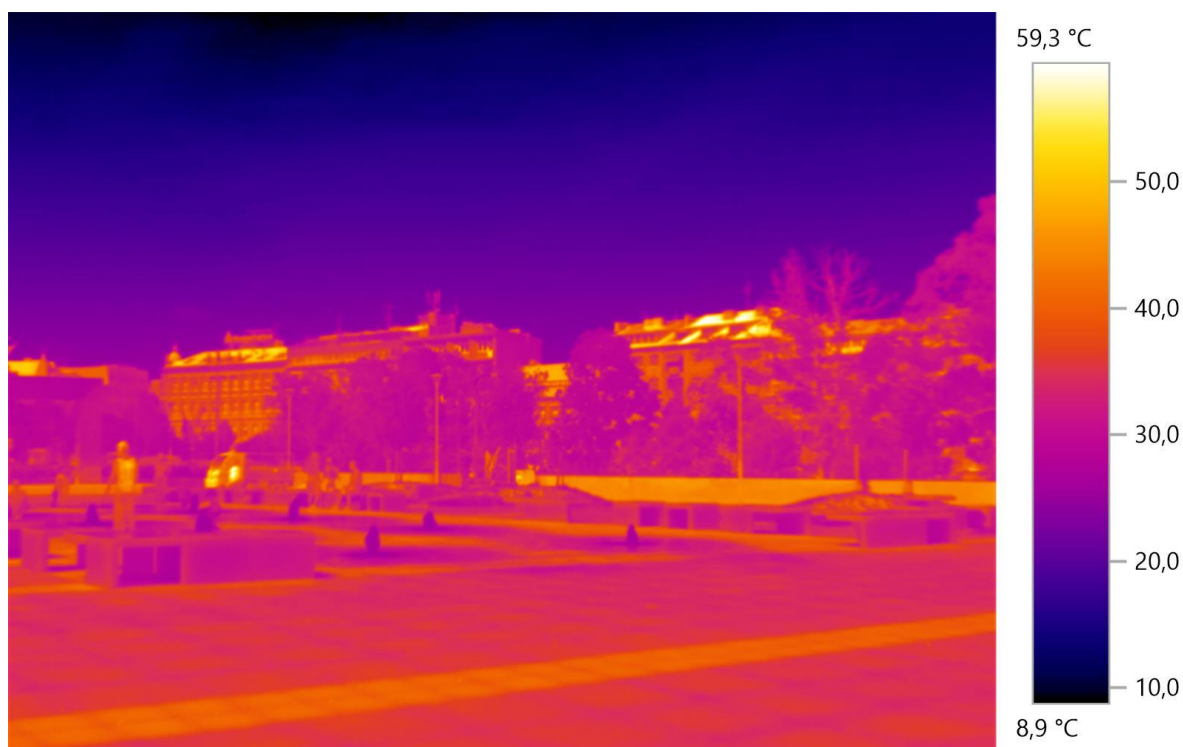




Hodnocení městského klimatu, zvláště tepelného ostrova (a postupy a opatření pro omezení negativních dopadů meteorologických extrémů na obyvatele a životní prostředí)“

Metodika

Jaroslav Rožnovský, Pavel Zahradníček, Pavel Lipina, Petr Štěpánek, Pavel Danihelka, Daniel Kopkáně, Jáchym Brzezina, Markéta Holíková, Petr Novotný, Petr Hora, Martina Brenčíč, Filip Chuchma, Grażyna Knozová, Michal Žák, Ilona Zusková, Luboš Němec, Stanislav Toman, Miroslav Řepka, Petr Münster, Stanislava Kliegrová, Aleš Farda, Hana Středová, Tomáš Středa, Martin Stráník, Petra Marková

2021

Český hydrometeorologický ústav
Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.
Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i.

Hodnocení městského klimatu, zvláště tepelného ostrova (a postupy a opatření pro omezení negativních dopadů meteorologických extrémů na obyvatele a životní prostředí)“

Metodika

Jaroslav Rožnovský, Pavel Zahradníček, Pavel Lipina, Petr Štěpánek, Pavel Danihelka,
Daniel Kopkáně, Jáchym Brzezina, Markéta Holíková, Petr Novotný, Petr Hora,
Martina Brenčíč, Filip Chuchma, Gražyna Knozová, Michal Žák, Ilona Zusková,
Luboš Němec, Stanislav Toman, Miroslav Řepka, Petr Münster, Stanislava Kliegrová,
Aleš Farda, Hana Středová, Tomáš Středa, Martin Stráník, Petra Marková

Dedikace:

Metodika je jedním z výstupů projektu MV ČR „Stanovení metod hodnocení městského klimatu, zvláště tepelného ostrova, určení postupů a návrh opatření pro omezení negativních dopadů meteorologických extrémů na obyvatele a životní prostředí, zejména ve velkých městských aglomeracích“, VH20202021052.

Metodika byla certifikována Ministerstvem životního prostředí ČR, odborem bezpečnosti a krizového řízení pod číslem jednacím MŽP/2022/020/43

Autoři (abecedně)

Ing. Martina Brenčíč¹
Mgr. Jáchym Brzezina, Ph.D.¹
prof. RNDr. Pavel Danihelka, CSc.³
RNDr. Aleš Farda, Ph.D.²
Markéta Holíková¹
Mgr. Petr Hora¹
RNDr. Filip Chuchma, Ph.D.¹
Mgr. Stanislava Kliegrová, Ph.D.¹
Dr. Grażyna Knozová¹
Ing. Daniel Kopkáně, Ph.D.²
Ing. Pavel Lipina¹
Ing. Petra Marková¹
Mgr. Petr Münster¹
RNDr. Luboš Němec¹
Ing. Petr Novotný, Ph.D.³
RNDr. Ing. Jaroslav Rožnovský, CSc.¹
Mgr. Miroslav Řepka¹
Mgr. Martin Stráník¹
doc. Ing. Tomáš Středa, Ph.D.¹
doc. Ing. Hana Středová, Ph.D.¹
Mgr. Petr Štěpánek, Ph.D.¹
Ing. Stanislav Toman¹
Mgr. Pavel Zahradníček, Ph.D.¹
Mgr. Ilona Zusková¹
Mgr. Michal Žák, Ph.D.¹

¹Český hydrometeorologický ústav

²Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.

³Výzkumný ústav bezpečnosti práce, v.v.i.

Obsah

Úvod.....	6
Cíl.....	7
1 Naše podnebí, městské klima a tepelný ostrov města.....	8
1.1 Naše podnebí	8
1.2 Městské klima.....	9
1.3 Tepelný ostrov města.....	10
2 Zdroje meteorologických a klimatologických dat	11
2.1 Metody měření mezo a mikroklimatu města	11
2.2 Měřicí jízdy.....	12
3 Analýza tepelného ostrova města Prahy na základě dlouhých časových řad	14
4 Měření pomocí účelových, příklad Ostrava, umístění – popis druhů městského prostředí, uvedení průběhu teploty a vlhkosti, intenzity srážek, využití synoptických situací	19
5 Letecké snímkování, postupy, hodnocení získaných map, dálkový průzkum	24
5.1 Mapy struktury pokryvu a teploty povrchů obcí	24
5.2 Mapa teploty povrchů a mapa širokopásmové emisivity povrchů	24
5.3 Mapy modelu reliéfu terénu, modelu reliéfu povrchu a modelu normalizovaných výšek povrchu.....	25
5.4 Postup zpracování mapy holého terénu, mapy výšek a mapy povrchu	25
5.5 Mapy tříd pokryvu	26
6 Kvalita ovzduší	27
6.1 Znečišťující látky v ovzduší	28
6.2 Vztahy mezi TOM a kvalitou ovzduší.....	29
7 Metodický postup pro prevenci a mitigaci akutních dopadů tepelných ostrovů měst.....	29
7.1 Fáze a kroky řešení metodiky	30
8 Závěr	34
9 Seznam literatury	35

Úvod

Pojem městské klima je stále více uváděn nejen v odborné literatuře, ve vědeckém výzkumu, ale také v běžném životě, protože města mají stále více obyvatel. Rozrůstají, nahrazují původní krajinu, takže se mění podmínky, ve kterých jejich obyvatelé žijí. Ovšem rozvoj měst nemá jen pozitiva, ale také se stále více projevují dílčí negativní vlivy, které dopadají na obyvatele měst. Je tedy velmi potřebné věnovat pozornost vývoji městského prostředí, jeho nejdynamičtější složce, tedy městskému počasí a podnebí. Ovšem nestačí studovat městské klima bez vazeb na okolní prostředí, na celkové klimatické poměry a všechny další souvislosti, ovlivňující vzájemnou vazbu mezi městy, jejich hospodářskou činností a obyvateli na jedné straně a okolím až po makro měřítku na straně druhé. V tomto smyslu je sestavena i tato metodika.

Jednou z posledních významných celosvětových aktivit byl klimatický summit OSN COP26 v Glasgow mezi 31. 10. až 13. 11. 2021. Připomenutím tohoto summitu poukazujeme na skutečnost, že se mění názor nejen nejvyšších představitelů světových velmocí, ale i dalších zemí na problematiku změny klimatu, a hlavně jejich dopadů. Tuto skutečnost je nutné zdůraznit proto, že poznatky klimatologů nebyly zcela respektovány i v naší republice. Je pozitivní, že v posledních několika letech se tento pohled mění a naše společnost tuto oblast daleko více vnímá.

Počasí a jeho dlouhodobý režim podnebí jsou nejdynamičtější přírodní složkou životního prostředí. Vývoj lidstva je spjat se změnami přírodního prostředí, které s využitím vědeckých poznatků z různých oborů bylo a je významně měněno. Přitom proměnlivost podnebí je jeho přirozenou vlastností, intenzita proměnlivosti je potom dána změnami v krajině. S rozvojem průmyslu a celkové hospodářské činnosti lidstva je ovlivňováno i podnebí, jak dokládají četné klimatologické studie. Projevy změny klimatu mají často negativní dopady na celou lidskou společnost. Nejsou to jen rozsáhlé výskyty povodní či sucha, vichřic, vysokých teplot vzduchu nebo naopak výskyty mimořádně silných mrazů, ale také podmínky pracovního či obytného prostředí. Život ve městech je přírodními projevy, přes veškerý technický i technologický pokrok, významně limitován. Jak se prokazuje, stále jsme závislí na přírodních zdrojích, proto musíme vycházet z celkových poměrů až po detaily.

Změna klimatu ovlivňuje i městské klima, které má navíc svá specifika, takže mnohdy dochází až k synergii těchto procesů, jindy naopak výrazné diferenci. Proto musíme vycházet z podkladů stanovených pro naše území. K základním patří v závěru roku 2020 vládou schválená „Koncepce environmentální bezpečnosti 2021-2030 s výhledem do roku 2050“. V ní jsou uvedena environmentální rizika přírodního původu, která právě rozvojem lidské společnosti stále více ovlivňují životní prostředí. A jak dokládají výskyty až katastrof v minulosti, může díky chybám techniky, ale i chybných zásahů člověka, právě riziko do podoby environmentálních katastrof přejít. Musíme si uvědomovat, že environmentální rizika přírodního původu jsou v podmínkách ČR podmíněna extrémními stavy počasí. A musíme mít neustále na paměti, že právě městské klima tyto extrémní stav počasí umocňuje.

K problematice změny klimatu a jejích dopadů byly schváleny další významné materiály, není nutné je zde podrobně rozebírat, ale musíme z nich vycházet. Z našich studií vyplývá, že městské prostředí je nutné vést právě ve směru adaptací na změnu klimatu, ideálně ve směru mitigačním. Současně jsme si vědomi širší problematiky městského prostředí a v jeho rámci městského klimatu. Obsah této metodiky vychází z našich poznatků o potřebné úrovni monitoringu městského klimatu, využití dostupných údajů o meteorologických podmínkách, a jejich vhodném zpracování. Dále uvádíme v podstatě upozornění na výskyty hodnot projevů klimatu odpovídajících uvedeným environmentálním rizikům a přehled vhodných postupů pro jejich předcházení, případně řešení. Využitím této metodiky při zpracování územních plánů, úpravách ve městech a dalších činnostech je možné nejen snížení negativních dopadů meteorologických extrémů, ale těmto přímo předcházet.

Cíl

Změna klimatu souvisí úzce s problematikou městského klimatu a cílem této metodiky je přenést do praktického využití poznatky z projektu „Stanovení metod hodnocení městského klimatu, zvláště tepelného ostrova, určení postupů a návrh opatření pro omezení negativních dopadů meteorologických extrémů na obyvatele a životní prostředí, zejména ve velkých městských aglomeracích“, VH20202021052.

Uvedeny jsou vhodné postupy, zvláště pro velké městské aglomerace, a to od metod monitoringu, zpracování naměřených dat, sestavení výstupů pro charakteristiku městského klimatu, až po vymezení tzv. tepelného ostrova (dále jen TOM). Dále návrhy možných postupů pro stanovení rizik daných meteorologickými extrémů a opatření k omezení jejich negativních dopadů. Obsah předkládané metodiky představuje přehledný návod, jaké volit postupy pro zlepšení stávajícího městského prostředí, ale také jak postupovat při formulování územních plánů pro město s tím, že nebude prohlubován rozsah tepelného ostrova. Cílem metodiky je také ukázat, že zlepšení městského prostředí je možné jen s využitím konkrétních dat, která budou naměřena na konkrétních městských lokalitách. Současně dokládáme, jakými postupy je potřebné při zajištění údajů pro dané město postupovat, jaké údaje dané zdroje poskytují a jak tyto využít.

1 Naše podnebí, městské klima a tepelný ostrov města

Problematika vývoje podnebí na Zemi je předmětem studia mnoha klimatologů a dalších odborníků. Jak vyplývá z různých studií, tyto změny jsou příčinou zvyšující se četnosti výskytů extrémních stavů počasí. Probíhající změna klimatu je nejčastěji dokládána zvyšováním teploty vzduchu, hovoříme o tzv. globálním oteplování (Rožnovský, 2019). Možné dopady změn našeho podnebí jsou studovány v širokých souvislostech již od devadesátých let minulého století, jak dokládají mnohé rozsáhlé studie (Brázdil a Rožnovský et al., 1995).

1.1 Naše podnebí

Základem pro charakterizování městského klimatu a jeho dynamiky je znalost podnebí daného místa. Pro naše podnebí je typická proměnlivost, která je dána geografickou polohou a reliéfem našeho území. Jsme součástí mírného klimatického pásu, ovšem v oblasti přechodného klimatu středoevropského. Významnou roli sehrávají cirkulační a geografické poměry. Po převážnou část roku u nás převládá vzduch mírného pásma, ale na našem území se projevuje v krátkých obdobích i vzduch tropický, ale také vzduch arktický. Atlantický oceán způsobuje, že oceanita našeho podnebí je vyšší v Čechách, kde jsou častěji mírnější zimy a chladnější léto, srážky jsou rozděleny rovnoměrněji. Naopak kontinentalita je oproti Čechám vyšší na Moravě a ve Slezsku, kde jsou také větší teplotní amplitudy.

Z geografických podmínek mají vliv naše hory, které vytvářejí tzv. klimatické přehradu, kdy zčásti zabraňují vpádům studeného vzduchu od severu více v Čechách, ale vzhledem k západnímu proudění vyvolávají dešťový stín. Významnou roli pro naše počasí má cyklonální činnost, která ovlivňuje přechody atmosférických front přes naše území, a tím výskyt srážek. V Atlasu podnebí Československa (1958) a Podnebí ČSSR-Tabulky (1960) jsou uvedeny výstupy zpracování za období 1901 až 1950. Mapy v Atlasu podnebí Česka (Tolasz et al., 2007) byly vypracovány z meteorologických údajů za období 1961 až 2000.

Z analýz našeho podnebí v posledních desetiletích vyplývá, že roste počet extrémních projevů počasí, statisticky prokazatelně se zvyšuje teplota vzduchu. Od 80. let 20. století je pozorován významný nárůst teplot vzduchu, a to ve všech sezónách s výjimkou podzimu (Střešník et al., 2014, Rožnovský a Střešník, 2021). Převážný počet roků v posledním desetiletí měl extrémně vysoké teploty vzduchu. Jde o roky 2012, 2015, 2017, 2018, ale také 2019. Připomínáme, že nejvyšší maximum teploty vzduchu na území ČR bylo naměřeno 20. 8. 2012 v Dobřichovicích, a to 40,4 °C a nejnižší minimum teploty vzduchu, - 42,2 °C se vyskytlo v Litvínovicích u Českých Budějovic 11. února 1929. Tedy takřka před sto lety. I zde vidíme projevy změny klimatu, kdy za období 1961 až 2020 na našem území vzrostly zimní teploty vzduchu. Jižní části naší republiky mají místa, kde za posledních třicet let (1991 až 2020) jsou průměrné teploty vzduchu za zimu nad 0 °C.

Projevem změny našeho podnebí jsou častější povodně i sucho, které se ale na našem území vyskytují nepravidelně. Mimořádně vysoké úhrny srážek vyvolávají plošné povodně, jak tomu bylo v letech 1997, 2002 a díky rychlému tání vysoké sněhové pokrývky i v roce 2006. V roce 2010 byly zaznamenány vysoké srážkové úhrny a výskyt mnoha lokálních povodní z přívalových dešťů. Ovšem z dlouhodobého hodnocení vyplývá, že roční úhrny srážek na našem území nemají trend, tedy nerostou ani neklesají. Vysokou dynamikou výskytu srážek je v posledních dvou desetiletích dána rostoucí četností stavů sucha, které jsou vyvolány nízkými úhrny srážek hlavně během teplého půlroku (duben až září) s trváním od několika týdnů až po několik měsíců. Výskyty mimořádného sucha takřka na celém území ČR jsme zaznamenali v letech 2000, 2003, 2012, 2015, 2017, 2018 i 2019.

