou vysoké (0.4). Teplota zemského povrchu je 29,7 °C, což patří mezi nižší hodnoty. Hodnoty ukazují dobrý zdravotní stav vegetace v této oblasti. Lesy obecně vykazují vyšší hodnoty NDVI a NDWI. Obora Hvězda s LST 29 °C měla NDVI 0.83 a NDWI 0.38. Zalesněné oblasti v centru Prahy, jako jsou Riegrovy sady, Olšanské hřbitovy, Vítkov nebo park na Letné, dosahují teplot mírně vyšších, okolo 31 °C, ovšem hodnoty NDVI jsou stále vysoké, okolo 0.8. Mírný pokles byl zaznamenán pro hodnoty NDWI, které se pohybují pod 0.4. Lesy v průměru dosahují hodnot NDVI 0.8, NDWI 0.37 a teplot 29 °C.

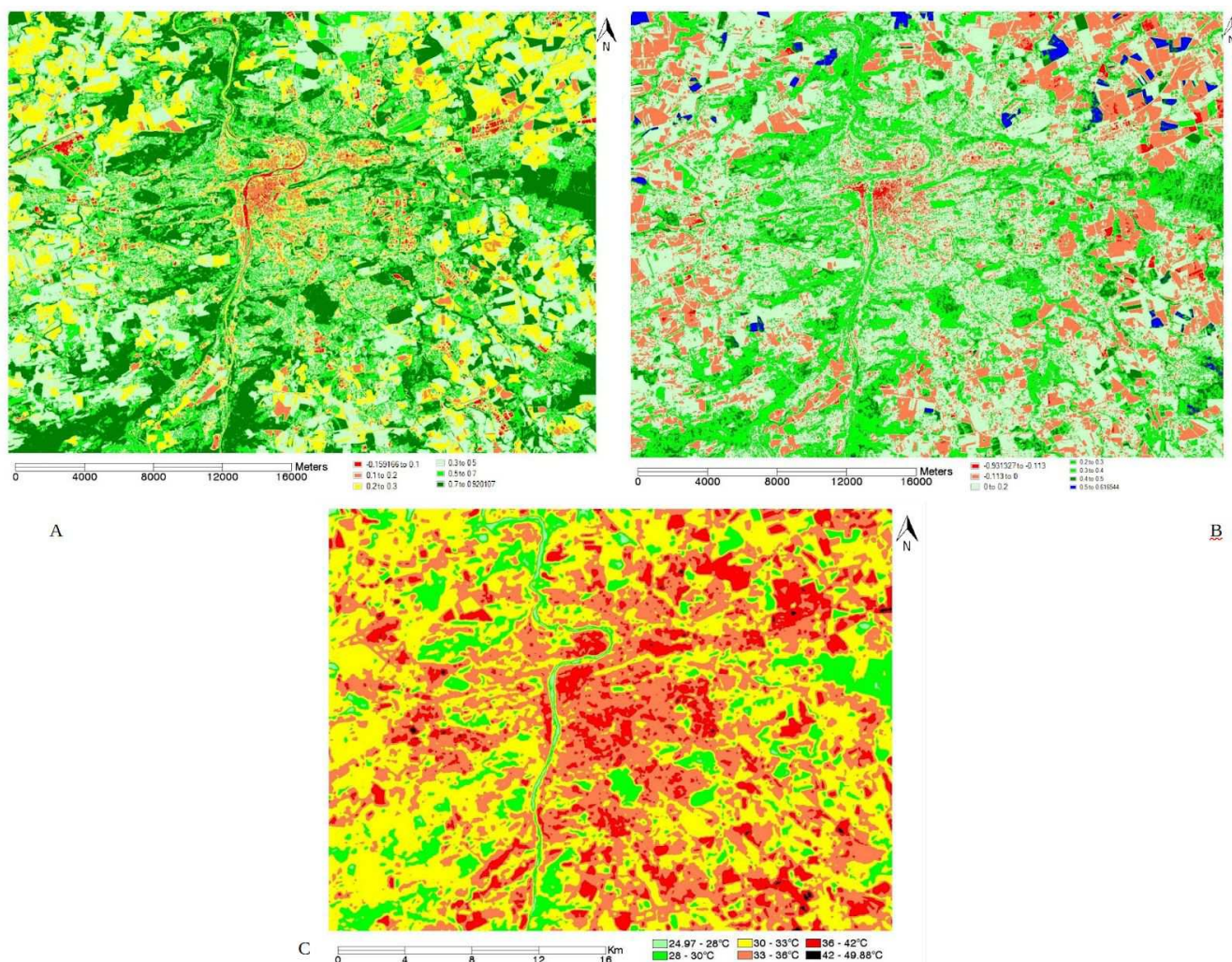
Teplota polí dosahovala různých hodnot v závislosti na vegetačním pokryvu, stejně tak hodnoty NDVI a NDWI. Při vegetačním pokryvu polí byla naměřena hodnota 31 °C s NDVI 0.3 a NDWI



