Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

Vliv vegetace na teplotní režim městského prostředí

Diplomová práce

Bc. Jan Sedláček

Školitel: RNDr. Martin Hais, Ph.D.
Konzultant: Ing. Radek Kyrian
České Budějovice, 2020

Sedláček, J. (2020) Vliv vegetace na teplotní režim městského prostředí (Influence of vegetation on thermal conditions of urban environment – Mgr. Thesis, in Czech), Faculty of Science, Univerzity of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic..

This thesis is aimed at the influence of vegetation on temperature in urban areas. In order to research this influence, a thermal camera was used to measure surface temperature in a number of places in České Budějovice.

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 21. 5. 2020

……

Jan Sedláček

Anotace

Tato práce je zaměřena na vliv zeleně na teplotu povrchů v městském prostředí. Za účelem zhodnocení tohoto vlivu byla provedena řada měření termální kamerou v intravilánu Českých Budějovic. Bylo zjištěno, že zeleň nejenže snižuje teplotní extrémy, ale ovlivňuje i teplotu okolního povrchu v řádech jednotek metrů. Nižší povrchové teploty v letních dnech byly prokázány nejen u vzrostlých stromů, ale i u méně obvyklých struktur, jako jsou např. okrasné rostliny či zelená střecha a stěna. Na základě těchto zjištění byla přednesena praktická doporučení pro správce zeleně za účelem navýšení účinnosti zelených struktur a snížení vlivu městského tepelného ostrova.

Abstract

This thesis is aimed at the influence of vegetation on temperature in urban areas. In order to research this influence, a thermal camera was used to measure surface temperature in a number of places in České Budějovice. The results show that vegetation not only reduces thermal amplitudes, but also influences the temperature of surrounding surfaces (up to a few metres). Lower temperatures compared with conventional surfaces were reached during the summer days not only by trees, but also by less common green structures, such as ornamental plants or a green roof and wall. According to the results, some suggestions were brought in order to increase the effectivity of green infrastructure and to reduce the Urban Heat Island effect.

Poděkování

Rád bych v první řadě poděkoval svému školiteli Martinu Haisovi za cenné připomínky při tvorbě této práce a za zajištění termokamery.

Dále bych chtěl poděkovat Radku Kyriánovi za pomoc s výběrem míst pro měření na území Českých Budějovic, Milanu Novákovi za pomoc s technickou přípravou termokamery a Kristýně Pouchové za asistenci při sběru dat.

V neposlední řadě děkuji manželům Vančurovým a Tomáši Chromčákovi za to, že mi umožnili přístup na místa, odkud jsem mohl snímat data.

Obsah

1. Úvod 1
1.1 Hypotézy 2
2. Literární rešerše 2
2.1 Přeměny sluneční energie 2
2.2 Vliv vegetace na ochlazování okolí 3
2.2.1 Principy ochlazování 3
2.2.2 Důsledky zeleně pro teploty v krajině 4
2.3 Teplotní režim měst 5
2.3.1 Městský tepelný ostrov (UHI) 5
2.3.2 Vliv zeleně na snižování UHI 6
3. Metodika 7
3.1 Zájmové území 7
3.2 Sběr a zpracování dat 10
4. Výsledky 12
4.1 Vzrostlé stromy vs. plochy bez vegetace 12
4.2 Teplotní gradient od korun stromů 14
4.3 Menší vertikální struktury pouliční zeleně vs. nezelené povrchy 15
4.4 Zelená stěna a střecha 16
4.5 Srovnání vlivu: stín stromů a trávník 18
4.6 Srovnání více typů zelených povrchů 18
5. Diskuze 20
5.1 Vzrostlé stromy vs. plochy bez vegetace 20
5.2 Teplotní gradient od korun stromů 21
5.3 Menší vertikální struktury pouliční zeleně vs. nezelené povrchy 22
5.4 Zelená stěna a střecha 23
5.5 Srovnání vlivu: stín stromů a trávník 24
5.6 Srovnání více typů zelených povrchů 25
5.7 Souhrn doporučení 26
6. Závěr 27
Zdroje 28

1. Úvod

V současné době, kdy stále větší podíl lidské populace žije ve městech, se pozornost odborné veřejnosti obrací mimo jiné i na městské mikroklima, které je jedním z důležitých faktorů určujících životní podmínky pro obyvatele. Klíčovým jevem pro urbánní mikroklima je tzv. městský tepelný ostrov (Urban Heat Island – UHI), což je nárůst teploty vzduchu i povrchů v městském prostředí oproti okolní rurální krajině (Taha, 1997; Yang et al., 2015). Nejedná se jen o nárůst průměrných teplot, ale především o zvětšování extrémů (Gallo et al., 2011), což může kromě sníženého pohodlí vyvolat i řadu dalších problémů, jako jsou např. zdravotní rizika (Mishra & Ramgopal, 2013).

Jako hlavní prostředek ke snížení důsledků UHI je uváděna městská zeleň. Ta má schopnost ochlazovat svoje okolí, především stíněním a transpirací, která přeměňuje dopadající sluneční energii na latentní teplo výparu. Vliv zeleně na teplotní režim měst byl předmětem výzkumu v mnoha městských aglomeracích po celém světě (např. Armson et al., 2012; Peng, 2016; Ward et al., 2016; Estoque et al., 2017).

Již delší dobu probíhá celospolečenská diskuze, zda zeleň (především vzrostlé stromy) patří do intravilánů měst či nikoliv. Kritici zeleně argumentují především nutností údržby, padajícím listím a možnou sníženou provozní bezpečností stromů; z těchto důvodů prosazují odstranění stávajících dřevin a minimální náhradní výsadbu. V takových případech je potřeba zdůrazňovat, že zeleň má kromě funkce estetické a rekreační také funkci mikroklimatickou, jejíž význam narůstá zejména v současné době, kdy – spojeným vlivem růstu průměrné teploty (Hansen et al., 2010) a zvětšování plochy měst – narůstá četnost a intenzita teplotních extrémů ve městech. Zmíněné výzkumy zaměřené na vliv zeleně na teplotu okolí proto mohou být vhodným argumentem pro zachování a rozšiřování zelených ploch v intravilánu.

Cílem této práce je otestovat vliv různých typů vegetace na snížení povrchových teplot v prostředí intravilánu Českých Budějovic. K tomu jsou použita termovizní data z kamery snímající v pásmu dlouhovlnného vyzařování. Testování dat bylo prováděno srovnáním teplot povrchů v místě s vegetací a bez vegetace, přičemž probíhalo pokud možno tak, aby reflektovalo denní chod teplot. Důraz je kladen zejména na ochlazující vliv vzrostlých stromů; v menší míře je v práci též zahrnut vliv trávníků, keřových výsadeb či střech pokrytých vegetací.

1.1 Hypotézy

1. Vegetace v intravilánu města bude vyrovnávat denní kolísání teplot povrchů, zejména sníží nejvyšší denní teploty za slunečného počasí.
2. Vegetace bude nejen vykazovat nižší povrchovou denní teplotu, ale ovlivní i teplotu nejbližšího okolí.
3. Dřeviny budou snižovat denní maxima účinněji než travinný porost.
4. Střechy a stěny pokryté vegetací budou vykazovat při oslunění nižší teplotu než střechy a stěny z tradičních materiálů.

2. Literární rešerše

2.1 Přeměny sluneční energie

V naší zeměpisné šířce dopadá na zemský povrch sluneční záření s intenzitou 800-1000 W/m^2 (za letního poledne a slunečného počasí), přičemž celkový denní souhrn přijaté energie může za těchto podmínek dosahovat i 7 kWh/m^2 (Pokorný, 2001). Ta část záření, která není odražena, absorbována nebo použita na chemické reakce (např. pro fotosyntézu), se posléze přemění buď na zjevné (neboli též pocitové) teplo, které se projeví zvýšením teploty, nebo na latentní teplo, které v danou chvíli teplotu nezvýší a je použito na skupenské přeměny (Yoshino, 1975).

Poměr mezi těmito dvěma typy tepla je označován jako Bowenův poměr. Čím je vyšší, tím více je uvolněno zjevného tepla oproti latentnímu a tím více při dané míře dopadajícího slunečního záření narůstá teplota. Hodnoty Bowenova poměru se mohou velmi lišit; zatímco v krajině se stromy je uváděn obvyklý poměr 0,5-2, ve městech již dosahuje hodnot okolo 5 a v pouštích dokonce okolo 10 (Taha, 1997).

Hlavní proměnnou, která určuje podíl zjevného a latentního tepla (a tím následně i hodnotu Bowenova poměru), je množství vody, které lze na daném místě odpařit. V místě, kde je jí dostatek (zejména vlivem vhodné vegetace zásobené vodou) je až 70-80 % sluneční energie přeměněno v latentní formu a jen 5-10 % ve zjevnou. Naproti tomu u suchých povrchů bez funkční vegetace je záření přeměněno především ve zjevné teplo (až ze 70 %), což způsobuje přehřívání povrchu. Uvádí se například, že na 1 km^2 odvodněné plochy (což odpovídá typickému poli v některých částech ČR) se za letní den uvolní zjevné teplo v podobném množství, jaké by vzniklo spálením až 1000 tun hnědého uhlí (Pokorný, 2001; Brom et al., 2012).

2.2 Vliv vegetace na ochlazování okolí

2.2.1 Principy ochlazování

Klíčovým jevem pro transformaci tepla vegetací na latentní formu je transpirace. Jedná se o odpařování vody z průduchů na povrchu nadzemních rostlinných pletiv (především listů) na základě toku vody po gradientu vodního potenciálu; zatímco v půdě je za vhodných podmínek potenciál nejvyšší (nejméně záporný), směrem do listů a dále do atmosféry se snižuje. Ve zdravé rostlině je tento gradient neustále udržován osmotickými principy a způsobuje za vhodných podmínek nepřetržitost transpirace (Kolařík et al., 2010).

Ochlazovací účinek transpirace spočívá ve skupenské přeměně kapalné vody na páru a je navýšen zejména neobvykle vysokým skupenským teplem odparu u vody (2,3 MJ/litr). Teplo použité k tomuto odpaření snižuje podíl zjevného tepla a tím i Bowenův poměr, a to v závislosti na tom, kolik vody dokáže porost odpařit. Tato hodnota se u většiny porostů pohybuje v jednotkách milimetrů za den; například u listnatého lesa je uváděno, že každý hektar vytranspiruje okolo 25-30 tisíc litrů vody za den, což odpovídá 2,5-3 mm (Kolařík et al., 2010).

Na míru transpirace má vliv také LAI (Leaf Area Index), což je poměr celkové plochy listů vůči ploše vodorovného zemského povrchu. U zdravého stromu se tento poměr pohybuje okolo 3-6 (tedy celková plocha listů 3-6x převyšuje plochu země pod stromem), což v letním dni může stromu dodat ochlazovací výkon okolo 23 kW (Pokorný, 2001).

Transpirace z dané plochy listů je ovlivňována mnoha proměnnými. Obecně platí, že pokud má porost k dispozici dostatek vody, je transpirace limitována především přicházející sluneční energií, zatímco při suchu je odpar omezen dostupností vody, což způsobí pokles transpirace (Makarieva & Gorshkov, 2007). Negativní vliv na míru odparu má vyšší vlhkost vzduchu či zasolení půdy, naproti tomu proudění vzduchu a vysoká teplota transpiraci zvyšují (Petrík et al., 1986, Kolařík et al., 2010). Teplota má vliv především u listů s větší plochou, které se po vystavení slunečnímu záření zahřívají více (Leuzinger et al., 2010), což zvýší množství odpařené vody a tím přinese potenciál k opětovnému ochlazení.

Ochlazující účinek transpirace je dán i jejím načasováním. Nejvyšší míra transpirace je zpravidla spojená s největší plochou listů na přelomu jara a léta (Kolařík et al., 2010). V průběhu dne je uváděn největší odpar okolo 12.-14. hodiny (Petrík et al., 1986). Oba tyto vrcholy transpirace tedy odpovídají době, kdy se slunce nachází nejvýše nad obzorem, přichází z něj nejvíce záření a ochlazení je nejvíce potřeba.

Kromě samotné transpirace zeleň ochlazuje okolí ještě dalšími způsoby, z nichž hraje nejdůležitější roli stínění. Jeho význam spočívá v tom, že vegetace sníží množství záření, které dopadne na zem; navíc sluneční energie dopadne na takový povrch (listy), který z ní přemění na latentní teplo zpravidla větší část, než kdyby dopadla na zem. Například Gillner et al. (2015) uvádějí, že teplota povrchu zastíněného stromy byla při jejich měření o 15 °C nižší než u osluněného povrchu. Význam stínu je patrný také z ročního vývoje teplot půdy; zatímco na jaře před nárůstem listů se teplota půdy pod stromy a mimo vegetaci neliší tak výrazně, tak po olistění dojde pod stromy k výraznému zpomalení růstu teplot, což se s hodnotami mimo vegetaci vyrovná opět až po opadu listů (Zheng et al., 1993).