1.1.1 Možná změna našeho podnebí

Změna klimatu přináší statisticky prokazatelné změny hodnot jednotlivých klimatických prvků. Podle nejnovějších výstupů s největší pravděpodobností se naše území do poloviny století oteplí v průměru o 2 °C, podle některých modelů ještě více. Oproti tomu studie srážek dokládají, že za posledních takřka šedesát let nedošlo ke statisticky významné změně celkových ročních úhrnů srážek, ale zvyšuje se dynamika jejich výskytu jak v jednotlivých letech, tak v průběhu kalendářního roku, mění se skladba srážek, významně se projevuje četnost výskytu intenzivních srážek, prodlužují se bezsrážková období v teplé části roku. V nejbližším období 2021–2040 lze očekávat nárůst o 1 °C. Do konce století tato minimální změna může činit 3 °C, ale zde doufáme v podstatnou redukci skleníkových plynů a zpomalení tempa nárůstu teplot. Pro srážkové úhrny lze očekávat nezměněné srážkové úhrny, případně jejich malý pokles – statisticky nevýznamný – a to především v létě (což ale v kombinaci s vyšší teplotou vzduchu každopádně znamená mj. vyšší hodnoty evapotranspirace, a tedy značné riziko častějších a delších epizod sucha). Počet tropických dnů, které mají výrazný dopad na přírodu (vysušování krajiny) a lidský organismus (např. nárůst úmrtnosti) podle ensemblového průměru z vybraných RCM simulací do budoucna rovněž poroste. V případě RCP 8.5 očekáváme, že nárůst tropických dnů v období 2021–2040 bude o čtvrtinu vyšší a na dvojnásobek oproti současnosti vystoupá do poloviny století. Podobně jako u srážkových úhrnů dochází u počtu dnů se srážkami (1, 10, 20 a 50 mm a více) k nárůstu oproti současnosti. Počet dnů se srážkami 1 mm a více se již ale v blízké ani vzdálené budoucnosti příliš nezmění. V případě počtu dnů se srážkami alespoň 10, a 20 mm hodnoty do budoucna porostou – především v blízké budoucnosti (a to hlavně v zimě), naopak u počtu dnů 50 mm a více především ve vzdálené budoucnosti. To znamená významný nárůst přívalových dešťů. Ovšem podle výsledků dostupných studií se tyto negativní extrémní projevy budou ve městech prohlubovat, pokud nebude provedena podrobná analýza městského prostředí, jeho dopadů na zdraví obyvatel, ale také nastavení postupů, jak naopak tato negativa snižovat, přitom s co největším využitím přírodních postupů.

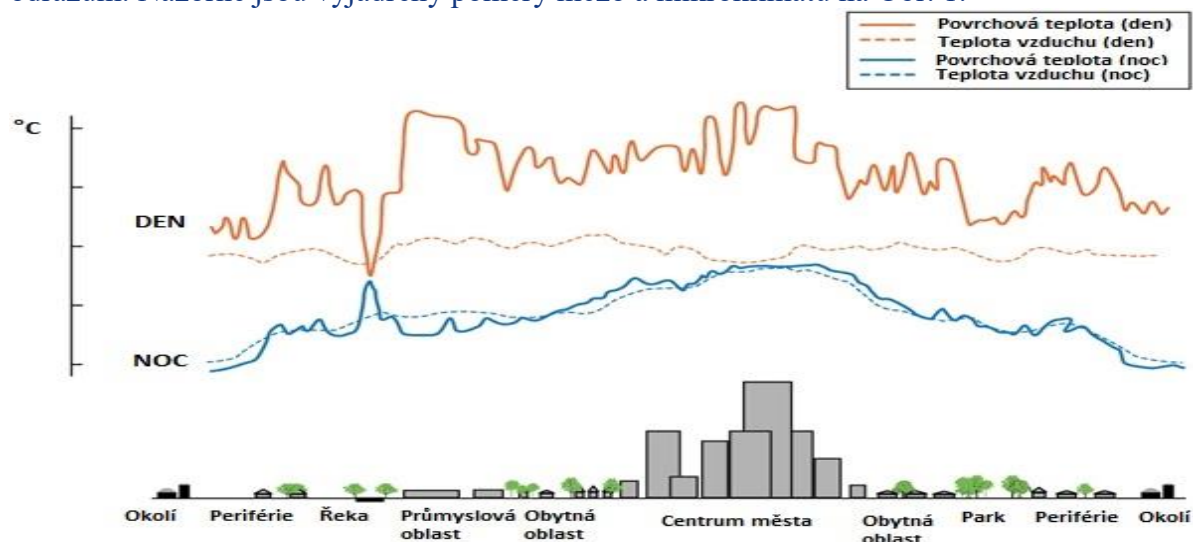
1.2 Městské klima

Všechny tyto projevy změn podnebí jsou ještě umocněny specifiky městského prostředí, zvláště ve velkých městských aglomeracích. Celosvětově je uváděno, že roste počet obyvatel měst, protože poskytují větší pracovní příležitosti, společenské vyžití apod. Rozdílnost městského prostředí oproti volné krajině spočívá ve vytváření umělých povrchů. Tímto je podmíněna odlišná radiační bilance, protože sluneční záření je různě odráženo a pohlcováno pevnými materiály (povrch vozovek, střech apod.) oproti porostům. Dochází k tomu, že tyto povrchy se v době dopadu slunečních paprsků více ohřívají, a tím zvyšují teplotu vzduchu, a tak dochází i k ovlivnění jejich vlhkosti. Rozdílné teploty povrchu potom ovlivňují teplotní režim v průběhu noci, kdy jsou rozhodující hodnoty vyzařování. Hodnocení městského prostředí vycházejí z analýz výskytu extrémů, výpočtů pocitových kategorií i v kombinacích se znečištěním ovzduší. Problémem je také světelné znečištění. Změny mezo- a mikroklimatu včetně zhoršení kvality ovzduší se stále více negativně projevují na kvalitě městského prostředí vzhledem k jeho obyvatelům.

První vědecká srovnání teplotního režimu města a přilehlých venkovských oblastí provedl Howard ve studii *Climate of London* z roku 1833. Studie městského klimatu včetně bioklimatu byla vypracována pro Bratislavu (Petrovič, 1979). Vlivům městského prostředí, včetně dopadů na zdraví obyvatel byla věnována pozornost mnoha autorů, např. Thom (1959), Oke (1973), Toy (2007), Litschmann, T. a Rožnovský, J. (2009, 2012), Středová et al. (2010), Tomáš (2012), Técher et al. (2021) a mnoho dalších.

Rozsáhlou studii městského prostředí na příkladu města Brna, která vycházela ze sítě účelových meteorologických stanic, najdeme v publikaci *Klima Brna* (Dobrovolný et al., 2012).

V porovnání s venkovskou krajinou mohou být ve městech nejen v denních maximech, ale i v nočních hodinách teploty i o 10 °C vyšší, což má přímý vliv nejen na lidské zdraví, ale i důsledky ekonomické. Změna geometrie aktivního povrchu – zvětšení jeho velikosti a převaha vertikálních povrchů - vede ke zvýšení množství pohlceného slunečního záření a k jeho četným odrazům. Názorně jsou vyjádřeny poměry mezo a mikroklimatu na Obr. 1.



Obr. 1 Rozložení teploty vzduchu a povrchové teploty v průběhu dne a noci nad městem a okolím (Oke, 1973)

Uzavřené prostory mezi budovami způsobují omezení dlouhovlnného vyzařování v nočních hodinách, a tím dochází ke snížení ztrát tepla, změně tepelných vlastností aktivního povrchu – budovy mají poměrně značnou tepelnou kapacitu, což umožňuje zvýšené pohlcování tepla v období pozitivní energetické bilance a jeho uvolňování během negativní energetické bilance. Jde také o změnu v hydrologické bilanci, kdy převaha nepropustných povrchů vede ke snížení dostupného množství vody k evapotranspiraci a současně i ke snížení latentního toku tepla a naopak ke zvýšení turbulentního toku. Díky potřebě co nejefektivnějšího využití plochy měst dochází k tomu, že není rozšiřována, ale naopak snižována plocha zeleně. Přitom právě zeleň přispívá ke snížení negativních dopadů městského prostředí několika způsoby, od přímého snižování teploty vzduchu, zvyšování jeho vlhkosti, zachycování nečistot apod. až po vytváření prostředí pro odpočinek a well-being (pohodu) obyvatel města.

Mnoha studiemi bylo potvrzeno, že pevné povrchy ve městech (dlažba, asphalt, střechy domů apod.) ovlivňují mikroklimatické poměry, a to logicky nejvíce v centrální části města, kde významně zvyšují teplotu vzduchu. Platí poznatek, že pokud je zeleň nahrazena stavebními materiály, dochází ke změnám radiační a energetické bilance a zvýšení dynamiky hlavně teploty a vlhkosti vzduchu. V odborné literatuře označujeme tepelné změny jako „tepelný ostrov měst“. Vychází se často jen z měření teploty a vlhkosti vzduchu, ale jde v podstatě o stav „počasí“ člověka v městském prostředí. Díky povrchu ze stavebních materiálů rostou teplotní amplitudy.

1.3 Tepelný ostrov města

Jde o jev, který zjednodušeně vyjadřuje stav, kdy jsou ve městech zaznamenávány vyšší teploty než v okolních venkovských oblastech. Tepelný ostrov města (TOM), podle anglického názvu Urban Heat Island též označovaný jako UHI. Zvláště teplé body s charakteristickými znaky (parkoviště, průmyslová zařízení, ploché střechy, asphaltové komunikace apod.) jsou definovány jako „micro urban heat islands - MUHI“.

TOM je funkcí meteorologických prvků (teplota vzduchu, srážky, sluneční radiace, oblačnost, proudění vzduchu, evapotranspirace) a charakteru samotného města (počet a hustota obyvatel, topografie terénu, nadmořská výška, zastoupení vodních ploch, pokryv povrchu – podíl zastavěného území, vegetace, barva povrchu (absorpční a emisní vlastnosti ve VIS/IR oblasti), vzdálenost mezi budovami, výška budov, tepelná kapacita použitých materiálů, rezistence povrchu, geometrie povrchu města - tzv. „městský kaňon“, „antropogenní teplo“ z vytápění a průmyslu, retence povrchu).

Ke sledování a kvantifikaci TOM jsou nejčastěji používány metody pozemního termálního monitoringu (IR senzory), dálkového průzkumu země (termální družicové snímky), metoda eddy kovariance a další. Klasickou metodou pro vymezení TOM (týká se teplot a vlhkosti vzduchu) je srovnání průběhu meteorologických prvků z městských a mimoměstských stanic.

2 Zdroje meteorologických a klimatologických dat

Pro hodnocení podnebí na našem území máme k dispozici meteorologická data ze sítě klimatologických stanic Českého hydrometeorologického ústavu (dále jen ČHMÚ). Jde o bohatou databázi meteorologických měření z počtu kolem dvou set stanic, ovšem z měření podle směrnic Světové meteorologické organizace pro klimatologické účely, tedy charakteristiku podnebí volné krajiny. Tyto stanice musí splňovat stanovené podmínky. Základní požadavek je, že pro dané okolí musí být reprezentativní, nemohou být v extrémních polohách, mají mít rovinný povrch s krátce střiženým trávníkem. Dále jejich vzdálenost od překážek musí být minimálně 4násobek jejich výšky, ve vzdálenosti 25 m od středu pozemku stanice nemají být žádné překážky vyšší než 2 m, veškerá zařízení musí být natřena bíle (Lipina, P. et al., 2014).

Z těchto měření jsou prováděny podrobné analýzy. Jako modelové oblasti byly vybrány naše velké městské aglomerace, a to Praha, Brno, Ostrava a Hradec Králové. Jde o města s rozdílnou plochou, zastoupením zeleně, průmyslu apod. U všech těchto měst probíhají dlouhodobě meteorologická měření na klimatologických stanicích. Z dosavadních analýz vyplývá, že stávající klimatologické stanice umístěné ve městech (např. pražské Klementinum, v Brně stanice na ulici Kroftově) jsou ovlivněné městským prostředím. Ovšem to pro jeho ověření nestačí, proto je nutné provádět meteorologická měření přímo v městském prostředí přesto, že to není v souladu se stávajícími předpisy pro klimatologická měření.

2.1 Metody měření mezo a mikroklimatu města

Jak z výše uvedeného vyplývá, městské prostředí až na výjimky splnění těchto podmínek nedovoluje. Ale pro účely vyjádření městského klimatu musíme naopak měřit v typických podmínkách města, proto musíme zajistit meteorologická měření, která nám klima měst vyjádří. Toho dosáhneme instalací účelových meteorologických stanic v různých podmínkách města, s cílem vyjádřit vliv různých povrchů, zástavby, rozptýlené i souvislé zeleně apod. Oproti volné krajině je ve městech rozdílná nejen výše, ale také dynamika meteorologických prvků měřených meteorologickými stanicemi. Senzory musí monitorovat teplotu a vlhkost vzduchu v desetiminutovém intervalu, který odpovídá standardním měřením v síti klimatologických stanic Českého hydrometeorologického ústavu. Tyto plní funkci referenčních stanic, aby tak byly vymezeny rozdíly v chodu teplot a vlhkosti vzduchu vlivem mikroklimatu na měřících bodech. Mimo vyšší teplotu je ve městech zvýšená oblačnost a četnost mlh, snížená dohlednost (větší zákal), a tím zeslabené sluneční záření, zvýšené úhrny srážek a četnost bouřek, snížená rychlost větru a vlhkost vzduchu. TOM není možné identifikovat měřením teploty nebo vlhkosti vzduchu na standardních klimatologických stanicích, musí být zajištěna účelová měření ve

speciální síti stanic v odlišných podmínkách, na různých površích. Zvláště teplé body (malé plochy) s charakteristickými znaky (parkoviště, průmyslová zařízení, ploché střechy, asfaltové komunikace apod.) jsou definovány jako „micro urban heat islands - MUHI“.

Příkladem instalace účelových meteorologických stanic je výzkum mezo a mikroklimatu na území města Hradec Králové. Charakteristická místa pro hodnocení městského klimatu představují následující lokality. Vzrostlá dřevinná vegetace v centru města, travní pokryv, celodenní stín, blízkost soutoku dvou velkých toků. Městské lesy, středněvěký, převážně jehličnatý lesní porost, absence významných ploch s umělým povrchem Historické centrum města – Hudební síň, uzavřený areál (nádvoří) s vertikálními povrchy a limitovaným prouděním vzduchu, umělý pevný povrch, od dopoledních do odpoledních hodin osluněno. Místo v bytové zástavbě do pěti pater výšky, bezprostřední okolí měření s výskytem dřevinné a keřové vegetace, travní pokryv, převážně zastíněno, částečně osluněno v odpoledních hodinách. Okraj příměstské rodinné zástavby, výskyt dřevinné a keřové vegetace, travní pokryv, většinu dne zastíněno, osluněno v odpoledních hodinách. Měření v průmyslové zóně, betonový povrch, blízkost hal, po část dne zastínění, ale vliv vyzařování stěn hal apod.

Zdrojem meteorologických dat mohou být měření, která provádějí některé instituce pro své potřeby. Ovšem před využitím těchto dat musí vždy proběhnout podrobná analýza podmínek, za kterých byly získány. Musí se ověřit jednak kvalita čidel, kdy byly, či zda vůbec byly cejchovány. Běžně prodávaná teplotní a vlhkostní čidla vykazují velké rozdíly, a pokud nebyla před měřením cejchována, jsou soubory dat nepoužitelné. Důležité je též umístění čidel, pokud jsou v blízkosti budov, na různě orientovaných ke světovým stranám, potom je jejich využití omezeno pouze na charakteristiku jejich umístění, tedy z hlediska vlivu typu povrchu na jednotlivých lokalitách, např. využití území, zastínění lokality apod. Jestliže popis umístění chybí, nelze využití těchto dat doporučit. Důležité je též ověřit formu zápisu a nastavení času, viz připomínka k měřením v době platnosti SELČ.

2.2 Měřicí jízdy

Pro poznání podrobnějšího rozložení teploty vzduchu na území města je nutné získat co nejvíce údajů v co nejkratším čase a na co největší ploše města, s vyjádřením vlivu různých povrchů. S ohledem na tyto požadavky, tedy co nejrychleji provést měření na území města, se osvědčily měřicí jízdy osobním autem, a to vzhledem ke kvalitě ovzduší nejlépe elektromobilem (Obr. 2). Je možné použít i jiné mobilní prostředky, např. použita byla i měření s čidly umístěnými na tramvajích (Quitt, 1972). Jejich významným nedostatkem je, že měření jsou dána vymezenou trasou, není možná plynulost jízdy apod., proto je v podstatě nedoporučujeme.

Pro mobilní formu měření je potřebné použít teplotní a vlhkostní čidla s vysokou citlivostí a vysokou kapacitou paměti, protože je vhodné mít záznamy dat každých 10 sekund. Čidla musí být vždy pod radiačním krytem, aby nedocházelo k jejich ohřívání slunečním zářením. Nad střechou auta musí být umístěna jednak tak, aby měřila ve výši 2 m nad zemí, ale také byla alespoň 30 cm nad střechou auta. Jistěže jde o měření nad vozovkami, ale díky pohybu vzduchu a umístění čidla lze tyto údaje použít k vymezení teplotního pole města.

