

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

BAKLÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Jakub Suchomel

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ
A ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**

**VÝVOJ INTENZITY MĚSTSKÉHO TEPELNÉHO
OSTROVA V PRAZE**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vedoucí práce: Mgr. Aleš Urban, Ph.D.
Bakalant: Jakub Suchomel**

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jakub Suchomel

Krajinářství

Územní technická a správní služba

Název práce

Vývoj intenzity městského tepelného ostrova v Praze

Název anglicky

The development of the urban heat island intensity in Prague

Cíle práce

Charakteristiky městského tepelného ostrova se mění v závislosti na sezóně a synoptické situaci. Cílem práce je seznámit se s problematikou městské klimatologie a zpracovat základní přehled procesů a faktorů, které ovlivňují intenzitu městského tepelného ostrova během roku.

Metodika

V praktické části bude úkolem analyzovat sezónnost a dlouhodobé trendy intenzity tepelného ostrova (MTO) v Praze. Na základě analýzy dostupných dat ČHMÚ budou vytipovány stanice a období vhodné pro analýzu. Intenzita MTO bude určena jako rozdíl mezi teplotními řadami na vybraných městských a venkovských stanicích. Budou analyzovány trendy vývoje v jednotlivých ročních obdobích a případné změny v sezónním chodu MTO.

Doporučený rozsah práce

30-50 stran

Klíčová slova

klima města, tepelný ostrov města, intenzita tepelného ostrova, analýza časových řad

Doporučené zdroje informací

Mills, G., 2007. Cities as agents of global change 1857, 1849–1857. doi:10.1002/joc
Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J.A. 2017: Urban Climates. Cambridge University Press, USA. ISBN 978-1-107-42953-6

Skalák, P., Žák, M., Zahradníček, P., Helman, K. 2015: Příspěvek projektu UHI k poznání klimatu Prahy.

Meteorologické zprávy 68. 18–23.

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FŽP

Vedoucí práce

Mgr. Aleš Urban, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 3. 12. 2020

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 1. 2021

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Vývoj intenzity městského tepelného ostrova v Praze vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 30. března 2021

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Mgr. Aleši Urbanovi, Ph.D. za odborné a vyčerpávající vedení, cenné rady a připomínky. Dále děkuji své rodině za podporu během zpracovávání bakalářské práce i během celého studia.

Vývoj intenzity městského tepelného ostrova v Praze

Abstrakt

Městský tepelný ostrov představuje klimatický jev charakteristický nepřirozeným zahříváním zemského povrchu a atmosféry ve městech ve srovnání s venkovskou krajinou. Rešeršní část práce měla za cíl uvést do problematiky městského tepelného ostrova a shrnout současné poznatky o vztahu městského tepelného ostrova a okolního prostředí. Cílem praktické části práce bylo analyzovat sezónnost a dlouhodobé trendy intenzity tepelného ostrova v Praze na základě denních dat ze stanice ČHMÚ Praha – Klementinum, Praha – Ruzyně, Brandýs nad Labem – Stará Boleslav v období 1971–2019. Analýza ukázala, že rostoucí trend intenzity městského tepelného ostrova Prahy se v polovině 90. let 20. století zastavil, a v poslední dekádě intenzita dokonce mírně klesá. Důvodem je rychlý nárůst teploty na venkovských stanicích od poloviny 90. let, jež je srovnatelný nebo dokonce rychlejší než na stanici Klementinum. To může být důsledkem zvýšené urbanizace původně nezastavěných území nejbližšího okolí Prahy a většího vlivu městského tepelného ostrova na tyto oblasti.

Klíčová slova: klima města, tepelný ostrov města, intenzita tepelného ostrova, analýza časových řad

Development of the intensity of the urban heat island in Prague

Abstract

An urban heat island is a climatic phenomenon characterized by the unnatural heating of the land surface and atmosphere in cities compared to the rural landscape. The research part of the work aims to introduce the issue of urban heat island and summarize current knowledge about the relationship between the urban heat island and the surrounding environment. The aim of the practical part of the work was to analyse the seasonality and long-term trends of the intensity of the heat island in Prague on the basis of daily data from the CHMI stations Prague – Klementinum, Prague – Ruzyně, Brandýs nad Labem – Stará Boleslav in the years 1971–2019. The analysis showed that the growing trend in the intensity of the urban heat island of Prague stopped in the mid-1990s, and the intensity was even slightly declining in the last decade. The reason is the rapid rise in temperature at rural stations since the mid-1990s, which is comparable or even faster than at the Klementinum station. This might be caused by the increased urbanization of the originally undeveloped areas of the immediate vicinity of Prague and the greater influence of the urban heat island on these areas.

Keywords: urban climate, heat island city, heat island intensity, time series analysis

Obsah

1 Úvod	12
2 Cíl práce a metodika	14
2.1 Cíl práce	14
2.2 Metodika	14
3 Teoretická východiska	15
3.1 Meteorologie a klimatologie	15
3.1.1 Meteorologie	15
3.1.2 Klimatologie.....	16
3.2 Klima.....	17
3.2.1 Definice klimatu	17
3.2.2 Klimatický systém	17
3.3 Změny klimatu.....	18
3.4 Klima města.....	20
3.4.1 Klimatologie města.....	20
3.4.2 Význam studia klimatu měst	21
3.4.3 Historie městské klimatologie	22
3.4.4 Městský metabolismus.....	22
3.4.5 Charakteristické rysy klimatu města.....	24
3.4.6 Teplotní poměry měst	26
3.4.7 Teplotní poměry měst a venkova	27
3.4.8 Energetická bilance UHI.....	28
3.5 Typy městských tepelných ostrovů	29
3.5.1 Atmosférický tepelný ostrov (AUHI).....	30
3.5.2 Povrchový tepelný ostrov (SUHI)	31
3.6 Faktory ovlivňující charakter městského tepelného ostrova	31
3.6.1 Vlhkost vzduchu ve městech.....	31
3.6.2 Srážky ve městech	32
3.6.3 Větrné poměry ve městech.....	33
3.6.4 Sluneční záření a oblačnost ve městech.....	34
4 Analýza městského tepelného ostrova Prahy	35
4.1 Definice zájmového území.....	35
4.2 Použitá data	36
4.3 Statistická analýza	37
5 Výsledky	38
5.1 Vývoje a trendy teplot v ročních obdobích a za rok.....	38

5.2	Roční chod intenzity městského tepelného ostrova Prahy	43
5.3	Vývoj intenzity městského tepelného ostrova Prahy	44
5.4	Shrnutí hlavních výsledku	51
6	Diskuse	52
7	Závěr	54
8	Seznam použitých zdrojů	55

Seznam použitých zkratk

AUHI	Atmosférický tepelný ostrov
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
IPPC	Mezinárodní panel pro klimatickou změnu
SUHI	Povrchový tepelný ostrov
UBL	Mezní vrstva atmosféry
UHI	Městský tepelný ostrov
WHO	Světová zdravotnická organizace

1 Úvod

Tématem předkládané bakalářské práce je vývoj intenzity městského tepelného ostrova v Praze.

Lidé už celá tisíciletí experimentují s přirozenou krajinou, přetváří ji ke svému obrazu, ovlivňují svými zásahy celou řadu přírodních procesů. Vzhledem k současnému vývoji klimatu je studium městského klimatu velmi aktuálním tématem aplikované klimatologie (Barros, 2006; Dobrovolný, 2012; Skalák, 2015; Oke, 2017). Role měst ve studiu klimatu roste především z důvodu stále narůstající populace žijící ve městech. Rozvoj metropolitních oblastí je spojen s celou řadou environmentálních problémů. Jedním z nich je i modifikace lokálního klimatu, která působí na všechny složky fyzicko-geografické sféry a naopak (Beranová, 2003; Barber, 2017).

Poznatky o městském klimatu se využívají zejména v souvislosti s plánováním výstavby nových či revitalizovaných městských částí, vzhledem ke skutečnosti, že urbanizace představuje jednu z nejpodstatnějších změn ve využívání půdy člověkem. Fenomén, který se s tímto procesem bezprostředně pojí je vznik městského tepelného ostrova (UHI), který je charakteristický vyšší teplotou středu města oproti okolním venkovským oblastem. UHI zpravidla doprovází negativní projevy, jako je vyšší spotřeba energie nebo zhoršení kvality ovzduší a městského ekosystému.

V prvním desetiletí 21. století překročil počet obyvatel ve městech hranici 50 % a tento trend neustále narůstá. Aktuální prognózy předpokládají, že úroveň urbanizace do roku 2030 přesáhne hranici 75 %, zatímco na počátku 20. století žilo ve městech pouze 15 %. (Mills, 2007; Skalák, 2015; WHO, 2020). Řada studií ukazuje, že městská zástavba ovlivňuje řadu meteorologických parametrů – teplotu a vlhkost vzduchu, rychlost větru, intenzitu slunečního záření atd., kterými se urbanizované oblasti liší od venkovského okolí. Pro městské oblasti je charakteristická větší plocha aktivního povrchu, složitější geometrie městských objektů s převahou vertikálních ploch, dále větší míra znečištění ovzduší, čímž dochází k tomu, že se umělý povrch podstatně liší od přírodního povrchu svými mechanickými, radiačními, tepelnými a hydraulickými vlastnostmi. Městskou

klimatologií a studium městského tepelného ostrova (UHI) se zabývá velké množství studií, neboť vývoj města, včetně územního plánování, a spokojenost a zdraví jeho obyvatel jsou zásadně závislé na jeho klimatických podmínkách (Beranová, 2003; Mills, 2007; Dobrovolný, 2012, 2013; Huszár, 2014; Oke, 2017).

Tato práce se zabývá vývojem intenzity tepelného ostrova v Praze, která popisuje teplotní rozdíly mezi centrální částí města, reprezentovanou stanicí Praha-Klementinum, a jeho venkovským okolím reprezentovaným stanicemi Praha-Ruzyně a Brandýs nad Labem – Stará Boleslav.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Teoretický oddíl práce si klade za cíl seznámit s problematikou městské klimatologie a zpracovat základní přehled procesů a faktorů, které ovlivňují intenzitu městského tepelného ostrova během roku.

V praktické části bylo cílem analyzovat sezónnost a dlouhodobé trendy intenzity tepelného ostrova v Praze. Analýza se věnuje časové variabilitě teploty vzduchu v oblasti městského tepelného ostrova a venkova. Popisuje dlouhodobé kolísání intenzity tepelného ostrova Prahy v období 1971–2019 na základě analýzy dat získaných ze stanic ČHMÚ Praha – Klementinum, Praha – Ruzyně, Brandýs nad Labem – Stará Boleslav. Hodnocenými klimatologickými charakteristikami jsou průměrné měsíční a roční teploty vzduchu.

2.2 Metodika

Teoretická část práce je rešeršního charakteru. Předkládá aktuální poznatky z oblasti meteorologie, klimatických změn, klimatu města a městského tepelného ostrova. Praktická část pracuje s měsíčními a ročními průměrnými teplotami vzduchu získaných z profesionálních stanic ČHMÚ.

3 Teoretická východiska

3.1 Meteorologie a klimatologie

Meteorologie a klimatologie patří mezi nejstarší přírodovědné obory. Jedná se o disciplíny, které měly velmi široké uplatnění v oblastech jako je zemědělství, mořeplavectví nebo při zakládání měst a osad. Oba obory se řadí mezi atmosférické vědy. Aplikovaná klimatologie a meteorologie se postupně staly velmi populárními u vědecké obce i laické veřejnosti. Zájem o tyto vědy roste v posledních desetiletích především z těchto důvodů:

- narůstá počet důkazů o existenci klimatických změn,
- dochází k narušování přirozeného stavu klimatického systému,
- stále častěji se vyskytují extrémní přírodní katastrofy, jejichž původ lze nalézt právě v atmosférických procesech,
- studium klimatu má přímou spojitost s problematikou ochrany životního prostředí a celosvětovými environmentálními tématy (Vysoudil, 2014).

3.1.1 Meteorologie

Termín meteorologie má původ v řeckém slově „meteoros“, což znamená vznášející se ve výši a „logos“ – slovo, věda. Meteorologie představuje vědu o atmosféře, zabývá se jejím složením, vlastnostmi a procesy a ději, ke kterým v ní dochází. Jedná se o obor, který má velmi blízko k fyzice, neboť aplikuje její poznatky a metody řešení. Meteorologie je dokonce nazývána jako fyzika atmosféry (Acot 2005; Vysoudil, 2014).

Předmětem studia meteorologie je především složení a stavba atmosféry, cirkulace tepla a tepelný režim atmosféry, cirkulace vody a její interakce se zemským povrchem, dále globální cirkulace a lokální cirkulace atmosféry, elektrické pole atmosféry a také atmosférické akustické a optické jevy (Acot, 2005; Vysoudil, 2014).

3.1.2 Klimatologie

Termín klima poprvé použil antický astronom Hipparchos (190-120 př. l.). Klimatologie představuje vědní disciplínu na pomezí mezi geografickými a geofyzikálními obory a jedná se o nauku o podnebí (z řeckého "klima" - sklon a "logos" - slovo, věda). Obecná definice zní, že klimatologie je věda o klimatech Země, o podmínkách a příčinách jejich formování. Rovněž ji lze definovat jako vědu o působení klimatu na člověka, objekty jeho činnosti a naopak (Acot, 2005; Vysoudil, 2014; ČMeS, 2017).

Klimatologii lze dělit podle různých hledisek a dle toho se tento obor dále specializuje. V rámci studia městské klimatologie a městského tepelného ostrova se obor klimatologie uplatňuje v rámci měřítka území, na kterém jsou klimatické podmínky studovány. Na základě této specializace se klimatologie dělí na:

- makroklimatologii, která se zaměřuje na makroklima; zabývá se vlastnostmi klimatických pásem, klimatem pevnin a oceánů;
- mezoklimatologii, jejíž specializací je mezoklima; zabývá se zejména klimatickými faktory, které přetváří makroklima na mezoklima a specifickými vlastnostmi mezoklimatu, jako je např. rozložení srážek; vychází z dat získaných ze standardního meteorologického měření a pozorování, také využívá speciálních metod (např. stožárová meteorologická měření) a jiná měření vertikálních gradientů meteorologických prvků; mezi nejlépe zdokumentovaný typ mezoklimatu patří klima města;
- topoklimatologii, která představuje klimatologii terénní; studuje topoklima a jejím cílem je posoudit, jaký vliv má při tvoření klimatu reliéf povrchu;
- mikroklimatologii, která představuje část klimatologie studující mikroklima jednak otevřených prostorů, jako jsou reliéfy, porosty, půdy, ulice apod., tak uzavřených, mezi které patří např. místnosti, skleníky apod. (Acot, 2005; Vysoudil, 2014; ČMeS 2017).

3.2 Klima

3.2.1 Definice klimatu

Pojem klima neboli podnebí lze charakterizovat jako dlouhodobý a specifický režim počasí. Je definováno z antropocentrického hlediska zahrnující proměnné, které se vztahují k pevnému nebo kapalnému povrchu planety Země. Fyzikální jevy, jež podmiňují klima povrchu Země, vytváří klimatický systém (Acot, 2005; Metelka, 2009; Stehr, 2014; Vysoudil 2014).

Podle Metelky (2009) je klima vytvářeno vzájemnou interakcí mnoha faktorů, mezi něž patří např.:

- faktory mimozemské – sluneční záření, změny orbitální dráhy Země;
- vlastnosti zemské povrchu – rozložení pevnin a oceánů, sopečná činnost, vegetace;
- změny uvnitř samotného klimatického systému – chemické složení, biologické změny, změny ve využití půdy, emise skleníkových plynů apod.

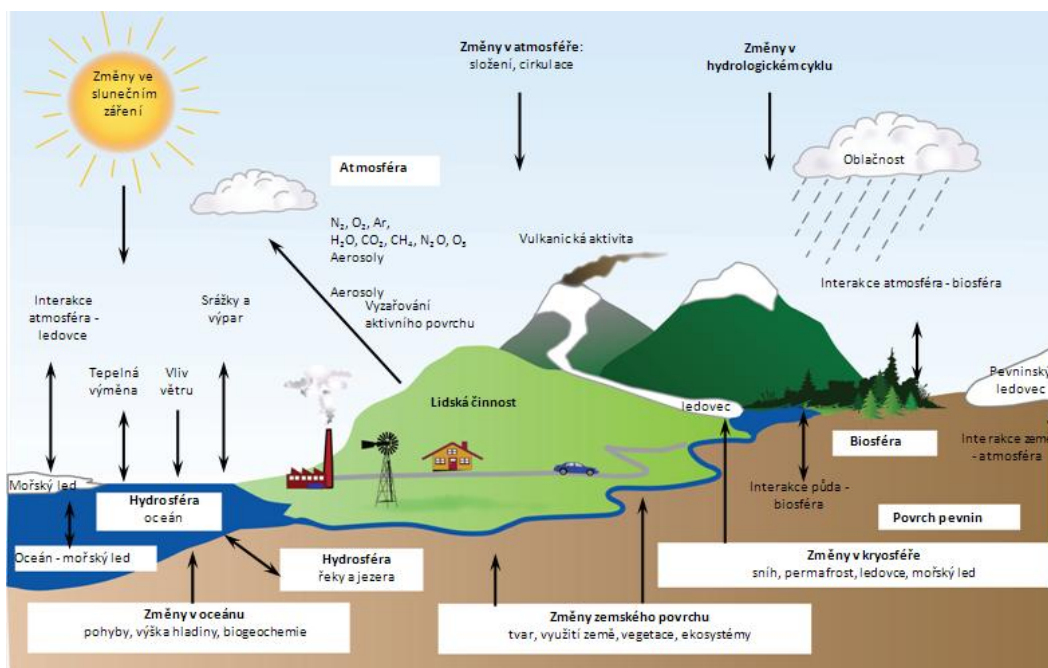
3.2.2 Klimatický systém

Klima stejně jako klimatický systém jsou definovány z antropocentrického hlediska a obsahují oblasti, které se vztahují ke kapalnému či pevnému skupenství Země, protože právě zde se nachází většina živočichů, včetně člověka. Oblast planety Země, kde se projevují fyzikální jevy, které mají vliv na klima povrchu, vytvářejí právě klimatický systém. Ten je vytvářen vrstvou atmosféry, kapalně hydrosféry, pevné hydrosféry (kryosféra), pedosféry a biosféry (Barros, 2006; Burroughs, 2003).