Okrajově se zde projevují i další vlivy, jako například velká tepelná kapacita rostlinných pletiv (daná vysokým obsahem vody), spotřeba energie pro fotosyntézu či vysoká odrazivost vegetace v blízké infračervené oblasti spektra. Petrík et al. (1986) uvádějí také skutečnost, že vegetace tvoří plochu pro zachytávání horizontálních srážek, které pak svým odpařováním také odebírají teplo; to však hraje roli především v chladnějších částech roku, kdy ochlazující vliv vegetace není tolik potřeba (Taha et al., 1988).

2.2.2 Důsledky zeleně pro teploty v krajině

Jak vyplývá ze zmíněných principů, způsob využití krajiny (a s tím spojené množství zeleně schopné účinné transpirace) je za daných meteorologických podmínek klíčovou proměnnou pro teplotu povrchů v krajině. Obecně lze říci, že během slunečného dne s přibývajícím množstvím zeleně klesá povrchová teplota (Myung-Hee et al., 2001; Tiangco et al., 2000), zatímco holá půda a zejména antropogenní zpevněné povrchy (beton, asfalt) mají tendenci za těchto podmínek teplotu navyšovat (Herb et al., 2008). V našich podmínkách to potvrzují například Hesslerová et al. (2013), kteří uvádějí, že místa s dostatkem vegetace zásobené vodou se při slunečním svitu vyznačují nižší teplotou a menším vertikálním gradientem; zeleň podle nich obecně vyrovnává extrémy. K podobnému závěru dochází i Rožnovský (2014), podle něhož se holá písčitá půda v létě zahřeje v průměru zhruba na 50 °C, zatímco trávníky jen na asi 40 °C.

Z toho vyplývá, že změna krajinného pokryvu způsobí změnu teplotního režimu. Pokud v ekosystému probíhá sukcese a přibývá rostlinné biomasy, tak dojde k nárůstu evapotranspirace a povrchová teplota má tendenci klesat – naproti tomu různé disturbance včetně umělého odstranění vegetace vedou k růstu teploty (Dong-Hoon et Kyoo-Seock, 2005). To potvrzuje i Sader (1986), při jehož měření se teploty ve vzrostlém lese pohybovaly o 2,5 °C níže než v mladém porostu. Ve výzkumu, který provedli Li et al. (2012), se nárůst

zeleně o 10 % projevil poklesem teploty o 0,86 °C. V našich podmínkách se touto problematikou zabývali např. Brom et al. (2012), kteří na příkladu těžby uhlí v Podkrušnohoří ukázali, že odstranění porostů zvýší teploty povrchů a destabilizuje klimatický režim v oblasti, zatímco opětovná sukcese teplotní režim opět vyrovná.

Jsou ale zmiňovány i případy, kdy vegetace může paradoxně zvýšit teplotu povrchu; například vrstva tmavého organického opadu pod řídkým porostem se někdy prohřívá více než světlejší půda na plochách bez vegetace, což může v případě malé dostupnosti vody a tím nízké transpirace převážit nad ochlazujícím vlivem odparu (Qin et al., 2002).

2.3 Teplotní režim měst

2.3.1 Městský tepelný ostrov (UHI)

Důsledkem výše popsaných principů je skutečnost, že města, která zpravidla obsahují menší podíl vegetace ve srovnání s okolní krajinou, mají tendenci k vyšším teplotám oproti svému okolí. Tento jev se nazývá jako městský tepelný ostrov (Urban Heat Island – UHI) a narůstá nejen s dopadající radiací, ale i s rozlohou města, počtem obyvatel (a tím pádem s počtem obytných jednotek a intenzitou průmyslu a dopravy) a podílem zpevněných ploch (Jiang et Tian, 2010; Pal et Ziaul, 2016; Yang et al., 2015). Z řady měst byl popsán gradient, kdy teplota narůstá směrem do středu města, přičemž tento nárůst koreluje a klesajícím podílem vegetace (Estoque et al, 2017).

Tepelný ostrov se projevuje jak u teploty vzduchu, tak i povrchů. Intenzita UHI u teplot vzduchu se pohybuje od desetin do jednotek °C (závisí to na zeměpisné poloze daného města a době a trvání měření); pro města v mírném klimatu se u dlouhodobých měření uvádí nárůst průměrné teploty o 0,6-3 °C (Yang et al., 2015). U povrchových teplot bývá UHI ještě výraznější, což je způsobeno nižší teplotní stabilitou většiny povrchů v porovnání se vzduchem; obvykle se uvádí průměrný nárůst teplot o 7-12 °C (Voogt et Oke, 2003; Yang et al., 2015).

Intenzita UHI za daných podmínek dále záleží na denní době a ročním období. Peng et al. (2016) zmiňují nárůst UHI v letních měsících za nejvyšších teplot. Gallo et al. (2011) navíc uvádí nejvyšší rozdíl mezi teplotou povrchu a vzduchu (což v praxi znamená větší nárůst teploty povrchů) v následujících hodinách poté, kdy je slunce nejvýše nad obzorem. Tepelné ostrovy však existují i v noci, například Saaroni et al. (2000) zjistili až 6 °C rozdíl mezi středem a okrajem města z důvodu akumulace tepla v asfaltu, což v noci, zejména v její počáteční fázi, vytváří zdroj dlouhovlnného vyzařování. Naproti tomu Schrijvers et al. (2015) uvádí, že některé povrchy ve městě mohou v noci vychládat více než okolní krajina.

Týká se to především níže položených povrchů (zejména pokud mají nižší tepelnou vodivost) v ulicích s vysokými budovami; tyto povrchy jsou přes většinu dne zastíněné, takže nestačí přijmout tolik sluneční energie.

Obecně lze říci, že UHI nemusí být vnímán pouze jako škodlivý jev, například Taha et al. (1988) uvádí jako pozitivní důsledek úsporu energie pro vytápění v chladnějších oblastech. Nicméně v tropických, subtropických a v letních měsících i v mírných oblastech (včetně České republiky) převládají negatvní důsledky (např. snížené pohodlí, snížení kvality ovzduší či zvýšený výdej energie pro klimatizaci), což způsobuje veřejný zájem na tom, aby byla přijata opatření ke snížení UHI (Yang et al., 2015).

2.3.2 Vliv zeleně na snižování UHI

Zřejmě nejdiskutovanějším způsobem ke snížení UHI je zvýšení podílu vegetace ve městech; tato vegetace bývá někdy označována jako zelená infrastruktura, popř. spolu s vodními prvky jako zeleno-modrá infrastruktura (Green and Blue Infrastructure – GBI; Broadbent et al., 2019). Vlivem principů popsaných v kapitole 2.1 a 2.2 městská zeleň snižuje teplotní maxima a vyrovnává extrémy, což potvrzuje řada autorů (Gluch et al, 2006; Peng et al., 2016). Výhodou zeleně je skutečnost, že pomocí transpirace snižuje teplotu pouze tehdy, když je to užitečné (zejména v letních dnech), zatímco v zimě tento proces prakticky ustává (Susca et al., 2011).

Existují různé typy městské zeleně, v našich podmínkách jsou nejvýznamnější dřeviny (v první řadě stromy) a trávníky. Armson et al. (2012) uvádí, že oba tyto typy jsou důležité pro ochlazování; trávník vykazoval až o 24 °C nižší teplotu v porovnání s betonovým povrchem a stromy mohou být dokonce ještě účinnější vlivem zastínění a také hlubších kořenů, které zajišťují dostupnost vody lépe než u trávníku. U stromů hraje roli nejen vzrůst a dostupnost vody, ale i druh stromu a jeho umístění v rámci města, například teplota korun stromů v parcích bývá nižší než v ulicích, kde na stromy dopadá více záření odraženého z umělých povrchů (Leuzinger et al., 2010).

Vedle těchto hlavních forem jsou známy i další typy vegetace, například zelené střechy, tedy střechy pokryté půdou a vegetací (Niachou et al., 2001) nebo zelené stěny, což jsou zdi pokryté popínavými či převislými rostlinami (Wong et al., 2009).

Zelené plochy mají vliv nejen na teplotu povrchů v jejich území, ale i na teploty v jejich okolí (Doick et al., 2014). Uvádí se například, že skupina čtyř stromů dokázala během teplých letních nocí ochladit vzduch ve vzdálenosti 40 m o 1°C (Rafiee et al., 2016). To vyvolává diskuzi, jak má být zeleň po městě rozmístěna, aby ochlazovala své okolí co

nejúčinněji. Například Armson et al. (2012) uvádí jako nejúčinnější ochlazovací mechanismus mnoho drobných zelených ploch roztroušených v zástavbě, zatímco Li et al. (2012) upřednostňují jeden ucelený park.

Ačkoliv ochlazující vliv městské zeleně je dobře znám a popsán (i z Českých Buděpengvic, viz Kottová, 2017), existuje jen velmi málo poznatků o některých dílčích tématech, například účinku některých méně obvyklých prvků (zelené stěny, okrasné rostliny ve velkých květináčích) nebo o účinnosti menších zelených plošek v měřítku jednotlivých ulic. Cílem této práce je proto popsat účinek těchto ploch na povrchové teploty ploch samých i ploch v jejich okolí.

3. Metodika

3.1 Zájmové území

Veškerá data pro tuto práci byla získána na území Českých Budějovic. Jedná se o největší město Jihočeského kraje, žije zde zhruba 94 tisíc obyvatel. Město leží v Českobudějovické pánvi, jeho nadmořská výška dosahuje okolo 380 m. Oblast spadá do mírného klimatu na rozhraní oceanického a kontinentálního vlivu, s převládajícím západním prouděním a důležitým působením morfologie terénu (vlivem pánevního reliéfu jsou zde např. časté teplotní inverze). Průměrná roční teplota dosahuje 8,3 ºC, průměrné měsíční teploty jsou -1,9 ºC v lednu a 18 ºC v červenci. Průměrný roční úhrn srážek je 730 mm; více srážek spadne v letních měsících (průměrně okolo 90 mm/měsíc) než v zimě, kdy je průměrný úhrn okolo 45 mm za měsíc (climate-data.org).

Centrum Českých Budějovic (Náměstí Přemysla Otakara II. a přilehlé ulice) je tvořeno prakticky pouze zpevněnými povrchy bez zeleně. V oblastech dále od centra se nachází především roztroušená zástavba, kde je oproti centru o něco větší podíl trávníků a bodových či liniových prvků dřevin. Na území města se také nachází několik parků (z nichž je největší Stromovka), které mají významný vliv na mikroklima (Marvalová, 2016; Kottová, 2017), potenciál pro vliv na teplotu mají také vodní toky Vltava a Malše, které protékají městem. Okolí města je tvořeno převážně venkovskou zemědělskou krajinou, v níž se nachází velké množství rybníků.

Na území města bylo vybráno několik míst, kde lze porovnat povrchovou teplotu zelených a nezelených povrchů, popř. kde lze zkoumat vliv vegetace na její okolí. Při srovnávání míst bylo nutné dodržet podmínku, aby obě místa byla v ohledu radiačních podmínek srovnatelná, např. aby porovnávané ulice měly stejný azimut a stejný poměr výšky

budov k šířce ulice, aby tam ve stejnou chvíli dopadalo stejné množství slunečního záření (Nunez et Oke, 1980; Pierce et al., 2005).

Zde je popis zkoumaných míst. Jejich fotografie a polohu v rámci města lze nalézt na Obr. 1, resp. Obr. 2.

1) Černá věž

Dvě východo-západně orientované ulice pod věží; jedna z nich (ul. Hroznová) bez jakékoliv vegetace, zatímco druhá (bezejmenná ulička rovnoběžně mezi Hroznovou a Kanovnickou) téměř zcela zakrytá korunami vzrostlých lip (*Tilia* sp.). Tyto lípy jsou prakticky jedinými vzrostlými dřevinami v historickém centru města. Mezi měřenými ulicemi stojí budova, jejíž tašková střecha začíná přímo u korun lip.

Předmět výzkumu: Srovnání denního vývoje povrchových teplot stromů, žulové dlažby v ulici bez vegetace a střešních tašek na budově mezi ulicemi; dále gradient teploty střechy s rostoucí vzdáleností od stromů v noci a ve dne.

2) Vodárenská věž

Skupina listnatých stromů rostoucích v blízkosti budovy, jejíž plochá eternitová střecha se nachází přibližně ve stejné výšce jako koruny stromů.

Předmět výzkumu: Srovnání několikadenního vývoje povrchových teplot stromů a střechy.

3) Náměstí Přemysla Otakara II.

Hlavní náměstí, jehož povrch je prakticky zcela tvořen nepropustnou dlažbou. Jedinou vegetací na území náměstí jsou betonové květináče a závěsné nádoby s okrasnými rostlinami (běžně pěstované rody typu *Pelargonium*).

Předmět výzkumu: Srovnání povrchových teplot okrasných rostlin a okolní dlažby.

4) Zelená střecha

Střecha sestávající ze dvou částí: Ta "zelená" je tvořena vrstvou půdy porostlou suchomilnými rostlinami, zatímco ta "nezelená" část sestává z vrstvy štěrku.

Předmět výzkumu: Srovnání povrchových teplot zelené a nezelené části střechy.

5) Zelená stěna

Dům v Klavíkově ulici, jehož východní stěna je z části porostlá souvislým pokryvem břečťanu obecného (*Hedera helix*).