Časový záznam o průjezdu vytypovanými lokalitami je možný různými formami, nejvhodnější je automatický záznam s využitím GPS. Zápis času lze provádět pomocí mobilního telefonu k vytypované lokalitě na trase během jízdy do sdílené Google tabulky, kde v řádku byl zápis času konkrétní jízdy pro lokality definované ve sloupcích. Pracnější je forma namlouvání do diktafonu, případně provádění zápisu spolujezdcem. V těchto dvou formách je náročné následně přepisování naměřených údajů do počítače ke zpracování.



Obr. 2 Umístění čidel teploty a vlhkosti vzduchu na měřicím elektromobilu

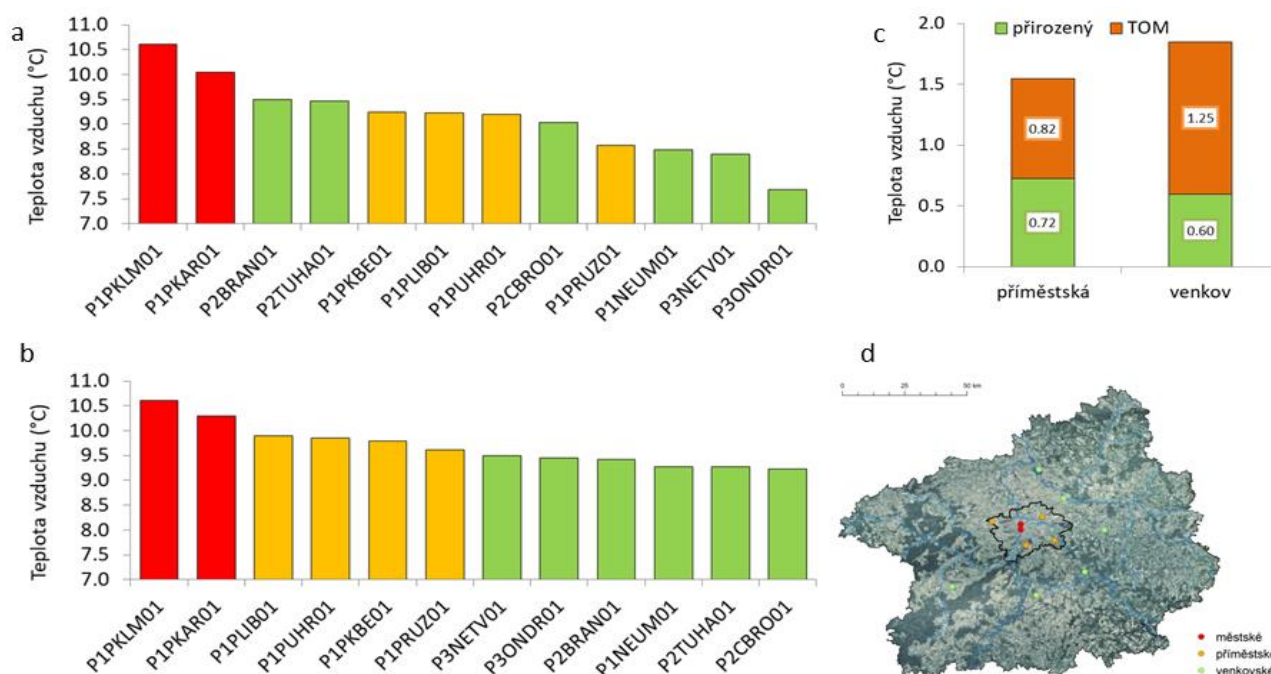
Doporučený postup pro měřicí jízdy autem

- Základem pro měření je stanovení měřicích okruhů po městě. Tyto musí být vedeny tak, aby byly záznamy ze všech částí města, tedy jak centrum, tak části města s různými povrchy, ale také okraje, alespoň ve všech hlavních světových stranách a s ohledem na tvar městského území. Přitom průjezdy centrem by měly být nejčastější. Vždy musí být vedeny jednotlivé okruhy tak, aby procházely přes centrum města.
- S ohledem na význam zeleně pro rozložení teploty je potřebné zařadit průjezdy parky, většími zelenými plochami, stromořadími apod. Podobně je potřebné vést jízdy kolem vodních ploch, včetně podél toků, aby bylo možné posoudit jejich vliv na teplotu vzduchu.
- Doba měření závisí na možnostech počtu měřicích jízd. Pro krátká či orientační měření by měla být vždy v době krátce po kulminaci slunce (dochází k nejvyššímu ohřátí vzduchu od vyzařujících stěn budov a vozovek), tedy v době nejvyšších denních teplot vzduchu. Pro podrobnou charakteristiku teplotního pole města je nutné zajistit jízdy v průběhu dne, tedy již v uvedené době kulminace slunce, ale také i několik nočních jízd, protože povrchy města významně ovlivňují teplotu vzduchu v noci. Určitě by měla být provedena měření krátce po východu slunce, kdy se projevuje denní minimální teplota vzduchu.
- Teplotu významně ovlivňuje stav počasí, takže nejvhodnější jsou dny bez oblačnosti s nízkými rychlostmi větru. Ovšem při podrobné analýze teplotního pole je potřebné měřit i v době, kdy je zamračeno.
- Výběr termínů měření nelze plánovat na delší období, protože počasí na našem území je proměnlivé. Z hlediska synoptického jsou nejvhodnější výskyty tlakových výší. Výběr termínů měření by měl být veden podle předpovědi počasí (portál chmi).
- Volba ročního období pro měření je opět dána cílem měření. Základem je provést měření při výskytu extrémních teplot vzduchu. Nejčastěji jsou prováděna měření v době maximálních letních teplot vzduchu, tedy v tropických dnech. Zvláště při výskytu horkých vln (více tropických dnů po sobě následujících) dochází k významnému dopadu na obyvatelstvo ve městě. Ovšem pro podrobnější poznání teplotního režimu města je potřebné měřit i v dalších ročních obdobích. V zimním období při výskytu ledových dnů, kdy denní maximum teploty je nižší než 0 °C), ale také při mimořádně teplých dnech. Vzhledem ke stále teplejším zimám dochází ke zkracování počtu dnů ledových i mrazových, což se jednoznačně projevuje na teplotních poměrech ve městech, např. ovlivněním zeleně.

- Důležité je zajištění přesného záznamu. Zápis lze v daném čase k určité lokalitě provádět ručně, pohodlnější je do mobilu během jízdy do sdílené Google tabulky s předem připravenými pozicemi zápisu. Doporučujeme využít mobilní aplikace, např. „Stopař“ aj.
- Vysokou pozornost je nutné věnovat druhu času záznamu, výsledky srovnání s klimatologickými stanicemi, které vždy měří ve středoevropském času (SEČ) a jsou takto uváděna i na portálu ČHMÚ, může poznamenat nerespektování hodinového posunu v době platnosti letního času – (SELČ).
- Pro kvalitní zajištění záznamů je vhodné, aby záznamy neprováděl řidič, ale spolujezdec, který byl o podstatě měření poučen.

3 Analýza tepelného ostrova města Prahy na základě dlouhých časových řad

Pro každé město lze využít různé typy podkladů. Jeden ze zdrojů jsou dlouhé časové řady, které se používají hlavně pro detekci rychlosti nárůstu teploty vzduchu při srovnání městské, příměstské a venkovské stanice. Ideálním příkladem v rámci České republiky je město Praha a okolí, kde se nacházejí dostatečně dlouhé časové řady jednotlivých typů stanic (Obr. 3d). Pro městské klima lze použít dvě stanice, a to Praha Klementinum (P1PKLE01) a Praha – Karlov (P1PKAR01). Jako příměstské stanice se pro analýzy využívají Praha-Libuš (P1PLIB01), Praha-Ruzyně (P1PRUZ01), Praha-Kbely (P1PKBE01) a Praha-Uhřetěves (P1PUHR01). V okolí Prahy se pak nachází větší množství venkovských stanic. Do této kategorie jsou zařazovány i stanice, která měří například v intravilánu obce, ale je mimo prostředí velkého města. Doporučení je používat stanice Netvořice (P3NETV01), Ondřejov (P3ONDR01), Brandýs nad Labem (P2BRAN01), Neumětely (P1NEUM01), Tuháň (P1TUHA01) a Český Brod (P2CBRO01).



Obr. 3 Průměrná teplota vzduchu na jednotlivých stanicích v Praze a okolí (a) a jejich hodnoty po přepočtu na jednotnou nadmořskou výšku 191 m n. m. (b) v letech 1961–2020, velikost tepelného ostrova (c) a mapa stanic (d)

Identifikace tepelného ostrova města Prahy je ztížená kvůli větším rozdílům nadmořské výšky v celých středních Čechách a v samotné Praze. Proto jsou rozdíly teploty vzduchu způsobeny i přirozenými faktory, jako je pokles teploty vzduchu s rostoucí nadmořskou výškou (v průměru $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ na 100 m). Z těchto důvodů se doporučuje sjednotit průměrné roční teploty vzduchu na jednotnou hodnotu nadmořské výšky. Pro Prahu byla zvolena výška 191 m n. m. , v které leží Praha-Klementinum. Pro jednoduchou analýzu je zcela postačující aplikovat základní přepočty $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Bez přepočtu na jednotnou nadmořskou výšku vychází jako nejteplejší obě městské stanice, ale poté následují stanice venkovské Brandýs nad Labem a Tuháň (Obr. 3a), což je dáno jejich nižší polohou a situováním do teplého Polabí. To poskytuje zavádějící výsledek a neidentifikuje vlastní velikost tepelného ostrova města Prahy. Po přepočtu na jednotnou nadmořskou výšku zůstávají nejteplejší obě městské stanice Klementinum a Karlov, a poté již všechny příměstské stanice následované venkovskými (Obr. 3b). Zde už tedy jednoznačně vystupuje role tepelného ostrova města. Rozdíl mezi centrem města a venkovem je v průměrné roční hodnotě $1,84\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z toho $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ je způsobeno přirozenými faktory a $1,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ tepelným ostrovem města (Obr. 3c), což znamená, že vliv TOM (druh zástavby, použitých materiálů atd.) je dvojnásobný oproti vlivu reliéfu.

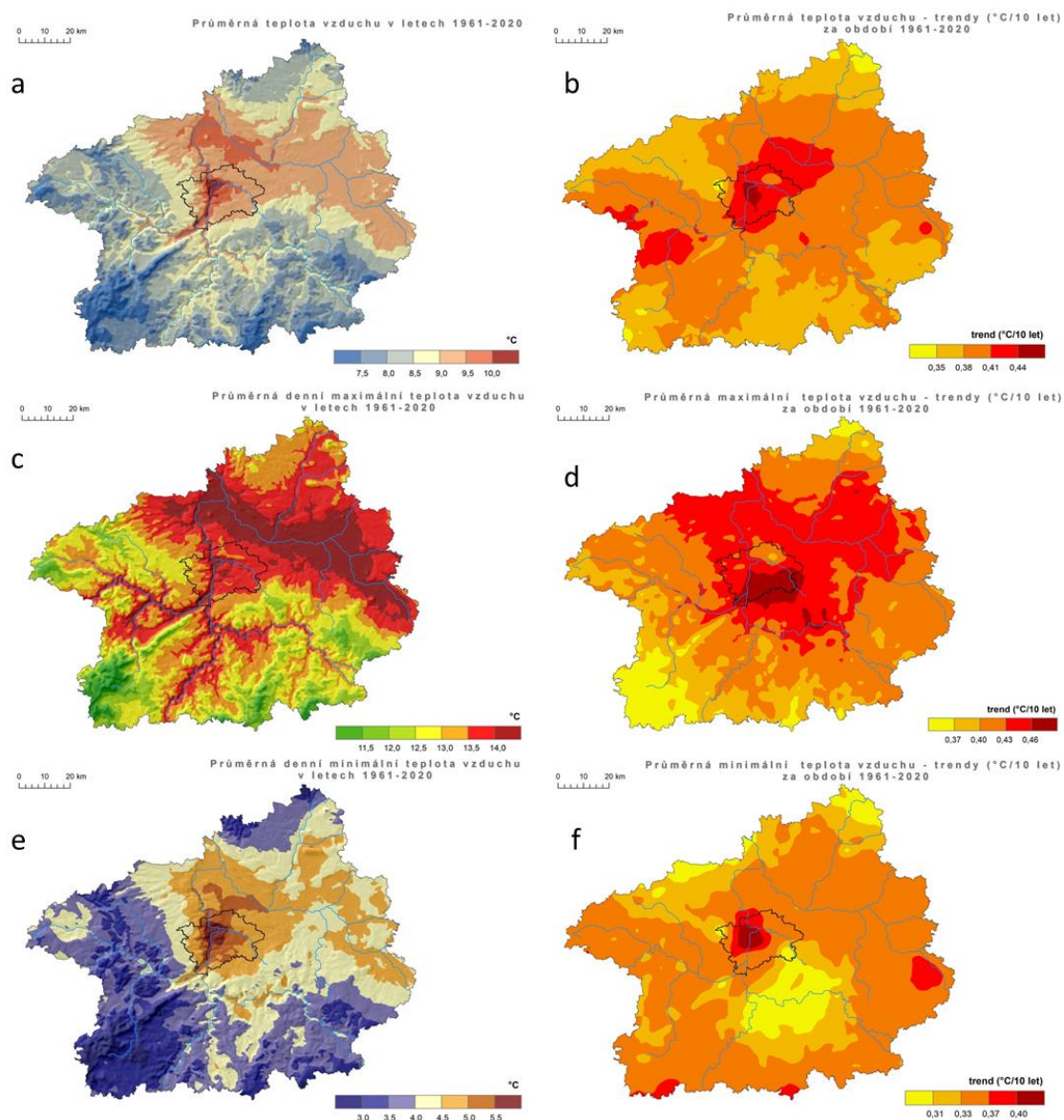
Probíhající růst teplot vzduchu v rámci klimatické změny může být ještě umocněn vlivem zesilujícího tepelného ostrova města. Jelikož v Česku je nejsilnější tepelný ostrov v Praze, tak i teploty vzduchu zde rostou nejrychleji z celé republiky. Průměrná roční teplota v celé České republice roste statisticky významně o $0,36\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 10 let . To v období $1961\text{--}2020$ znamená změnu o $2,16\text{ }^{\circ}\text{C}$. V centru Prahy je rychlost růstu průměrné denní teploty vzduchu nejvyšší z celé republiky. Praha-Klementinum vykazuje trend $0,46\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 10 let , což znamená oteplení o $2,76\text{ }^{\circ}\text{C}$ za posledních 60 let (Obr. 4a,b).

V případě maximálních teplot vzduchu je situace mírně odlišná. V celé oblasti Prahy a okolí dosahuje nejvyšších teplot nejen centrum města, ale také Polabí. Nejrychlejší růst teplot vzduchu pak není vázán přímo na centrum Prahy, ale na jihovýchodní část, kde se v posledních desítkách let zintenzivnila výstavba, a to jak sídlištních typů bydlení, tak logistických center (Obr. 4c,d). Průměrné maximální teploty vzduchu rostou v rámci republiky v průměru o $0,40\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 10 let , ale v případě centra Prahy je to o $0,48\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 10 let .

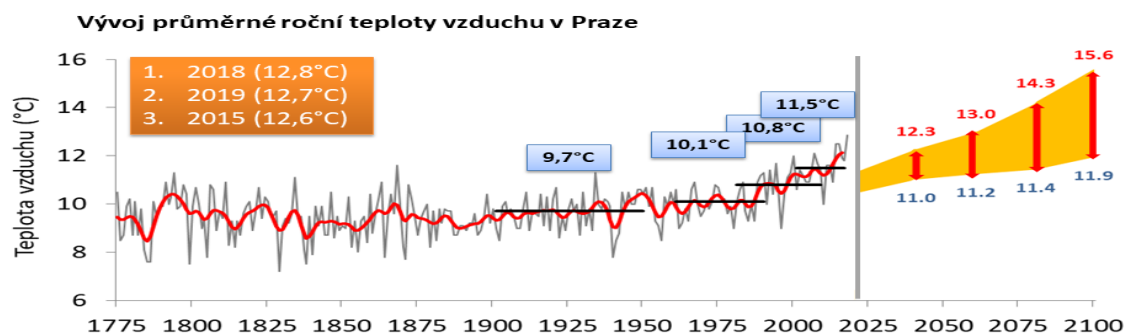
Nejviditelnější projev tepelného ostrova města je v minimálních teplotách (většinou jde o teplotu dosaženou v noci). Zde je nárůst těchto teplot v centru Prahy markantní (Obr. 4e,f). Průměrný trend pro Českou republiku je $0,33\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 10 let , ale pro centrum Prahy je o $70\text{ }\%$ vyšší a to $0,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ za 10 let . Minimální teploty tedy vzrostly v České republice za posledních 60 let o $1,98\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale v Praze-Klementinu o $3,36\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na Obr. 5 lze vidět nejdelší řadu teploty vzduchu v České republice a to Praha-Klementinum. Ta měří od roku 1775 do současnosti. Nejteplejší období bylo zaznamenáno v letech $2011\text{--}2020$, kdy teplota byla vyšší o $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ než v letech $1851\text{--}1900$. Nejteplejší roky byly na této stanici, ale i v rámci České republiky zaznamenány v letech 2015 , 2018 , 2019 . Pro tuto řadu existuje i projekce změny teploty vzduchu do budoucnosti, které očekává v nejhorsím scénáři ke konci století oteplení o $6,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ oproti druhé polovině $19.$ století.

Jedním z důležitých charakteristik zkoumaných v rámci tepelného ostrova města je počet tropických dnů (teplota dosáhla aspoň $30\text{ }^{\circ}\text{C}$). Jelikož okolí Prahy je obecně také velmi teplé díky Polabí, tak v létě nejsou zaznamenány dramatické rozdíly mezi centrem Prahy a venkovskou krajinou (Obr. 6a). Naopak rozdíl mezi městskou a příměstskou oblastí je již znatelný, jelikož není tolik zkreslen přirozenými faktory. V centru Prahy se v období $1961\text{--}2020$ objevilo v průměru $12,8$ dnů za rok a v příměstských oblastech okolo $7,7$ dne za rok. V jednotlivých letech jsou rozdíly i kolem $10\text{--}15$ dnů. Rozdíly se zvětšují v posledních letech, jelikož rostoucí trend počtu tropických dnů je výrazně větší v centru než v okrajových částech (Obr. 6b,c).



Obr. 4 Průměrná (a), maximální (c) a minimální (e) teplota vzduchu a jejich trendy (b, d, f) v období 1961–2020 na území Prahy a středních Čech.

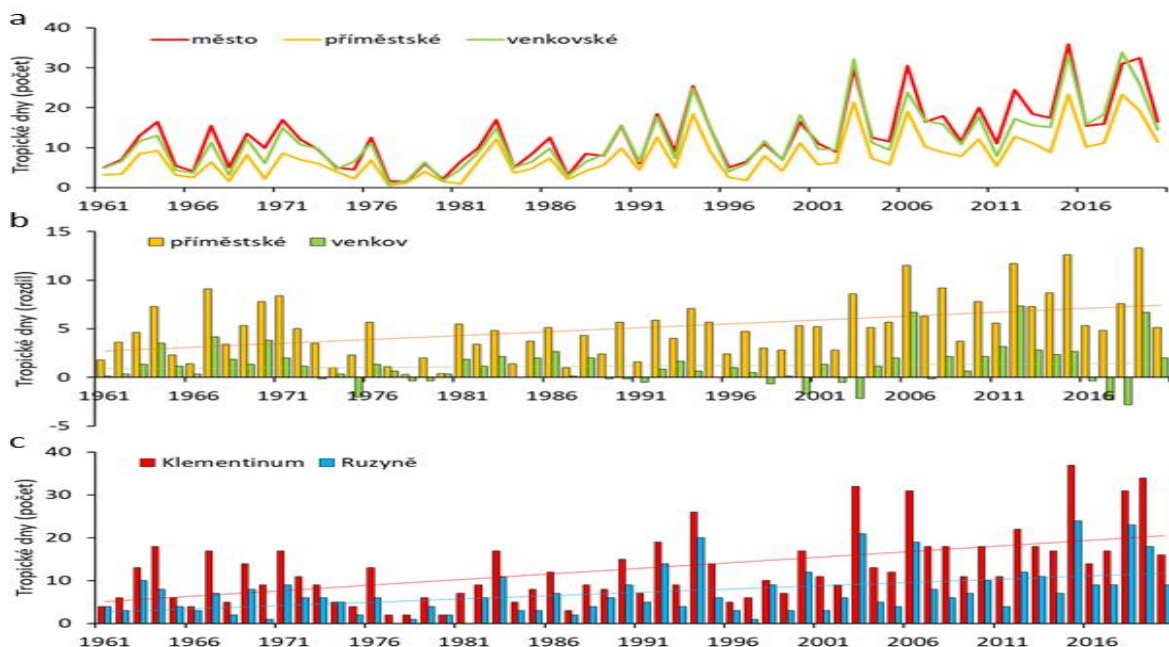


Vytvořeno na základě klimatických modelů EURO-CORDEX (studený-střední-vlhký model, RCP 2,6-8,5)

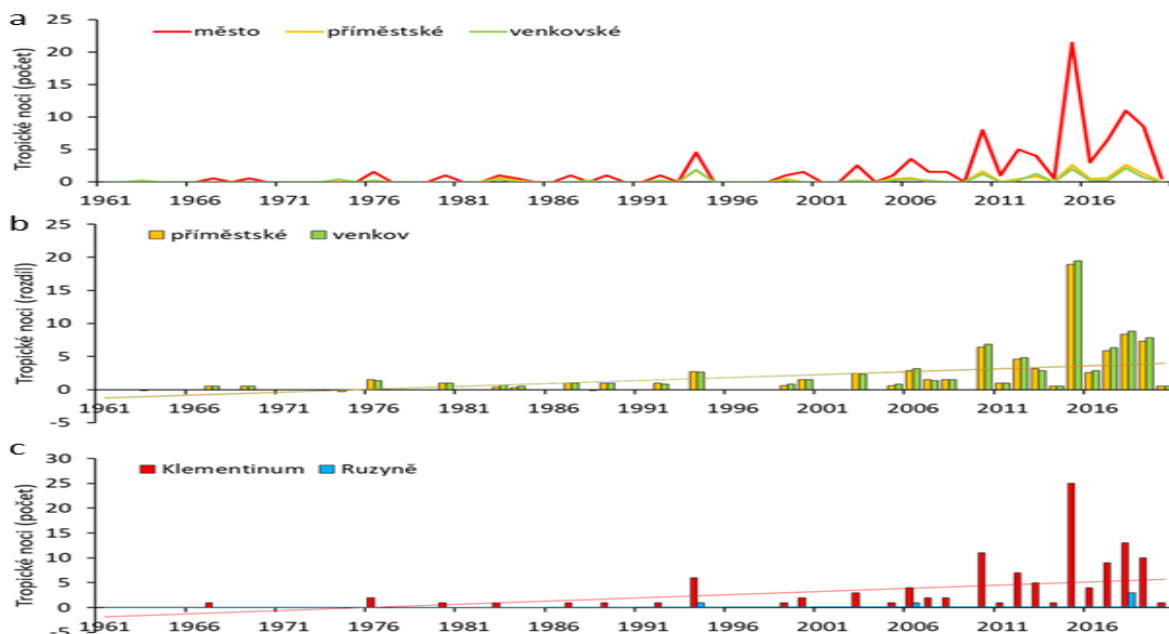


Obr. 5 Vývoj průměrné roční teploty vzduchu v Praze-Klementinum (1775–2100). Budoucí klima, klimatické modely EURO-CORDEX (Zdroj: Ústav výzkumu globální změny AV ČR)

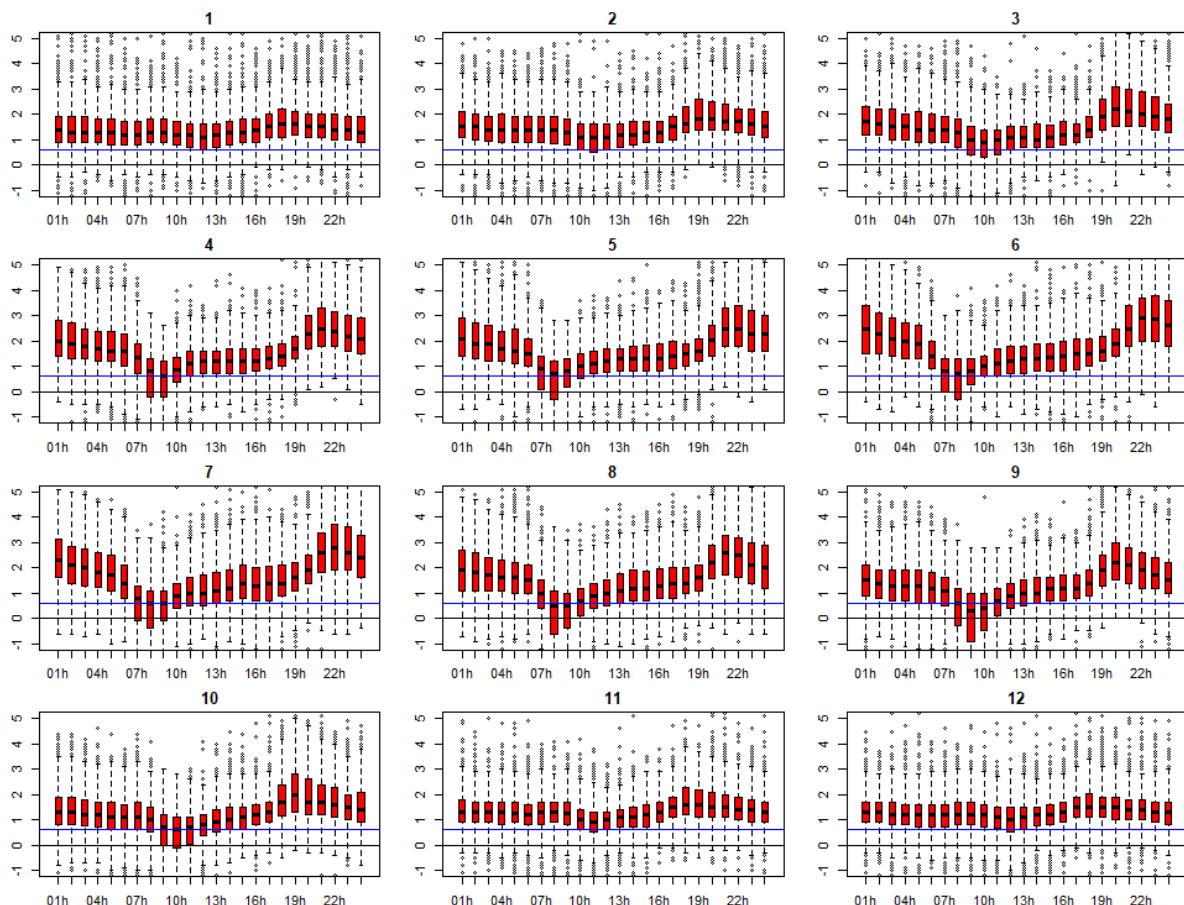
V poslední dekádě 2011–2020 narostl počet tropických dnů 2,3krát oproti období 1961–1970. Průměrný počet tropických dnů v centru Prahy v období 2011–2020 byl 21,9. U příměstských stanic to bylo jen 13,7 dnů, a i velmi teplé okolí mělo těchto dnů nepatrně méně než centrum města (19,8 dne).



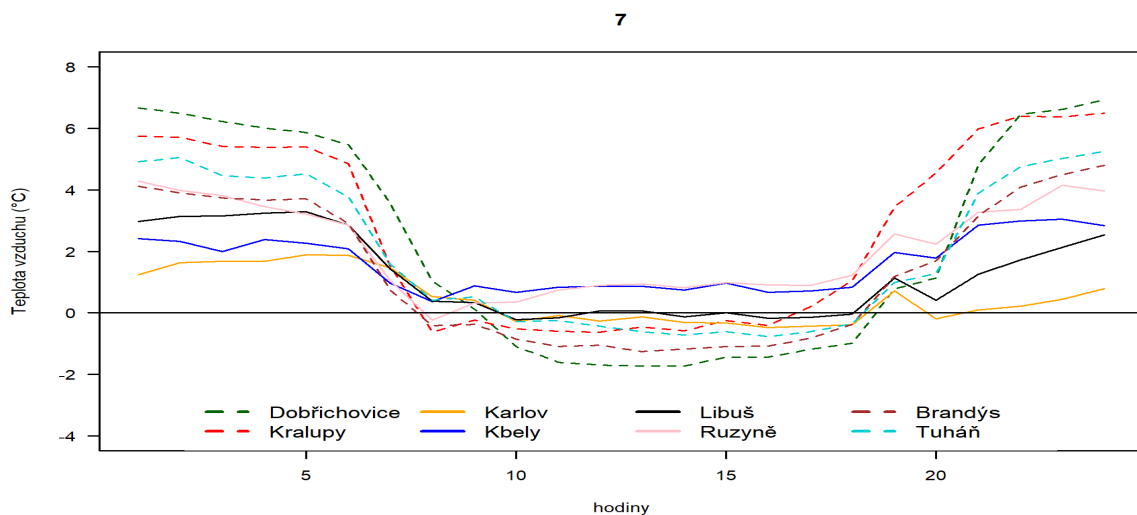
Obr. 6 Počet tropických dnů v centru, v příměstských částech a na venkově (a), rozdíl jejich počtu v centru města oproti okolí (b) a porovnání dvou reprezentativních stanic Klementinum (městská stanice) a Ruzyně (příměstská stanice) (c)



Obr. 7 Počet tropických nocí v centru, v příměstských částech a na venkově (a), rozdíl jejich počtu v centru města oproti okolí (b) a porovnání dvou reprezentativních stanic Klementinum (městská stanice) a Ruzyně (příměstská stanice) (c)



Obr. 8 Rozdíl teploty vzduchu v jednotlivých hodinách a měsících mezi pražskými stanicemi Karlov (městská stanice) a Ruzyně (venkovská stanice).



Obr. 9 Rozdíl teploty vzduchu v jednotlivých hodinách v červenci mezi Prahou-Klementinem (městská stanice) a okolím do 30 km.

Další důležitou charakteristikou je počet tropických nocí (teplota vzduchu neklesne pod 20 °C). Ty se typicky vyskytují hlavně v centru města a je to fenomén spjatý v České republice s klimatickou změnou umocněnou o působení tepelného ostrova města. Jak lze vidět na Obr. 7, do roku 2000 se tento jev objevoval sporadicky. Po tomto roce dochází k markantnímu nárůstu,

ale výhradně v centru města. V posledních 10 let se vyskytly v průměru tyto dny 6krát za rok, ale například v roce 2015 jich bylo v Klementinu zaznamenáno dokonce 25.

Jak už z předešlého textu vyplývá, největší rozdíl mezi centrem města a okolím je pozorován v nočních hodinách, což je způsobeno špatnou ventilací městských ulic (efekt kaňonu) a také použitými materiály, které se během dne více rozežřejí a ukládají teplo, a zároveň se ve městě zmenšuje přirozený výpar (voda kanalizací z ulic rychle odteče). Pro zjištění, v jakou část dne je vliv tepelného ostrova největší, můžeme porovnat jednotlivé hodiny.

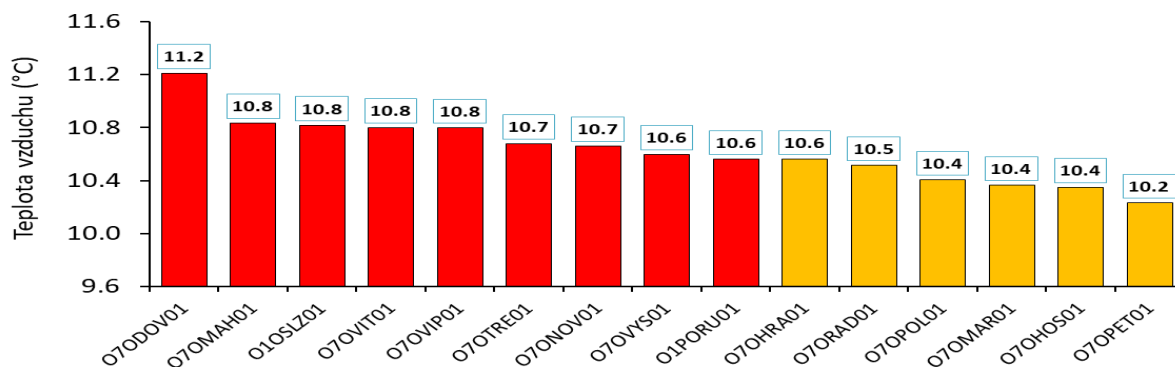
Na Obr. 8 lze vidět rozdíl mezi Karlovem (městská stanice) a Ruzyní (příměstská stanice) v jednotlivých hodinách a měsících. Obecně lze konstatovat, že největší rozdíly jsou po západu a před východem Slunce. Naopak nejmenší odlišnost nastává krátce po rozednění, a pak rozdíl postupně narůstá. Průměrné rozdíly na těchto dvou zkoumaných stanicích během celého roku jsou mezi 19 a 22 hodinou, kdy přesahují 2 °C. Nejmenší pak mezi 7 a 9 hodinu, a to okolo 0,8 °C. V odpoledních hodinách je to pak od 1,1-1,4 °C. Během roku nastávají největší rozdíly v období duben až říjen. Jelikož toto vyhodnocení s uvážením všech případů může být částečně zkreslující, doporučujeme sledovat jednotlivé situace. Pro tyto účely byly vybrány pouze slunečné dny bez oblačnosti, a to v červenci (Obr. 9). Při porovnání Klementina a stanic v okolí do 30 km je vidět, že během dne se dokáže okolí rozežrát i více než vlastní centrum města, ale se západem Slunce dochází k dramatickému rozdílu, kdy hustě zastavěná část města se nedokáže výrazně vychladit, a je tam teplota vyšší až o 7 °C.

4 Měření pomocí účelových, příklad Ostrava, umístění – popis druhů městského prostředí, uvedení průběhu teploty a vlhkosti, intenzity srážek, využití synoptických situací

Tepelný ostrov Ostravy identifikovaný pomocí husté sítě meteorologických stanic

Město Ostrava je ideální ukázkou možnosti zkoumání tepelného ostrova města na základě husté sítě účelových meteorologických stanic. Ty jsou k dispozici od roku 2018, proto analýza bude zaměřena na období 2018–2020. Stanice byly rozděleny na městské (10), příměstské (6) a venkovské (3). Stanice O7ODOV02 (Dolní oblast Vítkovic, Vysoká pec) nebyla do analýz počítána, jelikož její řada je kratší.