ČMeS (2017) charakterizuje klimatický systém jako část geosféry, která se účastní na procesu vzniku klimatu. Zahrnuje složky, které jsou ve vzájemné interakci, a to atmosféru Země, hydrosféru, kryosféru, biosféru a svrchní část litosféry (pedosféry). Mezi jednotlivými složkami neustále probíhají fyzikální, chemické a biologické procesy, které umožňují např. výměnu energie, jako je tomu v případě slunečního záření nebo hydrologického cyklu. Velmi intenzivní interakce probíhá mezi atmosférou a oceánem. Jednotlivé složky a procesy klimatického systému jsou zjednodušeně demonstrovány na obr. 1.

Pro klimatický systém je charakteristické, že v rámci historie Země nebyl nikdy stabilní. Jde o velice komplexní systém, jehož přesné postihnutí je prakticky nemožné, neboť pro pochopení jeho fungování by bylo nutné znát všechny existující vazby na Zemi, což je nereálné. Z tohoto hlediska není možné vývoj klimatu předpovídat s naprostou přesností. „Klíčové je, že klimatický systém je natolik složitý, že není v možnostech současné vědy ho popsat s takovou přesností, abychom mohli zcela přesně předpovědět jeho další vývoj, a to ani ve chvíli, kdy budeme znát přesné působení všech faktorů, které ho ovlivňují“ (Meteocentrum, 2021).

Na globální klimatický systém má rovněž vliv činnost člověka. Celá řada antropogenních aktivit uvolňuje do atmosféry teplo (např. vytápění budov), ke kterým dochází především ve městech, kde vznikají tzv. městské teplené ostrovy. Tyto ostrovy mohou ovlivňovat lokální klima a je otázkou do, jaké míry mají dopad na klima globální (Metelka, 2009).



Obr.1: Schéma základních částí klimatického systému Země (Metelka, 2009)

3.3 Změny klimatu

V rámci změn klimatu se diskutuje především o změnách teplot, respektive globálním oteplování. Erik M. Conway globální oteplování definoval jako zvýšení

zemské průměrné povrchové teploty v důsledku stoupaní hodnoty koncentrací skleníkových plynů (Graven, 2012). Skleníkový efekt je primárně přirozený jev, jeho negativní stránka přichází až s nadměrným vypouštěním skleníkových plynů (vodní pára, oxid uhličitý, metan, oxid dusný) do atmosféry, čímž se proces přirozeného skleníkového efektu zesiluje a vede ke globálnímu oteplování (Metelka, 2009).

První zmínka o možném vlivu CO₂ v atmosféře způsobujícím tzv. skleníkový efekt je datována do roku 1896. Tento fenomén prvně akcentoval švédský fyzik Svante Arrhenius, laureát Nobelovy ceny za chemii. Nezávisle na sobě právě Svante Arrhenius a americký geolog Thomas Croeder Chamberlain dospěli k závěru, že hromadění plynu CO₂ v atmosféře může způsobit oteplování naší planety Země. Podle něj dvojnásobné množství CO₂ v atmosféře může v budoucnu navýšit teplotu Země až o 5°C. Následovala řada dalších odhadů a rovněž výzkumy dalších autorů, které celkově vedly k názorům, které se lišily v předpokládané době (Lapka, 2006; Metelka, 2009; Marek, 2011).

Arrhenius byl názoru, že je tento proces otázkou třech tisíciletí. V současnosti se mnoho odborníků nevyhýbá mnohem rychlejší prognóze, která s takto rozsáhlou teplotní změnou počítá již v rámci 21. století. Zdá se být mírně znepokojující, že lidé na tuto problematiku výrazněji zareagovali až takřka 100 let od Arrheniova upozornění (Marek, 2011).

V souvislosti se změnou klimatu a jeho oteplováním dochází ke změnám klimatu také v rámci měst, kde dochází v posledních letech k výraznému nárůstu počtu tropických dní, kdy se maximální teplota vzduchu pohybuje od 30 °C a výše a počtu tropických nocí, kdy minimální teplota neklesne pod 20 °C. Tento teplotní trend vede ke zvýšené zranitelnosti městského obyvatelstva, negativně ovlivňuje kvalitu jeho života i městský ekosystém. Tzv. vlny horka¹ představují zásadní nebezpečí pro rizikové skupiny obyvatelstva, jako jsou malé děti, senioři nebo nemocní lidé, kteří mají sníženou schopnost termoregulace. Vedle tohoto negativního vlivu na zdraví má tento proces vliv také na ekonomiku a přirozené fungování městského ekosystému, např. se zvyšuje hrozba vzniku požárů (Klimatická změna, 2021).

¹ Pozn. období minimálně tři dny po sobě, kdy se maximální teplota pohybuje nad hranicí 30 °C (Klimatická změna, 2021)

3.4 Klima města

Problematika klimatu měst patří do studia zájmu mezoklimatologie a v moderní klimatologii je častým předmětem zájmu, neboť praktický dopad změn městského klimatu představuje významný problém. Podle Arnfielda (2003) patří městský tepelný ostrov dokonce mezi nejlépe zdokumentované příklady modifikace meteorologických a klimatických podmínek v mezo-měřítku.

Rostoucí podíl městské populace vede k její stále větší zranitelnosti. Hrozí jak ztráty na lidských životech, tak obrovské materiální škody, ke kterým dochází v souvislosti s tím, jaké podmínky město vytváří a jaký vliv na něj mají nejrůznější přírodní extrémny. Po celém světě žije ve velkých městech 50 % populace a ve městech vyspělých států se jedná dokonce o 75 %, stejně je tomu v České republice (Mills, 2007; Skalák, 2015).

Skutečnost, že většina lidí nežije na venkově, ale v městských aglomeracích vyvolává řadu témat. Městské prostředí se radikálně odlišuje od toho přírodního. Pro města je charakteristická menší míra vegetace, rozsah přirozených povrchů je eliminován ve prospěch umělých povrchů infrastruktury, která má zcela jiné vlastnosti, co se týče propustnosti půdy. Dalším jevem je větší produkce tepelné energie a znečištění prostředí (Mills, 2007; Dobrovolný, 2012; Oke, 2017).

3.4.1 Klimatologie města

Klima města je vzhledem k charakteru a fungování městského prostředí velmi modifikované, neboť pro město je typické specifické klima. Studium klimatu měst se zabývá klimatologie měst neboli urbanistická klimatologie, která analyzuje specifické rysy klimatu měst související s antropogenní činností a s transformací prostředí jako takového v rámci urbanizačního procesu. Předmětem zájmu je také přirozená proměnlivost klimatu, která bývá však v rámci města pozměněna. Tyto změny mohou mít negativní následky v podobě přímých dopadů na zdraví obyvatel nebo na rozsah škod na majetku způsobených například extrémními přírodními procesy. Poznání jednotlivých procesů a mechanismů, které ovlivňují městské klima, je v současné době velmi aktuální téma, neboť ani obrovský technologický pokrok posledních desetiletí nijak zásadně neeliminoval závislost lidské společnosti na přírodních podmínkách (Oke, 1997; Beranová, 2003; Dobrovolný, 2012; Oke 2017).

ČMeS (2017) definuje městskou klimatologii jako část mezoklimatologie a mikroklimatologie, která se aplikuje na problémy velkých měst a průmyslových aglomerací. Zahrnuje rovněž klimatologii mezní atmosféry a klimatologii znečištění ovzduší. V rámci mezoklimatu se zaměřuje na interakci města či průmyslové oblasti jako celku s okolím, v rámci mikroklimatu studuje jednotlivé městské prvky – náměstí, dvory, ulice apod.

3.4.2 Význam studia klimatu měst

Městské klima je specifické tím, že jej lze studovat v rámci mnoha kategorií. Důležité jsou rysy aktivního povrchu. Tím je myšlen povrch, na kterém dochází k přeměně zářivé energie v jinou energii. Ve spodních vrstvách atmosféry dochází k procesům, které jsou zásadně formovány vlastnostmi aktivního povrchu. Jedná se o radiační, tepelné, dokonce aerodynamické vlastnosti, čímž je myšlena drsnost povrchu. Dalším podstatným faktorem je i propustnost povrchu neboli jeho absorpční schopnost. Předními faktory ovlivňujícími specifické rysy klimatu města představují změny charakteru aktivního povrchu zástavbou, znečištěním ovzduší, produkce odpadního tepla (Mills, 2007; Dobrovolný, 2012; Oke, 2017).

„Podle čtvrté hodnotící zprávy Mezinárodního panelu pro klimatickou změnu IPCC (Solomon et al. 2007) by růst frekvence a intenzity extrémních projevů počasí mohl být s velkou pravděpodobností jedním z projevů stávající klimatické změny“ (Dobrovolný, 2012, s. 7). Problematika klimatu měst je velmi aktuální i v souvislosti s procesem globálního oteplování, zejména s přihlédnutím k jeho následkům. Projevuje se extrémními jevy, jako je zvýšení intenzity, četnosti výskytu a délky trvání vln horka, které mohou mít přímé negativní dopady na lidské zdraví. Tepelné městské ostrovy a jejich intenzifikace mohou mít rovněž vliv na proces globálního oteplování. Na druhé straně má studium fenoménu klimatu města přínos také v rovině každodenního života městské populace a standardního chodu urbanistických lokalit (Dobrovolný, 2012; Oke, 2017).

3.4.3 Historie městské klimatologie

První vědecké práce zabývající se klimatem měst vznikaly v první polovině 19. století. Britský chemik a také amatérský meteorolog, L. Howard sepsal na toto téma práci „*The Climate of London*“ (1833), kde mimo jiné stejně jako ostatní badatelé souhlasil s názorem, že za zhoršení městského klimatu může zejména spalování fosilních paliv. Rovněž na základě vlastních měření prokázal, že střed města je teplejší než jeho okolí a popsal základní rysy časové a prostorové variability tzv. tepelného ostrova (Dobrovolný, 2012).

Dalším badatelem, který studoval tuto problematiku byl francouzský badatel, E. Renou (1855), který rovněž zaznamenal vyšší teploty vzduchu v Paříži v porovnání s okolní krajinou, kromě jiného také popsal zásadně nižší frekvenci záporných teplot a nižší rychlost větru ve městě ve srovnání s okolím. Ve 20. století začaly být ke studiu meteorologických a klimatických poměrů měst využívány nové metody, např. metoda tzv. měřících jízd. Poprvé k nim v roce 1927 došlo prostřednictvím W. Schmidta ve Vídni. Tato metoda dokázala mnohem lépe zachytit prostorovou variabilitu meteorologických prvků ve městě a v jeho okolí na rozdíl od předešlých metod, které spočívaly pouze v komparaci rozdílů v hodnotách naměřených ve městech a ve volné krajině. V našich podmínkách tuto metodu poprvé použil dr. E. Quitt k detailní charakteristice rozdílů teploty vzduchu v Brně. V dnešní době je tato metoda stále aplikována v kombinaci s geoinformatikou (Dobrovolný, 2012).

Dalším pokrokem ve studiu klimatu bylo budování hustší sítě městských meteorologických stanic, které mají své specifické vlastnosti a následně využití družicového snímání, družicové meteorologie a klimatologie. Letecké a družicové snímky a metody dálkového průzkumu Země umožňují studium prostorové diferenciací povrchové teploty a jsou podstatné při analýze intenzity městského tepelného ostrova. Data z těchto technologických vyspělých metod jsou rovněž velmi přínosná pro zjišťování znečištění vzduchu v městských aglomeracích (Dobrovolný, 2012; Oke, 2017).

3.4.4 Městský metabolismus

Komplexní fungování urbanistického ekosystému se označuje jako urbanistický metabolismus. Ten je založen na tom, že město se chová jako

kompaktní otevřený systém, ve kterém dochází ke vzájemné interakci ne jedné straně mezi živými organismy, na druhé straně s fyzikálním prostředím (obr. 2).

Tento specifický metabolismus využívá elektřinu, palivo, vodu, potraviny, jež jsou využívány na výrobu průmyslových produktů a zajišťují potřeby živých organismů, avšak tento proces má svůj vedlejší efekt. Město stejně jako živé organismy vytváří odpad. Tento odpad se projevuje v podobě pevných látek, znečištění vody a atmosféry (Folberth, 2015; Oke, 2017).

Mezi hlavní faktory, které ovlivňují urbanistický metabolismus, patří modifikace městského povrchu, která ovlivňuje klima mezní vrstvy a výměnu energie, hmoty a hybnosti mezi ní a povrchem. Zemský povrch je zásadní pro:

- absorpci, reflexi a emisi radiace;
- transformaci energie a hmoty;
- intercepci srážek a částic znečišťujících ovzduší;
- odchýlení proudů vzduchu a zpomalení rychlosti vzduchu.

Charakter urbanistického systému je možné popsat na základě jeho forem (angl. urban form) a funkcí (angl. urban function). Jednotlivé formy i funkce ovlivňují atmosféru, a to prostřednictvím fyzikálních nebo chemických faktorů.

Jako formy jsou vnímány:

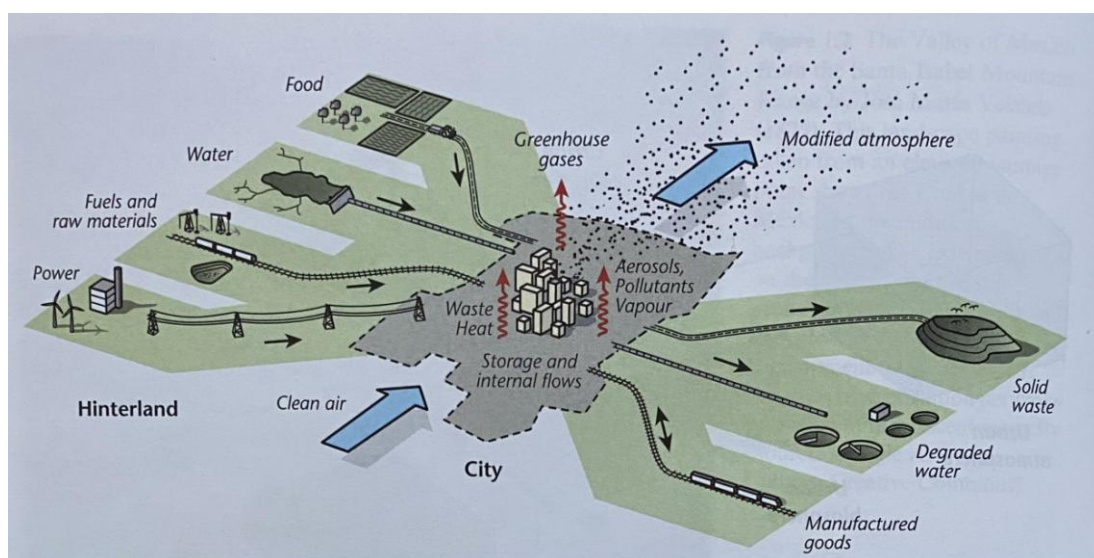
- látky vytvářející jednotlivé urbánní prvky – budovy, cesty nebo vegetace;
- povrch – zastavěný, dlážděný, porostlý vegetací či vodní;
- a geometrická struktura města – charakterizovaná velikostí budov a vzdáleností mezi nimi, šířkou a délkou ulic apod.

Pro město je velmi podstatná jeho schopnost absorbovat, odrážet, emitovat radiaci a vsakovat, transportovat a zadržovat teplo a vodu. Tato schopnost je závislá na poměru přírodních a umělých materiálů, které město vytváří. Tímto způsobem jsou ovlivňovány radiační, tepelné a vodní bilance města (Mills, 2007; Dobrovolný, 2012; Oke, 2017).

Na rozdíl od přírodního povrchu, který je spíše rovinného charakteru, vykazuje městský povrch větší členitost, čímž dochází k rozšíření jeho aktivní plochy a současně je tak eliminováno množství dopadajícího záření. Městské bloky se mohou značně lišit. Například rozsáhlé zelené plochy jako parky mají jiné fyzikální vlastnosti než průmyslové komplexy. Rozsáhlé bloky zeleně jsou schopné generovat

lokalizované systémy brízové cirkulace (angl. breeze circulation), tovární bloky produkují velké množství páry a zvyšují tím oblačnost (Mills, 2007; Oke, 2017).

Na městský metabolismus mají vliv antropogenní emise, které vznikají lidskou činností. Jedná se o chemické látky uvolňované např. průmyslovými závody apod. Jejich přímým účinkem jsou ztráty tepla budovami a automobily, které vedou k ohřevu okolního vzduchu, naopak produkce páry chladicími věžemi způsobuje kondenzaci a tvorbu oblaků. Mezi nepřímé účinky patří procesy, kde se znečišťující částice vměšují do radiačního přenosu v atmosféře, tvorbu kondenzačních jader nebo emise skleníkových plynů, které modifikují radiační bilanci (Oke, 2017).



Obr. 2: Schéma městského metabolismu (Oke, 2017)

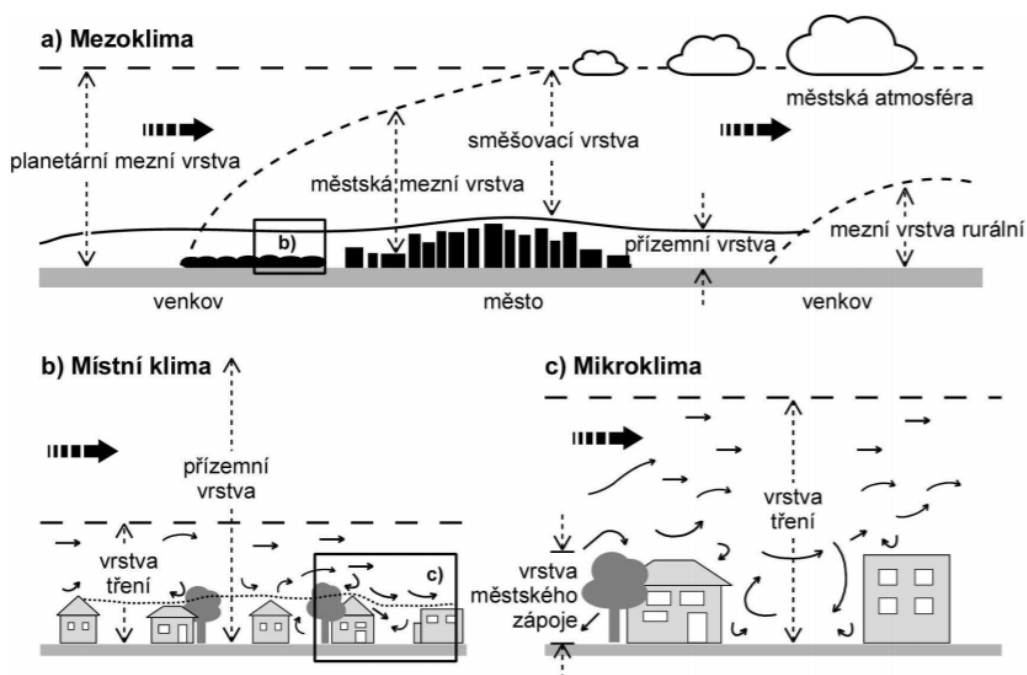
3.4.5 Charakteristické rysy klimatu města

Zastavěné plochy města formují jeho charakteristické klima, které je velmi odlišné od toho, které panuje ve volné přírodě. Klima lze dělit podle rozsahu území, které ovlivňuje do několika kategorií, kterými jsou mikroklima, mezoklima a makroklima. Mikroklima je např. klima, které se nachází v uzavřených prostorech, jaké nalézáme v budovách, makroklima se tvoří v rámci světadílů. Mezoklima měst patří mezi nejdiskutovanější oblast v rámci tohoto typu klimatu (Akbari, 2008; Crewe, 2016; Oke, 2017).