Předmět výzkumu: Srovnání povrchových teplot zelené a nezelené části stěny.

6) Sídliště Vltava

Otevřený prostor s několika nedávno vysázenými javory (*Acer* sp.), jehož povrch je z části tvořen trávníky a z části běžnými "nezelenými" zpevněnými povrchy.

Předmět výzkumu: Srovnání povrchových teplot 4 povrchů: Zastíněný trávník, osluněný trávník, zastíněná dlažba, holá dlažba; z toho vyplývající srovnání ochlazujícího vlivu trávníku a stínu stromů.

7) Lannova ulice

Východo-západně orientovaná ulice, v jejíž západní části bylo poměrně nedávno vysazeno několik okrasných stromků rodu *Prunus*.

Předmět výzkumu: Srovnání povrchových teplot korun okrasných dřevin a okolní (nezastíněné) dlažby.

8) Senovážné náměstí

Otevřené prostranství s několika různými typy antropogenní vegetace, od dřevin až po záhony s různými typy rostlin.

Předmět výzkumu: Gradient teploty trávníku s rostoucí vzdáleností od vybraného jehličnanu (*Picea sp.)* zavětveného od země; dále srovnání 4 zelených povrchů (porost keřů, záhon s růžemi, záhon se suchomilnými trávami a běžný trávník) se 2 referenčními povrchy nezelenými (beton, asfalt).

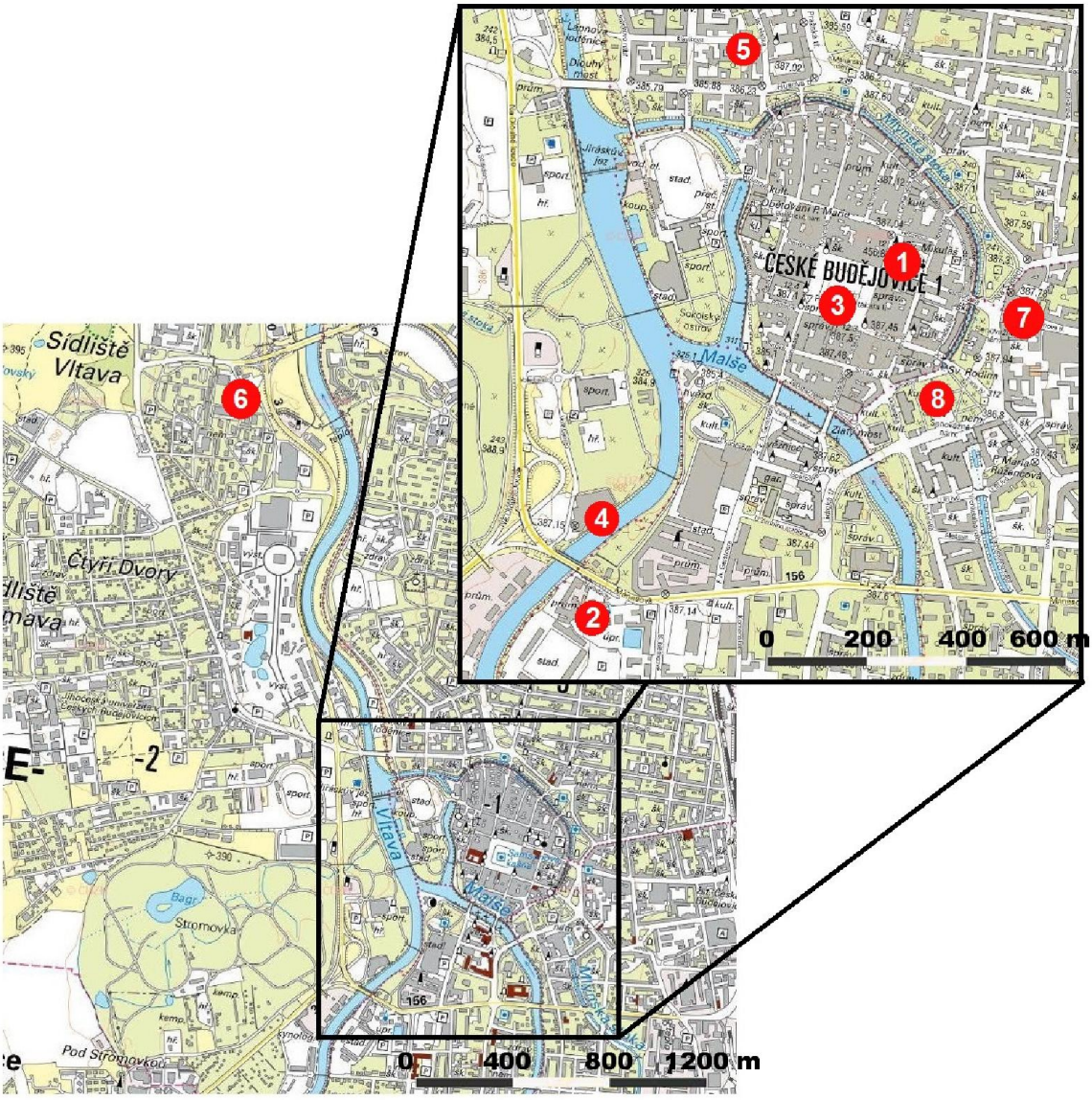
Obr. 1: Fotografie zkoumaných míst. 1. Černá věž, 2. Vodárenská věž, 3. Náměstí P. O. II., 4. zelená střecha, 5. zelená stěna, 6. Vltava, 7. Lannova ul., 8. Senovážné nám. - strom, 9. Senovážné nám. - záhon s xerofyty

3.2 Sběr a zpracování dat

Data byla naměřena v době od června do října 2018. Pro měření povrchové teploty byla použita termální kamera Workswell Wiris 2nd. Její rozlišení činí 640×512 pixelů, citlivost 30 mK a přesnost ± 2 % nebo ± 2 K. Kamera pořizovala v tu samou dobu jak termální snímek, tak i RGB fotografii. Vzhledem k vinětovému efektu (možné mírné zkreslení v okrajových částech snímku) byla používána pokud možno data ze středové části snímků.

U Černé a Vodárenské věže byla kamera umístěna stacionárně a nastavena tak, aby pořizovala snímky každých 15 minut. U ostatních míst bylo použito ambulantní měření, kdy byl snímek pořízen pokaždé, když bylo stisknuto tlačítko spouště.

V Tab. 1 naleznete, ve kterých dnech probíhalo na kterých místech měření a jaké byly v té době meteorologické podmínky v Českých Budějovicích (www.in-pocasi.cz).



Obr. 2: Mapa města s vyznačenými místy měření

Tab. I: Denní maxima teplot ve dnech měření

Území	Datum měření	Maximální denní teplota vzduchu
Černá věž	18.6.2018	25 °C
Vodárenská věž	10.7.2018	19,4 °C
	11.7.2018	18,6 °C
	12.7.2018	22,5 °C
Lannova ulice	13.7.2018	26,4 °C
Sídliště Vltava		
Senovážné nám. (gradient)		
Náměstí Přemysla Otakara II.		
Zelená střecha	16.10.2018	21,2 °C
Zelená stěna	17.10.2018	19,1 °C
Senovážné nám. (6 povrchů)		

Surové snímky byly vloženy do programu Thermoformat za účelem korekce hodnot podle emisivit různých povrchů. Výsledkem byla data ve formátu CSV. Použité emisivity jsou shrnuty v Tab. II (Rubio et al., 1997; support.fluke.com; www-eng.lbl.gov; www.energytek.com).

Tab. II: Použité emisivity povrchů

Materiál	Emisivita
beton	0,75
štěrk	0,76
střešní tašky	0,51
žula	0,45
omítka	0,91
vegetace (mimo xerofytů)	0,98
xerofyty	0,94
eternit	0,96
asfalt	0,95

Poté byla CSV data převedena do ASC souborů, které byly zobrazeny v programu ArcGIS. V případě srovnávaných povrchů zde byl u každého povrchu náhodně vybrán určitý počet bodů (pokud možno bylo zahrnuto více snímků stejného typu povrchu snímaného ve stejném čase), v případě sledovaného gradientu byla vytvořena linie bodů; v obou případech do těchto bodů byly extrahovány hodnoty teplot z rastrových snímků. Tyto hodnoty byly nakonec uloženy v podobě tabulky a zpracovány v programech MS Excel a Statistica; u

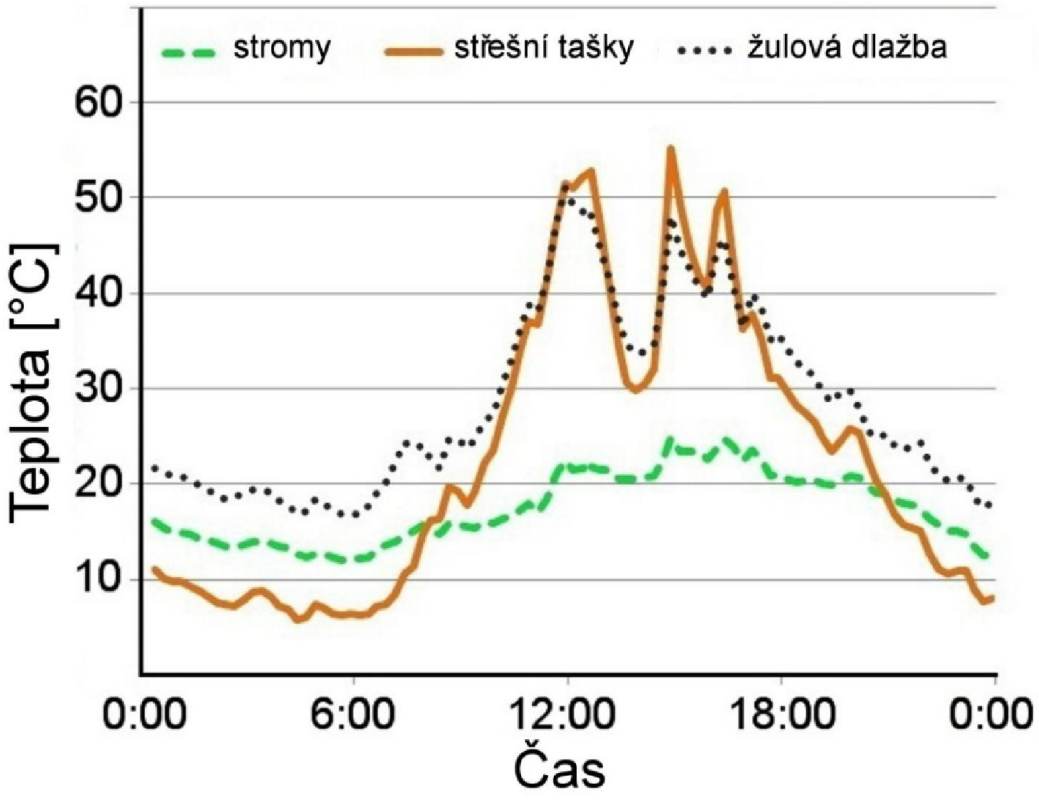
srovnávaných povrchů byl použit dvouvýběrový t-test za účelem zjištění, zda se zelené plochy průkazně liší svojí povrchovou teplotou od těch nezelených.

Data byla posléze znázorněna i graficky; ve všech grafech, kde je srovnáváno více ploch, byl u každé plochy zanesen do grafu medián, rozmezí hodnot mezi kvartily (box) a rozsah všech hodnot mimo ty extrémní (whiskers).

4. Výsledky

4.1 Vzrostlé stromy vs. plochy bez vegetace

Na Obr. 3 jsou znázorněny křivky vývoje teplot v průběhu 24 hodin pro tři typy povrchů pod Černou věží – koruny stromů, žulovou dlažbu v ulici bez zeleně a střešní tašky na budově mezi ulicemi. Jednoznačně nejnižší teplotní maxima i amplitudu vykazovaly koruny stromů; jejich teplota se nijak výrazně nelišila od teploty vzduchu, a to včetně maximálních hodnot (nejvyšší denní teplota vzduchu 25 °C odpovídala i teplotě korun stromů v té samé době). Naproti tomu jak u střešních tašek, tak i u dlažby překročily nejvyšší denní povrchové teploty hodnotu 50 °C. Rozdíl mezi zeleným a nezeleným povrchem dosáhl v některých okamžicích, konkrétně při slunečním svitu v době mezi 12. a 16. hodinou, až 30 °C.