0.1. S nárůstem teplot klesala hodnota NDVI a NDWI. Pro teploty 38 °C byla hodnota NDVI pouze 0.18 a NDWI 0.01.

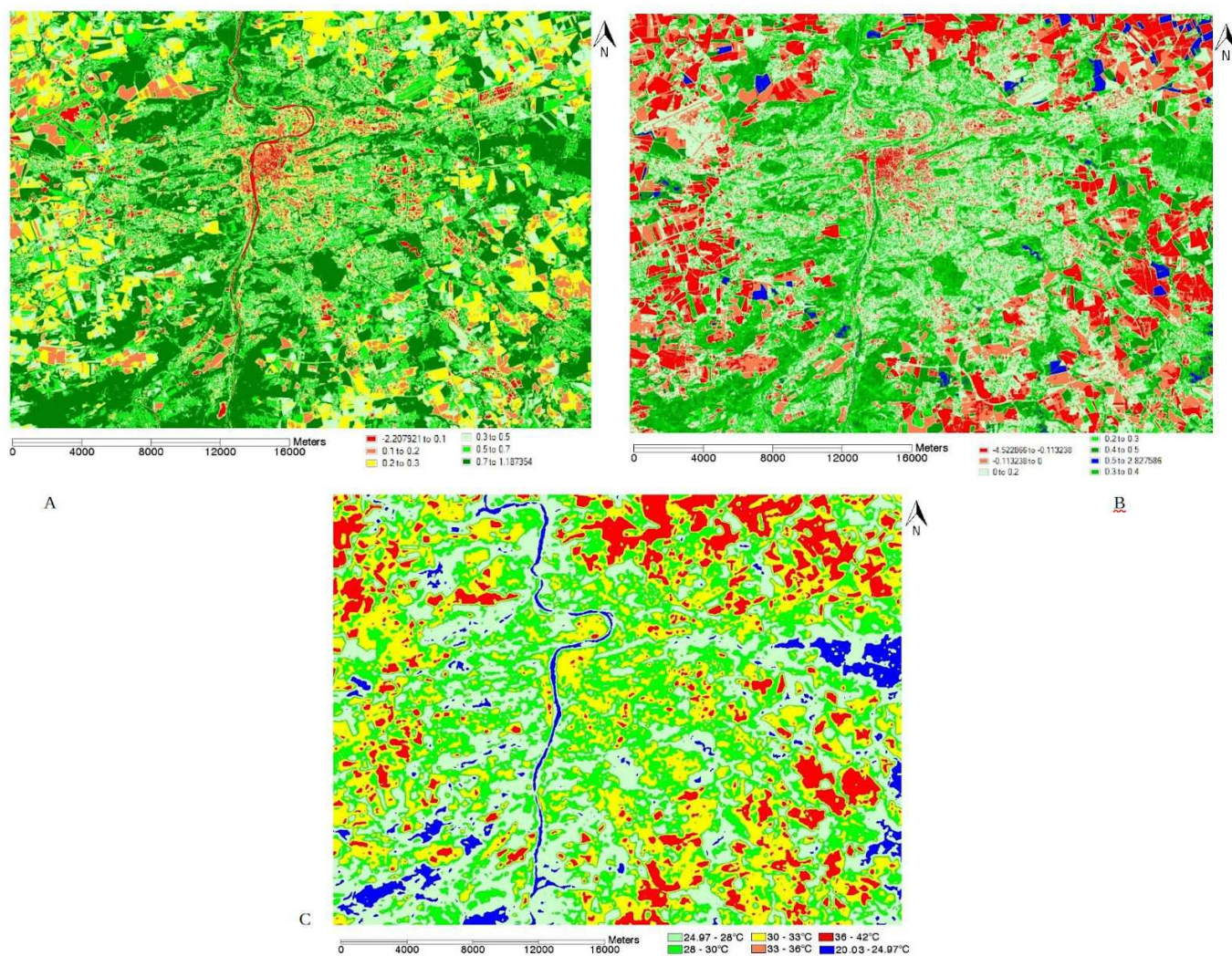
Tab. 5 - Tabulka hodnot LST, NDVI a NDWI se směrodatnou odchylkou pro daný typ zemského pokryvu za rok 2013.