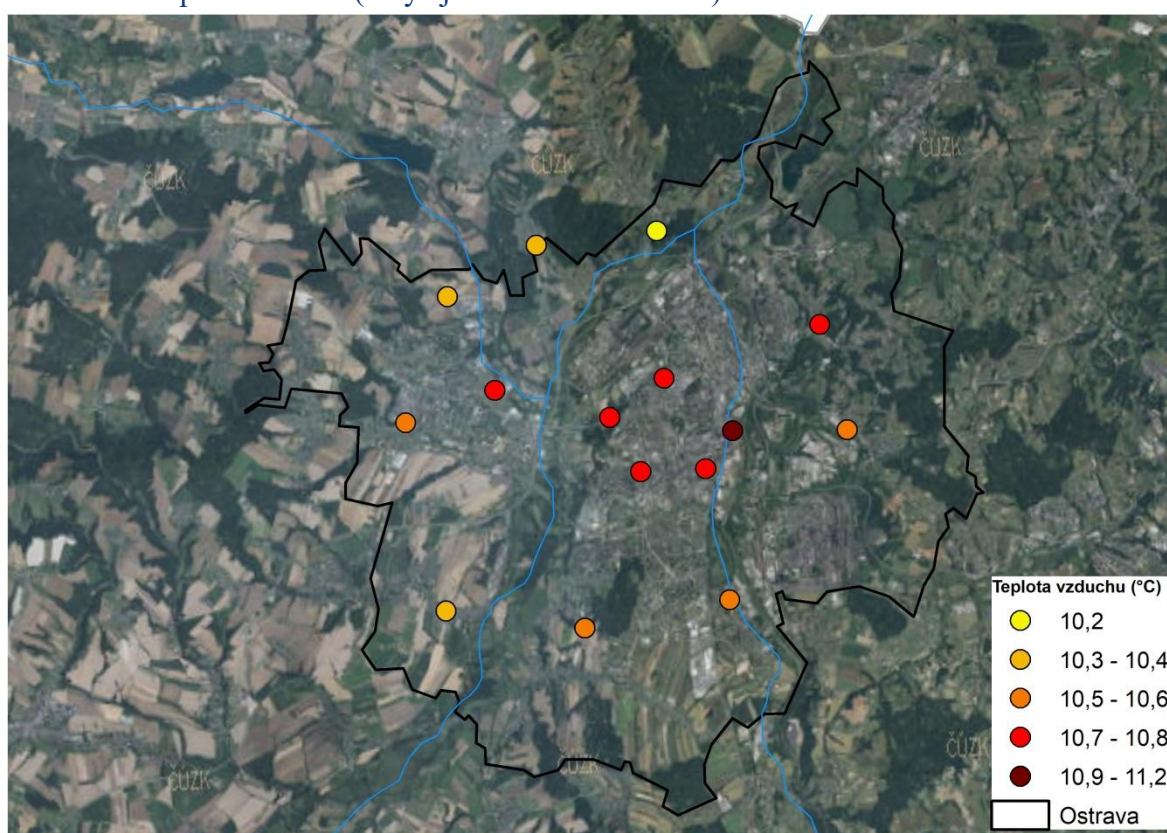
Pro první představu o chování tepelného ostrova v rámci města sloužilo pouhé porovnání průměrné roční teploty vzduchu na městských a příměstských stanicích, tedy na velmi malém prostoru. Průměrná teplota vzduchu byla použita jako univerzální prvotní ukazatel. Všechny 10 městských stanic mělo vyšší průměrnou roční teplotu v letech 2018–2020 než stanice příměstské (Obr. 10).



Obr. 10 Průměrná roční teplota vzduchu na městských (červeně) a příměstských (oranžově) meteorologických stanicích v Ostravě v letech 2018–2020

Nejteplejší stanicí je O7ODOV01 (Dolní oblast Vítkovic) s průměrnou teplotou 11,2 °C. Naopak nejchladnější je příměstská stanice O7OPET01 (Petřkovice) s průměrnou teplotou 10,2 °C (Obr. 11). Rozdíl tedy činí 1 °C. Rozdíl všech městských a příměstských stanic je v průměru 0,4 °C.

Největší rozdíl mezi průměrnou teplotou vzduchu ve městě Ostrava a venkovem je v dubnu až srpnu, kdy městské stanice jsou o 0,6 °C teplejší (Obr. 12a). Naopak malý rozdíl je spíše v chladném půlroce. Rozdíl oproti příměstským stanicím je během celého roku vesměs vyrovnaný a to okolo 0,4 °C ve prospěch města. Maximální teploty vzduchu jsou u příměstských stanic v období květen až srpen dokonce vyšší než u městských (Obr. 13b), tedy okraj města se nám v tomto případě rozežřeje více, což je pravděpodobně dáno specifickou strukturou města Ostrava. Oproti venkovským stanicím je ale město v období od dubna do srpna teplejší (+0,4 °C). Naopak v zimě jsou maximální teploty vzduchu vyšší v okolí Ostravy než ve městě. Jak už ukázaly předešlé analýzy, tak největší a nejmarkantnější rozdíl je v případě minimálních teplot vzduchu (tedy zjednodušeně nočních).

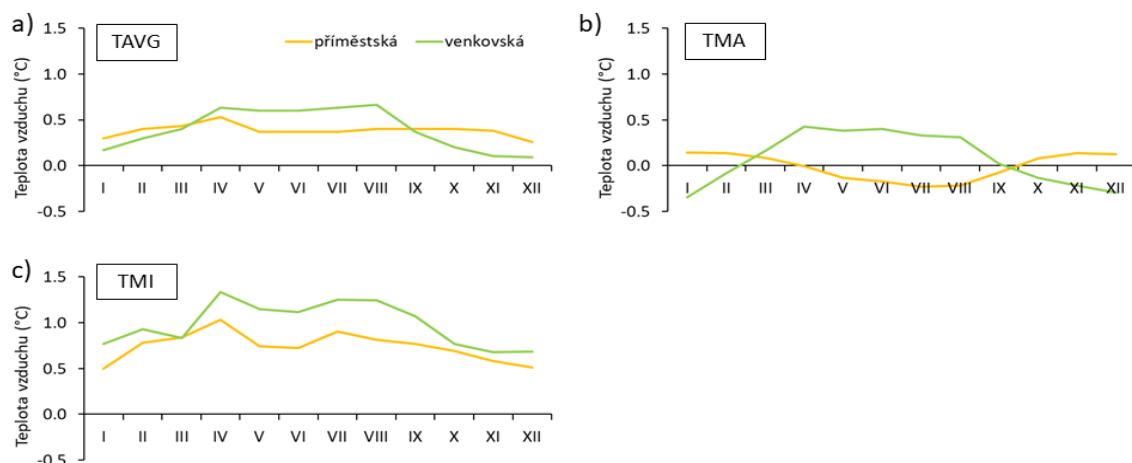


Obr. 11 Rozmístění stanic v Ostravě s označením nejteplejší a nejchladnější

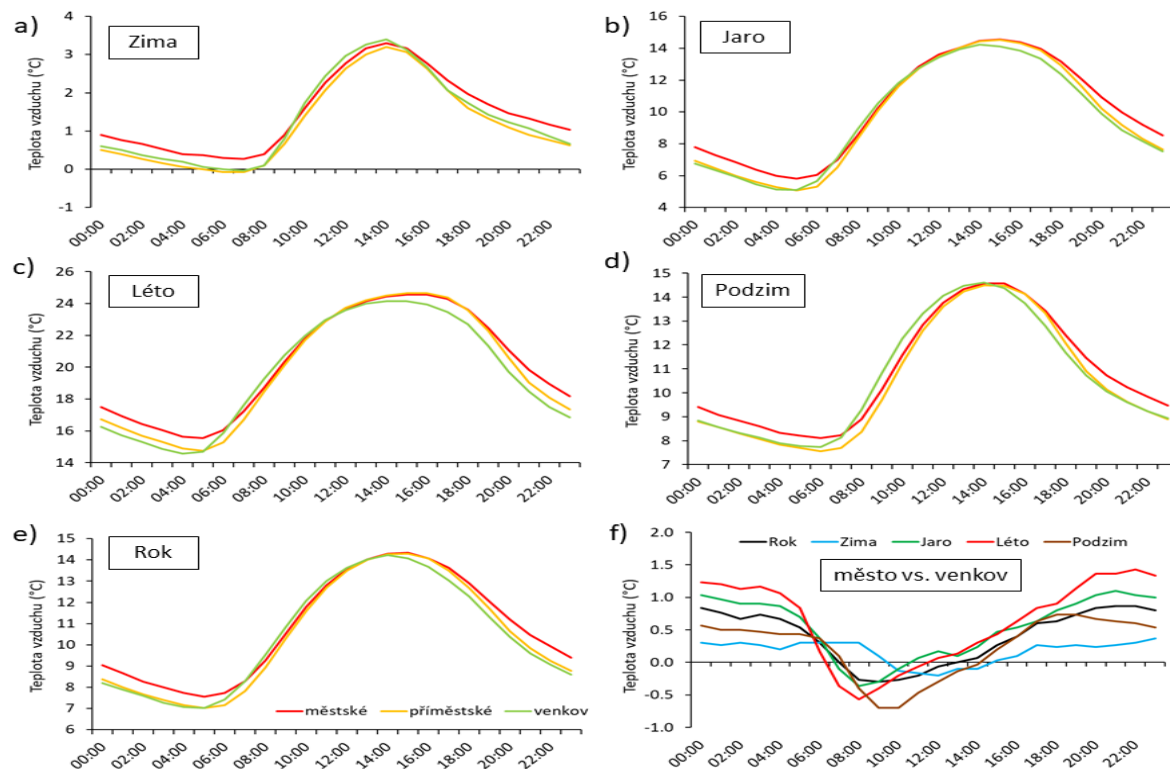
Konkrétně oproti okolí jsou minima ve městě vyšší v průměru nejvíce v dubnu, červenci a srpnu a to o 1,3 °C (Obr. 12c). Nejmenší rozdíl je v listopadu a prosinci, kdy je oblast města teplejší o 0,7 °C než venkov.

Pro posouzení tepelného ostrova města je hlavním nástrojem analýza denního chodu teploty vzduchu. Ta se pro většinu měst shoduje v jednom faktoru. Jak už naznačovala analýza jednotlivých teplot vzduchu (maxima, minima, průměry), tak městské prostředí je teplejší v nočních hodinách než během dne. I na příkladu husté sítě měření v Ostravě se to potvrzuje, a to během celého roku. Největší rozdíly jsou mezi 20. a 7. hodinou ranní (Obr. 13). Pokud analyzujeme všechny dny během roku v letech 2018–2020, tak nejvyšší průměrný rozdíl byl 0,7 °C ve 22 hodin (SEČ) mezi městským a příměstským prostředím a 0,9 °C v 21 a 22 hodin (SEČ) mezi městskými a venkovskými meteorologickými stanicemi (Obr. 13e,f). Nejvyšší

průměrné rozdíly nastávají na jaře a v létě (Obr. 13b,c,f). V létě je město v průměru o 1,4 °C teplejší než venkov a to ve 22 hodin. Na jaře je tento rozdíl o něco nižší a to 1,1 °C (ve 21 hodin). V zimě je rozdíl mezi městem a okolím vyšší pro příměstské oblasti než pro venkovské (Obr. 13a,f). Opět platí, že tepleji je ve městě hlavně mezi 22. a 6. hodinou, a to až okolo 0,4 °C. Na podzim (Obr. 13d,f) se největší rozdíl časově posouvá a město je oproti venkovu nejteplejší v 18 a 19 hodin (o 0,7 °C). Naopak po ranním svítání je dopoledne (8-11 hodin) okolí města většinou teplejší než vlastní město. Průměrná roční hodnota činí zhruba 0,3 °C ve prospěch venkova.



Obr. 12 Rozdíl průměrné (TAVG), maximální (TMA) a minimální (TMI) teploty vzduchu na městských stanicích oproti příměstským a venkovským v jednotlivých měsících v Ostravě a okolí v letech 2018–2020

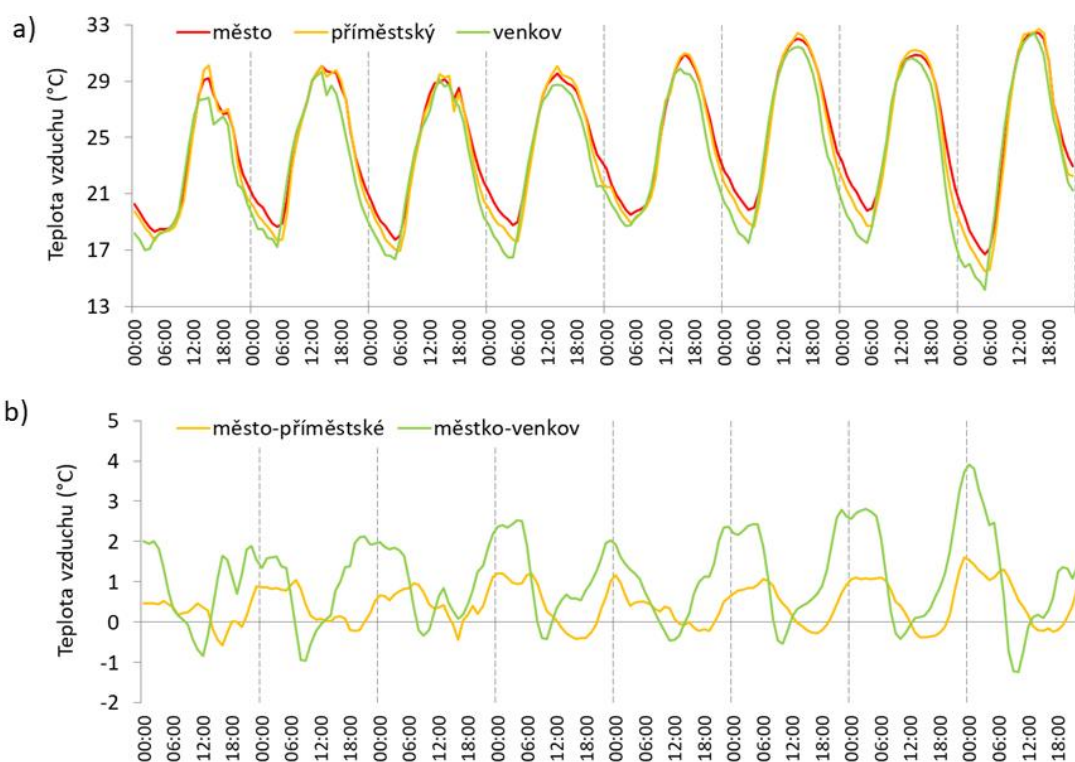


Obr. 13 Denní chod teplot v městském, příměstském a venkovském prostředí v Ostravě a okolí v jednotlivých sezonách (a-e) a rozdíl mezi městem a venkovem (f)

Pro analýzu chování tepelného ostrova města je dobré vybrat si určitou horkou vlnu a během ní zkoumat, jak se vyvíjely teploty vzduchu. Je totiž předpoklad, že ve změněném budoucím klimatu budou podobné vlny nastávat častěji. Jako příklad uvádíme 8denní horkou vlnu z období 28. 7. až 4. 8. 2018. Nebyly v ní sice dosahovány rekordní teploty, ale šlo o souvislou delší epizodu. Průměrná denní teplota vzduchu (počítána z hodinových dat) na městských stanicích byla 24,6 °C, na příměstských pak o 0,4 °C a u venkovských o 1,1 °C nižší. Tyto rozdíly byly dány opět převážně nočními, tedy minimálními teplotami vzduchu. Maximální teplota během epizody činila 32,7 °C jako průměr příměstských stanic a 32,4 °C jako průměr na městských a venkovských stanicích. Minimální teplota klesla na venkovských stanicích klesnout na 14,2 °C, na městských bylo minimum vyšší o 2,6 °C.

S rostoucí délkou horké vlny se zvyšuje i rozdíl mezi městem a venkovem, a to převážně v noci (Obr. 14). Nejviditelnější rozdíl je mezi 22. a 3. hodinou ranní. První den bylo město v noci teplejší než okolí o 2 °C, ale v poslední den horké vlny už činil rozdíl v nočních hodinách až 4°C. Mezi městským a příměstským prostředím byl znatelný rozdíl jen v noci. Naopak mezi městem a venkovem nastává i během odpoledních hodin.

Horká vlna 28.7-4.8.2018



Obr. 14 Průběh (a) a rozdíl (b) teplot vzduchu během horké vlny 28. 7. – 4. 8. 2018 v Ostravě a okolí

Teplota vzduchu se odráží ve výskytu klimatických indexů, které mohou lépe popsat chování tepelného ostrova města. Mezi vybrané charakteristiky patří počet letních, tropických a mrazových dnů a také tropických nocí.