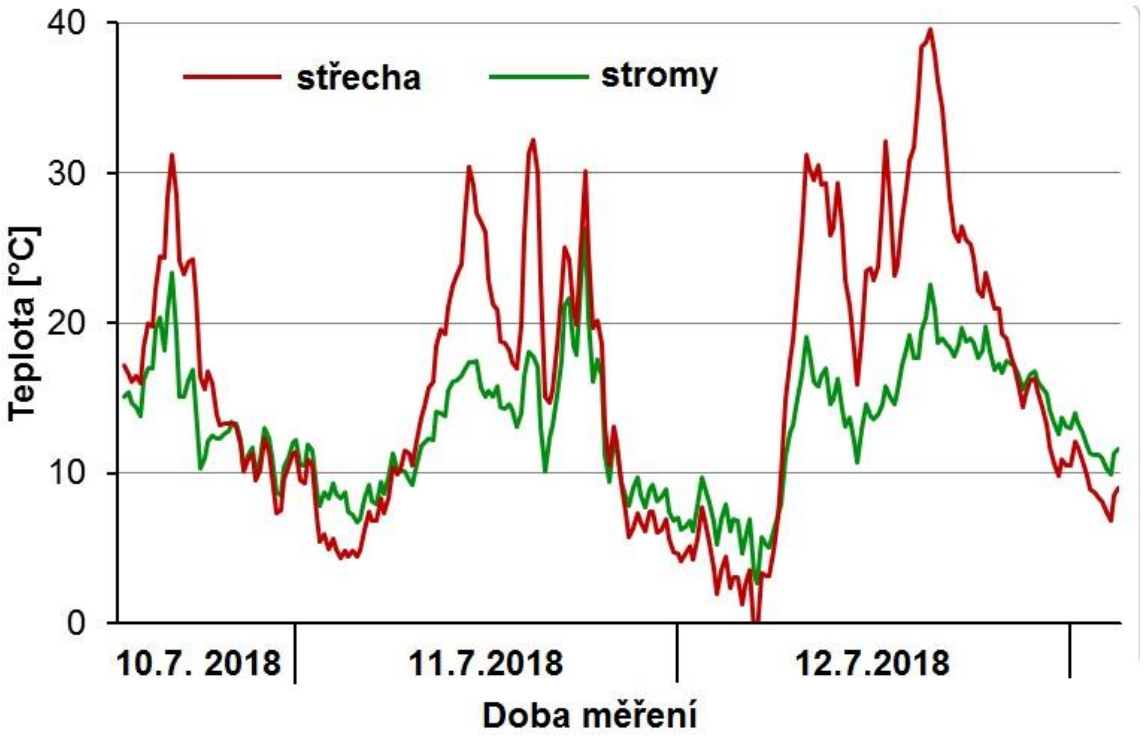


Obr. 3: Černá věž - vývoj povrchových teplot

Snížení teploty okolo 14:00 bylo způsobeno přechodem oblačnosti, která na krátkou dobu omezila insolaci. I v této chvíli však vykazovaly zpevněné povrchy zhruba o 10 °C vyšší teplotu než zeleň.

Teplotní křivky obou nezelených povrchů se přes den víceméně shodovaly, v noci však měly odlišný průběh. Zatímco dlažba si uchovala i přes noc vyšší teplotu oproti zeleni (o zhruba 5 °C), střešní tašky naopak vychladly natolik, že jejich teplota v nočních hodinách byla dokonce o zhruba 5 °C nižší než u zeleně. Střecha tím pádem vykazovala větší teplotní amplitudu než oba zbývající povrchy.

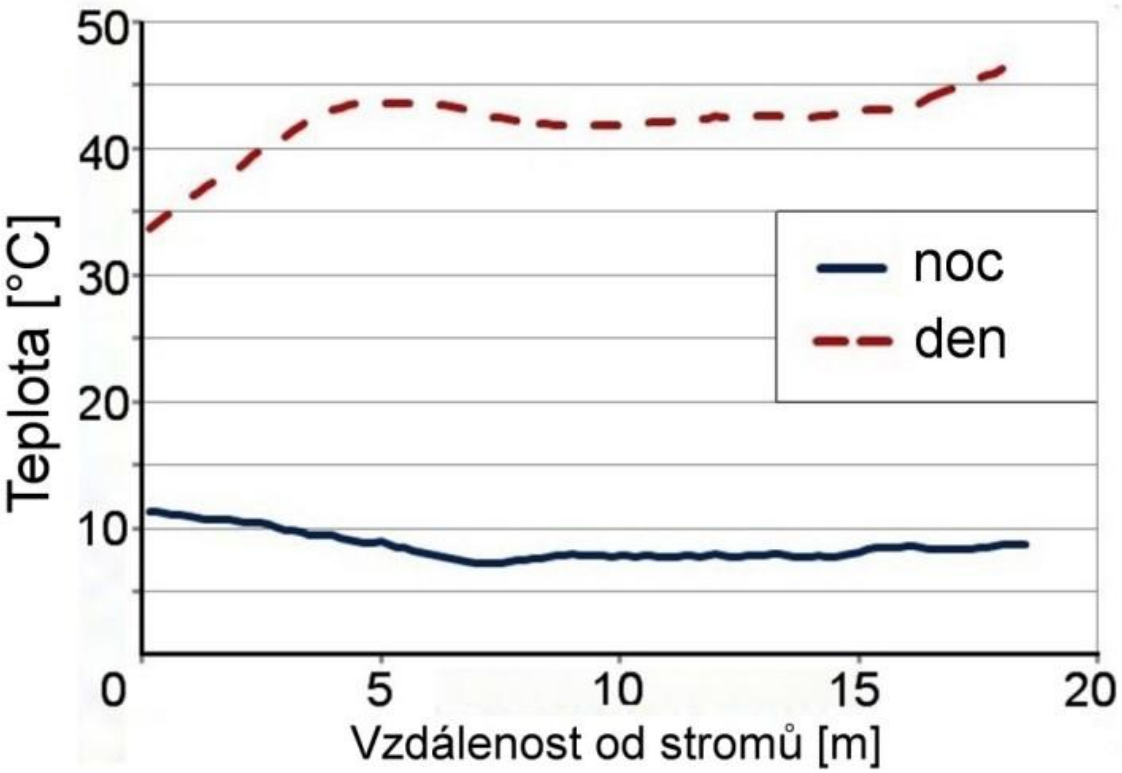
Podobné výsledky jako u Černé věže byly zaznamenány také u Vodárenské věže během celého třídenního měření, viz Obr. 4. Povrch korun stromů opět vykazoval nižší teplotní amplitudu oproti eternitové střeše, jejíž povrch se oproti stromům vyznačoval vyšší denní a nižší noční teplotou. Nejvyšší teplota vzduchu v těchto dnech dosáhla nižších hodnot než v případě měření u Černé věže (jen 18-23 °C), což se také odrazilo v nižším rozdílu povrchových teplot stromů a střechy; tento rozdíl tentokrát nepřesáhl 20 °C. Kolísání teploty v průběhu dne, zejména u střechy, bylo opět způsobeno oblačností, která v některých chvílích omezovala insolaci. Za zmínku stojí také pokles teploty střechy až k 0 °C v ranních hodinách třetího dne měření, zatímco povrch stromů v té samé chvíli vychladl pouze na zhruba 4 °C.



Obr. 4: Vodárenská věž - vývoj povrchových teplot

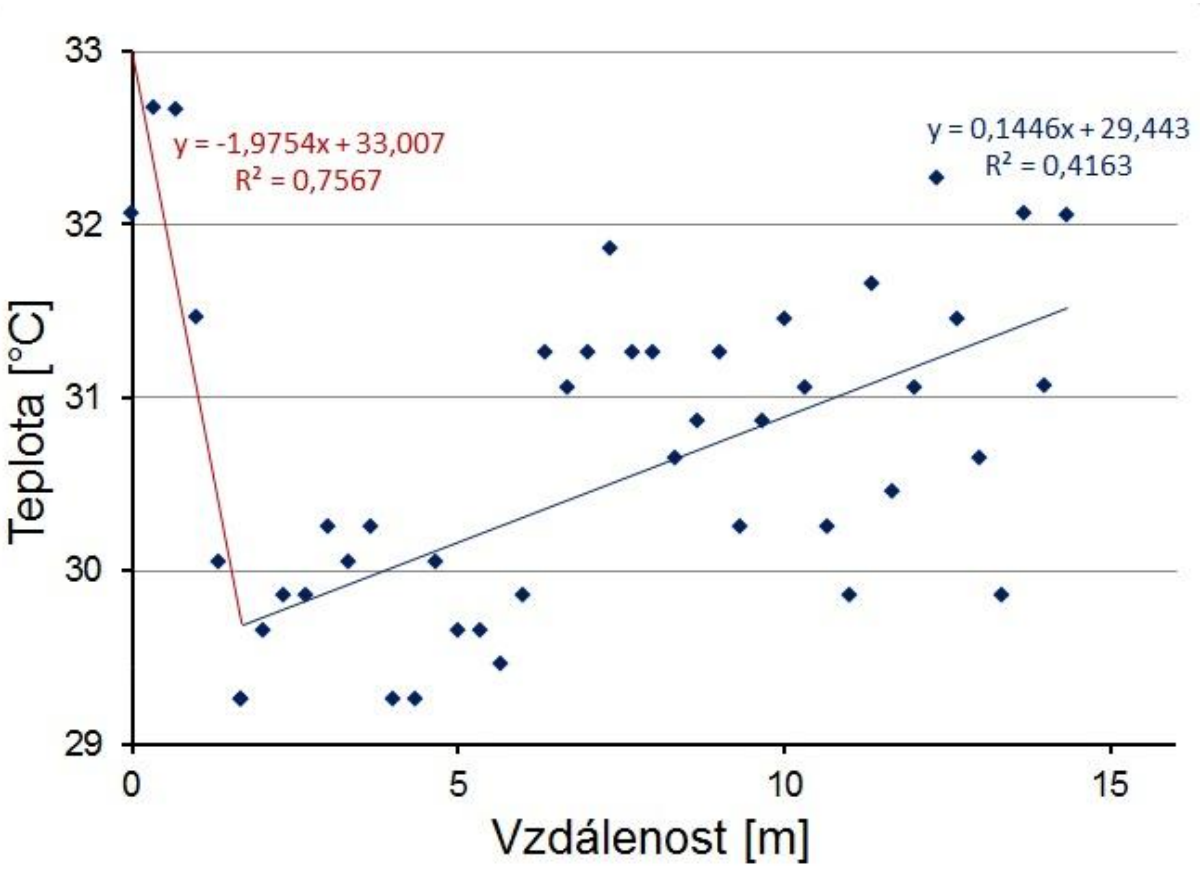
4.2 Teplotní gradient od korun stromů

Vzrostlé stromy se nejen vyznačovaly nižší denní teplotou oproti nezeleným povrchům, ale ovlivňovaly i teplotu povrchů ve svém okolí. Obr. 5 zachycuje gradienty povrchových teplot střechy, jejíž okraj začíná u korun stromů pod Černou věží. Stromy dokázaly snížit denní teplotu blízké části střechy o zhruba 10 °C, v noci naopak tato část střechy nevychladla tolik jako vzdálenější části, zde rozdíl dosáhl 4 °C. V obou případech byla závislost teploty na vzdálenosti od stromu přibližně lineární, a to zhruba do 5 metrů v denní době a do 7 metrů přes noc. Na vzdálenější části střechy již vliv nebyl prokázán.



Obr. 5: Černá věž - gradient povrchových teplot střechy

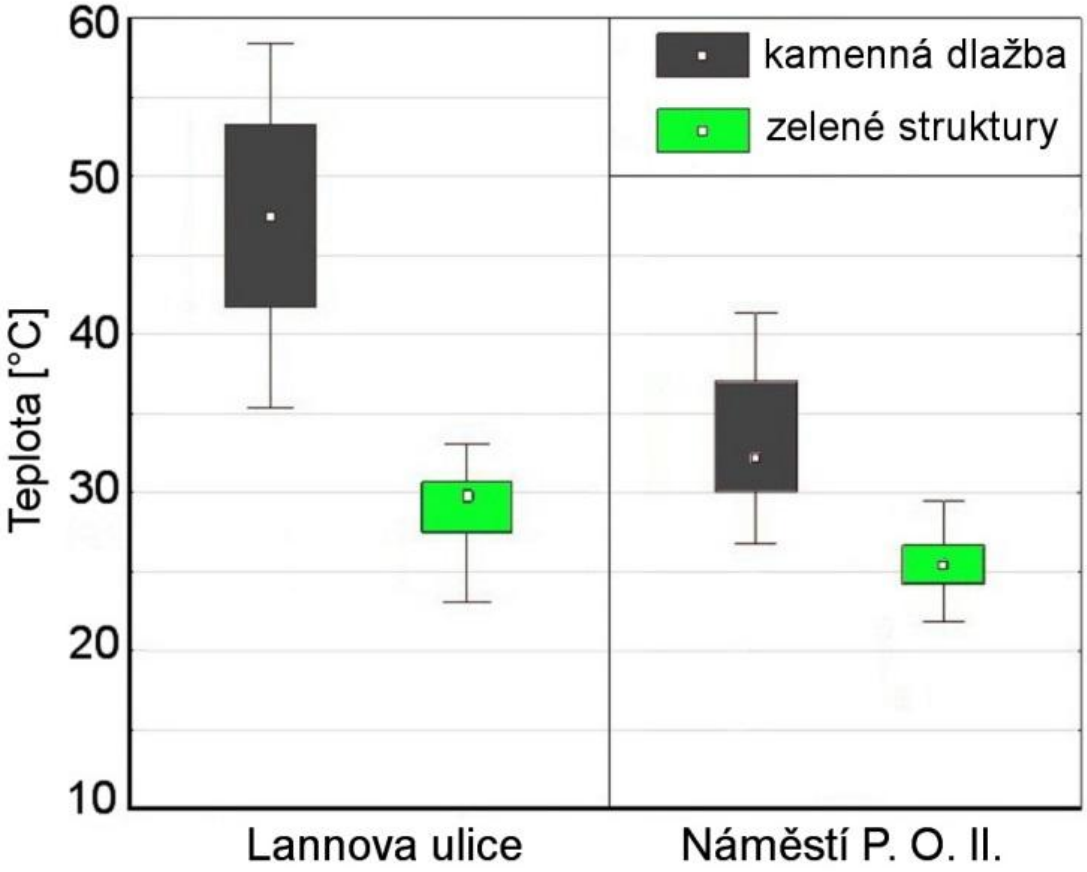
Vliv na teplotu okolního povrchu, v tomto případě trávníku, byl zaznamenán i v případě smrku na Senovážném náměstí. Na Obr. 6 je znázorněna závislost teploty trávníku na vzdálenosti od stromu. S výjimkou několika nejbližších bodů (do zhruba 1,5 metru), které vykazovaly vyšší teplotu (dokonce nejvyšší přímo u stromu a pak postupně klesající), byla patrná rostoucí teplota se vzdáleností od stromu. Nejvýraznější vliv je znát v nejbližších zhruba 7 metrech od stromu, dále již ochlazující vliv nebyl tolik patrný.