	LST [°C] (STD)	NDVI (STD)	NDWI (STD)
Zastavěná plocha	34.67 (2.01)	0.41 (0.16)	0.09 (0.10)
Les	29.80 (1.02)	0.80 (0.03)	0.38 (0.04)
Zemědělská plocha	33.06 (2.14)	0.31 (0.05)	0.00 (0.05)
Louky a trávy	31.38 (1.42)	0.68 (0.10)	0.27 (0.12)
Vodní plochy	28.40 (1.27)	0.27 (0.17)	0.26 (0.07)



Obr. 7 - Mapa hodnot (A) NDVI, (B) NDWI a (C) LST v roce 2013.

Rok 2017 vykazuje stejné znaky jako 2013, ale s nižšími hodnotami LST. Nejnižší teploty LST byly zaznamenány pro oblasti s nejvyššími hodnotami NDVI. Průměrná LST pro hodnoty NDVI 0.8 je 24,5 °C. V oboře Hvězda byla naměřena LST 24,5 °C, NDVI 0.89 a NDWI 0.45. Olšanské hřbitovy, Riegrovy sady a Letenský park vykazují mírně vyšší teploty, v průměru 27 °C, s vysokými hodnotami NDVI od 0.7 až po 0.86, ovšem hodnoty NDWI jsou zde nižší, v průměru 0.3. Vysoké hodnoty NDWI nad 0.4) byly zaznamenány především mimo Prahu. V centru Prahy dosahuje vysokých hodnot NDVI (0.87) Petřín s LST 25,3 °C, ovšem i zde jsou hodnoty NDWI nižší (0.3). Pole mají vyšší teplotu, v průměru 34 °C, hodnoty NDVI 0.1–0.2 a NDWI v průměru 0.003.



Obr. 8 - Mapa hodnot (A) NDVI, (B) NDWI a (C) LST v roce 2013.

## 4 Diskuze

Nesčetné množství různých typů zemského povrchu a prostorová složitost, které při utváření měst vznikají, vytvářejí nekonečné spektrum energetické bilance a mikroklimatických systémů, což vede k nemožnosti generalizace výzkumu MTO. Souvislost mezi MTO a ekologickým kontextem je zřejmý, ale nelze přesně určit do jaké míry, jelikož městská oblast vykazuje ekologickou rozmanitost a je vždy velice složitá. Výsledky mnoha studií ukázaly, že ačkoliv byly snímky k analýze MTO vhodné, je velice těžké vybrat snímky se stejnými atmosférickými podmínkami, vegetačním a vodním pokryvem. Jestliže je analýza stavěna na regionální úrovni, je nezbytné pro získání teploty naprostá uniformnost atmosférických podmínek, ovšem výběr takových snímků je velmi obtížný. Pro dosažení lepších výsledků je nutností zlepšit způsob získávání teploty, aby se snížil vliv tenkých mraků a nehomogenních atmosférických podmínek.

I přes vhodnost dat Landsat 8 ke studím MTO, data vykazují značné nedostatky. Například pro měření teploty zemského povrchu data poskytují rozlišení 100 m, které není úplně ideální vzhledem k přesnosti měření. Jeden pixel je tak širší, než-li celá řeka a data jsou zkreslená hodnotami okolního povrchu. Při měření určitých oblastí tak vznikají smíšené pixely. Pro přesnější výsledky studie a kvalitativní výzkum je vhodné zkombinovat více dat a metod. Lze využít data MODIS, družice Aqua, které poskytují informace o vlhkosti půdy. Stejně tak data IKONOS poskytující informace o propustnosti zemského povrchu či data družice Sentinel-2 A, která jsou optická a multispektrální s vyšším prostorovým rozlišením od 10 do 60 metrů a jsou kompatibilní s daty Landsat. Vždy je přínosné podpořit studii terénním výzkumem. Pro studium MTO napříč časem nejsou snímky z roku 2013 a 2017 v dostatečném časovém rozpětí. Ideální by bylo využít data starších řad Landsat, které sahají až do roku 1972, a vytvořit časové řady. Abychom eliminovali vliv turbulence, vlhkosti půdy a dalších faktorů v čase pořízení snímků na výzkum MTO, měli bychom využít více snímků slunečních dní a jejich hodnoty zprůměrovat.