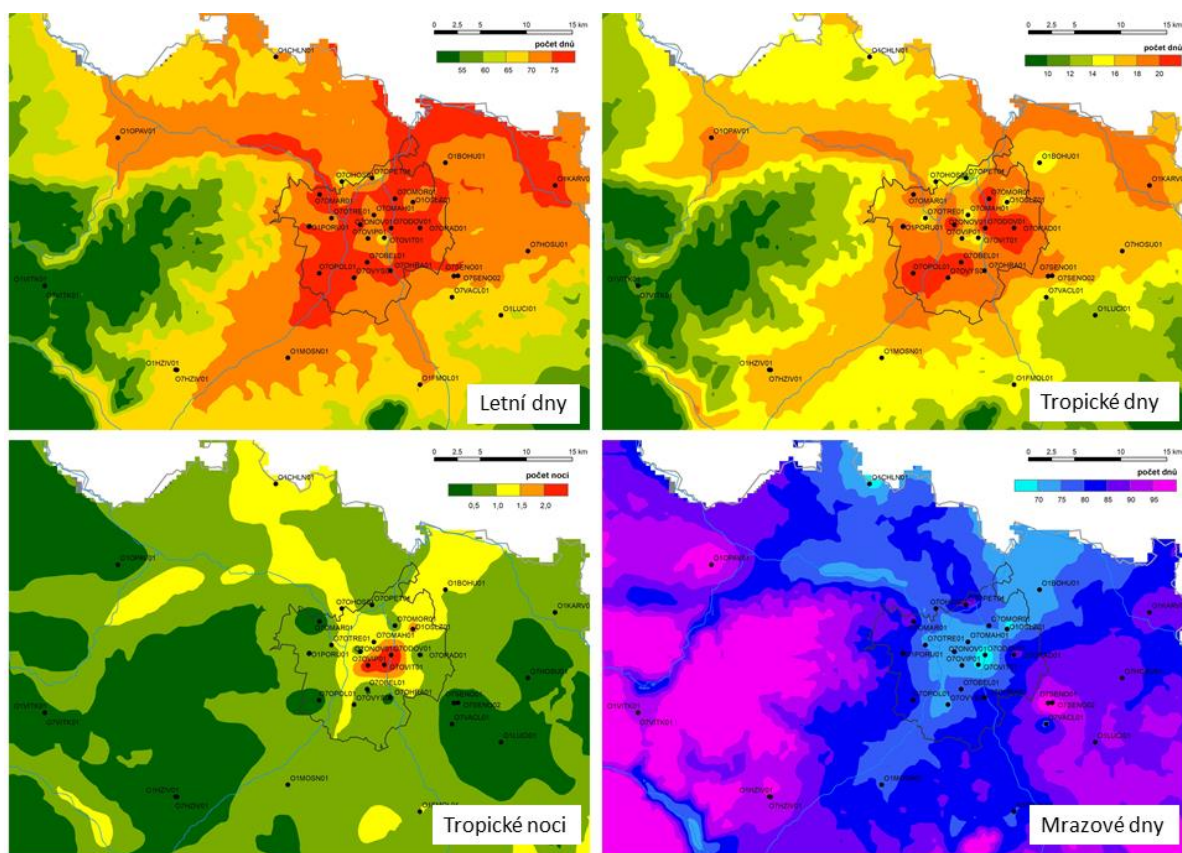
Letní den nastává, když teplota vzduchu dosáhne aspoň 25°C. Průměrný počet letních dnů v letech 2018–2020 v katastru Ostravy byl 75,4. Nejvíce v celém Moravskoslezském kraji bylo těchto dnů zaznamenáno v centru města Ostravy na stanici O7ORAD01 (Radvanice) a to 86,7 dne. Jak lze vidět na Obr. 15, tak nejvíce dnů připadá právě na město Ostrava. Na druhou stranu příměstské stanice O7OHOS01 (Hošťálkovice) a O7OPET01 (Petřkovice) mají jen 69,0 a 70,3

letních dnů, což je o 19 % méně než městské stanici Radvanice. Na našich vybraných venkovských stanicích byl tento počet mezi 66,7 až 74,7 dne.

Tropický den nastává, když teplota vzduchu dosáhne aspoň 30°C. Průměrný počet tropických dnů byl v oblasti katastru Ostravy 18,8 v letech 2018–2020. Nejvíce jich bylo opět zaznamenáno na stanici Radvanice a to 27. Opět je vidět, že nejvíce těchto dnů připadá na centrum města Ostravy (Obr. 15). V kategorii nad 20 dnů není žádná stanice mimo město Ostrava. Naopak stanice Hošťálkovice měla těch dnů o 44 % méně (15,3 dne). Na venkovských stanicích byl tento počet od 12,3 do 18,0.

Tropická noc nastává, když teplota v noci neklesne pod 20°C. Na mapě (Obr. 15) je zcela zřetelně vidět, že tropické noci jsou vázány hlavně na středy města a jsou dány horší ventilací a také nočním sáláním nahromaděného tepla z betonových povrchů. Tropická noc je hlavně nebezpečná v kombinaci s tropickým dnem, následek zvýšená zdravotní rizika. Průměrně se vyskytne na katastru Ostravy jedna tropická noc za rok, při značných prostorových rozdílech. Na stanici O7ODOV01 (Dolní Vítkovice) se vyskytly v průměru 3 noci za rok v letech 2018–2020. Naopak na příměstské stanici O7OMAR01 (Martinov) se nevyskytl ani jeden den.

Tepelný ostrov se neprojevuje jen během letních měsíců, ale i například v zimě. Jako dobrý ukazatel slouží počet mrazových dnů (minimální teplota vzduchu je pod bodem mrazu, ale maximální je kladná). Průměrný počet mrazových dnů na území Ostravy byl v letech 2018–2020 78,1. Nejméně jich je v oblasti Vítkovic a to 64,7 dne (Obr. 15). Naopak na příměstské stanici Petřkovice jich je 86,3, tedy o 35 % více. Na venkovské stanici O7SENO01 (Šenov) jich bylo dokonce 92,3, což je o 44 % více než ve Vítkovicích. To má dopad na menší množství sněhu a tvorbu námrazových jevů. Z tohoto pohledu má centrum města výhodu, může být méně náročné na úklid množství sněhu a na menší množství posypových materiálů.



Obr. 15 Počty dnů s charakteristickou teplotou vzduchu v Ostravě a okolí v letech 2018–2020

5 Letecké snímkování, postupy, hodnocení získaných map, dálkový průzkum

Přístrojové vybavení použité pro letecké skenování se skládalo ze tří hyperspektrálních skenerů - CASI, SASI, TASI (ITRES Research Limited), snímajících obrazová data v rozsahu viditelného, krátkovlnného a dlouhovlnného infračerveného elektromagnetického záření. Současně s hyperspektrálním skenováním probíhalo 3D letecké laserové skenování (LiDAR), pro které byl využit přístroj Riegl LMS Q-780. Pozice a prostorová orientace leteckého nosiče byla zaznamenávána dvěma GNSS/IMU jednotkami Applanix. Dataily technických parametrů jsou dostupné v odkazu [<https://olc.czechglobe.cz/flis/>].

Kroky předzpracování obrazových leteckých dat. Všechna data získaná metodami dálkového průzkumu Země jsou ovlivněna charakteristikou snímací aparatury a vlastnostmi atmosféry mezi senzorem a snímaným povrchem. Z tohoto důvodu, před vlastní analýzou/interpretací, se v závislosti na kategorii dat provádí několik kroků (korekcí). Tyto postupy jsou blíže popsány v následujících odkazech [<https://olc.czechglobe.cz/zpracovani-dat/zpracovani-casi-a-sasi/>], [<https://olc.czechglobe.cz/zpracovani-dat/zpracovani-tasi/>], [<https://olc.czechglobe.cz/zpracovani-dat/zpracovani-dat-z-laseroveho-skeneru/>].

5.1 Mapy struktury pokryvu a teploty povrchů obcí

Pod mapovým výstupem zde rozumíme graficky upravenou tematickou mapu v png/pdf souboru, primárně vhodnou k vizuální interpretaci po jejím zobrazení či vytištění. Digitálním tematickým výstupem rozumíme georeferencovaná data, ze kterých je pdf soubor vytvořen po doplnění mapových sounáležitostí (měřítko, legenda, atd.). Tyto tematické vrstvy jsou pro experty z magistrátů měst (např. Oddělení dat, analýz a evaluací MMB) velmi důležitými vstupy do jejich analýz a územního plánování. Pro jednoduchost budeme v dalším textu nazývat oba produkty jako mapy. Výsledkem zpracovaných leteckých hyperspektrálních, leteckých LiDARových a pozemních dat jsou pro všechna zájmová území následující mapy aktuální k termínu snímání:

1. mapa teploty povrchů
2. mapa průměrné emisivity povrchů
3. model reliéfu terénu
4. model reliéfu povrchu
5. mapa normalizovaných výšek povrchu
6. mapa tříd pokryvu

Všechny tyto výstupy jsou uživatelům k dispozici ve třech datových typech: 1/soubor PDF/PNG/JPG jako mapa pro tisk; 2/soubor GEOTIF pro další aktivní využití aplikačními garanty.

Metody zpracování map

Společným jmenovatelem pro vytvoření výše uvedených map jsou data z leteckého skenování nasnímaná po jednotlivých liniích opakovaných přeletů letadla nad daným územím. Pro data získaná z pasivně snímajících hyperspektrálních skenerů CASI, SASI a TASI jsou kroky předzpracování podobné a využívají i podobný či stejný software. Jedná se o radiometrické, atmosférické korekce a georeferencování. Předzpracování i vlastní zpracování dat z aktivního LiDAR skenování se od předcházejících liší.

5.2 Mapa teploty povrchů a mapa širokopásmové emisivity povrchů

Oba produkty jsou výsledky získanými z dat hyperspektrálního skeneru TASI.

5.2.1 Radiometrické korekce

Radiometrické korekce nasnímaných dat se provádí v programu RadCorr Ver. 9.3.6.0. V průběhu radiometrických korekcí je nejprve provedeno odečtení pozadového šumu senzoru (DS - Dark Subtraction). Takto ošetřená data jednotlivých linií jsou převedena na radiometrické hodnoty

$[\mu\text{W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ nm}^{-1}]$. Pro tento přepočet jsou použity koeficienty odvozené z dat kalibračních těles snímaných na začátku a konci každé letové linie.

5.2.2 Georeferencování

Metoda georeferencování je totožná pro všechny 3 použité hyperspektrální senzory. Georeferencování se provádí metodou parametrického geokódování za pomoci dat pořízených GNSS/IMU jednotkou a digitálního modelu terénu v programu GeoCor Ver. 5.6.3. (ITRES Research Limited). V jednom kroku jsou provedeny geometrické korekce, ortorektifikace i georeferencování dat. Pro pře-vzorkování dat do souřadnicového systému je použita metoda nejbližšího souseda (nearest neighbor). Hyperspektrální data jsou georeferencována do souřadnicového systému UTM (zóna 33N, ETRS89). Z jednotlivých georeferencovaných linií jsou v programu ENVI (Harris Corporation) vytvořeny mozaiky celého pokryvu snímaných lokalit.

5.3 Mapy modelu reliéfu terénu, modelu reliéfu povrchu a modelu normalizovaných výšek povrchu

Datovým zdrojem pro vytvoření těchto modelů jsou mračna bodů nasnímaná leteckým LiDARem. Předzpracování dat spočívá ve výpočtu trajektorií letu, georeferencování a vyrovnaní relativní orientace laserových linií (stripů).

5.3.1 Výpočet trajektorií

Pro výpočet trajektorií je používán software POSPac 7.1 (Applanix - a Trimble Company) a ke konverzi trajektorií software Riegl -POFImport 1.7.3 (RIEGL Laser Measurement Systems GmbH). Vstupními daty jsou GNSS zápisy v systému ETRS89 a IMU měření s frekvencí 200 HZ a výstupem je trajektorie letu v systému ETRS 89.

5.3.2 Georeferencování

Pro georeferencování laserových dat je používán následující software od společnosti RIEGL Laser Measurement System GmbH: RiPROCESS 1.8.4 – software k výpočtům urovnání ALS dat; RiWORLD 5.1.3 – software ke georeferencování ALS dat; GeoSysManager 2.0.8 – správa databáze souřadnicových systémů a projekcí.

5.3.3 Vyrovnaní relativní orientace laserových stripů

Jako laserový strip jsou označována data nasnímaná v průběhu jedné letové linie. Při přímém georeferencování je v důsledku přesnosti měření GNSS/IMU jednotek patrná prostorová chyba mezi jednotlivými liniemi, kterou lze potlačit procesem relativní orientace. Vstupními daty pro urovnání laserových stripů jsou surová data z leteckého skeneru a vypočítané trajektorie letů. Data jsou načtena do softwaru RiPROCES (pro minimalizaci prostorové chyby se používá metoda nejmenších čtverců) a zpracována metodickým postupem určeným pro tento program. Nejdříve jsou vypočteny polohové a úhlové ofsety jednotlivých laserových stripů, které jsou po vzájemném vyrovnaní exportovány do jednoho datového souboru (bodového mračna) pro snímanou lokalitu.

5.4 Postup zpracování mapy holého terénu, mapy výšek a mapy povrchu

V dalším se odkazujeme na skripty z balíku lastoolsⁱ které kombinujeme s vlastními skripty v jazyce Python do kompletního zpracovatelského řetězce.

- Rozdělení zájmového území na dlaždice o velikosti 1000×1000 m (*lastile*). Tento krok je nezbytný z důvodů datové a výpočetní náročnosti. Práce s bufferovými zónami okolo dlaždic zaručuje, že při zpětném sesazení do celkové mozaiky předcházíme artefaktům na hranicích.
- Odstranění šumových bodů (*lasnoise*). Šumové body se mohou vyskytovat v mračnu nad úrovní povrchu města nebo naopak pod úrovní terénu, což by důsledek náhodných odrazů v atmosféře nebo důsledek koutových odrazů a chyb geometrické korekce. Jejich množství závisí na atmosférických podmínkách během skenování i na charakteru snímaného území. Za šumové se považují body, které se vyskytují osamocně (neadekvátně očekávané hustotě mračna) nebo které se vyskytují příliš vysoko nad úrovní terénu či naopak pod ní. (Aproximaci terénu předpokládáme dle oficiálního zdroje DMR4g zpracovaného ČÚZKⁱⁱ.)
- Klasifikace bodů terénu. Realizováno skriptem *lasground* s nastavením pro metropoli (odpovídá předpokládanému výskytu velkoplošných budov). Po následné vizuální kontrole byla klasifikace terénu na několika místech manuálně zpřesněna. Produktem rasterizace bodů klasifikovaných jako terén je **mapa holého terénu** (v prostorovém rozlišení 1 m, hodnoty jednotlivých pixelů představují nadmořskou výšku holého terénu).
- Přepočítání Z-souřadnice bodů z nadmořské výšky na výšku nad terénem (*lasheight*).
- Rasterizace bodového mračna (*lasgrid*) s přihlédnutím pouze k nejvyšším bodům uvnitř buněk.
- Ošetření rastru speciálním víceetapovým mediánovým filtrem s cílem zacelit mezery v povrchu budov a stromů. Výsledným produktem je **mapa výšek** (v prostorovém rozlišení 0.25 m, hodnoty jednotlivých pixelů představují výšku nad terénem).
- Sečtením mapy holého terénu a mapy výšek vzniká **mapa povrchu** (v prostorovém rozlišení 0.25 m, hodnoty jednotlivých pixelů představují nadmořskou výšku nejvyššího povrchu v daném místě).

5.5 Mapy tříd pokryvu

Pro získání mapy aktuálního stavu pokryvu v katastru města byly využity vstupy z předzpracovaných dat hyperspektrálních (HS) skenerů CASI, SASI a LiDAR (ALS). Jedná se o následující datové vrstvy:

- ALS – *výška* rastrová data v rozlišení 0.25 m, význam ... výška objektů nad terénem, zpracováno na základě bodového mračna laserového skenování pomocí skriptů *lastools*ⁱⁱⁱ a vlastních skriptů
- ALS – *amplitude, pulse width, nr of echos* rastrová data v rozlišení 0.25 m, význam veličiny popisující detailní charakteristiku odražených vln laserového skenování (síla odrazu, šířka odraženého pulzu a počet odrazů z jednoho paprsku), zpracováno na základě bodového mračna laserového skenování pomocí skriptů *lastools*, *opals*^{iv} a vlastních
- HS – *NDVI, SJSK* indexy
- rastrová data v rozlišení 0.8 / 2.0 m, význam ... vitalita vegetace odhadovaná z hodnoty typických poměrových vegetačních indexů (*NDVI*^v ... v blízké / *SJSK*^{vi} ... ve střední infračervené oblasti spektra), zpracováno v software^{vii}
- maska zájmového území rastrová binární data v rozlišení 2.0 m, zpracováno v software QGIS^{viii} (rasterizací vektorového vymezení zájmového území = katastr města + buffer 500 m)

- maska *voda* rasterová data pomocného charakteru v rozlišení 2.0 m vznikla jakou součet tří masek: a) prahování bodové hustoty mračna laserového skenování (*voda* v této vlnové délce neodráží); b) prahování hyperspektrálního kanálu ve střední infračervené oblasti (*voda* má v této vlnové délce nízkou odrazivost); c) oficiální vektorová vrstva vodních prvků DIBAVOD^{ix} dočištěná na základě našich leteckých dat

Zvolené třídy pokryvu:

1. **voda** ... výrazné vodní prvky = řeky, rybníky; drobnější vodní prvky = bazény apod., jsou-li rozlišitelné
2. přírodní povrchy s nezanedbatelnou výškou nad terénem >1m... vyšší vegetace = **stromy**, keře
3. přírodní povrchy se zanedbatelnou výškou nad terénem <1m... nízká vegetace = **travníky**, zelená pole
4. umělé povrchy s nezanedbatelnou výškou nad terénem ... **budovy**
5. umělé povrchy se zanedbatelnou výškou nad terénem ... **silnice**, chodníky, holá půda

Postup:

1. Software eCognition = objektově orientovaná klasifikace (dlaždicové zpracování z důvodu výpočetních nároků ... jednotná pravidla, tedy bez vlivu na výsledek po mozaikování).
2. Vymezení zájmového území – maska katastru.
3. Segmentace na malé homogenní objekty s využitím všech datových vrstev.
(Poznámka: Tyto virtuální objekty nemají ambici vymezovat hranice objektů reálného světa, např. celých budov, jejich smyslem je víceméně homogenním rozložením hodnot datových vrstev umožnit zatřídění každého polygonu do cílových tříd.)
4. Klasifikace na základě vrstvy *výška* na vysoké a nízké objekty.
5. Třídění vysokých objektů na **stromy** a **budovy** na základě vrstvy *NDVI*.
6. Vymezení třídy **voda** z nízkých objektů na základě masky *voda*. Třídění zbývajících nízkých objektů na **travníky** a **silnice** na základě vrstvy *NDVI*.
7. Reklasifikační úpravy:
 - Vyřazení z třídy **budovy**, pokud je objekt nižší než zadaný práh a prostorově méně rozlehlý než zadaný práh.
 - Přeražení do třídy **voda**, pokud objekt sousedí s plochou vody a splňuje méně přísný práh v masce *voda*.
 - Přeražení mezi třídami **stromy** a **budovy** na základě vrstvy *nr of echos*.
 - Zařazení neklasifikovaných drobných objektů do třídy s nejdelší společnou hranicí.
8. Export klasifikace ve formátu geotiff.