Obr. 6: Senovážné náměstí - gradient povrchových teplot od stromu s vyznačeným trendem s použitím Piecewise Linear Regression

4.3 Menší vertikální struktury pouliční zeleně vs. nezelené povrchy

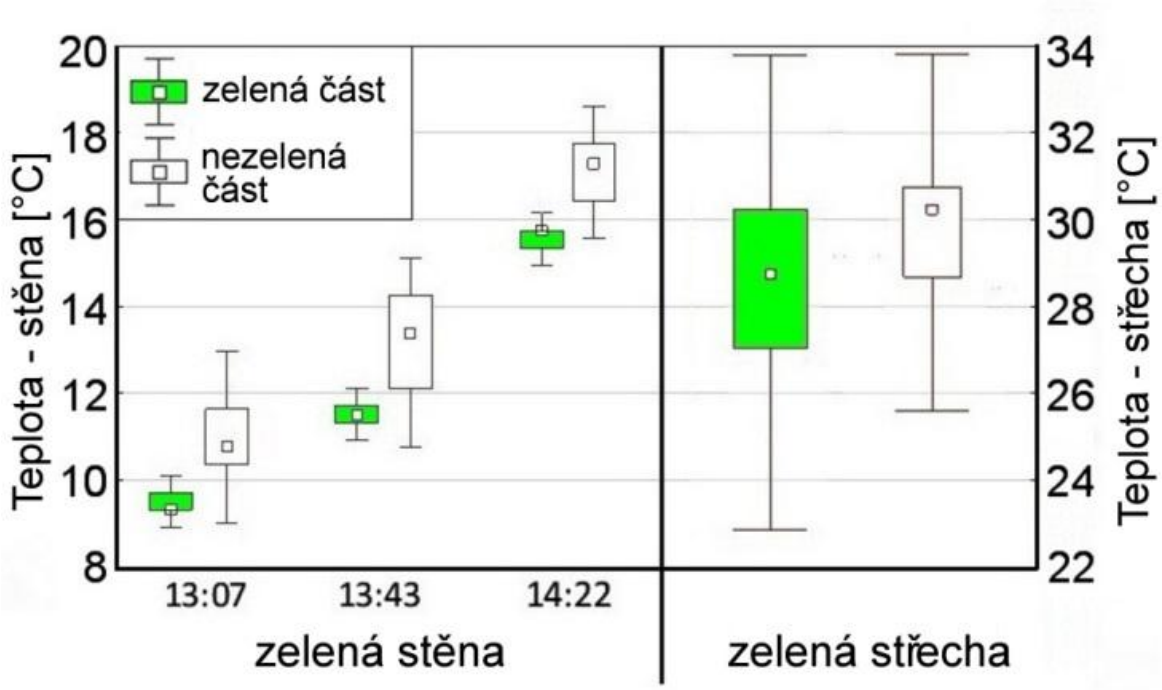
Na Obr. 7 je znázorněno rozpětí povrchových teplot korun mladých stromků (v Lannově ulici) a okrasných rostlin ve velkých betonových květináčích (na náměstí Přemysla Otakara II.) oproti kamenné dlažbě na obou těchto místech (na každém místě byla měřena teplota obou povrchů v ten samý čas; mezi oběma prostranstvími byla z technických důvodů zhruba desetiminutová prodleva, nicméně nedošlo k výrazné změně počasí, takže jsou obě místa srovnatelná). Zelené struktury vždy vykazovaly průkazně (dvouvýběrový t-test, $p<10^{-3}$) nižší teplotu oproti dlažbě. Okrasné rostliny byly mírně chladnější než koruny stromků (asi o 3 °C), nicméně vykazovaly nižší rozdíl oproti dlažbě, který činil zhruba 7 °C v případě okrasných rostlin a 17 °C u stromků. Zeleň se vždy vyznačovala nižším rozptylem hodnot teploty než dlažba.



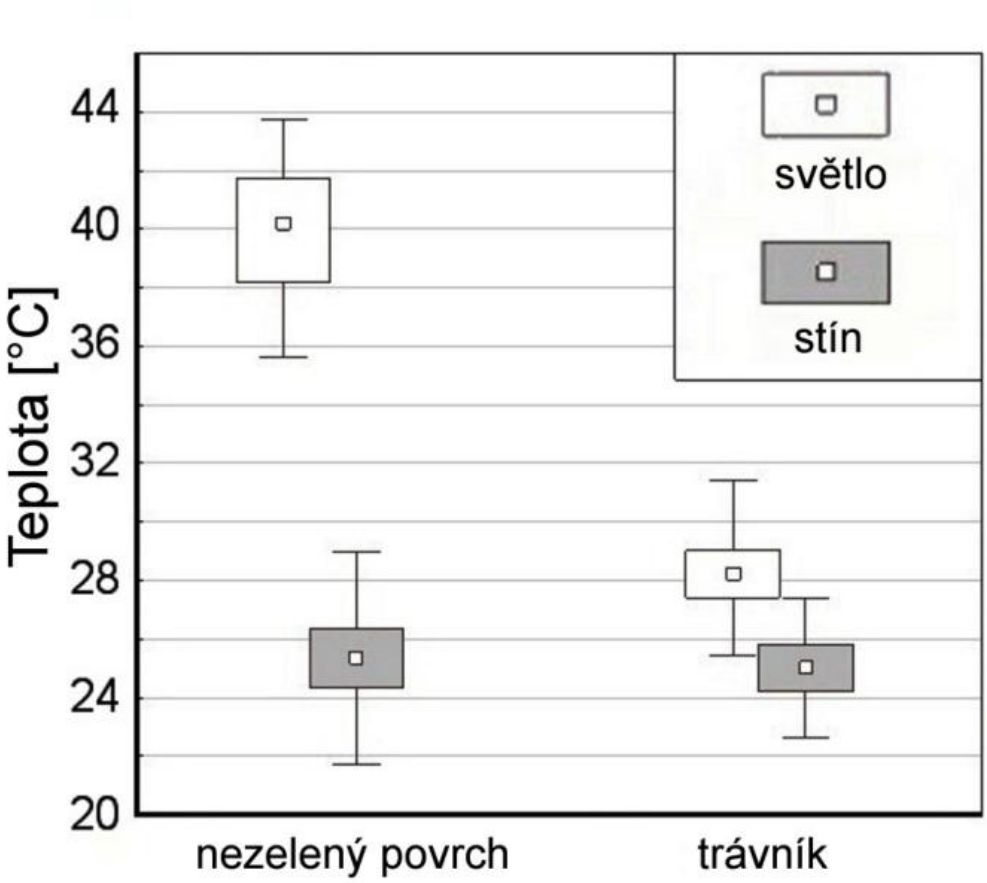
Obr. 7: Povrchová teplota mladých stromů a květináčů s okrasnými rostlinami oproti okolí

4.4 Zelená stěna a střecha

Na Obr. 8 je patrné, že jak u stěny, tak i u střechy byly zelené části vždy mírně, avšak průkazně (dvouvýběrový t-test, $p<10^{-3}$) chladnější než ty nezelené. Zelená střecha byla v průměru o 1,3 °C chladnější oproti nezelené, u stěny porostlé břečťanem se rozdíl pohyboval mezi 1,4-1,5 °C. Odlišnost mezi oběma strukturami při měření spočívala v tom, že stěna nebyla v tu dobu přímo osvětlena sluncem, zatímco střecha ano; účinnost břečťanu ve stínu tedy byla srovnatelná s účinností střechy při insolaci (teplota vzduchu byla v obou dnech zhruba srovnatelná). Liší se také variabilita dat; zatímco u stěny byla zelená část více teplotně homogenní než nezelená, u střechy naopak vykazovala zelená část větší rozptyl dat.



Obr. 8: Střecha a stěna - srovnání zelených a nezelených částí



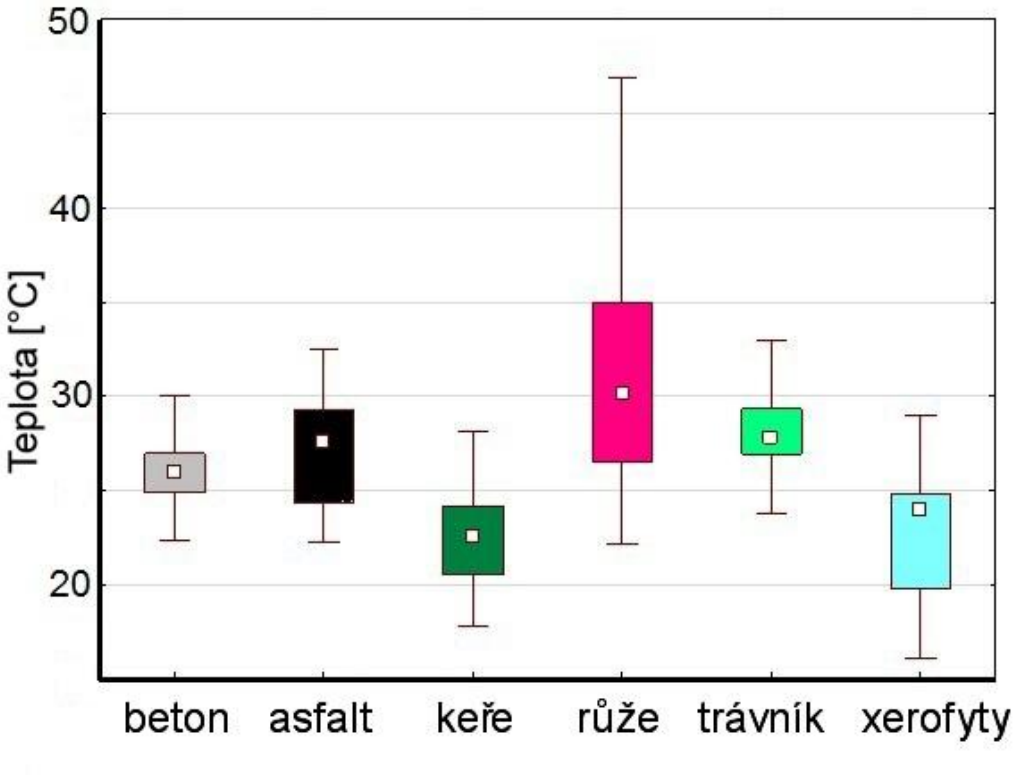
Obr. 9: Sídliště Vltava - vliv stínu vs. trávníku

5. Srovnání vlivu: stín stromů a trávník

Jak zastínění mladými stromy, tak i travnatý pokryv dokázaly průkazně (dvouvýběrový t-test, $p<10^{-3}$) snížit teplotu povrchu, a to v průměru o více než 10 °C. Ochlazující účinek samotného stínu byl mírně větší (zhruba o 3 °C) než účinek samotného trávníku. Nejnižší teploty byly zaznamenány v případě, kdy byl povrch zároveň jak pokrytý trávou, tak i zastíněný stromy, v tomto případě byla povrchová teplota o zhruba 15 °C nižší než u nezeleného (zpevněného) osluněného povrchu. Teplotní rozdíl mezi osluněnou a neosluněnou částí trávníku byl mnohem menší než mezi osvětlenou a neosluněnou částí zpevněného povrchu.

4.6 Srovnání více typů zelených povrchů

Na Obr. 10 jsou zobrazeny naměřené hodnoty teplot u čtyř zelených povrchů na Senovážném náměstí – jednalo se o magnoliové keře, záhon řídce osázený růžemi, běžný trávník a záhon s xerofytními okrasnými travinami; pro srovnání byly ve stejnou dobu snímány i dva běžné nezelené povrchy (beton, asfalt).