Kdybychom chtěli zkoumat vliv teploty zemského povrchu na vegetační indexy kvalitativněji, bylo by vyhovující nalézt fyzickou změnu, například vysázení stromů ve městě, a porovnat hodnoty pro dvě časová období. Pro přesnější studie vztahu MTO a zdravotního stavu vegetace bychom se mohli zaměřit na konkrétní park uvnitř města, spočítat průměr LST, NDVI a NDWI

pro všechny pixely parku a to samé pro park mimo město a vzájemně tyto hodnoty porovnat. Pro kvantitativní analýzu by byla vhodná aplikace na další evropská města ve stejném biomu.

## 5 Závěr

V případové studii byla použita data Landsat 8 ze srpna 2013 a 2017, z nichž byly získány teploty zemského povrchu a vypočítány indexy NDVI a NDWI. Byl zkoumán vztah mezi LST, NDVI a NDWI a různými typy zemského pokryvu. Data byla zpracována v softwarech GIS. Výsledky ukazují přítomnost městského tepelného ostrova, ovšem v roce 2017 byl MTO mnohem slabší. Obytná oblast vykazuje homogenitu LST v porovnání s industriálními a komerčními oblastmi, které jsou často zasazeny mezi vegetované oblasti a vytvářejí tak velký teplotní gradient, který je velkou měrou dán i využitím jejich stavebních materiálů. To se projevuje především na skladištích v Jirnách, kde byly naměřeny hodnoty až 49 °C. Dále výsledky ukazují korelaci NDVI s LST. Čím nižší teplota zemského povrchu, tím vyšší hodnoty NDVI. V roce 2017, kdy byly hodnoty LST nižší, byly naměřeny vyšší hodnoty NDVI a NDWI v porovnání s rokem 2013. Zároveň studie ukazuje, že hodnoty NDWI jsou nižší ve městech, kde je vyšší teplota, v nezávislosti na hodnotě NDVI. To značí horší zdravotní stav vegetace uvnitř města. Obecně nejnižších teplot a nejvyšších hodnot NDVI a NDWI dosahují lesy, dále to jsou trávy a louky. Hodnoty pro zemědělské oblasti jsou závislé na druhu pěstované rostliny, odstupu mezi řádky a hustotě vegetace.

Výsledky studie se shodují s ostatními studiemi a potvrzují závislost MTO na okolním biomu. Kontrast mezi městskými jádry a venkovskými oblastmi je poháněn okolním využitím zemského pokryvu a je často ještě výraznější v době, kdy je vegetace fyziologicky aktivní, zejména u lesních pozemků. V biomech s kratší dobou vegetace a nižší biomasou je kontrast menší. Vlhkost je dalším důležitým faktorem ovlivňujícím intenzitu MTO. Městské tepelné ostrovy by byly slabší, když by studovaná oblast byla aridní. Zároveň jsou dány propustností zemského povrchu, nepropustné oblasti jsou prediktorem LST obecně pro všechny oblasti, s výjimkou pouštních oblastí.

Využití dat Landsat se potvrdilo jako vhodné pro zkoumání vztahu mezi LST, NDVI a NDWI a detekce městského tepelného ostrova, chceme-li studovat rozsáhlé oblasti. Výhodou využití satelitních snímků je studium rozsáhlých oblastí a studie prováděné v globálním měřítku.

Zapojí-li se do studií pokročilé počítačové metody, jako jsou například neuronové sítě, můžeme výzkum provádět kvantitativně a využít velké množství dat.

## Bibliografie

### Knižní zdroje a články

AKBARI, H. a kol (2008): Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies (Urban Heat Island Basics). U. S. Environmental Protection Agency, 22s., strana 4, 13-16.

Arrington, Kathleen, et al. "Implementing a Thermal Urban Runoff Model (TURM)." *Journal of Water Management Modeling*, 2004, doi:10.14796/jwmm.r220-20.

BEDNÁŘ Jan. Meteorologický slovník & výkladový terminologický: s cizojazyčnými názvy Hesel Ve slovenštině, angličtině, němčině, francouzštině a ruštině. Ministerstvo životního prostředí ČR, 1993

BEDNÁŘ Jan. Vybrané Kapitoly z Meteorologie: určeno pro Posl. přírodověd. Fakulty Univ. Karlovy. Univerzita Karlova, 1985, 107s, strana 83-85.

CAMPBELL, James B., and Randolph H. Wynne. *Introduction to Remote Sensing*. Fifth edition. Guildford Press, 2011, ISBN 978-1-60918-176-5

ČERVENÝ, Jaroslav. Podnebí a vodní režim ČSSR. Praha: SZN, 1984. Lesnictví, myslivost a vodní hosp.

Deosthali, Vrishali. "Impact of Rapid Urban Growth on Heat and Moisture Islands in Pune City, India." *Atmospheric Environment*, vol. 34, no. 17, 2000, pp. 2745–2754., doi:10.1016/s1352-2310(99)00370-2.

Chen, Xiao-Ling, et al. "Remote Sensing Image-Based Analysis of the Relationship between Urban Heat Island and Land Use/Cover Changes." *Remote Sensing of Environment*, vol. 104, no. 2, 2006, s. 133–146., doi:10.1016/j.rse.2005.11.016.

Irons, James R., and John L. Dwyer. "An overview of the Landsat Data Continuity Mission." In *SPIE Defense, Security, and Sensing*, s. 769508-769508. International Society for Optics and Photonics, 2010.

K. P. Gallo, A. L. McNab, T. R. Karl, J. F. Brown, J. J. Hood & J. D. Tarple, The use of a vegetation index for assessment of the urban heat island effect, *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 14:11, 2223-2230, doi: 10.1080/01431169308954031

Lin, Shu-Kun. "Introduction to Remote Sensing. Fifth Edition. By James B. Campbell and Randolph H. Wynne, The Guilford Press, 2011; 662 Pages, ISBN 978-1-60918-176-5." *Remote Sensing*, vol. 5, no. 12, 2013, pp. 282–283., doi:10.3390/rs5010282.

Lin, Shu-Kun. "Introduction to Remote Sensing. Fifth Edition. By James B. Campbell and Randolph H. Wynne, The Guilford Press, 2011; 662 Pages. Price: £80.75, ISBN 978-1-60918-176-5." *Remote Sensing*, vol. 5, no. 12, 2013, pp. 282–283., doi:10.3390/rs5010282.

Nakata-Osaki, Camila Mayumi, et al. "THIS – Tool for Heat Island Simulation: A GIS Extension Model to Calculate Urban Heat Island Intensity Based on Urban Geometry." *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 67, 2018, pp. 157–168., doi:10.1016/j.compenvurbsys.2017.09.007.

Nastran, Mojca, et al. "Urban Heat Islands in Relation to Green Land Use in European Cities." *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, doi:10.1016/j.ufug.2018.01.008.

Peng, Shushi, et al. "Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities." *Environmental Science & Technology*, vol. 46, no. 2, 2011, pp. 696–703., doi:10.1021/es2030438.

Prata, A. J., et al. "Thermal Remote Sensing of Land Surface Temperature from Satellites: Current Status and Future Prospects." *Remote Sensing Reviews*, vol. 12, no. 3-4, 1995, pp. 175–224., doi:10.1080/02757259509532285.

Roth, M., Oke, T. R., & Emery, W. J. (1989, 10). Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*, 10(11), 1699-1720. doi:10.1080/01431168908904002

S. Nieuwolt, The urban microclimate of Singapore, *The Journal of Tropical Geography*, 22 (1966), pp. 30-37

Storey, James, Michael Choate, and Donald Moe. "Landsat 8 thermal infrared sensor geometric characterization and calibration." *Remote Sensing* 6, no. 11 (2014): 11153-11181.

Storey, James, Michael Choate, and Kenton Lee. "Landsat 8 Operational Land Imager On-Orbit Geometric Calibration and Performance." *Remote Sensing* 6, no. 11 (2014): 11127-11152.

T.R. Oke, *Boundary layer climates*, 2nd edition, Methuen, London, 1973, 435 pp

T.R. Oke, The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1982, pp. 1-24

T.W. Owen, T.N. Carlson, R.R. Gillies, An assessment of satellite remotely-sensed land cover parameters in quantitatively describing the climatic effect of urbanization *International Journal of Remote Sensing*, 19, 1998, pp. 1663-1681

Tran, Hung, et al. "Assessment with Satellite Data of the Urban Heat Island Effects in Asian Mega Cities." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 8, no. 1, 2006, pp. 34–48., doi:10.1016/j.jag.2005.05.003.

Weng, Qihao, et al. "Estimation of Land Surface Temperature–Vegetation Abundance Relationship for Urban Heat Island Studies." *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, no. 4,

2004, pp. 467–483., doi:10.1016/j.rse.2003.11.005.

Zhang, Ping, et al. "Urban Heat Island Effect across Biomes in the Continental USA." 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010, doi:10.1109/igarss.2010.5653907.

Zhao, Lei, et al. "Strong Contributions of Local Background Climate to Urban Heat Islands." Nature, vol. 511, no. 7508, 2014, pp. 216–219., doi:10.1038/nature13462.

## Internetové zdroje

Mrazek, Lubor. "Základní Informace o Praze." Visitpraha.cz, 2017 [cit. 13.5.2018], [www.visitpraha.cz/cz/zakladni-informace-o-praze/19/](http://www.visitpraha.cz/cz/zakladni-informace-o-praze/19/).

"Landsat 8 Orbit". Heavens Above. [cit. 24.3.2018], <http://www.heavens-above.com/orbit.aspx?satid=39084&lat=-34.884&lng=-56.182&loc=Unspecified&alt=0&tz=UCT>

Oficiální Stránky Českého Statistického Úřadu. Český Statistický Úřad, ČSÚ, Nejnovější údaje: hl. m. Praha, 21.3.2018 [cit. 2.4.2018], <https://www.czso.cz/csu/xa/1-xa>

Portál ČHMÚ : Historická Data : Počasí : Územní Teploty, 2018 [cit. 4.4.2018], [www.portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty](http://www.portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty).

Souhrnné přehledy o půdním fondu z údajů katastru nemovitostí České republiky, 2018 [cit. 7.4.2018], [https://www.cuzk.cz/Periodika-a-publikace/Statisticke-udaje/Souhrne-prehledy-pudniho-fondu/Rocna-ocenka-pudniho-fondu\\_2018.aspx](https://www.cuzk.cz/Periodika-a-publikace/Statisticke-udaje/Souhrne-prehledy-pudniho-fondu/Rocna-ocenka-pudniho-fondu_2018.aspx)

Souhrnné údaje o výrobě elektřiny za leden až prosinec 2014. Ministerstvo průmyslu a obchodu, 6.2.2015 [cit. 2018-05-03], [www.mpo.cz/dokument155749.html](http://www.mpo.cz/dokument155749.html)

U.S. Geological Survey (July 2012). "Landsat Data Continuity Mission" (PDF). Rolla Publishing Service Center. [cit. 11.3.2018], <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3066/fs2012-3066.pdf>

U.S. Geological Survey. "Landsat 8 (L8), Data Users Handbook, LSDS-1574, version 2.0, March 29, 2016" (PDF), p. 106. [cit. 24.3.2018], <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>

# Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1 - Řez typickým městským tepelným ostrovem .....	8
Obrázek 2 - Denní chod intenzity městského tepelného ostrova atmosféry a povrchu za anticyklonálního počasí ve dne a v noci .....	11
Obrázek 3 - Satelitní snímek hlavního města Praha a jeho okolí s fialově zvýrazněnou zastavěnou plochou pomocí RGB syntézy .....	22
Obrázek 4 - Klasifikace zemského pokryvu města Prahy a jeho okolí do šesti základních kategorií pomocí metody ROIS v programu ENVI .....	22
Obrázek 5 - Geografická distribuce teplot zemského povrchu v roce 2013, (A) barevná klasifikace, (B) teploty zemského povrchu na území Prahy .....	30
Obrázek 6 - Geografická distribuce teplot zemského povrchu v roce 2017, (A) barevná klasifikace, (B) teploty zemského povrchu na území Prahy .....	31
Obrázek 7 - Mapa hodnot (A) NDVI, (B) NDWI a (C) LST v roce 2013 .....	32
Obrázek 8 - Mapa hodnot (A) NDVI, (B) NDWI a (C) LST v roce 2013 .....	33
Tabulka 1 - Shrnutí základních charakteristik povrchového městského tepelného ostrova a atmosférického tepelného ostrova .....	11
Tabulka 2 - Průměrné změny vybraných klimatických charakteristik urbanizovaných oblastí o velikosti Prahy v porovnání s rurálním okolím v letním období .....	12-13
Tabulka 3 - Charakteristika spektrálních pásem dat Landsat 8 .....	25
Tabulka 4 - Rozsahy indexových hodnot pro různé typy / pokrytí půdy .....	28
Tabulka 5 - Tabulka hodnot LST, NDVI a NDWI se směrodatnou odchylkou pro daný typ zemského pokryvu za rok 2013 .....	32