Podle ČMeS (2017) dochází v rámci městského mezoklimatu zejména k procesům jako je tření o zemský povrch a turbulentní promíchávání. Tyto procesy

probíhají na horizontální úrovni v řádu jednotek až desítek kilometrů, v dalším vertikálním směru je mezoklima limitováno tzv. mezní vrstvou atmosféry (angl. urban boundary Layer (UBL)). Jedná se o vrstvu, která má přímý vliv na pole meteorologických komponentů a zasahuje do výšky od několika set metrů od povrchu země až do 2 km (Dobrovolný, 2012).

V prostředí městské zástavby dosahuje mezní vrstva největší mocnosti, a to vzhledem k drsnosti povrchu, který je jeden ze zesilujících faktorů. Dalším faktorem větší mocnosti je zvýšená instabilita teplotního zvrstvení, pro kterou se vytváří v urbanistickém prostředí příznivé podmínky pro vytváření UHI. Mezní vrstvu atmosféry lze charakterizovat z hlediska denního chodu různých meteorologických komponentů, jako jsou teplota nebo vlhkost vzduchu. V případě, že se mezní vrstva charakterizuje z hlediska proudění vzduchu, poté se její spodní vrstva označuje jako vrstva tření. Součástí mezní vrstvy atmosféry, která velmi významně přispívá k formování městského klimatu je přízemní vrstva atmosféry (obr. 3) (Oke, 2002; Mills, 2007; Dobrovolný, 2012; Oke, 2017).



Obr. 3: Měřítko městského klimatu (Oke, 1997)

Podle ČMeS (2017) je přízemní vrstva definována jako nejspodnější část mezní vrstvy atmosféry, která dosahuje tloušťky několik desítek metrů. Jedná se o oblast, kde se termální a dynamické vlivy zemského povrchu projevují

nejintenzivněji a teplota. V rámci městského klimatu se definuje v přízemní vrstvě tzv. městský zápoj (ang. Urban Canopy Layer – UCL). Jde o situaci, kdy je v městské zástavbě uzavřen určitý objem vzduchu uzavřený zpravidla umělými povrchy od zemského povrchu do průměrné výšky budov (Oke, 2002; Mills, 2007; Dobrovolný, 2012; Oke 2017).

Výše zmíněné vrstvy a specifické klima měst jsou utvářeny řadou faktorů. Oke (2017) uvádí zejména tyto:

- tepelné a radiační vlastnosti aktivních povrchů, které jsou rozhodující pro intenzitu pohlcování a odrazu krátkovlnného elektromagnetického záření a emitování záření dlouhovlnného;
- nepropustný charakter aktivních povrchů formujících zvýšený odtok srážek a snížení výparu a vlhkosti vzduchu;
- geometrické uspořádání aktivních povrchů, které zvyšuje celkovou plochu, přispívá k podstatnému podílu ploch s vertikální orientací, k vytváření tzv. uličních kaňonů a k vysoké drsnosti;
- znečištění atmosféry;
- produkce odpadního tepla (Mills, 2007; Dobrovolný, 2012; Oke, 2017).

3.4.6 Teplotní poměry měst

Několik desítek let výzkumu ukazuje, že města jsou prakticky vždy teplejší než jejich okolí. Tento jev představuje tzv. městský tepelný ostrov (UHI) a jedná se o modelový příklad neúmyslné změny klimatu způsobené člověkem. Tento fenomén má velké množství dopadů a nejde jen o to, že například ve městech dříve rozkvétají rostliny. V městech často vznikají nižší náklady na vytápění, za to však rostou náklady na jeho ochlazování. Setkáváme se tu rovněž s další řadou negativních jevů, jako je zvýšený tepelný stres na obyvatele v létě nebo vysokou koncentrací smogu (Crewe, 2016; Oke, 2017).

Jako jeden z nejtypičtějšých příkladů antropogenního ovlivňování mezoklimatu je tento jev dobře zdokumentován. Zastavěné městské oblasti většinou vykazují značně odlišné teploty než okolní krajina (viz obr. 4), tento jev souvisí zejména se specifickými rysy městské zástavby jako určitého typu aktivního povrchu v porovnání s přírodní krajinou. *„Zvětšení plochy aktivních povrchů a převaha*

vertikálně orientovaných povrchů vedou ke zvyšování množství pohlceného krátkovlnného záření a k jeho četným odrazům. Uzavřené prostory mezi budovami omezují dlouhovlnné vyzařování, a především v nočních hodinách snižují ztráty tepla“ (Dobrovolný, 2012).

V rozsáhlých urbanistických aglomeracích vytváří zástavba komplikovaný systém, kde se uplatňuje velká prostorová a také časová variabilita teplotních poměrů. Následkem toho jsou i parametry UHI, mezi které patří rozsah, denní a roční chod intenzity, jež jsou značně proměnlivé. Prostorová variabilita má souvislost s rozdílným typem zástavby (obytná zástavba, průmyslové a obchodní zóny), její koncentrací, poměrem povrchů s vegetací, vodní nádrže apod. Vedle toho časová variabilita se pojí s meteorologickými podmínkami, denní a roční dobou (Dobrovolný, 2012; Geletič, 2016; Oke, 2017).

Prostorová variabilita urbanistického prostředí představuje velmi komplikovanou oblast výzkumu. Jak uvádí Arnfield (2003) např. budova se skládá z různých typů materiálů s odlišnou časovou expozicí slunečního záření, s rozdílnou výměnou dlouhodobého záření a úrovní ventilace. Dále se prostorová variabilita projevuje v horizontálních přízemních plochách tvořených směsicí různorodých prvků (zavlažované trávníky, zahrady, nezavlažovaná vegetace, zpevněné plochy), v mnoha případech také kontrastními radiačními, tepelnými, aerodynamickými a vlhkostními vlastnostmi.

3.4.7 Teplotní poměry měst a venkova

Příčiny vzniku městského teplotního ostrova je možné identifikovat prakticky ve všech městech. Tato skutečnost je dána tím, že zastavěné území vykazuje odlišnou energetickou bilanci ve srovnání s okolní venkovskou krajinou. Následkem toho jsou jednotlivé meteorologické jevy odlišné, zejména pokud jde o hodnoty teploty vzduchu. Existuje předpoklad, že teplota vzduchu směrem k centru měst se zvyšuje, a to v závislosti na zvyšující se hustotě městské zástavby. Základní charakteristiky, které mají vliv na vznik tohoto jevu, shrnuje Voogt (2003):

- změna geometrie aktivního povrchu – zvětšení jeho velikosti a převaha vertikálních povrchů vede ke zvýšení množství pohlceného slunečního záření a k

jeho četným odrazům, uzavřené prostory mezi budovami vedou k omezení dlouhodobého vyzařování v nočních hodinách a tím i ke snížení ztrát tepla,

- změna tepelných vlastností aktivního povrchu – povrchy budov mají poměrně značnou tepelnou kapacitu, což umožňuje zvýšené pohlcování tepla v období pozitivní energetické bilance a jeho uvolňování během negativní energetické bilance,

- změna v hydrologické bilanci – převaha nepropustných povrchů vede ke snížení dostupného množství vody k evapotranspiraci a tím současně i ke snížení latentního toku tepla a ke zvýšení turbulentního toku.

Na efekt tepelného ostrova, na jeho rozšíření a proměnlivost v čase mají vliv rovněž geografické specifikace konkrétního místa, mezi které patří velikost města, jeho uspořádání, zvolené druhy povrchů, reliéf, nadmořská výška, klima daného regionu apod. (Voogt, 2002; Mills 2007; Oke 2017).

Nejčastěji se intenzita tepelného ostrova definuje jako maximální rozdíl mezi teplotou ve městě a teplotou v okolí. Existuje řada způsobů, jak se v konkrétních podmínkách typická teplota urbanistického nebo rurálního prostředí zjišťuje. Tyto přístupy mohou zásadním způsobem ovlivňovat výsledky s ohledem na hlavní charakteristiky UHI. Intenzitu UHI formuje především velikost města, které je definováno počtem populace (Stewart, 2011).

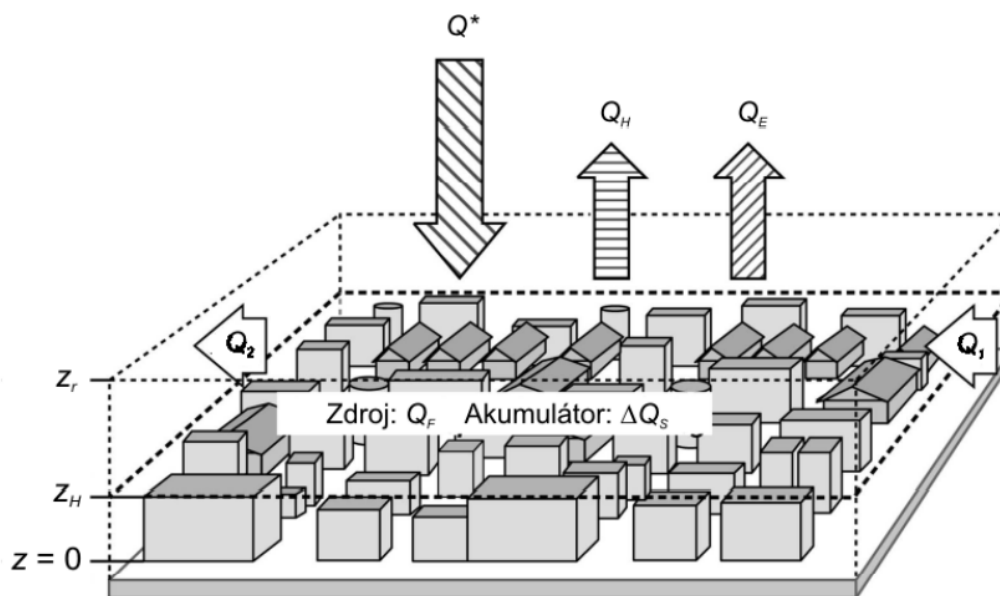
3.4.8 Energetická bilance UHI

Specifické vlastnosti městského klima vznikají v důsledku působení městských faktorů, které jsou dány vlastnostmi městského povrchu a charakterem antropogenní činnosti probíhající ve městě. Působením městských faktorů dochází ke změně energetické a vláhové bilance aktivní vrstvy ve městě a uvolňování odlišného množství tepla a vodní páry do městské atmosféry v porovnání s přízemní atmosférou ve venkovské krajině. Rozdíly v energetické bilanci zastavěných a nezastavěných lokalit mohou vést primárně k formování oblasti teplejšího vzduchu v prostoru města a chladnějšího ve venkovních oblastech (Dobrovolný, 2012).

Energetická bilance, počítaná pro určitý objem městské aktivní vrstvy (obr. 4), je v městském prostředí vyjádřena pomocí následující rovnice (Oke, 2017):

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q + (\Delta Q_A). \quad (1)$$

Ve vzorci (1) je Q^* radiální bilance, Q_F ztráty tepla z antropogenní činnosti, Q_H turbulentní tok zjevného tepla, Q_E turbulentní tok latentního tepla, ΔQ_S změna entalpie objemu (v případě městského prostředí představuje měření tohoto členu značný problém, proto se přistupuje k jeho výpočtům (Roberts et al., 2006)), ΔQ_A bilance horizontálního přenosu tepla – na obr. 4 je Q_1 resp. Q_2 advektované teplo do resp. z objemu.



Obr. 4: Schéma energetické bilance objemu městské aktivní vrstvy (Roberts et al., 2006). Městská aktivní vrstva je vymezena zdola nulovou výměnou tepla v podloží a shora průměrnou výškou prvků městského povrchu z_H nebo úrovní z_r používající se při měření turbulentních toků v lokálním měřítku (Grimmond a Oke, 2002). Nadzemní vrstva městského povrchu v intervalu výšek od 0 do z_H je definována jako městský zápoj.

3.5 Typy městských tepelných ostrovů

Jak už bylo uvedeno v předchozí části, městský tepelný ostrov představuje rozdíl teplot mezi urbanistickou oblastí a jejím okolím, neboť urbanistický systém vykazuje takové vlastnosti, kvůli kterým se pohlcené teplo ve městech během dne

kumuluje a po západu slunce postupně uvolňuje. Vzhledem k této skutečnosti je právě po západu slunce intenzita městského tepelného ostrova v městské vrstvě atmosféry nejvyšší. Tempo ochlazování vzduchu nad městem je kvůli zpětnému uvolňování tepla od zdí budov pomalejší než nad venkovskou krajinou. Výsledkem je, že denní hodnoty takového tepelného ostrova vykazují nepodstatné nebo záporné měření (Dobrovolný, 2013; Oke, 2017).

Městský tepelný ostrov je ovlivňován různými mechanismy. Jinými slovy UHI se různí tím, jak vzniká, maximální i průměrnou intenzitou, časovým průběhem intenzity, možnostmi identifikace a kvantifikace, nebo dopadem na lidské aktivity. Na základě těchto parametrů jsou rozeznávány dva základní typy UHI: tzv. atmosférický tepelný ostrov (Atmospheric Urban Heat Island – AUHI) a tzv. povrchový tepelný ostrov (Surface Urban Heat Island – SUHI) (Akbari, 2008; Dobrovolný, 2012; Oke, 2017).

3.5.1 Atmosférický tepelný ostrov (AUHI)

Podle Akbariho (2008) je pro tento typ tepelného ostrova charakteristická relativně zvýšená teplota vzduchu v městských oblastech ve srovnání s relativně chladnějším vzduchem v okolním prostředí. Rozdílnost teploty přízemní vrstvy nad městem a okolním prostředím je mnohem menší než v případě urbanistických a venkovských aktivních povrchů. Vzhledem k rozdílným parametrům jednotlivých měst (počet obyvatel, rozloha města, hustota zalidnění, geografická poloha apod.) nelze stanovit jednu hodnotu nebo přesný rozptyl hodnot, který bylo možné vztáhnout na všechna města.

Identifikace AUHI probíhá na základě měření teploty vzduchu na standardních meteorologických stanicích. K tomu účelu jsou také používány tzv. účelová měření ve speciálních sítích stanic, nebo také za pomoci tzv. měřících jízdy. AUHI se v rámci vertikálního směru člení na dva další typy. První je tzv. tepelný ostrov mezní vrstvy atmosféry (boundary layer UHI), dalším typem je tepelný ostrov ve vrstvě městského zápoje (tzv. canopy layer UHI) (Dobrovolný, 2012).

3.5.2 Povrchový tepelný ostrov (SUHI)

Na rozdíl od předešlého typu se SUHI neboli tepelný ostrov povrchu města netýká teploty vzduchu, ale teploty přirozených a umělých povrchů. Dobrovolný (2012) definuje SUHI jako kladnou teplotní anomálii aktivních povrchů v prostoru městské zástavby v porovnání s venkovskou krajinou. K získávání údajů o prostorové variabilitě teploty aktivních povrchů (Land Surface Temperature – LST) jsou mnohdy využívána data z družicového měření (Dobrovolný, 2013).

Oke (2017) charakterizuje SUHI jako relativně zvýšenou teplotu aktivního antropogenního povrchu (silnice, chodníky, střechy apod.) v porovnání s aktivními přírodními povrchy mimo městskou zástavbu. Bylo vyzorováno, že disparita mezi teplotami antropogenních a přírodních povrchů je mnohem výraznější přes den (neboli v období pozitivní energetické bilance povrchu) než v noci. Vzhledem k tomu je teplotní rozdíl přirozeně vyšší v letních měsících než v zimních. Vedle toho přírodní povrchy mimo města za stejných podmínek vykazují zásadně nižší rozdíl, v řadě případů jej lze označit za bezvýznamný. Kromě expozice povrchu je intenzita ohřevu ovlivňována rovněž barvou a strukturou aktivního povrchu. K detekci SUHI je využíváno zejména dálkového termálního snímání. Tento typ metody je stále přesnější a detailnější v souvislosti s rozvojem technologických možností (Berdahl, Bretz, 1997; Akbari, 2008; Dobrovolný, 2012; Dobrovolný, 2013; Oke 2017).

3.6 Faktory ovlivňující charakter městského tepelného ostrova

Zastavěná území jsou modifikována řadou faktorů. Mezi podstatné vlivy patří vlhkost vzduchu, srážky, větrné poměry, sluneční záření a oblačnost (Li, 2019).

3.6.1 Vlhkost vzduchu ve městech

Urbanizované oblasti zásadně modifikují vlhkostní poměry v porovnání s územím s převahou přirozených ploch. Vlhkost městského prostředí je ovlivněna specifickým prostředím ve městě, konkrétně hustotou zástavby, množstvím nepropustných povrchů, průmyslovou činností, dopravou nebo vytápěním obydlí, a

současně také výsledkem působení vzájemných pozitivních a negativních vazeb vlhkosti na jiné meteorologické prvky (Mills, 2007; Dobrovolný, 2012; Li, 2019).

Jako hlavní procesy, které určují časovou a prostorovou rozdílnost charakteristik vlhkosti vzduchu označují Holmer a Elison (1999) výpar, kondenzaci a advekci. Charakteristický nižší podíl zeleně ve městech způsobuje, že intenzita výparu, vznikající při vyšších teplotách, je znatelně nižší, než je tomu ve volné krajině. Důsledkem toho je nedostatečná spotřeba latentního tepla a zvyšování teploty vzduchu ve městě. Intenzitu výparu a vlhkost vzduchu také eliminuje rychlé odtékání srážkové vody. Místo toho, aby se voda vsakovala do půdy a ochlazovala ji, stéká po umělých nepropustných plochách rovnou do kanalizace. Teplotní rozdíly různých částí města způsobují rozdílný tlak vzduchu, což vede k tomu, že pohybující se vzduch dále působí na vlhkost v zastavěných městských oblastech. Naopak pozitivní vliv na vlhkost městského vzduchu má přirozeně vegetace, jež uvolňuje výrazné množství vodní páry v závislosti na velikosti, hustotě nebo druhu (Dobrovolný, 2012; Oke, 2017).

Na vlhkost vzduchu má vliv také roční doba, obecně je zvýšený tlak vodní páry pozorovatelný v zimě a nižší pak v létě v porovnání s příměstskými oblastmi. Nižší vlhkost vzduchu se zpravidla vyskytuje také v centrech měst než v okolí. Svoji roli sehraávají i prachové částice, které mají schopnost pohlcovat vodní páru a jejichž koncentrace ve městech jsou vysoké v důsledku průmyslových aktivit a dopravy (Dobrovolný 2012; Oke, 2017).

Celková bilance vlhkosti vzduchu může být v některých městech a městských oblastech ovlivněna také antropogenní produkcí odpadní vodní páry, která vzniká např. při spalování, nebo je uvolňována chladicími věžemi. Tento typ vlhkosti vzduchu však zpravidla nedokáže vybalancovat ztráty vzniklé ostatními procesy, které naopak vlhkost vzduchu snižují, neboť takto produkovaná pára většinou jen rychle stoupá do vyšších pater atmosféry (Dobrovolný, 2012).

3.6.2 Srážky ve městech

V rámci městské klimatologie patří srážkový režim k nejproblematictějším oblastem výzkumu, neboť na něj nelze uplatnit prostorová a časová kritéria. Je značně komplikované přesně vymezit jejich vliv vzhledem k velké časové a

prostorové variabilitě. Obecně je vliv srážek vysvětlován tak, že vzduch pohybující se nad městem obsahuje větší množství kondenzačních jader, což způsobuje výskyt vyšších úhrnů srážek a také jejich vyšší intenzitu v závětrných oblastech, kde dochází k ochlazení podporujícímu kondenzaci, nárůst oblačných kapek a k vypadávání srážek (Dobrovolný, 2012).

Současný stav poznání režimu srážek v městských lokalitách si klade otázku, zda urbanizované oblasti pouze zesilují existující srážky nebo je dokonce vyvolávají. Podle řady studií (Landsberg, 1981) je množství srážek ve městě a za městem ve směru větru o 5 až 15 % vyšší, než je tomu v krajině okolo měst a současně města mají vliv na zvýšení srážkových úhrnů. Tento jev je způsobeno zejména termálním a mechanickým efektem a efektem znečištění ovzduší (Oke, 2017).

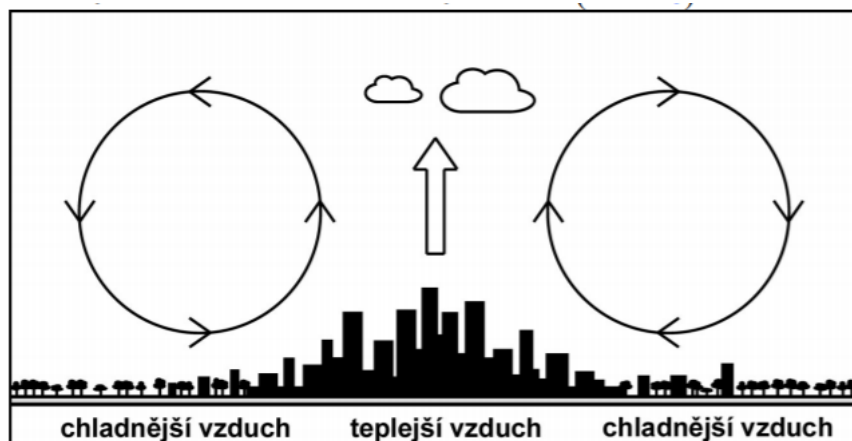
Termální efekt představuje hlavní příčinu vzniku izolovaných srážek nad městem v létě, někdy to může vést k vyššímu výskytu bouřek nebo krupobití. S charakterem povrchů, které bývají ve městech drsnější, souvisí mechanický efekt. Drsný povrch v urbanizovaných lokalitách může způsobovat zpomalení frontálních systémů, a tak zvyšovat úhrny srážek. Role jednotlivých prvků je stejně jako u jiných meteorologických prvků značně proměnlivá a rozdílná a stále předmětem studia (Dobrovolný, 2012).

3.6.3 Větrné poměry ve městech

Pro zastavěné městské oblasti je charakteristická eliminace řady povětrnostních parametrů – průměrná roční rychlost větru je o 20 až 30 % nižší, dále je o 10 až 20 % nižší maximální rychlost větru, naopak výskyt bezvětří je o 5 až 10 % vyšší než v okolní krajině (Landsberg, 1981).

Větrné poměry ve městech jsou ovlivňovány termálními a mechanickými příčinami. Termální příčiny způsobují vznik místních cirkulačních systémů, které jsou podmíněny rozdílem v teplotě vzduchu městských a příměstských oblastí v důsledku UHI (obr. 5). Teplejší vzduch nad městem stoupá do výšky a odtéká směrem na periferii, kde po ochlazení klesá a v důsledku konvekce nad městem vane zpět směrem do centra města a uzavírá celou cirkulační buňku. Větrné poměry ve městech jsou značně závislé na antropogenních faktorech, jako je rozloha města,

charakter zastavěných území a rovněž na přirozených faktorech, jakými je obecný charakter proudění na konkrétním území nebo povaha reliéfu (Dobrovolný, 2012).



Obr. 5: Schéma vzniku místní cirkulace v důsledku rozdílných teplotních poměrů nad městem a jeho okolím (Dobrovolný, 2012)

3.6.4 Sluneční záření a oblačnost ve městech

Podle studií Landsberga (1981) a Arnfielda (2003) je rozdíl v množství oblačnosti mezi městem a venkovskému prostředí v průměru 5 až 10 %, častěji se také vyskytují mlhy (v zimě o 100 % a v letě o 30 % více).

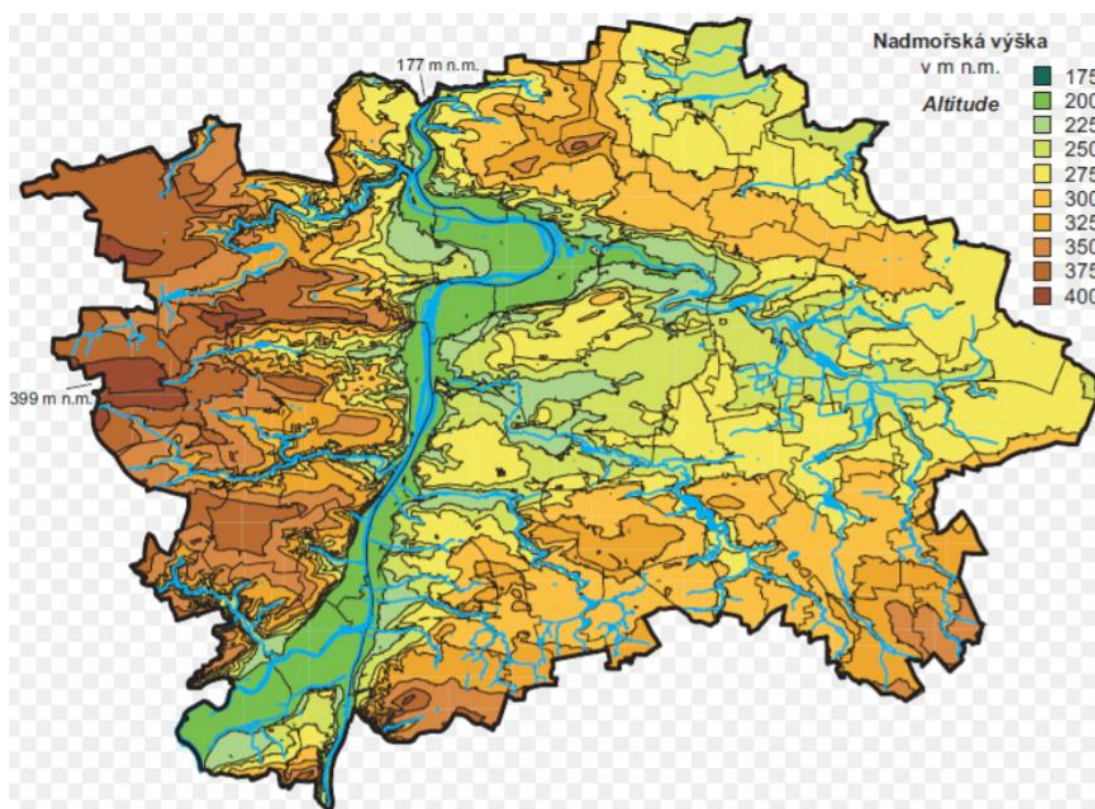
Hlavními příčinami zvýšeného výskytu oblačnosti v zastavěných územích jsou turbulentní povaha proudění, produkce kondenzačních jader v městské atmosféře a zvýšená intenzita konvekce. Ke snížení intenzity slunečního záření může docházet také vlivem vyššího množství atmosférických aerosolů a znečištěním atmosféry (Dobrovolný, 2012; Oke, 2017).

V rámci denního režimu oblačnosti je rozdíl mezi městem a venkovem pozorovatelný především v ranních hodinách, kdy se vyskytuje více mlh. Ve městech se také vyskytuje intenzivnější zákal, který je způsobený zhruba desetkrát větším počtem kondenzačních jader, dalších částic a vyšší koncentrací plynných příměsí, čímž může dojít až o 20 % nižší propustnosti slunečního záření, včetně kratší doby slunečního svitu o 5 až 15 % (Dobrovolný, 2012).

4 Analýza městského tepelného ostrova Prahy

4.1 Definice zájmového území

Cílem praktické části bakalářské práce je analyzovat sezónnost a dlouhodobé trendy tepelného ostrova v Praze. Praha leží mírně na sever od středu Čech na řece Vltavě ve vzdálenosti zhruba 40 km od jejího soutoku s Labem. Díky erozní činnosti přítoků Vltavy se nachází v členitém reliéfu. Nejnižší bod Vltavy je v nadmořské výšce 177 m n. m. u Suchdola (znázorněno na obr. 6), naopak nejvyšší bod se nachází 399 m n. m. mezi Sobětinem a Chrášťany. Praha se rozprostírá na rozsáhlé Pražské plošině, která dosahuje na západním a jižním okraji města výšky zhruba 400 m n. m. Nadmořská výška území Prahy je znázorněna na obr. 6 (Wikipedie, 2021).



Obr. 6: Znázornění nadmořské výšky města Praha (Žák, 2013)

Praha patří k nejteplejším místům na území ČR, stejné teplo či mírně tepleji je pouze v oblasti jižní Moravy. Kromě nadmořské výšky má na průměrné roční teploty vliv také efekt UHI. Na základě klementinského měření (od roku 1775) se

v Praze vyskytuje za rok v průměru 88 mrazových dní, 26 ledových dní, 46 letních dní a 9 tropických. Nejteplejším měsícem je červenec (Karlov 19,1 °C, resp. Ruzyně 17, 5 °C) a naopak nejchladnějším je leden (−0,9 °C resp. −2,4) (Červený a kol., 1984).²

Nejvyšší absolutní teplota v rámci Prahy byla naměřena 27. července 1983 v Uhříněvsi (40,2 °C); pro srovnání o 0,2 °C vyšší absolutní rekord v ČR byl naměřen 20. 8. 2012 na meteorologické stanici v Dobřichovicích. Nejnižší absolutní teplota v Praze byla neměřena v Ruzyni 10. února 1956 (−31,1 °C). Pro srovnání – český rekord byl naměřen v Litvínovicích 11. 2. 1929, a to −42,2 °C (ČHMÚ, 2020).

Červený a kol. (1984) uvádí, že velká část Prahy leží v mělké kotlině, kde dochází k časté stagnaci vzduchu. Na Ruzyni v 11,3 % dnů v roce dochází k bezvětrí, na Karlově pak v 25,3 % případů. V Praze je také oproti okrajovým částem města nižší průměrná rychlost větru. Stejně tak je v Praze oproti ostatním oblastem ČR nižší vlhkost vzduchu, i v rámci srážkového úhrnu patří Praha spíše k sušším oblastem.

4.2 Použitá data

Pro analýzu vývoje intenzity městského tepelného ostrova Prahy byly použity měsíční a roční průměrné teploty vzduchu ze tří stanic Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Data poskytuje ČHMÚ dle zákona 123/1998 Sb. volně ke stažení na svém webovém portálu. Analyzována byla data za období 1971–2019.

Intenzita městského tepelného ostrova Prahy (ve výsledcích označována jako intenzita UHI) byla pro účely práce definována jako rozdíl mezi teplotou vzduchu na městské stanici Praha – Klementinum (dále Klementinum) a průměrem teplot vzduchu na stanicích Praha – Ruzyně (Ruzyně) a Brandýs nad Labem – Stará Boleslav (Brandýs), které byly definovány jako venkovské. Stanice byly vybrány na základě délky dostupných časových řad a předběžné analýzy teplotních poměrů na dalších stanicích (Praha – Libuš, Praha – Karlov) dostupných na portálu ČHMÚ. Obě venkovské stanice leží ve vzdálenosti do 50 km od stanice Klementinum. Z důvodu

² Pozn. jedná se o hodnoty naměřené do roku 1984, kdy byla vydána tato publikace.

výrazných rozdílů v nadmořské výšce mezi jednotlivými stanicemi bylo třeba teplotní řady ošetřit o její vliv. To bylo provedeno tak, že hodnoty průměrných měsíčních teplot na stanicích Ruzyně a Klementinum byly upraveny teplotním gradientem 0,0065 °C za každý jeden metr nadmořské výšky vůči stanici Brandýs (přesnější postup: uvažujeme-li rozdíl v nadmořské výšce mezi stanicemi Brandýs (170 m n.m.) a Ruzyně (362 m n.m.) 183 m n.m., vynásobíme tento rozdíl teplotním gradientem 0,0065 a výslednou hodnotu ($183 \cdot 0,0065 = 1,2$ °C) přičteme k teplotám na stanici Ruzyně.

Vývoj průměrných teplot vzduchu a průměrné intenzity městského tepelného ostrova Prahy byl vyhodnocen v rámci celého roku a jednotlivých ročních období v letech 1971–2019. Jaro, léto, podzim a zima byly definovány na základě standardního meteorologického dělení měsíců do ročních období. Zima v daném roce byla definována jako tříměsíční období začínající prosince předchozího roku a končící únorem daného roku (tab. 1).

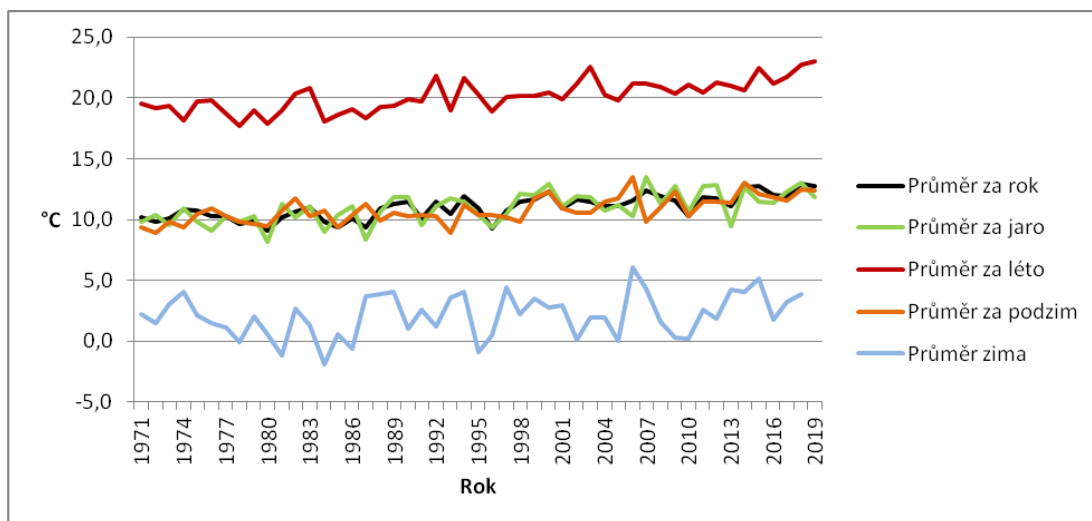
4.3 Statistická analýza

V rámci statistické analýzy byl nejprve analyzován dlouhodobý vývoj průměrné teploty za období 1971-2019 na jednotlivých stanicích. Za použití metody lineární regrese v MS Excel byly odhadnuty trendy vývoje průměrné teploty v rámci celého roku a jednotlivých ročních období. Spolehlivost trendů byla vyhodnocena pomocí koeficientu determinace (R^2), který vyjadřuje míru kvality regresního modelu, tj. jaký podíl variability závislé proměnné (na ose y) je vysvětlen regresním modelem. Stejným způsobem byly vyhodnoceny trendy vývoje intenzity městského tepelného ostrova. V poslední fázi analýzy byl vyhodnocen roční chod průměrné intenzity městského tepelného ostrova v jednotlivých měsících a sezónách za celé sledované období.

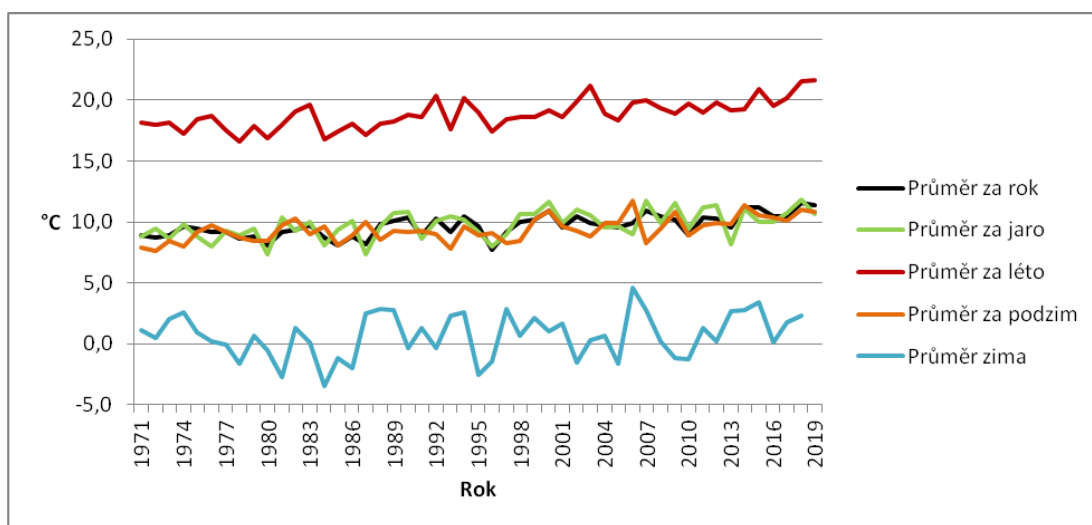
5 Výsledky

5.1 Vývoje a trendy teplot v ročních obdobích a za rok

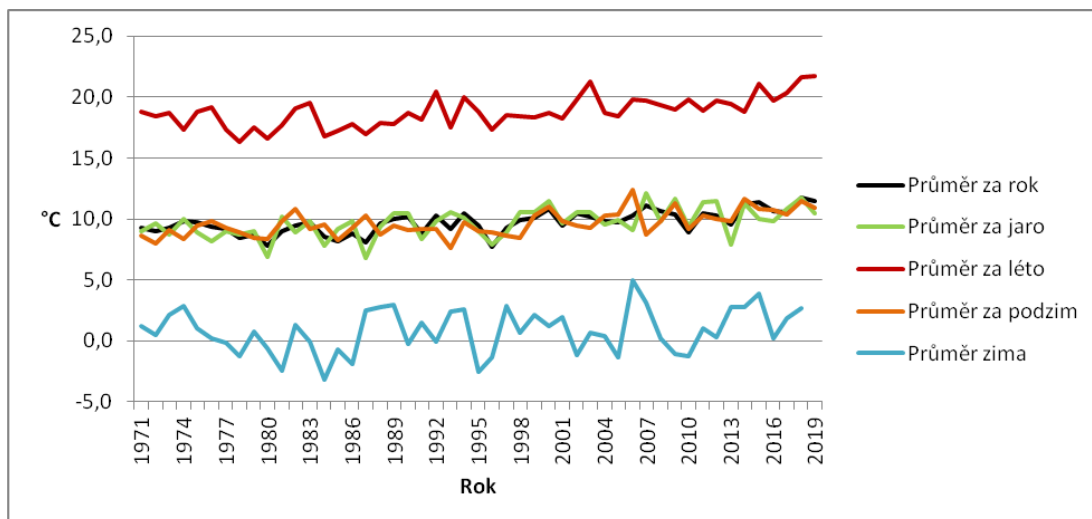
Obrázky 7, 8 a 9 a tab. 1 znázorňují průměrné teploty a jejich variabilitu za jednotlivá roční období na jednotlivých stanicích ošetřené o vliv rozdílné nadmořské výšky. Lineární spojnice trendů jsou pro lepší přehlednost znázorněny v obr. 10 až 14. Tabulky 2 a 3 znázorňují rovnice regresních modelů a jejich koeficienty determinace.



Obr. 7: Vývoj průměrné teploty v letech 1971-2019 na stanici Klementinum.



Obr. 8: Vývoj průměrné teploty v letech 1971-2019 na stanici Brandýs.

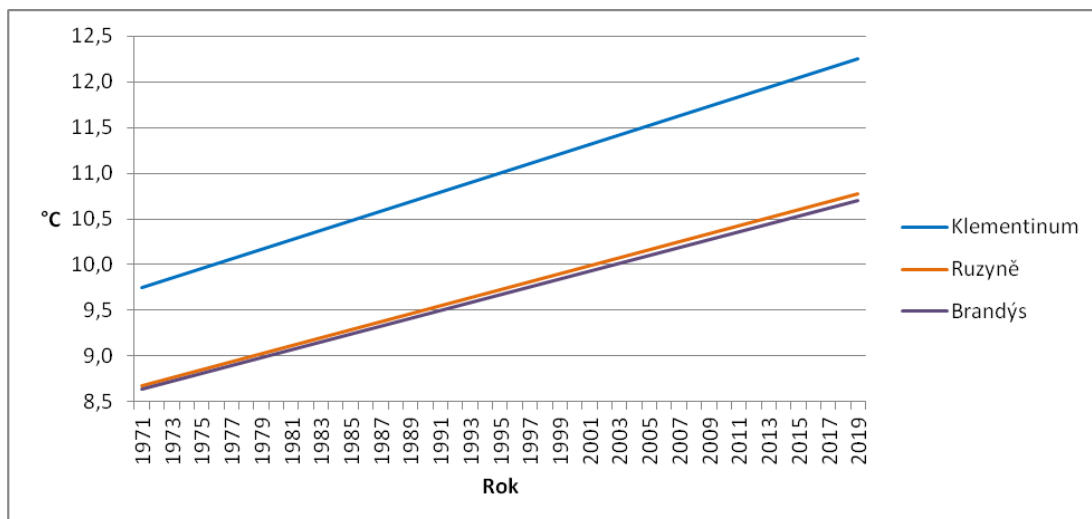


Obr. 9: Vývoj průměrné teploty v letech 1971-2019 na stanici Ruzyně.

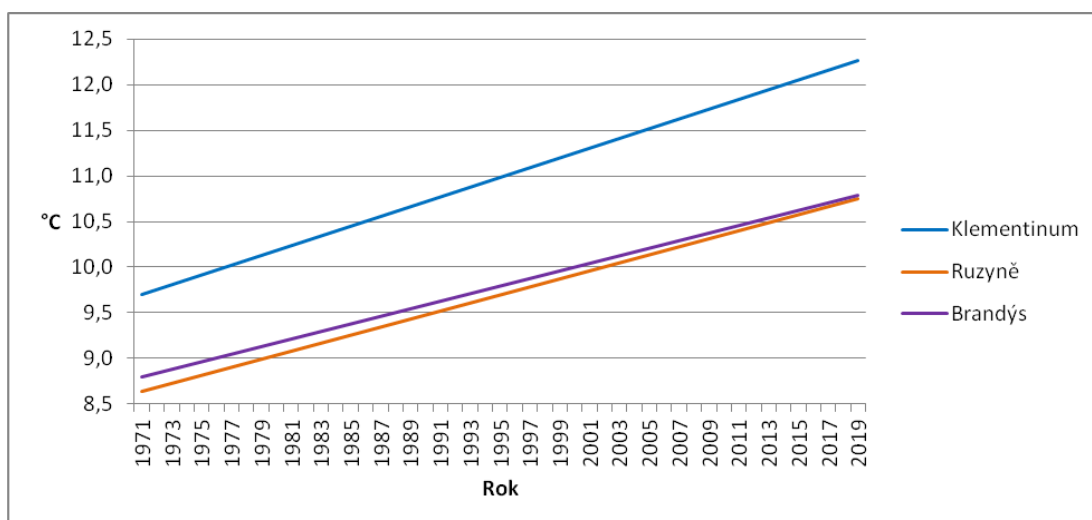
Tab. 1: Průměrné teploty na jednotlivých stanicích za celý rok a roční období; veškeré hodnoty jsou uvedeny ve °C a ošetřeny od vlivu nadmořské výšky.

	rok	jaro	léto	podzim	zima
Stanice	leden - prosinec	březen - květen	červen - srpen	září - listopad	prosinec - únor
Klementinum	11,0	11,0	20,1	10,8	2,1
Ruzyně	9,7	9,7	18,8	9,6	0,8
Brandýs	9,7	9,8	18,8	9,4	0,7

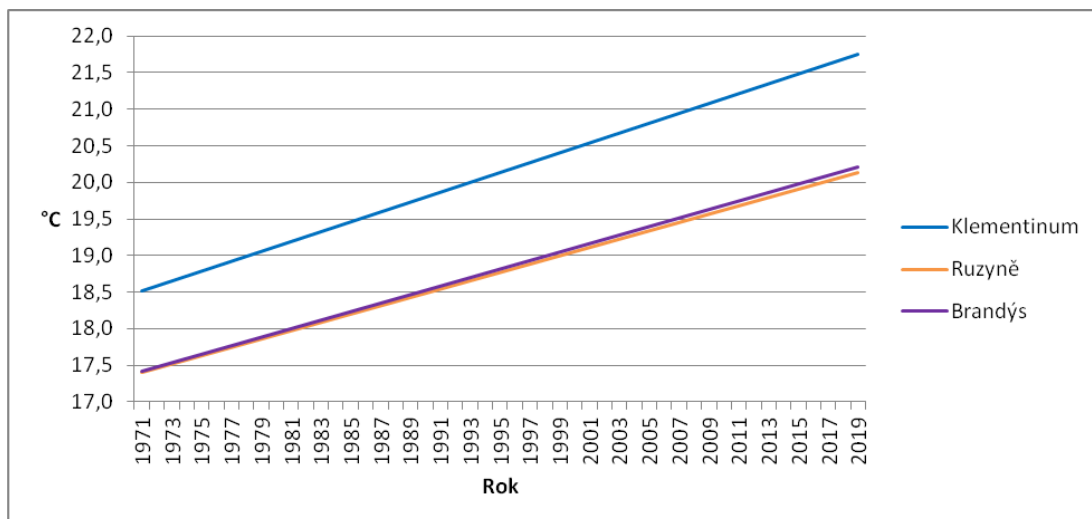
Z obrázků 7 až 9 a tab. 1 lze vyčíst, že stanice Klementinum byla nejteplejší stanicí ve všech ročních obdobích. Nejvyšší měsíční průměrné teploty dosahovala v letním období, a to 20,1°C. Na jaře pak byla nejchladnější stanicí Ruzyně, v létě byly nejchladnějšími stanicemi Brandýs i Ruzyně, na podzim byla nejnižší teplota na stanici Brandýs, v zimním období byla opět nejvíce chladnou stanicí Brandýs s naměřenou nejnižší průměrnou měsíční teplotou 0,7 °C. Teplotní rozdíly mezi stanicemi Brandýs a Ruzyně jsou po ošetření vlivu nadmořské výšky minimální, což podporuje uvažování stanice Ruzyně jako venkovské.



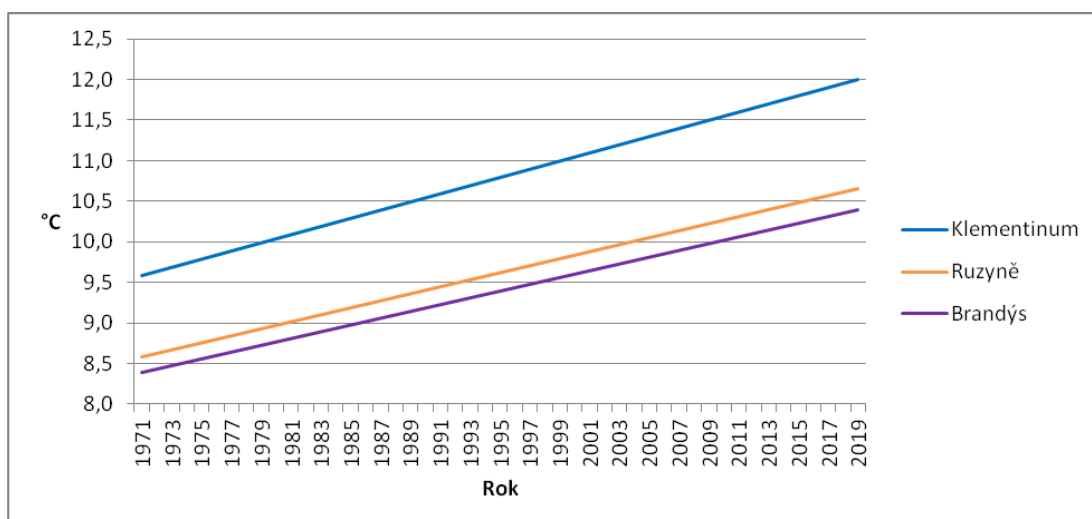
Obr. 10: Lineární trendy průměrné teploty za celý rok 1971-2019 na jednotlivých stanicích (k obrázkům 7-9).



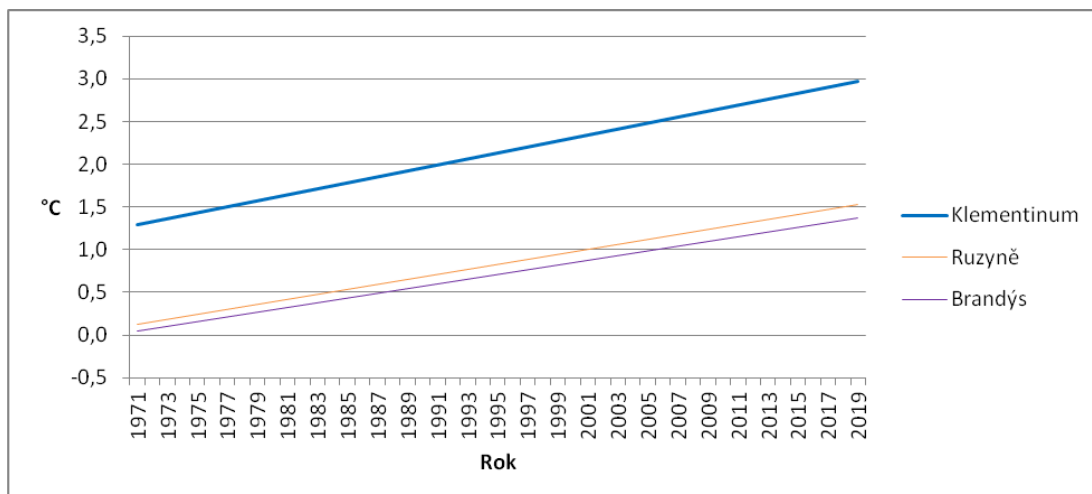
Obr. 11: Lineární trendy průměrné teploty za jaro 1971-2019 na jednotlivých stanicích (k obrázkům 7-9).



Obr. 12: Lineární trendy průměrné teploty za léto 1971-2019 na jednotlivých stanicích (k obrázkům 7-9).



Obr. 13: Lineární trendy průměrné teploty za podzim 1971-2019 na jednotlivých stanicích (k obrázkům 7-9).



Obr. 14: Lineární trendy průměrné teploty za zimu 1971-2019 na jednotlivých stanicích (k obrázkům 7-9).

Tab. 2: Rovnice regresních přímek k obrázkům 10 až 14.

Stanice	Jaro	Léto	Podzim	Zima	rok
Klementinum	$y = 0,0533x + 9,6476$	$y = 0,0674x + 18,446$	$y = 0,0503x + 9,5314$	$y = 0,0351x + 1,2569$	$y = 0,0521x + 9,7015$
Ruzyně	$y = 0,0441x + 8,5898$	$y = 0,057x + 17,341$	$y = 0,043x + 8,5436$	$y = 0,0291x + 0,1$	$y = 0,0438x + 8,6256$
Brandýs	$y = 0,0413x + 8,7609$	$y = 0,0584x + 17,355$	$y = 0,0417x + 8,3487$	$y = 0,0276x + 0,0168$	$y = 0,0429x + 8,6005$

Tab. 3: Koeficienty determinace k obrázkům 10 až 14.

Stanice	jaro	léto	podzim	zima	rok
Klementinum	$R^2 = 0,37$	$R^2 = 0,56$	$R^2 = 0,46$	$R^2 = 0,08$	$R^2 = 0,56$
Ruzyně	$R^2 = 0,27$	$R^2 = 0,41$	$R^2 = 0,36$	$R^2 = 0,05$	$R^2 = 0,44$
Brandýs	$R^2 = 0,27$	$R^2 = 0,49$	$R^2 = 0,38$	$R^2 = 0,05$	$R^2 = 0,46$

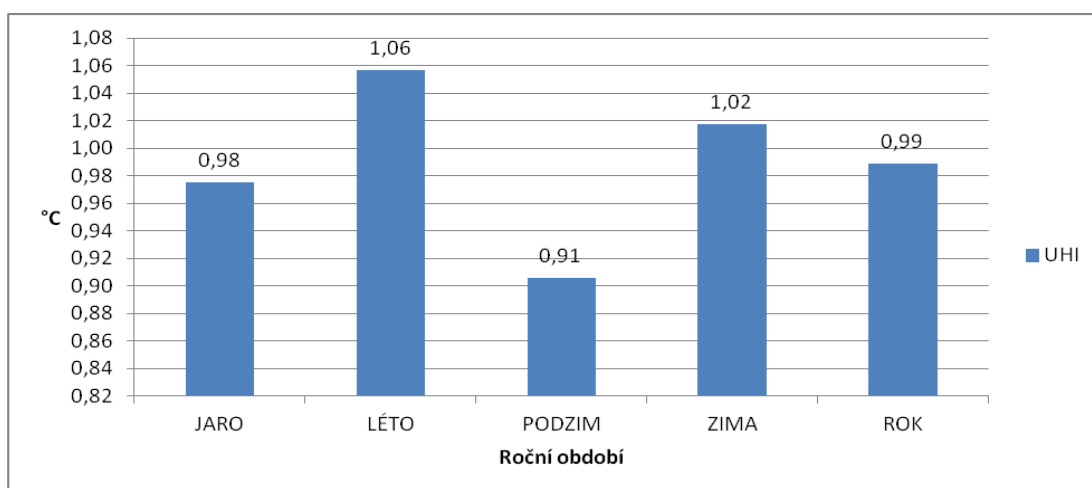
Obrázky 10 až 14 uvádí lineární spojnice trendu sledovaných hodnot a tabulky 2 a 3 rovnice regresních přímek s koeficienty determinace. Z grafů na obrázcích vyplývá, že ve sledovaném období 1971-2019 se nejrychleji oteplovala stanice Klementinum tempem 0,52 °C za 10 let. Stanice Ruzyně a Brandýs se oteplovaly pomaleji (0,44 °C za 10 let, resp. 0,43 °C za 10 let). Stanice Klementinum se oteplovala nejrychleji ve všech ročních obdobích. Stanice Ruzyně a Brandýs vykazují v průměru téměř identické tempo růstu teploty, což opět potvrzuje naše uvažování stanice Ruzyně jako venkovské.

Z hlediska jednotlivých ročních období bylo nejrychlejší tempo růstu teploty na všech sledovaných stanicích pozorováno v létě, a to přibližně o 0,6 °C za 10 let (tabulka 2). Naopak nejpomalejší tempo růstu bylo pozorováno v zimě, a to

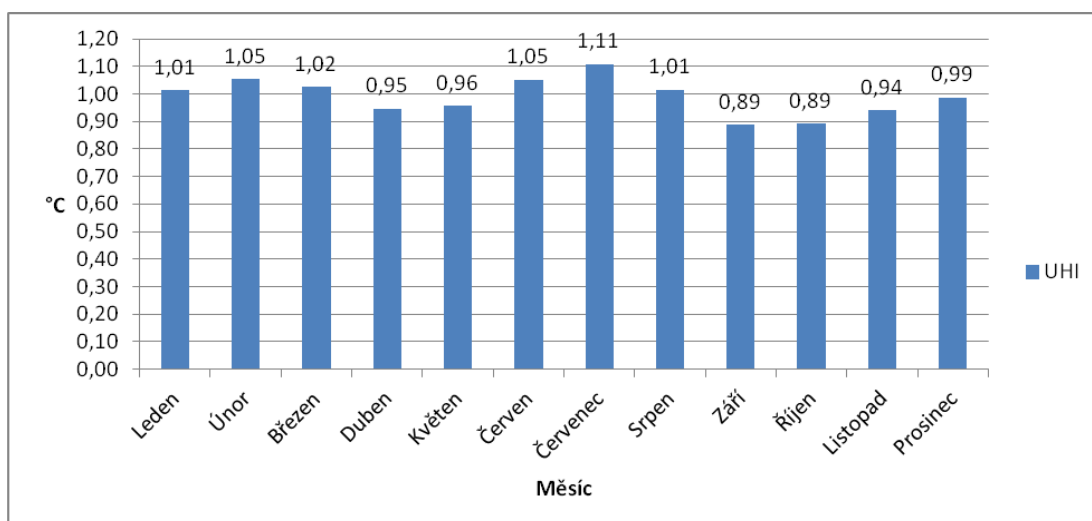
v průměru o 0,3 °C za 10 let (tabulka 2). Nízké hodnoty koeficientu determinace pro zimní trendy (tabulka 3) jsou pravděpodobně způsobeny větším kolísáním průměrné teploty v zimních měsících mezi jednotlivými roky.

5.2 Roční chod intenzity městského tepelného ostrova Prahy

Na obrázcích (obr. 15 a 16) se sloupcovými grafy vidíme, že intenzita UHI byla nejvyšší v letním období, a to s průměrnou hodnotou 1,06 °C a nejnižší na podzim s průměrnou hodnotou 0,91 °C. Dále pak můžeme přesněji určit, že nejvyšší intenzita UHI byla v měsíci červenci (1,11 °C) a nejnižší shodně v září a říjnu (0,89 °C).



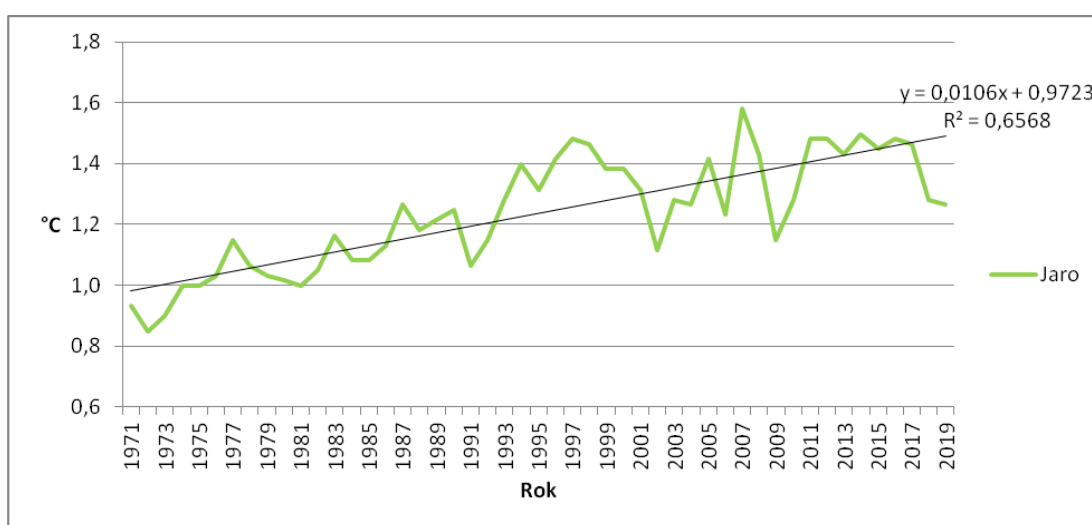
Obr. 15: Průměrná intenzita UHI Prahy v ročních obdobích v letech 1971-2019.



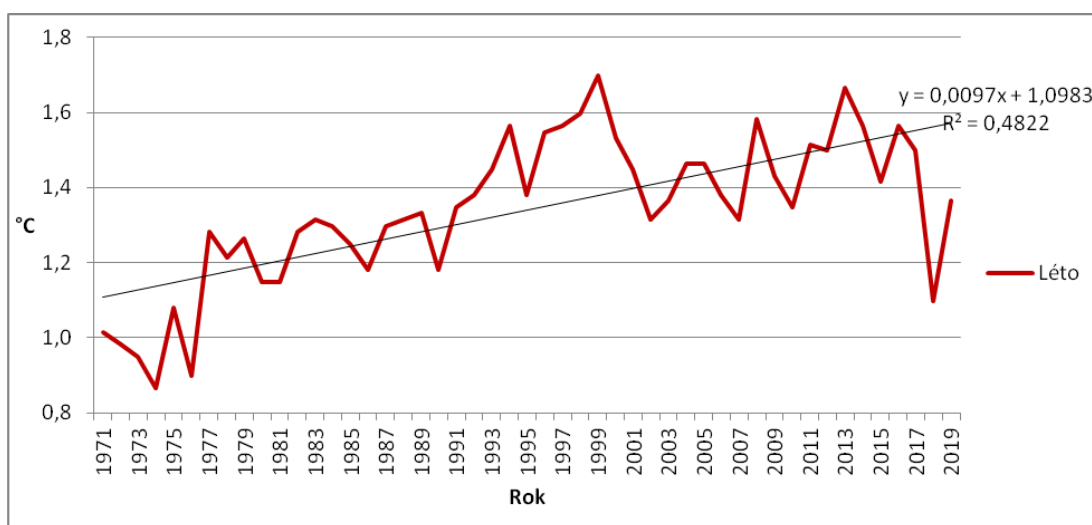
Obr. 16: Průměrná roční intenzita UHI Prahy 1971-2019 v jednotlivých měsících.

5.3 Vývoj intenzity městského tepelného ostrova Prahy

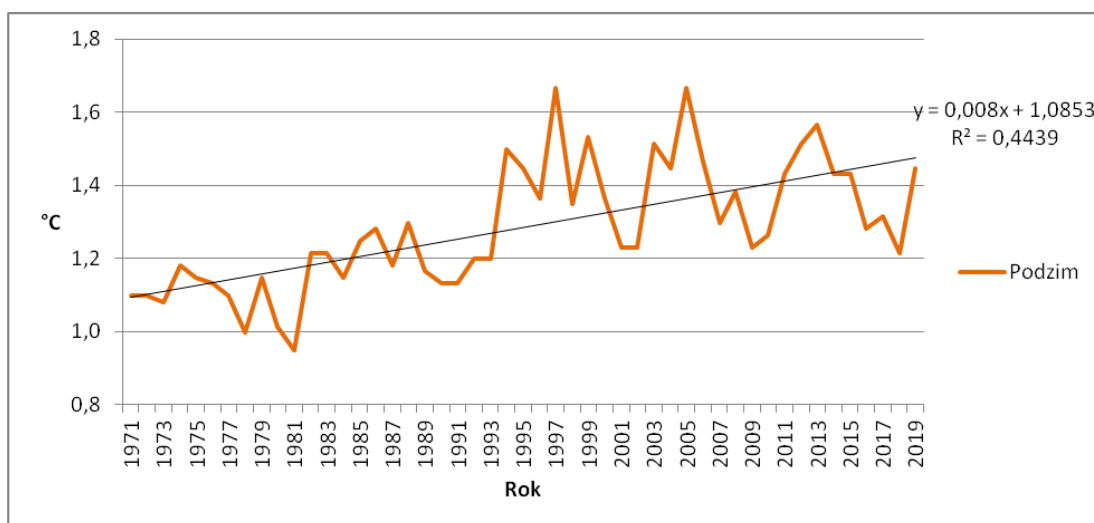
Obrázky (17 až 20) s grafy znázorňují vývoj intenzity UHI v jednotlivých ročních obdobích a obsahují i rovnici lineárního trendu s koeficienty determinace. Intenzita UHI roste nejrychleji na jaře (obr. 17) tempem 0,11 °C za 10 let a v létě (obr. 18) s tempem 0,10 °C za 10 let. Tempo růstu na podzim (obr. 19) bylo 0,08 °C za 10 let. Nejpomaleji rostla intenzita UHI v zimním období (obr. 20), a to o 0,07 °C za 10 let.



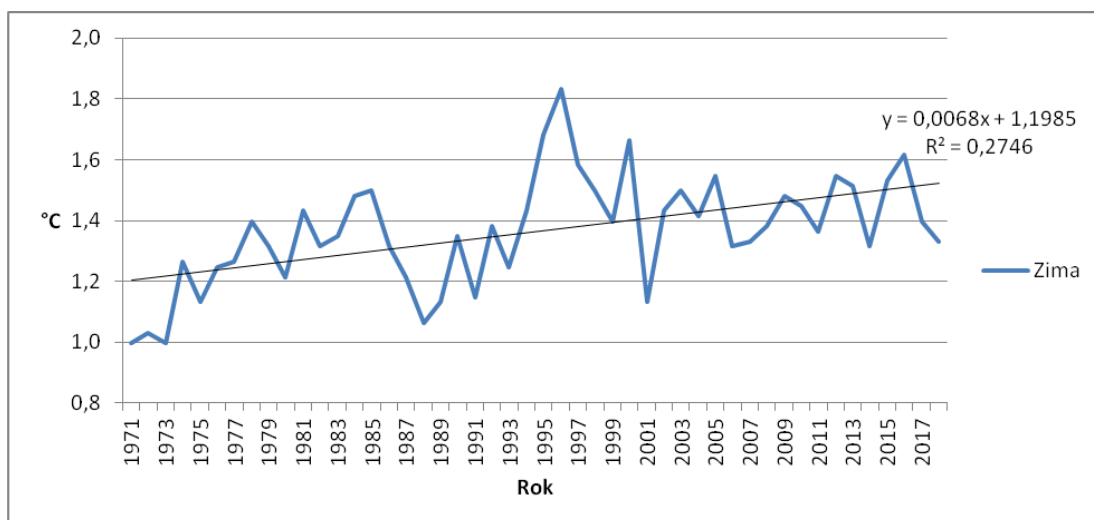
Obr. 17: Průměrná intenzita UHI Prahy na jaře za období 1971-2019.



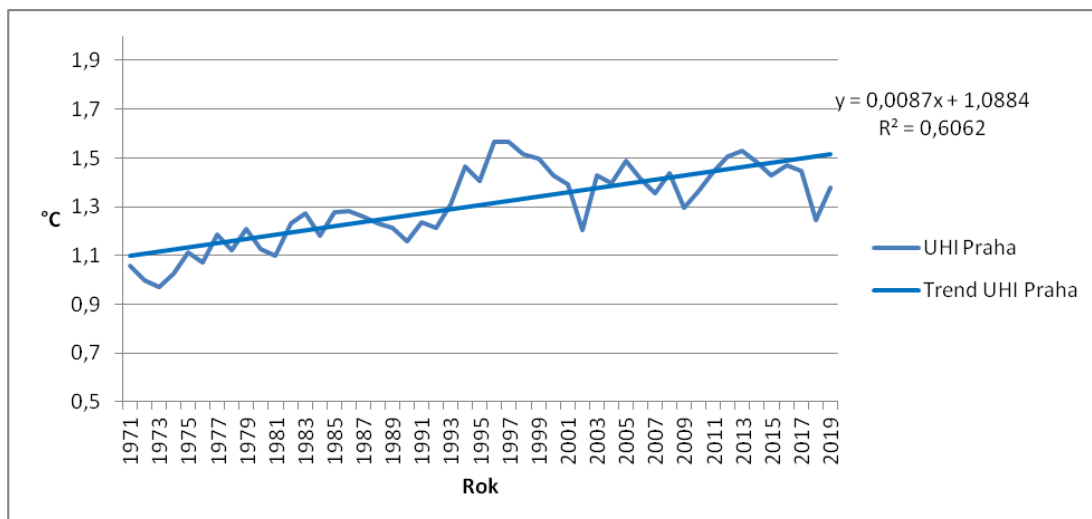
Obr. 18: Průměrná intenzita UHI Prahy v létě za období 1971-2019.



Obr. 19: Průměrná intenzita UHI Prahy na podzim za období 1971-2019.

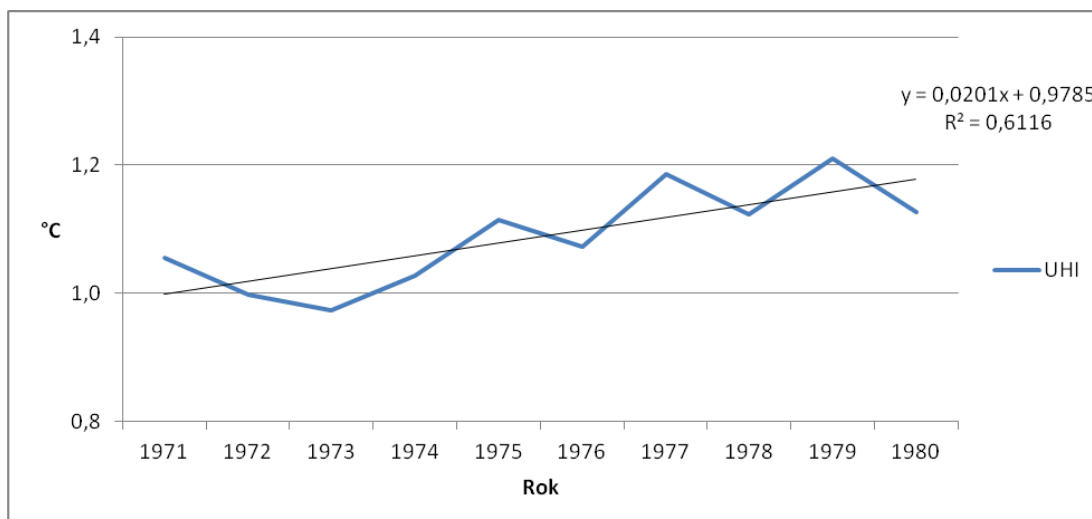


Obr. 20: Průměrná intenzita UHI Prahy v zimě za období 1971-2019.

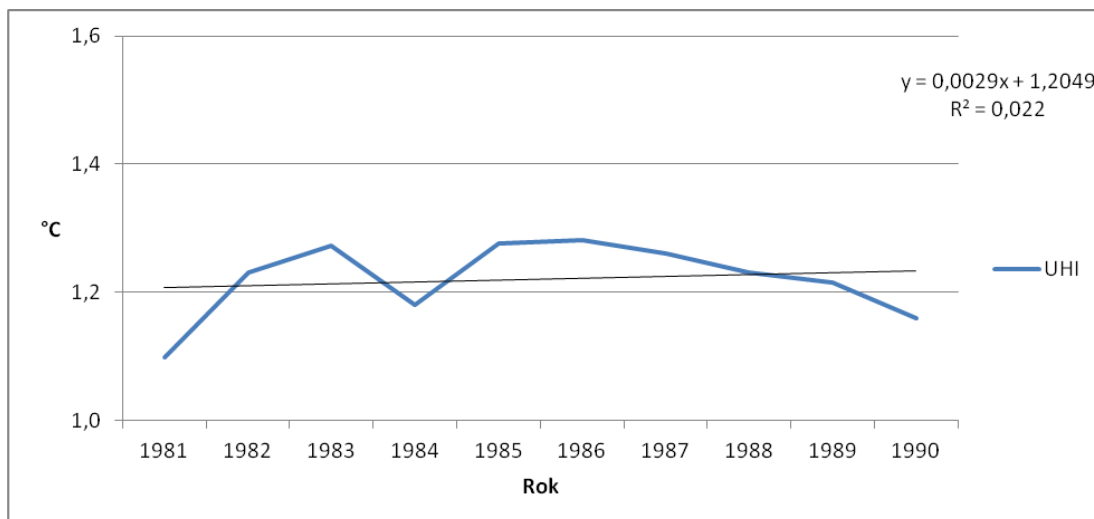


Obr. 21: Průměrná roční intenzita UHI v Praze 1971-2019 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace.

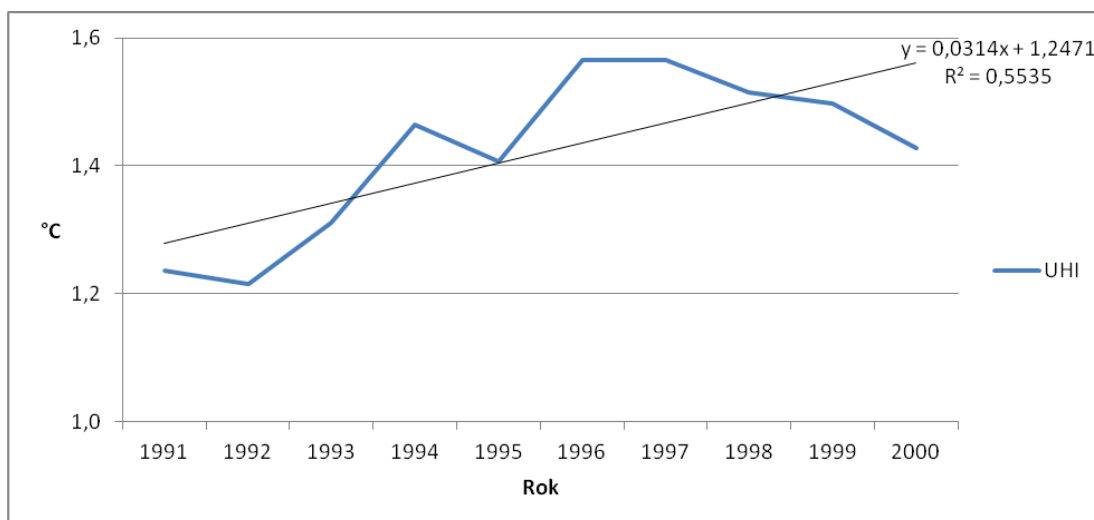
Obrázek 21 (graf) ukazuje vývoj průměrné roční intenzity UHI v Praze. Přestože lineární trend ukazuje setrvalý nárůst o 0,09 °C za 10 let, z křivky vývoje je patrné, že intenzita UHI rostla zejména do poloviny 90. let. Pro bližší pochopení průběhu trendu intenzity UHI bylo celé sledované období rozděleno do jednotlivých dekad.



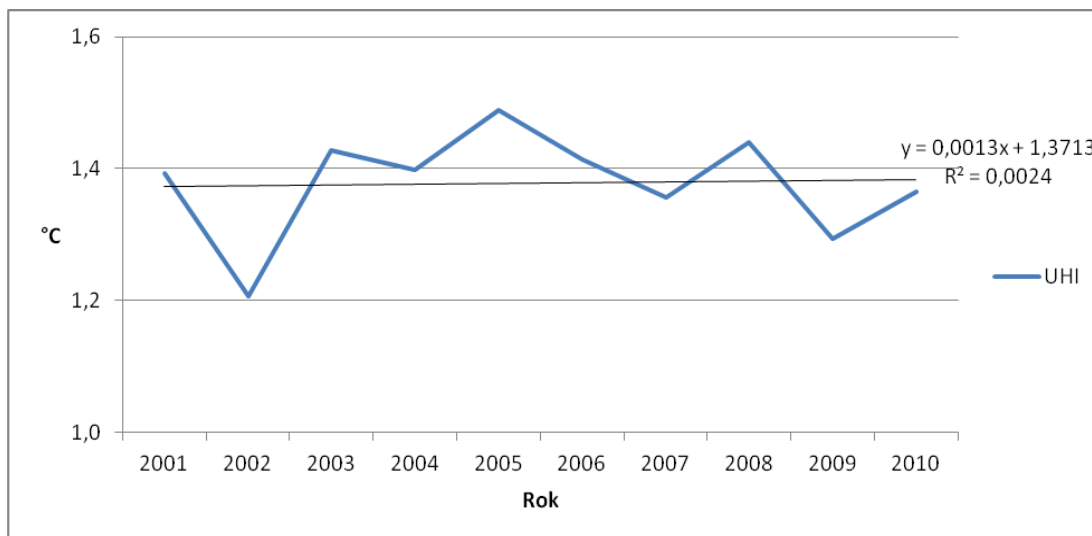
Obr. 22: Průměrná roční intenzita UHI v Praze 1971-1980 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace.



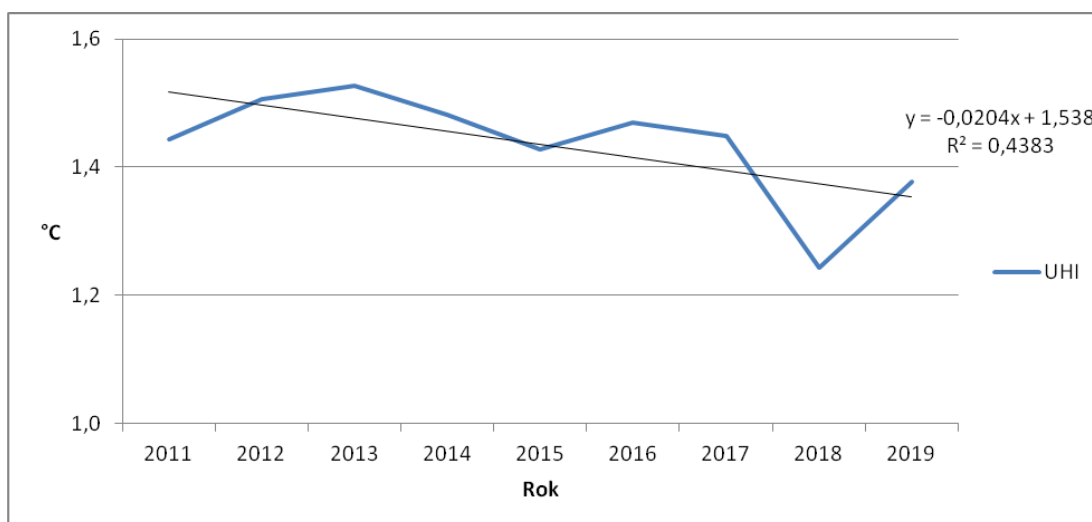
Obr. 23: Průměrná roční intenzita UHI v Praze 1981-1990 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace.



Obr. 24: Průměrná roční intenzita UHI v Praze 1991-2000 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace.



Obr. 25: Průměrná roční intenzita UHI v Praze 2001-2010 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace.



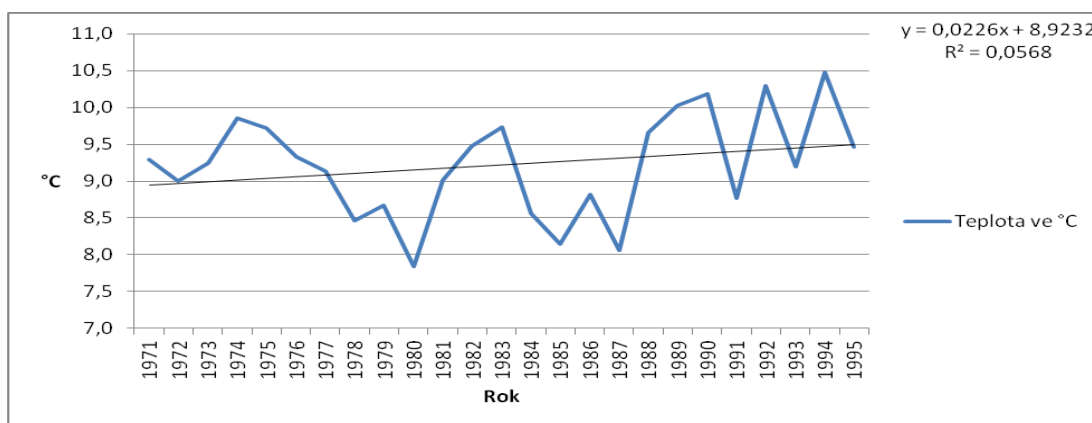
Obr. 26: Průměrná roční intenzita UHI v Praze 2011-2019 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace.

Obrázky 22 až 26 znázorňují trendy vývoje průměrné roční intenzity UHI Prahy v jednotlivých dekádách sledovaného období. Je patrné, že intenzita UHI měla nejvýrazněji rostoucí trend v 70. letech (0,20 °C za 10 let s $R^2 = 0,61$) a 90. letech (0,31 °C za 10 let s $R^2 = 0,55$). Naopak v 80. letech (0,03 °C za 10 let s $R^2 = 0,02$) a nultých (2001-2010) letech (0,01 °C za 10 let s $R^2 = 0,01$) byl nárůst intenzity UHI zanedbatelný.

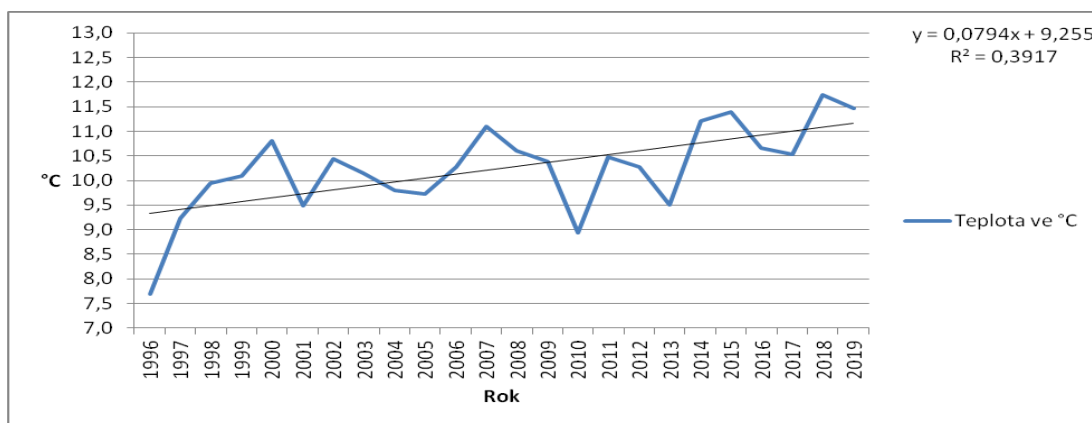
Nejprekvapivější výsledek byl pozorován v poslední dekádě sledovaného období 2011-2019, kdy měla intenzita UHI dokonce klesající trend (-0,20 °C/10 let).

Hlavním důvodem stagnace a poklesu intenzity UHI v posledních dekádách bylo pravděpodobně zrychlení nárůstu teploty na venkovských stanicích.

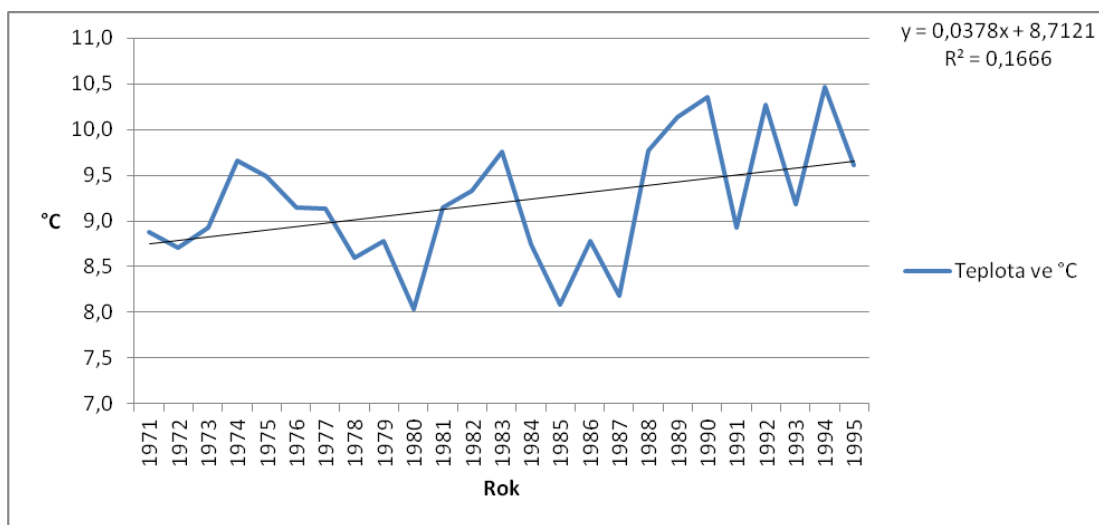
Pro ověření této hypotézy byly v následujících obrázcích 27 až 32 porovnány trendy vývoje průměrné roční teploty na jednotlivých stanicích v obdobích 1971-1995 a 1996-2019. Z obrázků vyplývá, že během prvního období se stanice Ruzyně (Obr. 27 a 28) oteplevala rychlostí 0,23 °C/10 let (obr. 27), zatímco v druhém o 0,79 °C/10 let (obr. 28). U stanice Brandýs (obr. 29 a 30) je situace obdobná – do poloviny 90. let se oteplevala rychlostí 0,39 °C/10 let (obr. 29) a od druhé poloviny 90. let o 0,73 °C/10 let (obr. 30). Pro porovnání stanice Klementinum (obr. 31 a 32) se do poloviny 90. let oteplevala průměrnou rychlostí 0,44 °C za 10 let (obr. 31) a od druhé poloviny již 0,73 °C za 10 let (obr. 32). Z analýzy vyplývá, že do první poloviny 90. let bylo tempo růstu teploty na stanici Klementinum nejrychlejší. Od druhé poloviny bylo stejné jako na stanici Brandýs a oproti stanici Ruzyně dokonce pomalejší.



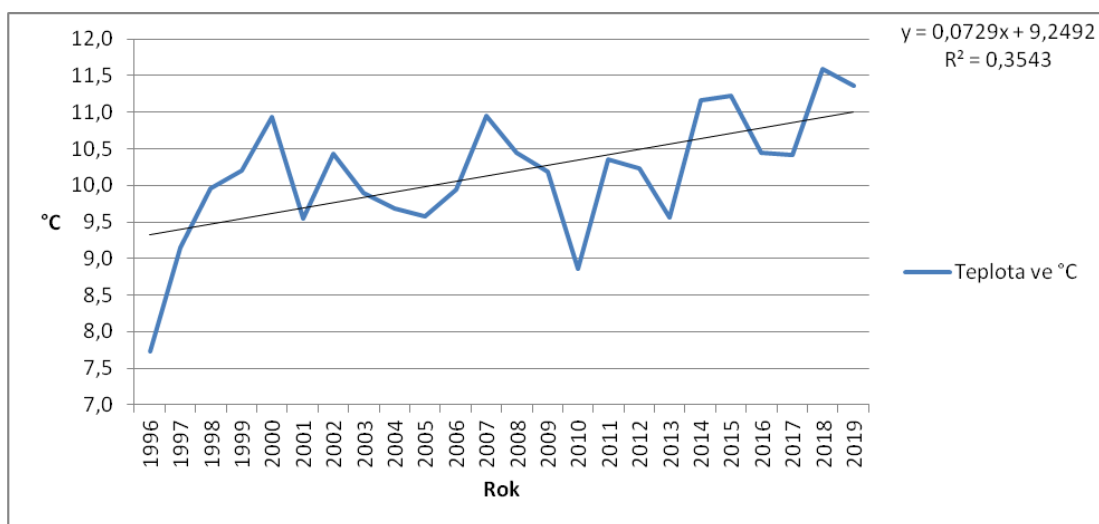
Obr. 27: Vývoj průměrné roční teploty v letech 1971-1995 na stanici Ruzyně.



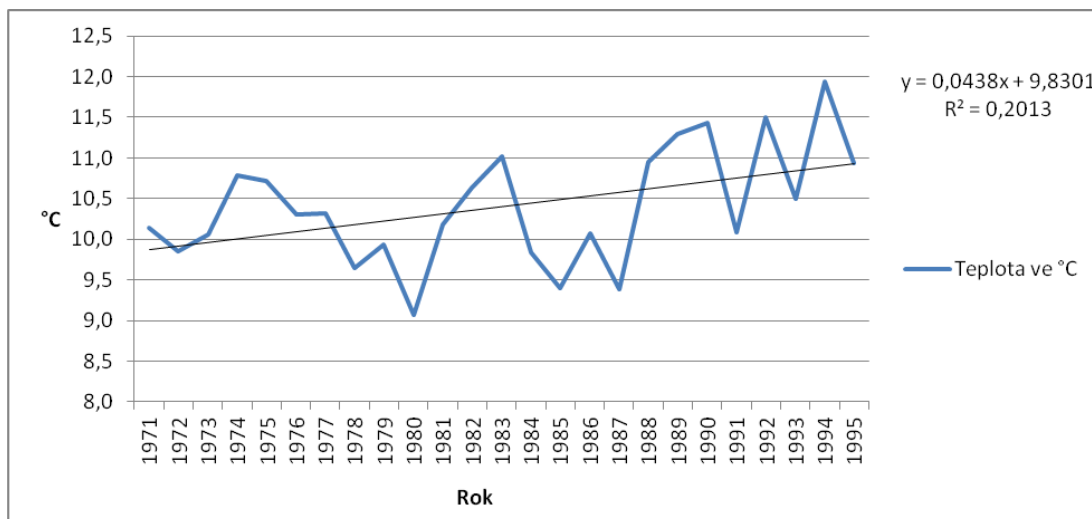
Obr. 28: Vývoj průměrné roční teploty v letech 1996-2019 na stanici Ruzyně.



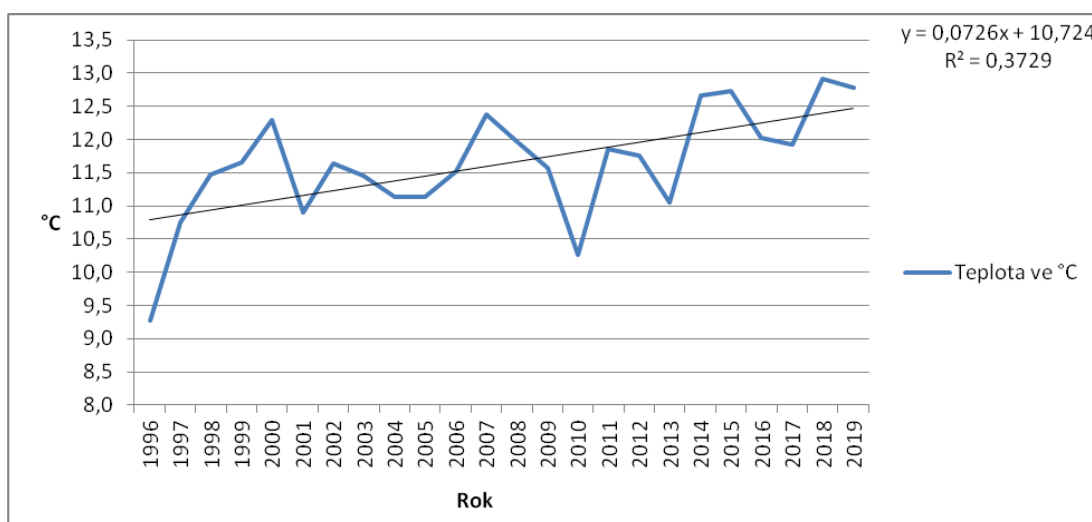
Obr. 29: Vývoj průměrné roční teploty v letech 1971-1995 na stanici Brandýs.



Obr. 30: Vývoj průměrné roční teploty v letech 1996-2019 na stanici Brandýs.



Obr. 31: Vývoj průměrné roční teploty v letech 1971-1995 na stanici Klementinum.



Obr. 32: Vývoj průměrné roční teploty v letech 1996-2019 na stanici Klementinum.

5.4 Shrnutí hlavních výsledku

Analýza průměrné měsíční teploty vzduchu na stanicích Praha Klementinum, Praha Ruzyně a Brandýs nad Labem Stará Boleslav v letech 1971-2019 prokázala, že Klementinum představuje nejteplejší stanici v každém ročním období každého roku za celou dobu pozorování, a to i při ošetření dat o vliv rozdílné nadmořské výšky. Intenzita pražského UHI dosahovala během let 1971 až 2019 nejvyšších hodnot v červenci, a to 1,11 °C, a naopak nejnižší v září a říjnu (0,89 °C).

Z hlediska vývoje za celé sledované období byl pozorován nárůst intenzity UHI Prahy tempem 0,09 °C za 10 let. Nejrychlejší růst intenzity byl zjištěn na jaře (0,11 °C za 10 let), zatímco nejpomalejší v zimě (0,07 °C za 10 let).

Po rozdělení křivky intenzity UHI do jednotlivých dekád bylo zjištěno, že v předposlední dekádě (2001 – 2010) sledovaného období došlo ke zpomalení růstu intenzity UHI $0,01^{\circ}\text{C}$ za 10 let (obr. 25) a v dekádě poslední (2011 – 2019) k jeho úplnému zastavení $-0,20^{\circ}\text{C}$ za 10 let (obr. 26).

6 Diskuse

Jak mnohé výzkumy, včetně této analýzy, potvrdily, růst a rozvoj města s sebou obvykle přinášejí zesilování tepelného ostrova. Poprvé se toto téma dostalo do popředí zájmu před téměř 200 lety (Howard, 1833). Na našem území se problematice dlouhodobých změn intenzity tepelného ostrova v 90. letech 20. století věnovali Brázdil a Budíková (1999), kteří zkoumali lineární trendy rozdílu teploty mezi stanicí Praha – Klementinum a 17 okolními stanicemi. Na základě svého výzkumu zjistili významný růst intenzity pražského tepelného ostrova 1922–1995 (celoročně i pro všechna roční období kromě léta). Největší nárůst intenzity byl zjištěn v zimě a na jaře ($0,06^{\circ}\text{C}/10$ let), nejmenší v létě. Tento výzkum částečně koresponduje i s výsledky této bakalářské práce, které potvrdily, že největší nárůst intenzity UHI Prahy je také na jaře, a to s tempem růstu $0,11^{\circ}\text{C}$ za 10 let. Naopak v zimě byl pozorován nejmenší nárůst intenzity $0,07^{\circ}\text{C}$ za 10 let.

Dalšími odborníky zabývajícími se intenzitou UHI v Praze byli Beranová a Huth (2003), kteří kvantifikovali intenzitu městského tepelného ostrova pomocí rozdílu denní minimální teploty vzduchu mezi stanicí Praha – Klementinum (městská stanice) a venkovskými stanicemi: Doksany, Brandýs nad Labem a Ondřejov. Jejich výzkum se soustředil na zkoumání chování této městské stanice v letech 1961–1990 v závislosti na cirkulaci atmosféry. Nejvyšší intenzita pak byla pozorována v létě, minimální v podzimních měsících, což koresponduje s výsledky této bakalářské práce. Trend růstu intenzity UHI činil v ročním průměru $1,2^{\circ}\text{C}$ za století. Na rozdíl od našeho výzkumu byly sledovány denní průměrné teploty, avšak stejně jako v našem případě byl potvrzen trend nárůstu intenzity UHI do roku 1990. Tento trend je však podle výsledků této práce od druhé poloviny 90. let stagnující, resp. mírně klesající kvůli narůstající teplotě na venkovských stanicích.

Skalák a kol. (2015) použil k identifikaci teplotních poměrů v Praze v letech 1961–2013 data o denní průměrné, minimální a maximální teplotě z profesionálních

synoptických stanic Praha – Ruzyně, Praha – Karlov, Praha – Libuš a klimatologické stanice Praha – Klementinum. Venkovské prostředí bylo reprezentováno stanicemi Brandýs nad Labem – Stará Boleslav, Dobřichovice a Tuhaň. Analýza zjistila, že nejteplejší stanicí je Praha – Klementinum (centrum města) a celkově nejchladnější Praha – Ruzyně. Dále byl na všech sledovaných pražských stanicích v letech 1961-1990 pozorován nárůst teploty až o 0,6 °C za desetiletí. V případě srovnání období 1961-1990 a 1991-2013 došlo na stejných stanicích v období 1991-2013 ke zvýšení měsíční teploty až o 1,5 °C. Za stejné období prokázala studie nárůst intenzity UHI o více než 0,5 až 0,7 °C; intenzita UHI byla vypočtena jako rozdíl teploty vzduchu stanice Klementinum a průměrnou teplotou vzduchu tří venkovských stanic Karlov, Ruzyně a Libuš. Nutno podotknout, že studie neuvažovala vliv rozdílné nadmořské výšky mezi stanicemi.

Všechny uvedené studie, včetně výsledků této bakalářské práce, potvrzují, že z dlouhodobého hlediska dochází k nárůstu intenzity UHI v Praze. Lze očekávat, že tento trend bude pokračovat vzhledem k pokračujícímu oteplování klimatu, a to zejména v letních měsících. Klesající rozdíl v teplotách mezi Klementinem a venkovskými stanicemi v poslední dekádě tento trend spíše potvrzuje a naznačuje zvyšující se vliv pražské aglomerace na své okolí.

Dlouhodobý nárůst teploty v Praze i jejím okolí má za důsledek zvyšující se počet tropických dní, které vykazují denní maxima přes 30 °C a tropických nocí, kde teplota neklesne pod 20 °C (ČMeS, 2017). Intenzita městského tepelného ostrova se projevuje samozřejmě i v zimním období, kdy klesá počet ledových dní, respektive mrazových dní³.

Proto je zapotřebí vyvíjet opatření, která vedou ke snížení účinku tepelného ostrova (ČMeS, 2017; Ekolisty, 2014; Oke 2017).

³ Pozn. mrazový den je mezinárodně standardizovaný charakteristický den, během něhož min. teplota vzduchu klesla pod 0,0 °C, takže alespoň část dne se vyskytl mráz; podmnožinou je ledový den – mezinárodně standardizovaný charakteristický den, v němž maximální teplota vzduchu nedosáhla hodnoty 0,0 °C, panoval tedy celodenní mráz (ČMeS, 2017).

7 Závěr

Cílem práce bylo analyzovat vývoj intenzity městského tepelného ostrova v Praze, určené rozdílem teplot na stanici Praha – Klementinum se dvěma venkovskými stanicemi (Praha – Ruzyně Brandýs nad Labem – Stará Boleslav), za období 1971-2019. Teplotní řady byly ošetřeny o vliv nadmořské výšky. I přesto analýza prokázala nižší průměrné teploty u venkovských stanic (Praha – Ruzyně a Brandýs nad Labem – Stará Boleslav) než u městské stanice Praha – Klementinum. Na stanici Praha – Klementinum byl také pozorován nejrychlejší trend oteplování v letech 1971–2019 (0,52 °C za 10 let) ve srovnání se stanicemi Praha – Ruzyně (0,44 °C za 10 let) a Brandýs nad Labem – Stará Boleslav (0,43 °C za 10 let). Intenzita tepelného ostrova Prahy nabývá, nejvyšších hodnot v červenci (1,11 °C), nejnižší pak v září a říjnu (0,89 °C). Průměrný roční nárůst intenzity městského tepelného ostrova během sledovaného období činil 0,09 °C za 10 let. Při detailnější analýze byl však pozorován mírně klesající trend od poloviny 90. let, což bylo způsobeno zrychleným oteplováním venkovských stanic.

Výsledky práce potvrzují dosavadní poznatky, že v Praze stejně jako v obdobných metropolích za posledních několik desetiletí došlo k intenzifikaci vlivu městského tepelného ostrova.

Ve městech vyspělých i rozvojových států se rok od roku koncentruje stále více obyvatel, z čehož plyne celá řada problémů a výzev. Proto získávají na stále větší důležitosti studie a projekty zabývající se problematikou městského klimatu, městského tepelného ostrova, jeho příčinami a následky. Tato témata se dostávají do popředí zájmu klimatologů, urbanistů, architektů, odborníků na územní plánování i zastupitelů měst, jejichž cílem je v zájmu zachování zdraví svých občanů tuto problematiku efektivně řešit.

8 Seznam použitých zdrojů

Literární zdroje

Akbari H. a kol, 2008: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies (Urban Heat Island Basics). U. S. Environmental Protection Agency, 22. s.

Acot P., 2005: Historie a změny klimatu. Karolinum, Praha, 240 s. ISBN 80-246-0869-3.

Arnfield A. J., 2003: Two decades of urban climate research: review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23, 4. 1, s. 1-26.

Barber B., R., 2017: Cool cities: urban sovereignty and the fix for global warming. Yale, 224 s. ISBN 978-0-300-22420-7.

Barros V., 2006: Globální změna klimatu. MF, Praha, 168 s. ISBN 80-204-1356-1.

Beranová R., Huth, R., 2003: Pražský tepelný ostrov za různých synoptických podmínek. *Meteorologické zprávy*, 56, s. 137–142. ISSN 1352-2310.

Berdahl P., Bretz, S., 1997: Preliminary Survey of the Solar Reflectance of Cool Roofing Materials. *Energy and Buildings*, 25:149-158.

Brázdil R., Budíková, M., 1999: An urban bias air temperature fluctuations at the Klementinum. Prague, The Czech Republic. *Atmospheric Environment*. Vol. 33. s 4211-4217. ISSN 1352-2310.

Burroughs W. J., Crowder, B., Robertson, T. a kol., 2003: Počasí. Svojtka, Praha, 288 s. ISBN 80-7237-747-7.

Crewe, K., Brazel, A., Middel, A., 2016: Desert New Urbanism: testing for comfort in downtown Tempe Arizona. *Journal of Urban Design*, 2016 vol. 21, No. 6, s. 746–763,

Červený J. a kol, 1984: Podnebí a vodní režim ČSSR. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 416 s. ISBN 07-984-84.

Dobrovolný P. a kol., 2012: Klima Brna. Víceúrovňová analýza městského klimatu. Masarykova univerzita, Brno, 200 s. ISBN 978-80-210-6029-6. s. 14.

Dobrovolný P, 2013: The surface urban heat island in the city of Brno (Czech Republic) derived from land surface temperatures and selected reasons for its spatial variability.

Geletič, J., Lehnert, M., Dobrovolný, P., 2016: Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities. Remote Sensing, 8, MU, Brno.

Graven G., 2012: Hrozí nám globální oteplování? Průvodce inteligentního laika džunglí veřejné debaty. Prostor, Praha, 252 s., ISBN 978-80-7260-259-9.

Huszár, P. a kol., 2014: Regional climate model assessment of the urban land-surface forcing over central Europe, Atmospheric Chemistry and Physics, 14, s. 12393-12413.

Landsberg, E. H., 1981: The Urban Climate. Academic Press, New York, ISBN 987-654-321, 277 s.

Lapka, M., Cudlíková, E., 2006: Globální klimatické změny a prvky globálního vědomí. Život. Prostor, roč. 40, č. 6, s. 298–302.

Li, D., Weilin, L., Ridgen, A. J., 2019: Urban heat island: Aerodynamics or imperviousness? Science Advances, vol. 5, no. 4. s. 1-4.

Marek M., V., 2011: Uhlík v ekosystémech České republiky v měnícím se klimatu. Academia, Praha, 256 s. ISBN 978-80-200-1876-2.

Metelka L., Tolasz, R., 2009: Klimatické změny: fakta bez mýtů. Univerzita Karlova, Praha, 35 s. ISBN 978-80-87076-13-2.

Mills G., 2007: Cities as agents of global change. International journal of climatology. Vol. 27, s. 1849-1857.

Oke T. R., 1997: Urban climates and global environmental change. In: Thompson RD, Perry A (eds.) Applied climatology. Routledge, London, pp 273–287.

Oke T. R., Mills, G., Christen, A. a Voogt, J., A., 2017: Urban Climates. Cambridge University Press, 525 p. ISBN 978-1-107-42953-6.

Oke T. R., 2002: Boundary layer Climates. Second edition. Taylor Francis. 464 pgs. ISBN 0-415-04319-0.

Skalák P., Žák, M., Zahradníček, P., Helman, K., 2015: Příspěvek projektu UHI k poznání klimatu Prahy. Meteorologické zprávy, 68, s. 18–23. ISSN 0026-1173.

Stehr N., Storch, v. H., 2014: Klima a společnost. Karolinum, Praha, 157 s. ISBN 978-80-246-2847-9.

Stewart I. D., 2011: A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. International Journal of Climatology, 31, č. 2. s. 200-217.

Voogt J.A., Oke, T. R. (2003). Thermal Remote Sensing of Urban Areas. *Remote Sensing of Environment*, 86: 370-384.

Vysoudil M., 2014: *Základy fyzické geografie 1 meteorologie a klimatologie*. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc. 134 s.

Internetové zdroje

Dobrovolný, P., Kýnová, A., 2012: Geografické faktory ovlivňující prostorovou diferenciaci povrchových teplot zastavěných ploch na příkladu města Brna. Geografický ústav, Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita (online) [cit. 2020. 01.20], dostupné z: http://gisak.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2012/sbornik/papers/dobrovolny.pdf.

ČHMÚ, ©2020: Měsíční a roční data dle zákona 123/1998 Sb. (online) [cit. 2020. 01.2], dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data/mesicni-data-dle-z.-123-1998-Sb>.

ČMeS, ©2017: Elektronický meteorologický slovník [cit. 2019. 19.20], dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/>.

Ekolisty, ©2014: Co je tepelný ostrov Prahy a proč ho zkoumat? (online) [cit. 2020. 02.20], dostupné z: <https://.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/PR-co-je-tepelny-ostrov-prahy-a-proc-ho-zkoumat#:~:text=Tepe%C3%BD%20ostrov%20je%20oblast%20m%C4%9Bsta,vzduch%20ve%20m%C4%9Bst%C4%9B%20v%C3%ADc%20oh%C5%99%C3%ADv%C3%A1>

Folberth, G. A., Butler, T. M., Collins, W. J., and Rumbold, S. T., 2015: Megacities and climate change – A brief overview, *Environ. Pollut.*, 203, 235–242, (online) [cit. 2020. 01.20], dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2014.09.004>, 2015.

Klimatická změna, ©2021 (online) [cit. 2020. 02.20], dostupné z: <https://www.klimatickazmena.cz/cs/>.

WHO – World Health Organization, ©2020: Urban population growth. (online) [cit. 2019.12.23], dostupné z: http://www.who.int/gho/urban_health/situation_trends/urban_population_growth_text/en/.

Wikipedie, ©2021: Praha (online) [cit. 2020. 02.20], dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Praha>.

Žák, M., Zahradníček, P., Skalák, P., 2013: Co víme o tepelném ostrovu Praha (online) [cit. 2020. 02.10], dostupné z: <http://docplayer.net/25760867-What-we-know-about-the-urban-heat-island-in-prague-michal-zak-pavel-zahradnicek-petr-skalak-czech-hydrometeorological-insitute.ht>

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma základních částí klimatického systému Země.	18
Obr. 2: Schéma městského metabolismu.	24
Obr. 3: Měřítko městského klimatu.	25
Obr. 4: Schéma energetické bilance objemu městské aktivní vrstvy.....	29
Obr. 5: Schéma vzniku místní cirkulace v důsledku rozdílných teplotních poměrů	34
Obr. 6: Znázornění nadmořské výšky města Praha	35
Obr. 7: Vývoj průměrné teploty v l. 1971 – 2019 na stanici Klementinum.....	38
Obr. 8: Vývoj průměrné teploty v l. 1971 – 2019 na stanici Brandýs	38
Obr. 9: Vývoj průměrné teploty v l. 1971 – 2019 na stanici Ruzyně.	39
Obr. 10: Lineární trendy prům. teploty za celý rok 1971-2019 na jednotliv. stanicích.	40
Obr. 11: Lineární trendy prům. teploty za jaro 1971-2019 na jednotliv. stanicích.	40
Obr. 12: Lineární trendy prům. teploty za léto 1971-2019 na jednotliv. stanicích	41
Obr. 13: Lineární trendy prům. teploty za podzim 1971-2019 na jednotliv. stanicích..	41
Obr. 14: Lineární trendy prům. teploty za zimu 1971-2019 na jednotliv. stanicích	42
Obr. 15: Prům. intenzita UHI Prahy v ročních obdobích v l. 1971-2019	43
Obr. 16: Prům. roční intenzita UHI Prahy 1971 – 2019 v jednotlivých měsících	43
Obr. 17: Průměrná intenzita UHI Prahy na jaře za období 1971-2019.....	44
Obr. 18: Průměrná intenzita UHI Prahy v létě za období 1971-2019	44
Obr. 19: Průměrná intenzita UHI Prahy na podzim za období 1971-2019.....	45
Obr. 20: Průměrná intenzita UHI Prahy v zimě za období 1971-2019.....	45
Obr. 21: Průměrná roční intenzita UHI v Praze 1971 – 2019 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace.....	46
Obr. 22: Průměrná roční intenzita UHI v Praze 1971 – 1980 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace.....	46
Obr. 23: Průměrná roční intenzita UHI v Praze v 1981 – 1990 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace.....	47

Obr. 24: Průměrná roční intenzita UHI v Praze 1991 – 2000 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace.....	47
Obr. 25: Průměrná roční intenzita UHI v Praze 2001- 2010 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace	48
Obr. 26: Průměrná roční intenzita UHI v Praze 2011- 2019 s rovnicí lineární regrese a koeficientem determinace.....	48
Obr. 27: Vývoj průměrné roční teploty v l. 1971 – 1995 na stanici Ruzyně.	49
Obr. 28: Vývoj průměrné roční teploty v l. 1996 – 2019 na stanici Ruzyně	49
Obr. 29: Vývoj průměrné roční teploty v l. 1971 – 1995 na stanici Brandýs	50
Obr. 30: Vývoj průměrné roční teploty v l. 1996 – 2019 na stanici Brandýs	50
Obr. 31: Vývoj průměrné roční teploty v l. 1971 – 1995 na stanici Klementinum.....	51
Obr. 32: Vývoj průměrné roční teploty v l. 1996 – 2019 na stanici Klementinum.....	51

Seznam tabulek

Tab. 1: Průmě. teploty na jednotlivých stanicích za celý rok a roční období	39
Tab. 2: Rovnice regresních přímk k obrázkům 10 až 14.....	42
Tab. 3: Koeficienty determinace k obrázkům 10 až 14	42