Obr. 10: Teploty různých povrchů na Senovážném náměstí

Je patrné, že nejvyšší teploty byly zaznamenány u záhonu s růžemi. Nejnižší teploty (oproti asfaltu a betonu nižší v řádu jednotek °C) vykazovaly keře a také xerofytní trávy,

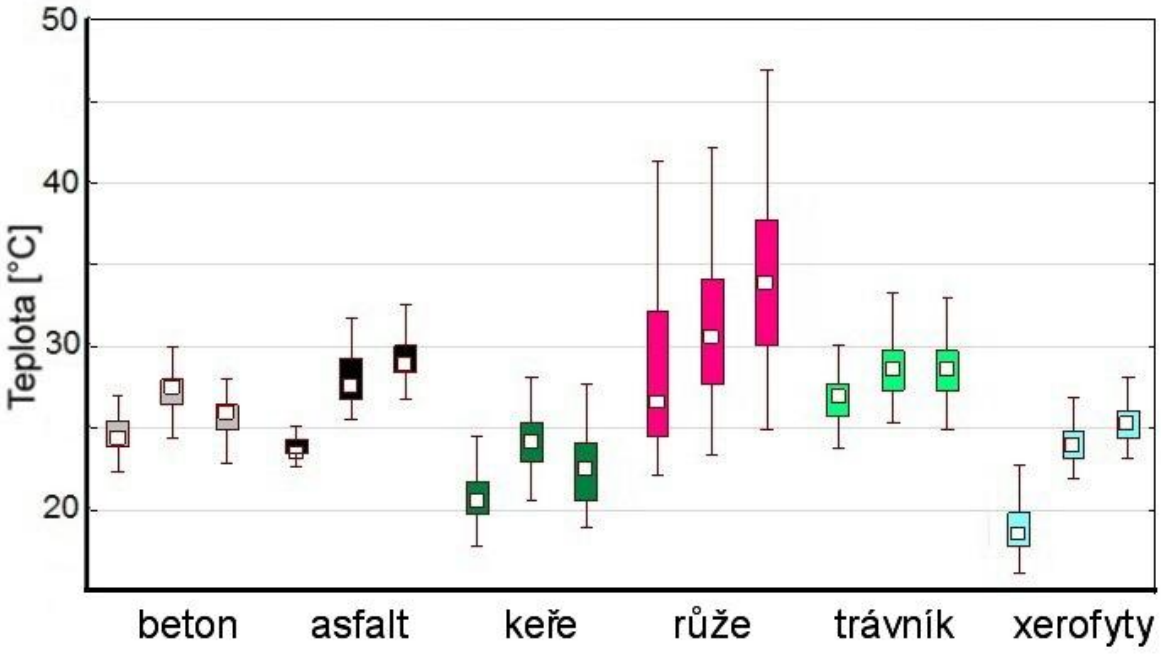
naproti tomu běžný trávník v tomto případě ochlazující účinek nevyvinul. Záhon s růžemi vykazoval nejen nejvyšší hodnoty teplot, ale také největší rozptyl dat.

Jak ukazuje Tukeyho test v Tab. III, každý z těchto povrchů se průkazně lišil od ostatních, s výjimkou keřů a suchomilných travin, které vykazovaly téměř stejnou strukturu teplot.

Tab. IIIII: Tukeyho test - vzájemná podobnost dat (červeně vyznačeno, pokud p<0,05)

	beton	asfalt	keře	růže	trávník
beton					
asfalt	0,000370				
keře	0,000020	0,000020			
růže	0,000020	0,000020	0,000020		
trávník	0,000020	0,000694	0,000020	0,000020	
xerofyty	0,000020	0,000020	0,992148	0,000020	0,000020

Pokud se podíváme zvlášť na každé ze tří měření, která zde byla v daný den provedena, zjistíme, že různé povrchy vykazovaly různý teplotní vývoj. Asfalt, záhon s růžemi a suchomilné rostliny vykazovaly růst během celé doby měření, zatímco povrchy betonu, keřů a trávníku projevily mezi druhým a třetím měřením teplotní stagnaci či dokonce pokles, jak je znázorněno na Obr. 11.



Obr. 11: Teploty snímaných povrchů při každém ze tří měření; první proběhlo ve 13:22 (krátce po rozpuštění oblačnosti a začátku insolace), druhé ve 13:57 a třetí ve 14:34.

5. Diskuze

Vzhledem k vysokému podílu lidí žijících ve městech a ke zvyšujícím se letním teplotám se obrací pozornost veřejnosti na prostředky, kterými lze zeslabit efekt městského tepelného ostrova (UHI). Jako jedno z řešení je uváděn princip zelené infrastruktury, který spočívá v tom, že vegetace ve městech tlumí teplotní extrémy a zvyšuje kvalitu života obyvatel (např. Estoque et al., 2017; Leuzinger et al., 2010; Li et al., 2012 apod.).

5.1 Vzrostlé stromy vs. povrchy bez vegetace

Jak u Černé věže, tak i u Vodárenské věže vykazovaly koruny stromů nižší teplotní amplitudy i denní maxima oproti okolí, což je v souladu s principem vlivu zelené infrastruktury na mikroklima urbánního prostředí (popsaném v předchozím odstavci nebo obsáhleji v kap. 2.3.2). Shoduje se to též s výsledky, které byly zjištěny zde na území Českých Budějovic z družicových snímků (Kottová, 2017). Krátké snížení rozdílu mezi teplotou vegetace a ostatních povrchů během přechodu oblačnosti se shoduje se stejným jevem, který popsali Gallo et al. (2011). Naproti tomu krátkodobý přechod stínu Černé věže přes zkoumané plochy (okolo 16. hodiny u žulové dlažby, 17. hodiny u střešních tašek a 18. hodiny u stromů) znatelný vliv nepřinesl, což bylo zřejmě způsobené jednak krátkou dobou trvání stínu a jednak skutečností, že poměrně úzký stín věže nikdy nezakryl zkoumanou plochu jako celek a vždy zde zůstala část plochy ozářená sluncem.

Noční vývoj teplot ukázal rozdíl mezi nezelenými povrchy, který spočíval ve větším vychladnutí střešních tašek oproti dlažbě. Upmanis et al. (1998) obecně tvrdí, že zeleň má i v noci nižší teplotu oproti okolí, což se v této diplomové práci potvrdilo u žulové dlažby, která zůstala v noci teplejší než zeleň, ale nikoliv u střešních tašek, které naopak vychladly více než zeleň, což spíše odpovídá principu většího vychládání konvenčních povrchů, který popsali např. Schrijvers et al. (2015). Tento rozdíl může být způsoben efektem uličního kaňonu (Nunez et Oke, 1977). Tepelné vyzařování z dlažby na povrchu ulice je omezeno okolními budovami, které zachytí část fotonů vyzářených dlažbou; jejich povrch se tím ohřeje, což zvýší i jejich tepelné záření a v důsledku se dlažba a budovy ohřívají navzájem. Oproti tomu u střechy tento princip neplatí, neboť se nachází výše, kde téměř nic nezadržuje vyzářené fotony dlouhovlnného spektra a energie z těchto fotonů se již nevrátí; navíc je střecha více v kontaktu s volnou atmosférou. Tento princip také popsali na konkrétních příkladech v New Yorku Susca et al. (2011).

Oproti tomu Schrijvers et al. (2015) docházejí ke zjištění, že níže položené části ulic mohou být v noci naopak chladnější než jejich okolí, a to vlivem nižšího oslunění (a tím

pádem nižší dodávky energie) v denní době, což může překonat i výše popsaný efekt zachycování dlouhovlnného záření. To se však v této diplomové práci neprojevilo, a to zřejmě proto, že data byla sbírána v červnu v blízkosti slunovratu, kdy je slunce nejvýše nad obzorem a svítí pod takovým úhlem, že přes den dodává energii i do níže položených povrchů v ulici. Navíc tam může energie přicházet nejen v podobě přímého záření, ale i toho rozptýleného a odraženého od okolních budov se světlou omítkou (Nunez et Oke, 1977).

Vedle tvaru ulice mohly k rozdílu mezi noční teplotou střechy a uliční dlažby přispět také různé tepelné vlastnosti použitých materiálů. Zatímco střešní tašky jsou určené k izolaci a nedokáží tedy uchovávat velké množství tepla, žulové kostky působí díky silnější vrstvě a lepší tepelné vodivosti (Pezeshki et al., 2018) jako tepelné úložiště, které přes den ukládá teplo a v noci je uvolňuje prostřednictvím dlouhovlnného záření. Tento jev byl popsán také u asfaltového povrchu, který v noci může taktéž působit jako tepelný zdroj (Hesslerová et al., 2013).

Tyto zjištěné skutečnosti mohou být argumentem, proč umisťovat zeleň nejen do parků, ale i do uličních kaňonů, protože právě tyto ulice jsou místem akumulace tepla a tím i potenciálně většího tepelného stresu, který zcela nezmizí ani v nočních hodinách. Pokud tam není možné sázet vysokovzrůstné stromy (např. z důvodu podzemních sítí), tak je vhodné tam alespoň vysadit keře či umístit nádoby s okrasnými rostlinami.

5.2 Teplotní gradient od korun stromů

Stromy nejen vykazovaly nižší teplotní amplitudy oproti okolním nezeleným povrchům, ale navíc ovlivňovaly i teplotu svého blízkého okolí. Tento jev byl již popsán v měřítku celých městských čtvrtí (např. Upmanis et al., 1998), ale je méně znám v měřítku jednotlivých ulic. Protože tepelné záření vede u blízkých povrchů k tendenci vyrovnávat jejich teploty, tak nižší teplota listů stromů oproti okolním povrchům (resp. vyšší teplota v noci oproti střešním taškám) vede k toku tepla z teplejšího povrchu ke chladnějšímu a tím k tomu, že se teploty blízkých povrchů postupně blíží k teplotě povrchu stromů.

Princip popsaný v předchozím odstavci platil jak u lip pod Černou věží, tak i u smrku na Senovážném náměstí; v druhém případě však s výjimkou nejbližších 1,5 metru, kde naopak byly naměřeny vyšší teploty. Hlavní příčinou byl zřejmě kyselý opad, který ochuzuje půdu v těsném okolí smrku, což snižuje pokryvnost a tím i transpirační schopnost trávníku. Vliv mohly mít i kořeny stromu těsně pod trávníkem, které z půdy v blízkosti stromu odčerpávají vodu a tím rovněž snižují transpiraci trávy. Doplňkovým vlivem mohl být i

odraz tepelného záření od stromu na plochu trávníku, který se mohl přičíst k záření trávníku a tím mírně zkreslit skutečnou teplotu jeho povrchu.

Zjištěné poznatky zdůrazňují roli roztroušené městské zeleně. Obecně lze říci, že koruny stromů jsou schopné ovlivnit teplotu povrchů v nejbližších jednotkách metrů. Z tohoto důvodu je vhodné, aby se stromy v rámci měst nacházely nejen v parcích, ale co nejvíce také roztroušeně v ulicích a na různých dalších prostranstvích, aby se co nejvíce zvýšila plocha „nárazníkové zóny“, kterou mohou stromy takto ovlivnit. Ačkoliv někteří autoři (např. Li et al., 2012) vyzdvihují především roli velkých parků, je nutné si uvědomit, že větší park sice vykazuje nižší teplotu než menší zelené prvky, avšak lidé objektivně musejí využívat i ulice dál od parku, kam již jeho ochlazující vliv nedosáhne.

V literatuře je též zmíněn vliv větru (např. Theuwees et al., 2013, Tan et al., 2015), kdy se vytváří „jazyk“ chladnějšího vzduchu od ochlazujícího prvku dál ve směru větru. Povrchy, které se nacházejí ve směru převládajících větrů od stromů (v našich podmínkách zpravidla na východ od nich), mohou být tedy ovlivněny ve vetší míře než povrchy na opačné straně od stromu. Tím pádem je rozumné sázet stromy především do míst, odkud proudí vzduch na místa s větší koncentrací lidí (např. na západní stranu náměstí nebo do úseku ulice západně od frekventované křižovatky).

5.3 Menší struktury pouliční zeleně vs. nezelené povrchy

Obě sledované struktury, tedy mladé stromky v Lannově ulici a okrasné rostliny na náměstí P. O. II., vykazovaly nižší teplotu než jejich okolí. Přestože stromky vykazovaly průměrně o zhruba 3 °C vyšší absolutní teplotu než okrasné rostliny, jejich teplotní rozdíl vůči dlažbě na tom samém místě byl mnohem větší – činil 17 °C oproti 7 °C u okrasných rostlin. Rozdíl teplot dlažby byl zřejmě způsoben odlišným použitým materiálem; dlažba okolo stromků v Lannově ulici byla mnohem tmavší než ta na náměstí okolo květináčů. Teplota dlažby přitom ovlivňuje i teplotu svého okolí včetně zelených povrchů; vlivem tepelného záření mezi povrchy vzniká tendence k vyrovnání teplot, jak bylo popsáno v kap. 5.2.

Z toho vyplývá, že stromky, ačkoliv relativně nově vysazené a s malou korunou, vykazovaly oproti svému okolí větší ochlazení než okrasné rostliny, což bylo zřejmě dáno spojením s půdním profilem a tím lepší dostupností vody pro transpiraci (Armson et al., 2012; Makarieva et Gorshkov, 2007). I u samotných rostlin byl však jejich povrch průkazně chladnější než jejich okolí; i omezená zásoba půdní vláhy v nádobách tedy zřejmě stačila do určité míry k transpiraci a tím pádem k ochlazení.