6 Kvalita ovzduší

Kvalita ovzduší obecně je do velké míry ovlivňována meteorologickými a rozptylovými podmínkami. V podmínkách České republiky jsou tyto faktory dokonce klíčové v meziroční variabilitě míry znečištění ovzduší. Mezi faktory ovlivňující míru znečištění ovzduší patří kromě již zmiňovaných meteorologických a rozptylových podmínek i množství emisí (množství znečišťujících látek emitovaných do ovzduší), sekundární reakce látek v ovzduší či výchozí stav.

Z meteorologických podmínek má na kvalitu ovzduší vliv například teplota a vlhkost vzduchu, rychlost a směr větru, množství srážek, intenzita slunečního záření či například teplotní zvrstvení atmosféry. Vliv teploty vzduchu na kvalitu ovzduší nelze paušalizovat. Jak vyšší, tak

nižší teplota vzduchu totiž může mít na kvalitu ovzduší pozitivní dopad, zásadní roli zde sehrává zejména roční období.

Nepřímý vliv spočívá v závislosti intenzity vytápění na venkovní teplotě. Jelikož je lokální vytápění domácností, zejména pak vytápění ve starých kotlích na tuhá paliva (uhlí, dřevo apod.), nejvýznamnějším a u některých látek téměř výhradním zdrojem emisí, je právě intenzita vytápění velmi významným faktorem kvality ovzduší. Obecně můžeme říci, že nejhorší bývá v ČR kvalita ovzduší při velmi nízkých teplotách v zimě, popř. v kombinaci se špatnými rozptylovými podmínkami. Teplotní zvrstvení atmosféry se projevuje na kvalitě ovzduší přímo – při vzniku přízemní teplotní inverze nedochází k dostatečnému rozptylu látek ve vertikálním směru a ty se tedy kumulují u povrchu. V těchto situacích je kvalita ovzduší výrazně zhoršená. Vliv tepelného ostrova města na kvalitu ovzduší je velmi komplexní a jejich vzájemný vztah je poměrně komplikovaný. Navíc je potřeba říci, že se nejedná o vztah jednosměrný – tak jako TOM může ovlivňovat kvalitu ovzduší, může kvalita ovzduší ovlivňovat intenzitu TOM.

Vysoké koncentrace aerosolových částic v ovzduší mohou zachycovat dlouhovlnné záření a v návaznosti na to zvyšovat intenzitu TOM. Na straně druhé mohou tyto vyšší koncentrace částic v ovzduší zároveň vyvolávat ochlazování mechanismem radičního působení (radiative forcing) tak, že odráží přicházející sluneční záření zpět do atmosféry před jeho dopadem na povrch (Cao et al., 2016).

6.1 Znečišťující látky v ovzduší

Obecně můžeme říci, že koncentrace každé monitorované znečišťující látky vykazují určitý specifický roční chod. Nejvyšší koncentrace bývají pozorované v zimě (z důvodu vytápění a z důvodu častějšího výskytu zhoršených rozptylových podmínek), naopak nejnižší v létě. Výjimkou je v tomto směru přízemní ozon, jehož chod je přesně opačný – nejvyšší hodnoty jsou pozorovány v létě za horkých jasných dní, nejnižší potom v zimě při oblačném počasí.

Města jsou plynofikovaná, navíc je zde významný podíl centrálně vytápěných bytů a domů. Tento způsob vytápění představuje z pohledu kvality ovzduší výrazně lepší variantu než vytápění v individuálních kotlech na tuhá paliva. V chladné části roku tedy bývají koncentrace některých znečišťujících látek, zejména suspendovaných částic PM₁₀ a PM_{2,5} a karcinogenního benzo[a]pyrenu, výrazně vyšší v některých malých obcích než ve městech.

Vysoké koncentrace aerosolových částic v ovzduší mohou zachycovat dlouhovlnné záření a tím zvyšovat intenzitu TOM, zároveň však mohou tyto vyšší koncentrace částic odrážet sluneční záření, zamezit tak jeho dopadu na povrch a vyvolat efekt ochlazování. Snížením aerosolu může dojít ke snížení intenzity TOM, a to primárně v noci, zároveň je však ve hře i fakt, že snížení intenzity TOM má negativní dopad na koncentraci aerosolových znečišťujících látek v blízkosti zemského povrchu. Teplejší dny s vlnou veder v létě a chladnější dny v zimě vykazovaly větší intenzitu výskytu aerosolu.

Poměrně komplikovaný je i vztah mezi TOM a koncentrací přízemního ozónu (Ngarambe, 2021). Jak již bylo zmíněno, nejvyšších koncentrací dosahuje přízemní ozón v letních měsících, kdy bývají teploty a intenzita slunečního záření nejvyšší. V poslední době se v Evropě navíc stává problémem dálkový přenos O₃, který je umožněn prouděním vzduchu ze zdrojových oblastí v jihovýchodní Asii do Evropy a Severní Ameriky. Studií byla zjištěna pozitivní korelace mezi intenzitou TOM a koncentracemi znečišťujících látek SO₂, NO₂, PM a CO. Naopak mezi intenzitou TOM a koncentrací O₃ byla zjištěna negativní korelace – s rostoucí intenzitou TOM klesala koncentrace O₃. Bylo pozorováno, že v noci naopak došlo k poklesu koncentrace O₃, neboť ozon byl spotřebováván přítomným oxidem dusnatým.

6.2 Vztahy mezi TOM a kvalitou ovzduší

Problematika městského tepelného ostrova úzce souvisí s kvalitou ovzduší a na celou věc je nutné pohlížet komplexně. Z výše uvedeného vyplývá, že strategie zmírňování TOM by měly respektovat vzájemné interakce mezi TOM a fenoménem městského znečištění ovzduší (Urban Pollution Island, UPI). Samotný vztah mezi TOM a kvalitou ovzduší je poměrně komplikovaný a ovlivňovat se navzájem mohou jak pozitivně, tak negativně. Příkladem zmírňovací strategie TOM může být výsadba zeleně, díky které sice lze snížit intenzitu TOM, zároveň ale může dojít vzhledem ke snížené cirkulaci vzduchu a jeho omezenému promíchávání k nárůstu koncentrací NO a CO. Velmi zde záleží na konkrétním provedení opatření – například i na mezerách mezi stromy, druhu stromů apod.

Některé druhy stromů navíc produkují těkavé organické látky a přispívají tím ke tvorbě O₃. Podobně je tomu u použití vysoce odrazivých materiálů na městské povrchy – sice dochází ke snížení intenzity TOM, zároveň se však snižuje i planetární mezní vrstva (PBL) a tím dochází k nárůstu PM₁₀ a vzhledem k vyšší míře odrazu slunečních paprsků roste i koncentrace přízemního ozonu.

Případová studie vztahu mezi TOM a UPI probíhala v Berlíně (Li, 2018) v letních měsících v průběhu let 2010-2017. Bylo zjištěno, že oba jmenované fenomény, TOM a UPI, spolu interagují. Ze studie vyplývá, že zvýšená teplota vzduchu způsobená vlivem TOM snižuje míru znečištění ovzduší tím, že podporuje disperzi aerosolových částic směrem k vyšším mezním vrstvám atmosféry. Snížením intenzity TOM tedy dochází k nárůstu koncentrací PM₁₀ v blízkosti povrchu.

Problematika TOM se nevyhýbá ani naší zemi, a tak se i v rámci České republiky intenzivně zkoumá nástroj, který slouží mimo jiné k posuzování vlivu běžně zvažovaných opatření vedoucích ke zmírnění městských tepelných ostrovů na kvalitu ovzduší (Belda et al, 2021). Předmětem této studie je model Palm 6.0, pomocí něhož je simulován tok městské mezní vrstvy poblíž frekventované křižovatky v Praze. Díky aplikovanému modelu lze například sledovat vliv výsadby městské zeleně či použití vysoce odrazivých materiálů na městské povrchy na TOM a kvalitu ovzduší.

7 Metodický postup pro prevenci a mitigaci akutních dopadů tepelných ostrovů měst

Cílem této části metodiky je návrh souboru opatření k omezení možných negativních dopadů tepelných ostrovů měst. Soubor opatření se sestává z analytické části, z krátkodobých opatření, která jsou vázána na vznik krizové situace a z dlouhodobých opatření, obvykle urbanistického charakteru.

Předmětem této části metodiky je stanovení postupů pro prevenci a mitigaci akutních dopadů tepelných ostrovů (TOM), a to hlavně dopadů na zdraví obyvatel. Tato část metodiky se zaměřuje na preventivní kroky vedoucí k omezení dopadů krizových situací podporovaných TOM. Součástí je také stanovení podmínek, při nichž dochází k aktivaci nebo dalšímu rozvoji rizika. Dále tato část obsahuje možnosti reakce na vznikající krizovou situaci, možný způsob zajištění včasného varování a podklady pro zajištění individuální a kolektivní ochrany pro bezprostřední reakci ke snížení dopadů tepelných ostrovů měst.

Předpokládání uživatelé metodiky nebo jejích výstupů mohou být rozděleni do skupin:

- a) Veřejná správa a autority;
- b) Právníkové a podnikající fyzické osoby;
- c) Obyvatelstvo.

V rámci skupiny a) je vhodné využití metodiky zejména na úrovni veřejné správy, dále u IZS, zdravotnických a sociálních služeb. Tato skupina uživatelů může přímo působit na snižování negativních následků tepelných ostrovů měst či nepřímo napomáhat ke snižování rizika vzniku tepelných ostrovů měst, např. skrze územní plánování.

V rámci skupiny b) je doporučováno využití u zaměstnavatelů, neboť tito jsou dle Zákoníku práce povinni přijímat opatření ke snižování negativního ovlivňování zdraví nebo životů svých zaměstnanců. Do této skupiny uživatelů také patří další právnické či podnikající fyzické osoby vyvíjející aktivity, jež mohou mít dopad na obyvatele.

V rámci skupiny c): Opatření pro zmírnění dopadů TOM budou využitelná pro všechny skupiny obyvatelstva, avšak predispoziční a jiné faktory určitých skupin obyvatelstva (starší osoby, nemocné osoby, těhotné ženy, děti, ale i těžce pracující atd.) vyžadují tvorbu specifických adaptací pro tyto skupiny.

Vzhledem k využití kombinace prostorových aspektů, časově proměnných aspektů a zranitelnosti je možné opatření rozdělit následovně:

- Dlouhodobá opatření, např. změna v urbanistice a architektuře a zlepšení stávajícího stavu;
- Střednědobá opatření, např. tvorba systému pro včasné varování a vzdělávání; ta sice mají charakter obdobný dlouhodobým opatřením, ale ve skutečnosti obvykle slouží k vybudování připravenosti na krizové situace a ke zvyšování resilience
- Krátkodobá (akutní) opatření, např. ochrana jednotlivých osob nebo aktuální přemístění nejvíce zranitelných skupin osob do vhodného prostoru.

7.1 Fáze a kroky řešení metodiky

Metodika je rozdělena na základní fáze, které svojí posloupností umožňují uplatnění základních principů managementu rizik dle ČSN EN ISO 31001. Fáze řešení metodiky jsou sestaveny následovně:

- I) Identifikace možné hrozby a rozhodnutí o jejím řešení;
- II) Analýza hrozby a jejího prostorového rozložení;
- III) Nástroje k hodnocení hrozby včetně rozpoznání její aktivity;
- IV) Preventivní opatření
- V) Mitigační opatření

Nedílnou součástí metodiky jsou procesy kontinuálního zlepšování na základě Demingova (PDCA) cyklu¹, efektivní komunikace napříč zainteresovanými stranami a monitorování celého procesu.

7.1.1 Fáze I: Identifikace možné hrozby a rozhodnutí o jejím řešení

Jedná se o vstupní fázi, v níž dojde, nejlépe na základě konzultace s klimatologickým pracovištěm nebo zkušeností s již proběhlými vlnami veder, k rozhodnutí o potřebě řešení rizik souvisejících s TOM. Pokud je tato potřeba shledána, dojde k započetí procesu metodiky a vytvoření příslušné pracovní skupiny a jejímu vybavení potřebným mandátem. Pracovní skupina v ideálním případě zahrnuje orgány veřejné správy, urbanisty, klimatology, krizové manažery, IZS, zdravotníky a sociální pracovníky a případně další stakeholdery.

7.1.2 Fáze II: Analýza potenciální hrozby a jejího prostorového rozložení

Tato fáze je zaměřena na procesy získání a vyhodnocení dat a ke znalostně orientovanému rozhodování ve všech výše uvedených časových horizontech (Obr. 16). Zahrnuje tři typy aspektů:

- a) **Prostorové aspekty**, které jsou vázány na zvyšování nebezpečnosti tepelného stresu a jeho dopadů vyplývajících z charakteru prostředí hodnoceného místa (mikroklimatické prvky) a z klimatických podmínek v dané lokalitě. Cílem analýzy prostorových aspektů je nalezení a klasifikace prostor (oblastí) vykazujících nebezpečí svázané s projevy TOM. Nalezení zmíněných prostor (oblastí) je možné s využitím postupu v jiných částech této metodiky. Výstupem analýzy aspektů je zařazení prostor (oblastí) do kategorií charakterizujících úroveň přírůstku efektivní teploty v důsledku vytvoření TOM v episodách veder a jejich prostorové zobrazení. Tyto aspekty mají v podstatě trvalý charakter, ale TOM vytvářejí pouze v omezených časových periodách vln veder.
- b) **Aspekty expozice** jsou vázány na vystavení aktuálním účinkům tepla, kterému jsou lidé (nebo jiný zranitelný cíl, například technologie) vystaveni. Expozice je výsledkem kombinace intenzity tepla a doby působení. Intenzita působení je umocňována negativními vlivy vyplývajících z projevů TOM v určitém prostoru (oblasti), tzn. že souvisí s prostorovými aspekty, které zvyšují tepelné zatížení působící na zranitelný cíl. Aspekty vázané na čas působení vyplývají z aktuálního stavu počasí a lze se o nich poučit také z historických záznamů a predikčních modelů.
- c) Součástí aspektů expozice je předpověď blízkého počasí – 2 až 3 dny. Za účelem stanovení aspektů expozice je možné využít i varování a předpovědi vydávané ČHMÚ (zatím obsahují jediný parametr – teplotu), ale také další parametry používané v jiných zemích nebo nově vyvinuté, např. indexy tepelné zátěže, WBGT index² nebo pocitové teploty. Tyto indexy jsou chápány jako plošné pro celou městskou aglomeraci, tedy ještě nezohledňují TOM jako takový.
- d) **Zranitelnost** je vlastností cíle, na který riziko působí. Z toho důvodu se jedná o osoby, na které mohou mít tepelné účinky včetně vlivu TOM zvýšené negativní důsledky. Zranitelnost je ovlivňována aktuálním stavem jedince, hydratací, oblečením včetně pokrývky hlavy, úrovní aklimatizace, fyzickou zátěží a dalšími aspekty. Pomocným vodítkem může být Nařízení vlády č. 361/2007 Sb. Zranitelnost jedince je také ovlivňována predispozicemi ovlivňující předcházející faktory, např. staré nebo nemocné osoby, těhotné ženy, případně další predispozice, které by měly být zohledněny ve faktorech zmíněných výše. Vhodným, nikoliv však jediným možným, výstupem analýzy zranitelnosti je zařazení do jedné z následujících úrovní zranitelnosti: nízká (tzn. normální/běžná), střední (zvýšená), vysoká. Zranitelnost se projevuje tím, že již menší tepelný stres způsobuje negativní účinky, a proto ji lze transponovat tak, jako by pro zranitelné osoby či subjekty byla aktuální teplota vyšší, tedy jako virtuální příspěvek k teplotě.



Obr. 16 Vztah jednotlivých kritérií a požadovaného výstupu hodnocení

7.1.3 Fáze III: Nástroje k hodnocení hrozby včetně rozpoznání její aktivace

Teplo expozice t_{exp} na lokální úrovni je pak vypočteno jako:

$$t_{exp} = t_{akt} + t_{TOM} + t_{virt}$$

Ohrožení tepelným stresem je stanoveno jako kombinovaný účinek tepla expozice a vlhkosti vzduchu s použitím hodnotících kritérií ILO, WHO nebo NIOSH. Na Obr. 17 je doporučená tabulka ILO³ s vyznačenými oblastmi úrovně ohrožení danými kombinacemi tepla a vlhkosti:

Tímto postupem dojde k zařazení každého hodnoceného místa do jedné ze čtyř kategorií: I - pozornost, II - velká pozornost, III - nebezpečí, IV - extrémní nebezpečí.

		Relativní vlhkost [%]													Teplota vzduchu [°C]		
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100			
	43.3	57.8													IV - Extrémní nebezpečí	Vysoké riziko mrtvice, vysoká pravděpodobnost úžehu	
	42.2	54.4	58.3														
	41.1	51.1	54.4	58.3													
	40	48.3	51.1	55.5	58.3												
	38.9	45.6	48.3	51.1	54.4	58.3									III - Nebezpečí	Riziko úpalu, svalových křečí a/nebo vyčerpání z tepla	
	37.8	42.8	45.6	47.8	51.1	53.9	57.8										
	36.7	40.6	42.8	45.6	47.8	50.6	53.3	56.7									
	35.6	38.3	40	42.2	44.4	46.7	49.4	52.6	55								
	34.4	36.1	37.8	39.4	41.3	43.6	45.3	48.1	51.9	53.2	57				II - Velká pozornost	Možný vznik úpalu, svalových křečí a/nebo vyčerpání z tepla	
	33.3	34.4	35.6	37.2	38.3	40.6	42.2	44.4	46.7	49.4	52.2	55					
	32.2	32.8	33.9	35	36.1	37.8	39.4	41.3	42.8	45	47.2	50	52.8	55.6			
	31.1	31.1	31.7	32.8	33.9	35.7	36.8	37.4	39.1	41.3	43.3	45	47.2	49.4			
	30	29.4	30.6	31.1	31.7	32.8	33.9	35	36.1	37.8	38.9	40.6	42.2	44	I - Pozornost	Možný vznik únavy	
	28.9	28.3	28.9	29.4	30	31.1	31.7	32.2	33.3	34.4	35.6	36.7	37.8	39			
	27.8	27.2	27.8	28.3	28.9	28.9	29.4	30	31.1	31.7	32.2	32.8	33.9	35			
	26.6	26.7	26.7	27.2	27.2	27.8	27.8	28.3	28.9	28.9	29.4	30	30	30.6			

Obr. 17 Ohrožení při různých hodnotách relativní vlhkosti a teploty vzduchu (ILO, 2010)

7.1.4 Fáze IV: Preventivní opatření

Preventivní opatření jsou realizována převážně v období mimo vlny veder, a to v dlouhodobém nebo střednědobém předstihu. Všechna opatření, jak preventivní, tak mitigační, se dělí do

celkem 5 úrovní a zohledňuje lokální situace. Jednotlivé části města, i relativně malé, mohou spadat do různých úrovní podle prostorového rozložení TOM.

Úroveň 0 (Plánování) *Celoroční plánování pro horké počasí, ohrožení 0.* Zahrnuje především urbanistická a životnímu prostředí blízka řešení, dále pak organizační opatření. Na úrovni místních komunit by mělo docházet k plánování, jakým způsobem je možné udržet budovy a prostory v chladu (urbanistické a arboristické úpravy, zateplení domů, světlé fasády, zatahování závěsů atd.), ale také plánování zajištění léků a chladných prostor. Tyto kroky by měly probíhat zejména v období mimo aktivaci vyšších úrovní opatření. Plánování je určeno zejména pro místní orgány a služby, pečovatelské domy a nemocnice. Jeho obsahem je příprava a plánování pro zmírňování dopadů pro nejvíce ohrožené skupiny obyvatel (staří, nemocní, děti). Dlouhodobá opatření: vzdělávání obyvatel, včasné varování, plánování urbanistických změn a jejich realizace.

Úroveň 1 (Připravenost) *Realizace přípravy na horké počasí mezi 1. červnem a 15. zářím.* Aktuální ohrožení max. I. Tato úroveň opatření je nastavena pro období, kdy je možné předpokládat výskyt vln veder. Hlavním účelem je revize připravených opatření, kontrola lokalizace nejvíce ohrožených osob nebo skupiny osob, kontrola existence a dosažitelnosti plánů pro horké počasí. Na počátku období je nezbytné provést detailní kontrolu, zdali neexistují další osoby, jež by mohly při nastalé vlně veder potřebovat pomoc a že obyvatelé vědí, jak udržet sebe v bezpečí před vlnami vedra (co, kdy a jak dělat).

Úroveň 2 (Pohotovost) *Jsou předpovídaný vysoké teploty s potenciálem negativního ovlivňování zdraví osob (v příštích dvou až třech) dnech, ohrožení max. II.* Realizace kroků této úrovně je standardně vázána na vydanou předpověď ČHMÚ v rámci SIVS na nebezpečný jev „vysoké teploty“ nebo „velmi vysoké teploty“, je však doporučeno využít také zhodnocení vlhkosti a zranitelnosti. Základním předpokladem je, že obyvatelé, zaměstnanci a jiné exponované osoby mají k dispozici potřebné informace. Mezi základní činnosti patří kontrola teploty v místnostech, zajištění chladných míst a zajištění dostatečného množství studené vody (zejm. pro osoby se sklonem k dehydrataci – např. starší osoby, děti). Místní komunity by měli věnovat pozornost předpovědi, mít zajištěné léky pro nemocné, kontrolovat dostatečný chlad v domácnostech osob, a dále se pravidelně kontrolují osoby, které mohou potřebovat pomoc.

7.1.5 Fáze V: Mitigační opatření

Je-li předpokládán výskyt jevu „*extrémně vysoké teploty*“, pak se přistoupí k realizaci opatření na úrovni 3 a 4 případně zároveň, a to dle rozhodnutí příslušného orgánu veřejného zdraví nebo krizového řízení (i na lokální úrovni). Je aktivován systém včasného varování.

Úroveň 3 (Velké nebezpečí pro zranitelné) *Při dosažení limitních hodnot nebezpečí.* Realizace kroků je při dosažení limitního ohrožení na úrovni III pro běžnou populaci a/nebo IV pro zranitelné skupiny. Realizace opatření je plánována veřejnou správou, podniky, personálem pečovatelských domů, nemocnic, škol a školek, pečovatelskými službami atd. Při realizaci dochází k aktivaci připravených plánů jednotlivých institucí, udržování provozu a služeb v upraveném režimu, zaměstnanci aktivně poskytují rady na pomoc potřebným skupinám osob, rady na udržování v bezpečí a chladu, doporučení na omezení cestování, kontrola návštěv a schůzek. Mezi další kroky patří doporučení k navštěvování nebo telefonování ohroženým skupinám osob (pečovatelské služby, charity, terénní péče atd.), akceptování doporučení a činností dle plánů, opětovné zveřejňování rad a doporučení k zajištění bezpečnosti v horkém počasí. Místní komunity (nebo rodiny) by měly v pravidelných intervalech kontrolovat osoby, které potřebují pomoc. V zaměstnání se aktivuje systém přátelské kontroly – zaměstnanci na sebe vzájemně dohlížejí.

Úroveň 4 (Krizová situace) *Výskyt extrémně vysokých teplot.* Realizace kroků je plánována při dosažení kategorie nebezpečnosti IV pro běžnou populaci. Opatření jsou obdobná jako na

úrovni 3, ale platí plošně pro celou populaci. Zranitelné skupiny jsou chráněny se zvýšenou péčí, zdravotní a sociální služby posíleny.

8 Závěr

Počasí a jeho dlouholetý režim, tedy podnebí, přes veškerý technický rozvoj významně ovlivňují lidskou společnost, která naopak svými aktivitami působí na celý klimatický systém. Přes veškeré zpochybňování o vlivu našich aktivit na tvorbu počasí a podnebí, je hospodářská činnost lidstva významným klimatickým faktorem. Jak dokládají klimatologické analýzy, dynamika vývoje klimatu může mít negativní dopady nejen na přírodu, ale i na nás, obyvatele Země.

Města jsou jednoznačně tvůrčí činnost člověka. Poskytují pro své obyvatele příznivější podmínky, proto jsou také stále více vyhledávána, tedy roste nejen jejich počet, ale i velikost. Městské prostředí se však stále více liší přírodních poměrů, ve kterých probíhal vývoj člověka. Proto se projevují i negativní dopady městského prostředí. Změna klimatu se nejvíce projevuje rostoucími teplotami vzduchu, ve městech, kde je radiční bilance ovlivněna umělými povrchy jsou potom teploty vzduchu, ale i povrchů za určitých situací ještě vyšší, hovoří se o tzv. tepelný ostrov města. Na těchto částech města jsou potom negativní dopady extrémů teplot častější a intenzivnější. Proto musíme využít všechny postupy na snížení jeho tvorby, ideálně jeho výskytu zabránit.

Tato metodika přináší podklady, jakými postupy získat údaje pro vyjádření městského klimatu tak, aby ve městech bylo vhodné klima, aby se co nejvíce omezily negativní dopady meteorologických extrémů jak na obyvatele, tak na prostředí měst.

Pro kvalitní analýzu klimatu daného města je základem příprava celého procesu od popisu podnebí dané oblasti, přes podrobné seznámení s poměry ve městě a stanovení lokalit pro měření pomocí účelové sítě, rozhodnutí o dalších formách měření včetně metod dálkového snímání. Důležitá je fáze využití získaných dat a jejich zpracování až do podoby mapových podkladů. Z těchto výstupů provést analýzu rizik a možných adaptačních a mitigačních opatření. Každý takto připravený projekt musí vést odborník a mít k dispozici zacvičené pomocníky. V každém případě je třeba zvážit vazbu mezi potřebnými údaji a finančními možnostmi.

Jak je v textu zdůvodněno, pro charakteristiku městského klimatu, zvláště potom tepelného ostrova, nestačí dostupná data ze sítě klimatologických stanic ČHMÚ. V metodice jsou popsány postupy více úrovněového systému monitoringu území měst. Jistě, že je nutné vycházet z klimatologických podmínek pro oblast měst, to je základní charakteristika pro další postupy. Uvádíme, jak zajistit co nejpodrobnější údaje o meteorologických podmínkách daných různými povrchy, tedy měření účelovými stanicemi. Upozorňujeme na možnost využití meteorologických měření, které provádějí některé instituce pro své potřeby. Ale současně zdůrazňujeme nutnou podrobnou kontrolu jejich umístění, kvality měřicí techniky a dobu měření.

Dále pro plošné vyjádření teplotního pole zvláště za extrémně vysokých teplot vzduchu, tedy převážně tropických dnů, doplnit databázi údaji z měřících jízď. Tyto připravovat s využitím předpovědí počasí s pozorností zaměřenou na výskyty tlakových výší.

Letecké snímání má velkou výhodu v plošném vyjádření teplotního pole, či podkladů ve volitelných spektrech. V kombinaci s naměřenými teplotami vzduchu umožňuje podrobnější analýzu teplotních poměrů ve městě, včetně vyzařování budov a povrchů, takže lze provést komplexní vymezení nejen tepelného ostrova, ale také části města s negativními dopady.

V rámci naplnění cíle metodiky je též rozpracována oblast pro stanovení rizik zvláště v částech s tepelným ostrovem a vhodných adaptačních a mitigačních opatření. Popsány jsou postupy pro charakteristiku prostředí pomocí vhodných indexů.

Uvedený přehled obsahu této metodiky je rozsáhlý, má návaznost na další výstupy z uvedeného projektu, a to k významu zeleně v městském prostředí. Současně však uvádíme, že jsme si vědomi, že každé město je svým způsobem specifické, a že tato metodika nepokrývá celou šíři problematiky městského klimatu a možných řešení.

9 Seznam literatury

Bednář, J. a O. Zikmunda. *Fyzika mezní vrstvy atmosféry*. Praha: Academia, 1985, 248

Belda, M., Resler, J., Geletič, J., Krč, P., Maronga, B., Sühring, M., Kurppa, M., Kanani-Sühring, F., Fuka, V., Eben, K., Benešová, N., and Auvinen, M, 2021. Sensitivity analysis of the PALM model system 6.0 in the urban environment, *Geosci. Model Dev.*, 14, 4443–4464.

Brázdil, R., Rožnovský, J. et al. Impacts of a potential climate change on agriculture of the Czech republic. *Národní klimatický program České republiky*, Praha ČHMÚ 1996, sv. 21, s. 146

Cao, C., Lee, X., Liu, S., Schultz, N., Xiao, W., Zhang, M. and Zhao, L., 2016. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution. *Nature communications*, 7(1), pp. 1-7.

control in climatological databases (Budapest, 25. - 30. May 2008), WCDMP,WMO, 2008. p

Dobrovolný, P., L. Řezníčková, R. Brázdil, L. Krahula, P. Zahradníček, M. Hradil, M. Doležalová, M. Šálek, P. Štěpánek, J. Rožnovský, H. Valášek, K. Kirchner a J. Kolečka. 2012, *Klima Brna. Víceúrovňová analýza městského klimatu*. Brno: Masarykova univerzita, 200 s. ISBN 978-80-210-6029-6.

Falasca, S. and Curci, G., 2018. Impact of highly reflective materials on meteorology, PM10 and ozone in urban areas: a modeling study with WRF-CHIMERE at high resolution over Milan (Italy). *Urban Science*, 2(1), p. 18.

Fallmann, J., Forkel, R. and Emeis, S., 2016. Secondary effects of urban heat island mitigation measures on air quality. *Atmospheric Environment*, 125, pp. 199-211.

Chi X, Li R, Cubasch U, Cao W (2018) The thermal comfort and its changes in the 31 provincial capital cities of mainland China in the past 30 years. *Theoret Appl Climatol* 132(1):599–619

KOLEKTIV AUTORŮ (1958): Atlas podnebí Československé republiky. Ústřední správa geodézie a kartografie, Praha.

KOLEKTIV: Podnebí ČSSR - Tabulky. HMÚ Praha 1961, 379 s.

Kopec, R. J. (1970): Further observations of the urban heat island in a small city. *Bulletin American meteorological Society*, Vol. 51, No. 7, s. 602-606

Li, H., Sodoudi, S., Liu, J., Tao, W., 2020. Temporal variation of urban aerosol pollution island and its relationship with urban heat island. *Atmospheric Research*, 241.

Lipina, P., Kain, I., Židek, D. *Návod pro pozorovatele automatizovaných meteorologických stanic: Metodický předpis ČHMÚ č. 13a*. 2. upravené vydání. Praha: ČHMÚ, 2014. 96 s. ISBN 978-80-87577-34-9.

Litschmann, T., Rožnovský, J., 2009. The incidence of heat index levels in urban areas of Brno. In: *Sustainable development and bioclimate: Reviewed Conference Proceedings*, Eds. Pribullová and Bičarová. Geophysical Institute of the Slovak Academy of Science and Slovak Bioclimatological Society of the Slovak Academy of Science, Stará Lesná, pp. 205–206. ISBN 978-80900450-1-9.

- Litschmann, T., Rožnovský, J., 2012. Zhodnocení indexu HUMIDEX na území města Brna. 20th International Poster Day Transport of Water, Chemicals and Energy in the Soil-Plant-Atmosphere System, Bratislava, 15. 11. 2012, ISBN 978-80-89139-28-6
- Meteorologický slovník výkladový a terminologický (eMS), ČMeS, dostupný na: <http://slovník.cmes.cz>
- Ngarambe, J., Joen, S.J., Han C., J., Yun, G.Y., 2021. Exploring the relationship between particulate matter, CO, SO₂, NO₂, O₃ and urban heat island in Seoul, Korea. *Journal of Hazardous Materials*, 403
- Oke, T.R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7, 769-779.
- Petrovič, Š., 1979. Klíma a bioklíma Bratislavy. VEDA, Bratislava, 272 s.
- Quitt., E. (1972): Měřicí jízdy jako jedna z cest k racionalizaci mezoklimatického výzkumu. *Meteorologické zprávy*, č. 6, s. 172-176
- Středová H., Fukalová P., Rožnovský J., 2010: Specific of temperature extremes under the conditions of urban climate. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 40, 249–261.
- Střeščík, J., J. Rožnovský, P. Štěpánek a P. Zahradníček, 2014. Increase of annual and seasonal air temperatures in the Czech Republic during 1961-2010. In:
- Técher, M, Haddou, HA, Aguejdad, R. Characterization of the urban microclimate by the modelling of urban planning policies in France. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021
- Thom, E.C. (1959): The discomfort index. *Weatherwise* 12, s. 57 – 60
- Tolasz, R., et al. (2007): Atlas podnebí Česka. Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého v Olomouci, 255 s. ISBN 978-80-86690-26-1 (CHMI), 978-80-244-1626-7 (UP).
- Tomáš, M., 2012. Letní teploty vzduchu v Olomouci v letech 2010-2011 z hlediska teplotního komfortu člověka. *Meteorologické zprávy*, Vol. 65, No. 3, s. 75–82. ISSN 0026-1173.
- Toy, s. a kol. (2007): Determination of bioclimatological comfort in three different land uses in the city of Erzurum, Turkey. *Building and Environment* 42, s. 1315 – 1318
- Widyasamratri H et al 2022 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 955 012023