5.4 Zelená stěna a střecha

Rozdíl ve variabilitě teplot (u střechy byl větší rozptyl hodnot v zelené části, zatímco u stěny v té nezelené) byl zřejmě způsoben odlišnou strukturou těchto prvků; zelená střecha měla poměrně různorodý povrch (včetně plošek holé půdy mezi nesouvislým porostem xerofytů) oproti poměrně stejnorodému povrchu nezelené střechy, zatímco u stěny, kde byla zelená část rovnoměrně zarostlá a tím stejnorodější, tomu bylo naopak.

Mezi zelenou střechou a stěnou existuje z pohledu termálních vlastností několik odlišností. Jedna z nich spočívá v expozici vůči dopadajícím paprskům – čím výše je slunce nad obzorem, s tím větší intenzitou (úměrnou tomu, jak se úhel dopadajícího záření blíží pravému úhlu) dopadá sluneční záření na střechu (která je v tomto případě zpravidla plochá) a naopak tím méně intenzivní záření na jednotku plochy dopadá na svislou stěnu. U stěny navíc hraje roli, na jakou světovou stranu je obrácená; u obou těchto druhů prvků navíc mohou mít vliv stíny okolních budov a dalších struktur.

Obecně pro všechny zelené střechy a stěny (bez ohledu na expozici) je důležitý rozdíl v tom, že popínavá rostlina na stěně je kořeny připojena k půdě okolo domu, z níž může čerpat vodu (pokud není zakořeněna v nádobě, což zde ale není běžné), zatímco sukulentní rostliny na zelené střeše jsou závislé na poměrně tenké vrstvě snadno vysychavé půdy na povrchu střechy, což zpravidla znamená nižší kapacitu vody pro transpiraci. To se projevilo i na rozdílu ve výsledcích; ačkoliv u obou prvků je rozdíl mezi zelenou a nezelenou částí zhruba stejný, měření byla prováděna za různých podmínek (u střechy za o něco vyšší teploty a za přímého oslunění, zatímco stěna byla v době měření ve stínu), takže lze očekávat, že za srovnatelných podmínek by byla stěna účinnější.

Na druhou stranu je nižší účinnost ochlazování u zelené střechy vyvážena schopností transpirace i za značného sucha. Měření u střechy probíhalo na konci mimořádně suchého léta 2018, kdy se obsah půdní vody zřejmě snížil na minimum, přesto dokázaly suchomilné rostliny mírně (o 1,3 °C), avšak průkazně snížit teplotu povrchu. Jiné typy rostlin by za těchto podmínek nebyly schopné transpirovat a mnohdy ani přežít. Z tohoto důvodu mnozí autoři (Du et al., 2019; Schindler et al., 2019 apod.) doporučují právě suchomilné rostliny (např. rozchodník) pro zelené střechy do oblastí se sušším podnebím.

Objevuje se i opačný názor, a to doporučení k použití vysokovzrůstné tmavší vegetace s větší mírou transpirace a tím i s významnějším ochlazením (Niachou et al., 2001). Ta je ovšem použitelná jen ve vlhčích oblastech či s použitím zavlažování nebo silnější vrstvy půdy na střeše, což ze stavebních důvodů není vždy možné.

Kromě transpirace může hrát u zelených stěn a střech roli také větší specifický povrch rostlin daný jejich více prostorovou strukturou oproti konvenčním materiálům – přestože je index listové plochy u suchomilných rostlin zpravidla menší než u ostatních typů, stále má potenciál vytvořit členitější povrch, než je např. plechová či tašková střecha. Tento povrch je schopen vyzářit více dlouhovlnného záření než rovnější povrchy; navíc je více v kontaktu s volnou atmosférou, což také přispívá k jeho lepšímu ochlazení. Nutno ovšem dodat, že v tomto případě to u zelené střechy větší roli zřejmě nehrálo, neboť i ta „nezelená" část střechy nebyla tvořena zcela konvenčním materiálem typu tašek, nýbrž vrstvou štěrku, který má také velký specifický povrch.

Zelené střechy a stěny nejen ochlazují samotný povrch těchto prvků, ale navíc snižují akumulaci tepla do budov a tím i následné tepelné vyzařování, které by v noci ohřívalo jejich okolí. Navíc pozitivně ovlivňují život v budovách; jak zmiňují různí autoři (Niachou et al., 2001; Wong et al., 2009 apod.), jak zelené střechy, tak i stěny jsou schopné snížit spotřebu energie a budovách a zvýšit celkovou kvalitu života jejich obyvatel.

5.5 Srovnání vlivu: stín stromů a trávník

Jak zatravnění, tak i stín mladých stromů na sídlišti Vltava dokázaly v tomto případě snížit povrchovou teplotu, což potvrzuje výsledek studie, kterou prováděli Armson et al. (2012). Oproti jejich studii, která ukázala trávník jako mírně účinnější ochlazovací prvek než stín, zde naopak vyšel stín o něco účinnější. To může být způsobeno sušším počasím v ČR v době sběru dat (léto 2018) oproti obvyklému počasí ve Velké Británii, kde byla provedena zmíněná studie. Sucho v půdě sníží obsah vody dostupné pro transpiraci, a to zejména v povrchové vrstvě, ze které čerpají vodu byliny v trávníku, což sníží jejich transpirační potenciál (viz Makarieva et Gorshkov, 2007). Stromy se naproti tomu vyznačují hlubšími kořeny, takže jsou schopny získat vodu i z poměrně hlubších vrstev půdy, kde se sucho neprojevuje tak akutně. Jsou tím zvýhodněny oproti trávníku, do určité míry (pokud sucho nepřesáhne určitou mez) mohou lépe transpirovat a rozvíjet svůj listový aparát, který vytváří stín. Z těchto důvodů vyzdvihují roli stromů i např. Gillner et al. (2015).

Podobný princip popisují i Shashua-Bar et al. (2009), kteří zkoumali teplotu vzduchu okolo zelených struktur v suchém podnebí. V jejich studii také vychází stín stromů jako účinnější ochlazovací prostředek než trávník, ale navíc se samotná tráva bez stromů vyznačuje větší spotřebou vody než celá struktura tvořená stromy a trávníkem (ve studii ovšem bylo použito umělé zavlažování, takže v obvyklých podmínkách by trávník tolik vody

k odparu neměl a spotřeba, ale i ochlazení, by byly nižší). Kromě toho docházejí k závěru, že stín stromů ochlazuje lépe než stín nezelených struktur.

Je ale potřeba dodat, že stín musí panovat po delší dobu; jak již bylo zmíněno v kap. 5.1, krátkodobý přechod stínu Černé věže znatelné ochlazení nepřinesl, v čemž se výsledek lišil od měření zde na sídlišti Vltava, kde stromy, byť poměrně mladé, stínily měřenou plochu po dobu přinejmenším několika hodin před snímáním.

Celkově lze říci, že jak stín stromů, tak i zatravnění pomáhají snížit efekt městského tepelného ostrova. Čím sušší panuje podnebí, tím více vzrůstá význam stromů oproti trávníku. Zjevně nejúčinnější možností je pak kombinace obou těchto prvků.

5.6 Srovnání více typů zelených povrchů

Oproti měření na sídlišti Vltava (viz kap. 4.5 a 5.5) trávník zde na Senovážném náměstí nevykazoval nižší teploty oproti povrchům mimo vegetaci; jeho teplota byla přibližně srovnatelná s teplotou asfaltu a dokonce mírně vyšší než u betonové dlažby (která, zřejmě vlivem světlejší barvy, nedosáhla tak vysokých teplot jako asfalt). To mohlo být způsobeno především neobvyklým suchem v roce 2018, kdy byla tato měření prováděna; zatímco měření popsané v kap. 4.5 probíhalo na začátku léta, kdy suché období bylo teprve v první polovině a zbytková vlhkost v půdě mohla dostačovat k vysoké pokryvnosti transpiračně aktivních rostlin v trávníku, měření na Senovážném náměstí proběhlo až na konci léta, kdy byl trávník jednak oslaben dlouhotrvajícím suchem (což snížilo jeho pokryvnost a zvýšilo podíl holé půdy, která má tendenci se více přehřívat) a jednak ani asimilující části trávníku nebyly schopny tak účinně transpirovat.

Na druhou stranu, z grafu na Obr. 9 je zřejmé, že s přibývajícím časem (mezi měřením ve 13:57 a 14:34) teplota trávníku spíše stagnuje, zatímco asfalt se zahřívá stále více. To naznačuje, že i u takto oslabeného trávníku může zvýšená teplota (která vyvolává i vyšší transpiraci, jak uvádí Kolařík et al., 2010) indukovat odpar, který další oteplování zpomalí.

Keře oproti trávníku vykazovaly nižší teplotu, což bylo zřejmě opět zapříčiněno hlubšími kořeny a tím i přístupem k těm vrstvám půdy, kde nebyl takový nedostatek vlhkosti (viz Makarieva et Gorshkov, 2007). Podobné teploty jako u keřů ovšem byly naměřeny i u suchomilných travin, které přitom tak hluboko nekoření. To by mohlo být způsobeno tím, že tyto xerofyty jsou obecně uzpůsobeny na teplá a suchá prostředí a povrch jejich listů se brání přehřívání, např. pomocí trichomů, které odrážejí část dopadajícího záření. Tím pádem se tyto suchomilné traviny zdají být vhodným typem vegetace do těch částí měst, kam není

(např. z důvodu podzemních sítí) možno sázet dřeviny, a to zejména na otevřená prostranství. Méně už by mohly být vhodné do „kaňonových“ ulic, kde může záření odražené od listů opět oteplit např. okolní budovy.

Z pohledu vývoje teplot se keře a xerofyty chovaly odlišně; mezi druhým a třetím měřením teplota keřů lehce poklesla, což mohlo být opět vyvoláno výše zmíněným principem, kdy oteplení povrchu rostlin vyvolá vyšší transpiraci a ta přinese zpomalení růstu teploty či dokonce opětovné ochlazení. U xerofytů, kde je míra transpirace nižší, teplota stále rostla, byť se i při posledním měření udržovala nejnižší ze všech snímaných povrchů kromě keřů.

Vysoké teploty (dokonce výrazně vyšší než u nezelených povrchů) u záhonu s růžemi byly zjevně způsobeny nízkou pokryvností růží; ty sice zřejmě také transpirovaly a tím ochlazovaly svůj povrch, nicméně většinu plochy záhonu zabírala holá půda, která se vlivem tmavé barvy silně zahřívala. Podobný princip, tedy velké zahřívání holé tmavé půdy oproti okolí, popsali Gluch et al. (2006). Také neobvykle velký rozptyl naměřených teplot vypovídá o teplotní různorodosti snímaného povrchu – od samotných chladnějších rostlin růží až po rozehřátý povrch půdy.

Neobvyklý je také pokles teploty betonové dlažby mezi druhým a třetím měřením, který je v kontrastu s růstem teploty u asfaltu. Protože však byla betonová dlažba v době snímání využívána nejvíce ze všech zkoumaných ploch (pohyb lidí, aut apod.), což samozřejmě mohlo způsobit rušivé vlivy, lze tyto údaje považovat spíše za orientační.

5.7 Souhrn doporučení

Celkově lze říci, že městská zeleň je vhodným prvkem ke zmírnění UHI a je proto vhodné ji umisťovat do městského prostředí v co největší míře za účelem zmírnění teplotních extrémů a zvýšení kvality života obyvatel.

Nezáleží ale jen na množství zeleně, nýbrž i na její podobě. Stromy, zejména ty vzrostlé, se ukazují jako výhodnější prostředek k ochlazování než trávníky (nejen lepší schopností transpirace, ale i stíněním a tím nižším prohříváním vzduchové hmoty pod nimi), a to tím více, o čím sušší oblast se jedná. To je velmi aktuální i u nás, vzhledem k suchým létům, která jsou v podmínkách ČR stále častější. Nicméně tam, kde objektivně není možné sázet dřeviny, jsou i trávníky (kromě těch zcela nejsušších období) lepší variantou než zpevněné povrchy. Namísto klasických trávníků lze využít i záhony s xerofyty, které jsou vůči suchu lépe uzpůsobené. Kromě toho je možné do takových prostranství umístit nádoby s okrasnými rostlinami.

U záhonů (např. s růžemi) je nutné dbát na to, aby rostliny měly zejména v letních měsících velkou pokryvnost, neboť odkrytá tmavá půda či tmavý mulč pod nimi může vést naopak k růstu povrchové teploty (částečným řešením by mohlo být použití světlého mulče).

Vliv má také umístění zeleně v rámci města. Je důležité, aby se zeleň nacházela nejen v parcích, ale také roztroušeně mezi zástavbou (aby se co nejvíce zvýšila plocha povrchů, které zeleň radiačně ovlivňuje) a přímo v ulicích, zejména těch kaňonovitých, kde je větší potenciál k přehřívání. U frekventovanějších míst může být vhodným řešením umístit zelené prvky na západ od nich, aby převládající větry přenášely chladnější vzduch právě na tato místa.

Doporučuji také více používat zelené střechy a stěny, které po správném vytvoření mohou snížit teplotní extrémy jak v okolních ulicích, tak i přímo v budovách. Jejich výhoda oproti ostatním typům vegetace je, že v zástavbě nezabírají nové plochy. Zejména zelené stěny, byť zatím nejsou tolik známé a rozšířené, mohou účinně snížit UHI díky propojení kořenů se zemí.

6. Závěr

Tato práce se zabývala vlivem městské zeleně na povrchovou teplotu a na snižování vlivu městského tepelného ostrova (UHI). Byl potvrzen obecně známý princip, kdy zeleň snižuje amplitudy povrchových teplot a především snižuje nejvyšší teploty v letních dnech, a to jak přímo u daného transpirujícího povrchu, tak i u nejbližšího okolí v jednotkách metrů. Tento princip byl ukázán (v některých případech i celodenním měřením) na několika konkrétních příkladech v prostředí Českých Budějovic, a to v měřítku jednotlivých ulic či prostranství.

Bližší pohled byl v této práci věnován účinku méně obvyklých struktur (zelená stěna a střecha) či takových, které se sice ve městech hojně vyskytují, ale literatura se jimi dosud příliš nezabývala (jednotlivé menší stromky, květináče s okrasnými rostlinami, záhony s xerofytními trávami apod.). Bylo zjištěno, že i tyto struktury mohou do určité míry pomoci ke snížení povrchové teploty a tím k redukci UHI, byť nedosahují takového účinku jako vzrostlé stromy.

V neposlední řadě byla přednesena praktická doporučení (pro správce městské zeleně, územní plánovače, ale i volené orgány měst), jakým způsobem koncipovat městskou zeleň tak, aby se co nejvíce projevil její ochlazující účinek. Tento praktický význam je dnes stále více aktuální vzhledem ke stále častějším vlnám veder, které se objevují na území ČR a zejména ve městech snižují kvalitu života obyvatel. Právě zeleň je vhodným prostředkem, jak teplotu ve městech snížit a tím přispět k opětovnému zvýšení kvality života ve městech.

Zdroje:

Armson, D.; Stringer, P.; Ennos, A. R. (2012) ´The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area´, Urban Forestry & Urban Greening, Vol. 11, No. 2, pp. 245–255

Broadbent, A. M.; Coutts, A. M.; Nice, K. A.; Demuzere, M.; Krayenhoff, E. S.; Tapper, N. J.; Wouters, H. (2019) ´The Air-temperature Response to Green/blue-infrastructure Evaluation Tool (TARGET v1.0); an efficient and user-friendly model of city cooling´, Geoscientific Model Development, Vol. 12, pp. 785–803

Brom, J.; Nedbala, V.; Procházka, J.; Pecharová, E. (2012) ´Changes in vegetation cover, moisture properties and surface temperature of a brown coal dump from 1984 to 2009 using satellite data analysis´, Ecological Engineering, Vol. 43, pp. 45–52

Doick, K. J.; Peace, A.; Hutchings, T. R. (2014) ´The role of one large greenspace in mitigating London's nocturnal urban heat island´, Science of the Total Environment, Vol. 493, pp. 662–671

Dong-hoon, S. & Kyoo-seock, L. (2005) ´Use of remote sensing and geographical information systems to estimate green space surface-temperature change as a result of urban expansion´, Landscape and Ecological Engineering, Vol. 1, pp. 169-176

Du, P.; Arndt, A. K.; Farrell, C. (2019) ´Is plant survival on green roofs related to their drought response, water use or climate of origin?´, Science of the Total Environment, Vol. 667, pp. 25–32

Estoque, R. C.; Murayama, Y.; Myint, S. W. (2017) ´Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia´, Science of the Total Environment, Vol. 577, pp. 349–359

Gallo, K.; Hale, R.; Tarpley, D.; Yu, Y. (2011) ´Evaluation of the Relationship between Air and Land Surface Temperature under Clear- and Cloudy-Sky Conditions´, Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 50, pp. 767-775.

Gillner, S.; Vogt, J.; Tharang, A.; Dettmann, S.; Roloff, A. (2015) ´Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites´, Landscape and Urban Planning, Vol. 143, pp. 33–42

Gluch, R.; Quattrochi, D. A.; Luvall, J. C. (2006) ´A multi-scale approach to urban thermal analysis´, Remote Sensing of Environment, Vol. 104, pp. 123–132

Hansen, J; Ruedy, R; Sato, M; Lo, K. (2010) ´Global surface temperature change´ Reviews of Geophysics, Vol. 48, pp.

Herb, W.R., Janke, B., Mohseni, O., et al. (2008) ´Ground surface temperature simulation for different land covers´ J. Hydrol. Vol. 356, pp. 327–343.

Hesslerová, P; Pokorný, J; Brom, J; Rejsková-Prochazková, A (2013) ´Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: Consequences for the local climate´, Ecological Engineering, Vol. 54, pp. 145-154

Jiang, J.; Tian, G. (2010) ´Analysis of the impact of Land use/Land cover change on Land Surface Temperature with Remote Sensing´, Procedia Environmental Sciences, Vol. 2, pp. 571–575

Kolařík, J. a kol. (2010) ´Péče o dřeviny rostoucí mimo les´ Metodika Českého svazu ochránců přírody č. 6, ISBN 978-80-86327-85-3

Kottová, Š., (2017) ´Vývoj a prostorová distribuce povrchových teplot v Českých Budějovicích a okolí´ Diplomová práce, Přírodovědecká fakulta JČU, České Budějovice

Leuzinger, S.; Vogt, R.; Körner, C. (2010) ´Tree surface temperature in an urban environment´, Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 150, pp. 56–62

Li, X.; Zhou, W.; Ouyang, Z.; Xu, W.; Zheng, H. (2012) ´Spatial pattern of greenspace affects land surface temperature: evidence from the heavily urbanized Beijing metropolitan area, China´, Landscape Ecology, Vol. 27, pp. 887–898

Makarieva, A. M.; Gorschkov, V. G. (2007). ´Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land´, Hydrology and Earth System Services, Vol. 11, No. 2, pp. 1013-1033.

Marvalová, J. (2016) ´Význam vegetace v utváření klimatických charakteristik v městské zástavbě´ Diplomová práce, Zemědělská fakulta JČU, České Budějovice

Mishra A. K.; Ramgopal M. (2013) ´Field studies on human thermal comfort—an overview´ Build Environ; Vol. 64, pp. 94–106

Myung-Hee, J. et al. (2001) ´The Spatial Topographic Analysis of Urban Suface Temperature using Remotely Sensed Data and GIS´ Presented at the 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5 - 9 November 2001, Singapore.

Niachou, A.; Papakonstantinou, K.; Santamouris, M.; Tsangrassoulis, A. (2001) ´Analysis of the Green Roof Thermal Properties and Investigation of its Energy Performance´, Energy and Buildings, Vol. 33, No. 7, pp. 719-729

Nuněz M.; Oke T. R. (1977) ´The Energy Balance of an Urban Canyon´, Journal of Applied Meteorology, Vol. 16, No. 1, pp. 11-19

Pal, S. ; Ziaul, S. (2017) ´Suitability Assessment for Selecting New Sites for Installing Water Service Centres within English Bazar Municipality, Malda, West Bengal´, Journal of Settlements and Spatial Planning, Vol. 7, No. 2, pp. 167-168

Peng, J.; Xie, P.; Liu, Y.; Ma, J. (2016) ´Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region´, Remote Sensing of Environment, Vol. 173, pp. 145–155

Petrík, M.; Havlíček, V.; Uhrecký, I. (1986) ´Lesnická bioklimatológia´ I. vydání, Príroda, Bratislava.

Pezeshki, Z.; Soleimani, A.; Darabi, A; Mazinani, S.M. (2018) ´Thermal transport in: Building materials´, Construction and Building Materials, Vol. 181, pp. 238–252

Pierce, K. B.; Lookingbill, T.; Urban. D. (2005) ´A simple method for estimating potential relative radiation (PRR) for landscape-scale vegetation analysis´, Landscape Ecology, Vol. 20, pp. 137–147

Pokorný, J. (2001) ´Dissipation of solar energy in landscape-controlled by management of water and vegetation´, Renewable Energy, Vol. 24, No. 3-4, pp. 641-645

Qin, Z.; Karnieli, A; Berliner, P. (2002) ´Remote sensing analysis of the land surfac e temperature anomaly in the sand-dune region across the Israel–Egypt border´ Int. J. Remote Sensing, Vol. 23, No. 19, pp. 3991– 4018

Rafiee, A.; Diasa, E.; Koomen, E. (2016) ´Local impact of tree volume on nocturnal urban heat island: A case study in Amsterdam´, Urban Forestry & Urban Greening, Vol. 16, pp. 50–61

Rožnovský, J. 2014 ´Klimatická změna: dopady na krajinu´ In: Povodně a sucho – krajina jako součást řešení, sborník příspěvků Komise pro životní prostředí Akademie věd ČR ze semináře 5. června 2014

Rubio, E.; Caselles, V.; Badenas, C. (1997) ´Emissivity Measurements of Several Soils and Vegetation Types in the 8-14/ m Wave Band: Analysis of Two Field Methods´, Remote Sensing of Environment, Vol. 59, pp. 490-521

Saaroni, H.; Ben-Dor, E.; Bitan, A; Potchter, O. (2000) ´Spatial distribution and microscale characteristics of the urban heat island in Tel-Aviv, Israel´, Landscape and Urban Planning, Vol. 48, pp. 1-18

Sader, S. A. (1986) ´Analysis of effective radiant temperatures in a pacific northwest forest using thermal infrared multispectral scanner data´, Remote Sensing of Environment, Vol. 19, No. 2, pp. 105-115

Schindler, B. Y.; Blaustein, L.; Vasl, A.; Kadas, G. J.; Seifan, M. (2019) ´Cooling effect of Sedum sediforme and annual plants on green roofs in a Mediterranean climate´, Urban Forestry & Urban Greening, Vol. 38, pp. 392–396

Schrijvers, P. J. C.; Jonker, H. J. J.; Kenjeres, S. (2015) ´Breakdown of the night time urban heat island energy budget´, Building and Environment, Vol. 83, No. 3, pp. 50-64

Shashua-Bar, L.; Pearlmutter, D.; Erell, E. (2009) ´The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate´, Landscape and Urban Planning, Vol. 92, pp. 179–186

Susca, T.; Gaffin, S. R.; Dell´Osso, G. R. (2011) ´Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs´, Environmental Pollution, Vol. 159, pp. 2119-2126

Taha, H; Akbari, H.; Rosenfeld, A.; Huang, J. (1988) ´Residential Cooling Loads and the Urban Heat Island the Effects of Albedo´ Building and Environment, Vol. 23, No. 4, pp. 271-283.

Tan, Z.; Lau, K. K.; Ng, E. (2015) ´Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment´ Energy and Buildings, Vol. 114 pp. 265–274

Theeuwes, N. E.; Solcerová, A.; Steeneveld G. J. (2013) ´Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city´, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 118, pp. 8881–8896

Tiangco, M., Lagmay, A. M. F. and Argete, J. (2008) ´ASTER-based study of the nighttime urban heat island effect in Metro Manila´, International Journal of Remote Sensing, Vol. 29, No. 10, pp. 2799-2818

Upmanis H. Eliasson, I.; Lindqvist, S. (1998) ´The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden)´, International Journal of Climatology, Vol. 18, No. 6, pp. 681-700

Voogt, J. A.; Oke, T. R. (2003) ´Thermal remote sensing of urban climates.´ Remote Sensing of Environment, Vol. 86, No. 3, pp. 370-384

Ward, K. et al. (2016) ´Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers´ Science of the Total Environment, Vol. 569–570, pp. 527–539

Wong, N. H.; Tan, A. Y. K.; Tan, P. Y.; Wong, N. C. (2009) ´Energy simulation of vertical greenery systems.´ Energy and Buildings, Vol. 41, pp. 1401–1408

Yang, J; Wang, Z.; Kaloush, K. E. (2015) ´Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a 'silver bullet' for mitigating urban heat island?´ Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 47, pp. 830–843

Yoshino M. M., (1975): Climate in a small area. An introduction to local meteorology. Univ. Tokyo Press, Tokyo.

Zheng, D.; Hunt, E.; Running, S. (1993) ´A daily soil temperature model based on air temperature and precipitation for continental applications´ Climate research, Vol. 2, pp. 183-191.

Climate data for cities worldwide [online] https://en.climate-data.org/ (cit. 10. 1. 2019)

Archiv počasí pro ČR. [online] https://in-počasí.cz (cit. 10. 1. 2019)

Emissivity values of common materials [online] (cit. 10. 1. 2019)
http://support.fluke.com/find-sales/Download/Asset/3038318_6251_ENG_A_W.PDF

IR Thermometers & Emissivity Metal Emissivity table [online]
www.energytek.com.tw/download_s.php?ds=27 (cit. 10. 1. 2019)

Table of Emissivity of Various Surfaces For Infrared Thermometry [online] (cit. 10. 1. 2019)
http://wwweng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf