

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích**  
**Přírodovědecká fakulta**

**Ekosystémové služby stromů v urbánním  
prostředí**

Bakalářská práce

**Adéla Wiatzková**

Vedoucí práce: Ing. Eva Semančíková, Ph.D.

České Budějovice 2021

Wiatzková, A., 2021: Ekosystémové služby stromů v urbánním prostředí. [Ecosystem services of trees in urban environment. Bc. Thesis, in Czech.] – 48 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

**Anotace:**

Bakalářská práce se zabývá problematikou ekosystémových služeb poskytovaných stromy v urbánním prostředí se zaměřením na ekosystémové služby regulační. Cílem práce je tyto služby popsat a zjistit, zda existují rozdíly v kapacitě poskytování služeb mezi jednotlivými druhy stromů. Dále se práce zabývá vybranými indikátory a modely, pomocí kterých je možné regulační ekosystémové služby stromů hodnotit. V rámci pilotní studie byl použit submodel i-Tree Canopy. Práce obsahuje návrh projektu, jehož cílem je vyhodnocení regulačních ekosystémových služeb stromů submodelem i-Tree Eco na území 13 parků v Českých Budějovicích.

**Annotation:**

The bachelor thesis deals with the issue of ecosystem services provided by trees in the urban environment with a focus on regulating ecosystem services. The aim of this work is to describe regulating ecosystem services provided by trees and find out whether there are differences among tree species. Furthermore, the work provide overview of selected indicators and models, which can be used to evaluate regulating ecosystem services of trees. The i-Tree Canopy submodel was used in the pilot study. The thesis contains a project proposal. Its aim is to evaluate the regulatory ecosystem services of trees using submodel i-Tree Eco on an area of 13 parks in České Budějovice.

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracovala 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 bakalářské 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, 30. 03. 2021

Adéla Wiatzková

**Poděkování:**

Tímto bych chtěla vyjádřit své díky školitelce práce Ing. Evě Semančíkové, Ph.D., za věnovaný čas a mnohé rady, které umožnily vznik této bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat mé rodině a přátelům za trpělivou podporu při studiu.

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Stávající stav poznání.....	2
2.1	Ekosystémové funkce a služby .....	2
2.2	Ekosystémové služby stromů v urbánním prostředí .....	6
2.2.1	Regulace kvality ovzduší.....	6
2.2.2	Regulace klimatu .....	12
2.2.3	Regulace vodního režimu .....	14
2.2.4	Regulace hluku .....	16
2.2.5	Další regulační ES .....	17
3	Metody sledování regulačních ekosystémových služeb stromů .....	18
3.1	Pilotní studie .....	22
3.1.1	Cíle pilotní studie .....	22
3.1.2	Metodika.....	23
3.1.3	Výsledky.....	24
4	Diskuse.....	27
5	Závěr.....	30
6	Návrh projektu.....	31
6.1	Cíle projektu .....	32
6.2	Metodika .....	32
6.2.1	Zájmové území .....	32
6.2.2	Příprava dat.....	33
6.2.3	Terénní šetření .....	34
6.2.4	Vyhodnocení regulačních ES stromů submodelem i-Tree Eco.....	34
6.2.5	Prezentace výsledků .....	34
6.3	Časový harmonogram projektu.....	35
6.4	Náklady.....	35
7	Zkratky .....	36
8	Seznam literatury.....	37
9	Přílohy .....	45

# 1 Úvod

Stromy jsou nedílnou součástí urbánního prostředí. Dodávají území nejen estetickou, historickou a náboženskou hodnotu, ale mají také velký význam pro zdravé životní prostředí a funkční ekosystémy. Regulují řadu negativních jevů, a poskytují tak lidem celou řadu výhod, které můžeme nazývat regulačními ekosystémovými službami (ES). Nicméně zároveň, zejména díky různým developerským zájmům, stromy z urbánního prostředí ve velkém mizí. V této souvislosti je důležité upozorňovat na výhody, které stromy představují pro obyvatele urbánního prostředí, a mít argumenty pro obhájení jejich existence a budoucích výsadeb. Otázkou je, jaké regulační ES stromy ve městech jejich obyvatelům poskytují? Existují nějaké rozdíly v kapacitě poskytování regulačních ES mezi jednotlivými druhy stromů? Na základě jakých indikátorů je běžné regulační ES stromů hodnotit?

Cílem této práce bylo zaprvé popsat zejména regulační ES, které stromy v urbánním prostředí poskytují a zjistit, zda jsou rozdíly mezi jednotlivými druhy stromů. Druhým cílem bylo vyhledat indikátory nebo modely používané pro kvantifikaci regulačních ES stromů. Třetím cílem bylo provést pilotní studii a vyhodnotit vhodnost použití submodelu i-Tree Canopy pro hodnocení regulačních ES stromů na území Českých Budějovic. Čtvrtým cílem bylo navrhnout projekt pro ohodnocení regulačních ES stromů v urbánním prostředí.

## 2 Stávající stav poznání

### 2.1 Ekosystémové funkce a služby

Ekosystémové funkce (EF) a služby (ES) jsou od konce 20. století velice diskutovaným tématem (Wilson and Carpenter, 1999; de Groot, Wilson and Boumans, 2002; Milenium Ecosystem Assessment, 2005; TEEB, 2008). Vzniklo mnoho studií a článků, v nichž se ale většinou přístupy k problematice dosti liší a také používaná terminologie není ucelená (Boyd and Banzhaf, 2007; Wallace, 2007; Maes *et al.*, 2016). EF a ES jsou nicméně silným nástrojem na ochranu světových ekosystémů, neboť slouží hlavně k zdůraznění jejich důležitosti a významu pro člověka. Jejich výčetem je možné upozornit na nezbytnost snahy o ochranu přírody, ochranu biodiversity a v neposlední řadě také o udržitelný rozvoj. Základem koncepce ES je tvrzení, že z nich profituje lidstvo, což znamená, že pokud lidstvo bude podporovat zdraví a funkčnost ekosystémů, samo z toho bude mít užitek (Milenium Ecosystem Assessment, 2005; Bouma and van Beukering, 2015). Pokud by se vědci shodli na vytvoření oficiální celosvětově uznávané metodiky, která by hodnotila důležitost určitého ekosystému a následně převedla tuto virtuální hodnotu do ekonomické podoby, stala by se tato metodika důležitým nástrojem i pro rozhodování ve sféře státních ekonomických strategií a projektů. V současné době existuje celá řada metodik, ale žádná není oficiálně celosvětově používaná (TEEB, 2010; Koetse, Brouwer and van Beukering, 2015). Nicméně panují obavy, že pouhým ekonomickým přístupem by mohlo dojít k zjednodušení chápání probíhajících přírodních procesů v ekosystémech a ve snaze finančně maximalizovat domnělé hlavní EF a ES by došlo k potlačení jiných, na kterých jsou ale závislé ostatní a celý systém by se zhroutil (Norgaard, 2010; Bouma and van Beukering, 2015). V tomto případě je důležité pamatovat na princip trade-off. Maximalizací jedné EF nebo ES, dojde k potlačení druhé. Za příklad může sloužit třeba intenzivní zemědělství.

Celá problematika pojetí ES a EF je velice komplexní a vznikala postupně. V dnešní době přikládají autoři často odlišný význam používaným termínům, nebo jsou termíny používány v nevhodných kontextech (de Groot, Wilson and Boumans, 2002). Proto je před nastíněním problematiky ES stromů v urbánním prostředí důležité shrnout jednotlivé odborné názory na ES a vysvětlit terminologii.

Veškeré jednotlivé, nebo ve větším měřítku vnímané ekosystémy nabízejí lidstvu určité služby a benefity. Ekosystémy poskytují vlastně především služby samy sobě, ale aby společnost dokázala upozornit na jejich důležitost pro lidstvo jako takové a nutnost je chránit a neničit, byl vytvořen termín ekosystémová služba. Ta představuje vlastně soubor

pozitiv, který ekosystém lidstvu poskytuje. ES jsou „benefity, které lidstvo čerpá z ekosystémů“ (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Tato definice je víceméně obecně přijímána a objevuje se například i v reportu *The economics of ecosystems and biodiversity* (TEEB, 2008).

ES se nejčastěji rozdělují do skupin, podle toho, jaký druh služby poskytují. Většina dnešních názorů rozdělování ES se odvíjí od konceptu Millennium Ecosystem Assessment (MEA) (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Ten rozděluje ES do čtyř skupin na regulační, kulturní, zásobovací a podpůrné (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Regulační ES podle MEA zahrnují regulaci kvality ovzduší, obecnou regulaci klimatu, regulaci vodních režimů, regulaci eroze, regulaci procesu čištění vody a jejího plýtvání, biologickou kontrolu, opylení a omezení dopadů přírodních katastrof. Kulturní služby zahrnují například estetické hodnoty, rekreaci, turismus a národní hodnoty. Co se týče zásobovacích služeb, ekosystémy poskytují pitnou vodu, potraviny, palivo, léčiva a v neposlední řadě i materiály na výrobu oblečení. Podpůrné služby poskytují sami o sobě lidstvu benefity nepřímo, nebo se projevují až po delší době. Zároveň jsou ale nepostradatelné pro funkčnost všech ostatních ES. Mezi takové jsou řazeny například utváření a vývoj půdy, fotosyntéza, nebo cykly prvků.

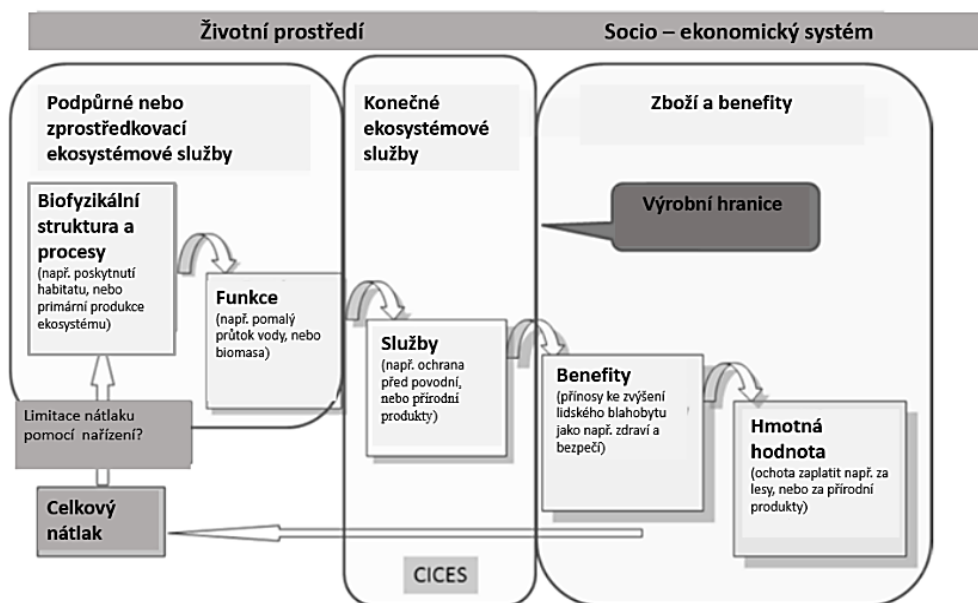
Tento přístup dobře deklaruje důležitost ekosystémů ve všech rovinách. Jeho aplikace není ale ve všech případech vhodná. Například pro management přírodních zdrojů spojený s biodiverzitou je výše popsaný model nevhodný, neboť dává do jedné roviny jak prostředky pro dosažení ES, tak i samotné ES (Wallace, 2007). Wallace (2007) proto podává trochu složitější model, který dává při rozdělení služeb důraz na strukturu a složení ekosystémů. Samotné služby jsou pak spojovány s jednotlivými přínosy pro lidstvo v podobě lidských hodnot. Lidské hodnoty jsou rozděleny na zdroje, ochranu před predátory, nemocemi a parazity, na příznivé chemicko-fyzikální prostředí a na kulturně-spoločenské hodnoty. K těmto jednotlivým skupinám hodnot jsou poté přiřazeny ES, které výše zmíněné hodnoty podporují a zároveň podmínky, za kterých může ekosystém ES poskytovat.

Další poměrně rozšířenou klasifikaci ES přináší *The Economics of Ecosystems and Biodiversity* (TEEB) (TEEB, 2008). Ta je ve své podstatě velice podobná klasifikaci MEA. Hlavním rozdílem je zrušení skupiny podpůrných ES, které TEEB považuje spíše za ekologické procesy. TEEB naopak klade důraz na schopnost ekosystémů poskytovat habitat v souvislosti s biodiverzitou. Proto do klasifikace přidává novou skupinu ES, a to službu habitační.



Podle Fishera a Turnera (2008) je při definici ES nutné odlišovat mezi ekosystémovým benefitem a službou. Za benefit je považováno to, čím ekosystémy přispívají k blahobytu lidstva, ale ne k jeho základním potřebám, tedy například turismus. Dále přicházejí s názorem, že ES musí být chápány jen z pohledu ekologického významu, čímž naznačují, že rekreace ani kulturní obohacení není ES. Zde už se konfrontuje použití výrazu benefit s použitím v samotné definici ES v práci MEA, kde je výraz benefit pouze prostředkem pro definování výrazu ES (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Snaha o ucelení definice ES stále pokračuje. V roce 2018 byla vydána aktualizovaná práce Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1, která navázala na práci MEA z roku 2005 (Haines-Young and Potschin, 2018). Shrnula, ucelila a zjednodušila základní dělení ES a upřesnila základy konceptu hodnocení ekosystémů. Jejím hlavním cílem je představit jasnou metodiku funkční klasifikace ES. CICES pracuje s termínem konečná ekosystémová služba, kterou definuje jako produkt ekosystémů sloužící přímo k lidské potřebě (Haines-Young and Potschin, 2013). Tyto konečné ES rozděluje do třech základních sekcí, a to na zásobovací, regulační spolu s udržovací sekcí a kulturní. Tyto sekce jsou dále rozděleny na divize, skupiny, třídy a podtřídy. CICES přijala model kaskádové struktury (Obrázek 1). V modelu je ukázáno, že na ES jsou navázány benefity pro lidstvo a z nich plynoucí zboží (Potschin and Haines-Young, 2011). Tím jsou myšleny přínosy ke zvýšení lidského blahobytu, které přímo plynou z konečných ES (Haines-Young and Potschin, 2013). I zde má tedy termín benefit klasifikační funkci. Stejně jako model MEA, tak i model CICES se zaměřuje především na ES biotických systémů, přičemž ale Haines-Young a Potschin (2013) dodávají, že stanovit hranici mezi biotickými a abiotickými ES je mnohdy složité. V aktualizované verzi z roku 2018 se proto CICES věnuje otázce klasifikace abiotických ES (Haines-Young and Potschin, 2018). Za příklad abiotické ES může být uvedena třeba výroba energie za pomoci větru, nebo vody (Haines-Young and Potschin, 2018).



Obrázek 1: Kaskádový model. Přeloženo dle: Potschin and Haines-Young, 2011.

Dalším, ne zcela jasně definovaným a vnímaným termínem je ekosystémová funkce. ES a EF jsou často v odborné literatuře zaměňovány, a jejich klasifikace a význam se často liší autor od autora. De Groot (1992) definoval EF jako „schopnost přírodních procesů a jejich součástí poskytovat zboží nebo služby, které přímo nebo nepřímo uspokojují lidské potřeby“. EF tak tedy nepřikládá stejný význam, jako ES a považuje je spíše za jakýsi soubor procesů a podmínek, díky němuž mohou ekosystémy služby poskytovat. Jsou řekněme chápány jako podmnožina ekologických procesů, přičemž vycházejí z přirozených procesů v ekosystémech probíhajících (de Groot, Wilson and Boumans, 2002). EF se podle konceptu de Groota, Wilsona a Boumansa (2002) dělí do čtyř základních skupin, a to na funkce regulační, habitační, produkční a informační. Podle těchto základních skupin funkcí je možné dále vymezit ES. Regulační funkcí je myšleno usměrňování a ovlivňování bio-geochemických cyklů a s nimi spojených ekologických procesů. Ekosystémy dále plní funkci habitační, neboť poskytují prostor pro rozmanité druhy, čímž přispívají k diverzitě a možnosti pokračování evolučních procesů. Produkční funkce se poté trochu překrývá s funkcí regulační, neboť souvisí s fotosyntézou a tokem živin v potravním řetězci. Informační funkcí je poté myšleno poskytování informací o průběhu vývoje evoluce a obecné obohacení vědomostí o přírodě a ekosystémech samých. Také model CICES aktualizovaný v roce 2018 považuje EF za vlastnosti ekosystému, které dohromady v dalším stupni kaskádového modelu vytvářejí dohromady určitou službu (Haines-Young and Potschin, 2018). Klasifikaci EF se ale dál nevěnuje. Většina zdrojů tedy chápe EF jako něco, z čeho nemá člověk přímo užitek. Ten má až poté, co se z EF odvodí příslušná konečná služba. Hranice mezi EF a ES

je ale velice tenká, a proto MEA (2005) zařazuje EF do jedné ze čtyř skupin ES. EF vnímá jako součást služeb podpůrných.

Ve výše uvedeném výčtu definic a klasifikací je vidět různorodost přístupů. V současné době se stále většina názorových proudů odvíjí od základního modelu nastíněného v práci MEA. Pro klasifikaci ES slouží dnes především práce MEA (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) a CICES (Haines-Young and Potschin, 2018), která dále pracuje na upřesnění nesrovnalostí mezi biotickými a abiotickými ES. Klasifikace v práci TEEB je doporučována v případech hodnocení ES zabývajících se biodiverzitou (TEEB, 2010). V této bakalářské práci se dělení ES dále zakládá na klasifikaci MEA.

## **2.2 Ekosystémové služby stromů v urbánním prostředí**

Stromy nejsou jen estetickým prvkem urbánního prostředí, ale poskytují obrovskou škálu ES, které jsou pro obyvatele zásadní, zejména v hustě obydlených a zastavěných plochách (Šerá, 2015). Stromy ve městech poskytují regulační, kulturní, zásobovací i podpůrné ES. Z pohledu zdraví obyvatel a příznivého urbánního životního prostředí mají stromy významnou roli především v regulačních ES. Stromy pomáhají ve městech mírnit zvětšující se dopad urbanizace a poskytují tak aspoň částečnou náhradu za původní přírodní, nebo přírodě blízké ekosystémy. Limity a možnostmi stromů poskytovat v urbánním prostředí ES se zabývá řada studií (McPherson and Simpson, 1999; Bodnaruk *et al.*, 2017; Rötzer *et al.*, 2019). Při snaze maximalizovat kapacitu regulačních funkcí stromů ve městech musí být brány ohledy na jejich fyziologické a ekologické nároky. Strom, který neprospívá, nemá dostatek prostoru na prokořenění, nebo byl vysazen v lokalitě, která neodpovídá jeho ekologickým nárokům nemůže nabídnout kapacitu služeb, jako zdravý prospívající jedinec. Proto je při managementu městské zeleně důležité vysazovat druhy vhodné pro uvažovanou lokalitu a zvažovat trade-off mezi jeho službami a lokalizací výsadby (Bodnaruk *et al.*, 2017). Následující kapitoly obsahují souhrn regulačních ES stromů v urbánním prostředí.

### **2.2.1 Regulace kvality ovzduší**

Stromy v urbánním prostředí dokážou zachytit významné množství polutantů z ovzduší a následkem toho i zlepšit zdravotní stav obyvatel. Vzdušné polutanty dělíme obecně na primární a sekundární. Primární jsou takové, které jsou zdrojem vypouštěny přímo do atmosféry. Sekundární polutanty následně vznikají v atmosféře díky reakcím polutantů primárních. Mezi primární se řadí polutanty jako prachové částice (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>), oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>), oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>), oxid siřičitý (SO<sub>2</sub>), oxid uhelnatý (CO) a sloučeniny olova

nebo dalších těžkých kovů (Novák, 2001; Nowak, Crane and Stevens, 2006). Stromy také dokážou regulovat do jisté míry vznik a množství přízemního ozonu (O<sub>3</sub>), který se řadí do sekundárních polutantů. Mimo to stromy přispívají k redukci škodlivých organických látek jako jsou třeba polyaromatické uhlovodíky (PAHs) (Terzaghi *et al.*, 2020). Stromy regulují množství polutantů v ovzduší přímou depozicí na svém povrchu, tak i absorpcí dovnitř pórů (Cieslik, Paoletti and Omasa, 2009; Roeland *et al.*, 2019).

Vhodnost druhu pro výsadbu do urbánního prostředí při záměru maximalizace zlepšení kvality ovzduší se liší v závislosti na odolnosti druhu vůči vnějším podmínkám, ekologických a fyziologických nárocích, na jeho negativních vlastnostech a samozřejmě na kapacitě zachytávání vzdušných polutantů (Donovan *et al.*, 2005). Mezi negativní vlastnosti stromů z pohledu obyvatel je možné jmenovat produkci pylu a produkci biogenních emisí těkavých organických látek (BVOC) (Donovan *et al.*, 2005). Druhy, které jsou vhodné pro výsadbu do urbánního prostředí a zároveň jsou efektní při regulaci polutantů PM, NO<sub>2</sub> a O<sub>3</sub> jsou znázorněny v Příloze 1. Nejvhodnějšími dřevinami pro vysazení ve městech a pro regulaci výše zmíněných polutantů jsou javor (*Acer sp.*), slivoň (*Prunus sp.*) a hloh (*Crataegus sp.*) (Sicard *et al.*, 2018). Dalšími dřevinami s vysokou redukční kapacitou jsou pajasan žláznatý (*Ailanthus altissima*), cedr (*Cedrus sp.*), liliovník tulipánokvětý (*Liriodendron tulipifera*), modřín opadavý (*Larix decidua*), buk lesní (*Fagus sylvatica*) a habr (*Carpinus sp.*) (Sicard *et al.*, 2018).

Pro hodnocení této ES se používají ukazatele jako množství odstraněných polutantů z ovzduší za rok, nebo rychlost suché depozice (Maes *et al.*, 2016). K výpočtu ukazatelů je možné použít hodnoty koncentrace vzdušných polutantů (Nowak, Crane and Stevens, 2006) a hodinové meteorologické údaje (Nowak, Crane and Stevens, 2006). Dalšími důležitými hodnotami, které se ve výpočtech často používají, jsou také výčetní tloušťka stromu, výška stromu k základně koruny, šířka koruny, procento chybějící koruny, míra odumření koruny, světelná expozice koruny a index listové plochy (LAI), popřípadě rozloha plochy pokryté stromy (Bottalico *et al.*, 2016; Russo, Escobedo and Zerbe, 2016). Mimo již zmíněné parametry stromů jsou významné i indikátory jako umístění stromu, biogenní emise stromu, stomatální vodivost a fyzikální vlastnosti listů.

### 2.2.1.1 Ozon

Troposférický ozon ( $O_3$ ) je sekundární polutant a jeho součástí je i přízemní  $O_3$ , který se nachází v přízemní vrstvě atmosféry (Hůnová, 2018). Není přímo emitován antropogenní nebo biogenní činností, ale vzniká v atmosféře převážně v důsledku chemických reakcí polutantů primárních převážně pak  $NO_x$  a biogenních emisí (Hůnová, 2018). Přízemní  $O_3$  je součástí fotochemického vzdušného znečištění a má silné oxidační účinky (Hůnová, 2018). Jako takový má v ovzduší negativní vliv na lidský organismus, na kondici vegetace a stav ekosystémů (Clarke, 1994). Podle Evropské agentury pro životní prostředí je přízemní  $O_3$  pro obyvatele jednou z nejnebezpečnějších látek v ovzduší, vyskytující se často v nadlimitních koncentracích (European Agency for Environment, 2016). Koncentrace přízemního  $O_3$  v ovzduší se odvíjí od stavu ostatních klimatických procesů a zároveň je závislá na množství emisí BVOC, působení slunečního záření a na koncentraci emisí vznikajících lidskou činností zejména emisí  $NO_x$  (Guenther *et al.*, 2006; Hůnová, 2018).

Stromy ovlivňují koncentraci přízemního  $O_3$  přímo i nepřímo (Nowak *et al.*, 2000). Přímo koncentraci redukuje cestou suché depozice, kdy se molekuly  $O_3$  navazují na různé receptory struktury vegetace (Hůnová, 2018).  $O_3$  může také pronikat stomaty listů do vnitřních struktur stromu, kde ale může způsobit značné poškození (Emberson *et al.*, 2000). Redukční vliv stromů je o to složitější, neboť samy stromy jsou původci emisí BVOC a působí tak na koncentraci přízemního  $O_3$  nepřímo (Guenther *et al.*, 2006). V případě, že je regulační funkce stromů nějakým způsobem narušena a zároveň stromy samotné uvolňují BVOC, může nastat i situace, kdy se koncentrace  $O_3$  vlivem stromů zvýší (Nowak *et al.*, 2000). S dřevinami souvisí hlavně skupina biogenních nemethanických těkavých organických látek (NMVOC), přičemž tato skupina látek je v atmosféře poměrně reaktivní. Mezi NMVOC které stromy do atmosféry uvolňují patří například isopren (Guenther *et al.*, 2006). Přízemní  $O_3$  vzniká z isoprenu oxidačními reakcemi za zvýšené koncentrace  $NO_x$  (Sillman and He, 2002). Problematika je ale složitější, neboť například extrémně zvýšená koncentrace  $NO_x$  limituje vznik  $O_3$ . Zároveň vzniká  $O_3$  nezávisle na koncentraci BVOC, pokud je koncentrace  $NO_x$  extrémně nízká (Sillman, 1999). Samozřejmě každý druh dřeviny vypouští do okolí rozdílné množství NMVOC. K dřevinám emitující větší množství NMVOC patří rody jako dub, vrba, topol, nebo akát (Geron *et al.*, 2000; Guenther *et al.*, 2006). Emitované množství také záleží na vnějších podmínkách jako je počasí, teplota vzduchu, dostupnost živin a okamžité chemické složení atmosféry (Guenther *et al.*, 2006).

I přes tento fakt zůstávají stromy důležitým prostředkem k redukci přízemního O<sub>3</sub>. Přístup k maximalizaci této funkce se nicméně liší. Diskutovaným tématem je otázka diverzity stromů. Čím větší diverzita dřevin v urbánním prostředí je, tím větší by měla být jejich schopnost redukovat přízemní O<sub>3</sub> (Manes *et al.*, 2012). Tento poznatek je důležitý hlavně z dlouhodobého hlediska pro plánování zeleně ve městech. Je důležité dbát na zastoupení různých druhů dřevin, neboť v případě změny limitujících klimatických podmínek by měly být diverzitně bohaté skupinky stromů schopny dále snižovat množství přízemního O<sub>3</sub> (Manes *et al.*, 2012). Kapacita redukce O<sub>3</sub> obecně záleží na celkové ploše listů, na délce vegetační sezony a na dalších meteorologických a klimatických parametrech (Nowak, Crane and Stevens, 2006). Někteří autoři udávají, že stálezelené listnaté stromy odstraňují více O<sub>3</sub> z ovzduší než druhy listnaté opadavé (Sicard *et al.*, 2018). Je také známo, že listnaté stromy odstraňují více O<sub>3</sub> než jehličnany (Sicard *et al.*, 2018). Při výsadbě dřevin se ale musí hledět i na vhodnost dřeviny z hlediska fyziologických a ekologických nároků. Co se týče prostorového rozmístění, větší skupina stromů v podobě dohromady fungujícího ekosystému představuje pro stromy vhodnější životní podmínky. Nejsou vystavovány stresu tolik, jako jednotlivci vysazení samostatně na ulicích a náměstích. Proto mohou redukční ES plnit lépe. Příměstské lesy a parky proto hrají zásadní roli při redukci O<sub>3</sub> (Sicard *et al.*, 2018).

#### **2.2.1.2 Prachové částice**

V souvislosti s vlivem vzdušných polutantů na lidské zdraví se často mluví o prachových částicích PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub>. Zkratka PM<sub>10</sub> označuje prachové částice s průměrem menším než 10 μm a zkratka PM<sub>2,5</sub> prachové částice s průměrem menším než 2,5 μm. Zvýšená koncentrace PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> v ovzduší způsobuje nárůst kardiovaskulárních a respiračních onemocnění, jakož i míru úmrtí způsobených těmito nemocemi (Myong, 2016). Zároveň je velká část vzdušných polutantů, jako třeba těžké kovy, nebo PAHs navázána na prachové částice, čímž umocňují jejich negativní účinky na lidské zdraví.

Snižování prašnosti souvisí se vzdušnou aerodynamikou, která je ovlivňována jak morfologií stromů, tak tvarem zástavby (Hofman *et al.*, 2013, 2014). Množství PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> se po zpomalení cirkulace vzdušné masy usazuje na listech, které představují obrovskou plochu (Hofman *et al.*, 2013). Množství usazeného PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> se liší i v závislosti na výšce a orientaci vůči směru vzdušného proudění. Množství usazeného PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> na listech se vzrůstající výškou v koruně klesá, zatímco na návětrné straně se usadí méně PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> než na závětrné straně stromu (Hofman *et al.*, 2013). Efektivnější usazování PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> se prokázalo na druzích, které disponují chlupatými, nebo vrásčitými listy (Kardel *et al.*, 2011). Mezi tyto druhy patří například bříza, buk a lípa (Mitchell, Maher

and Kinnersley, 2010). Studie zabývající se mezidruhovými rozdíly pocházejí převážně z Číny a okolních států, kde je vzdušné znečištění prachovými částicemi ve velkých městech závažným problémem (Liu *et al.*, 2018). Velikost listů také hraje určitou roli. Strom s menšími listy má potenciál zachytit více PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub>, než strom s listy velkými (Šerá, 2015). Část vzdušného znečištění z PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> se může u jehličnatých druhů stromů navázat i do voskové vrstvy jehlic, nebo do stomat (Urbat, Lehndorff and Schwark, 2004). Přesto mají jehličnaté stromy menší redukční kapacitu PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> než stromy listnaté (Šerá, 2015). Vhodným vysazením stromů se dá tedy zredukovat množství PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> v ovzduší měst. Pro základní vyhodnocení ES redukce PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> v ovzduší je důležitý LAI, který přímo ovlivňuje množství odstraněných částic (Maes *et al.*, 2016).

### 2.2.1.3 Oxid uhličitý

Mnoho měst má za cíl stát se klimaticky neutrálními, tedy dosáhnout neutrální bilance emisí uhlíku (Maes *et al.*, 2016). Stromy v urbánním prostředí mohou v tomto směru velice napomoci. Je známo, že rostliny v průběhu fotosyntézy čerpají z ovzduší CO<sub>2</sub>, který přemění a část zabudují do svých těl. Tímto procesem mohou tedy i stromy regulovat obsah CO<sub>2</sub> v ovzduší a do jisté míry i regulovat míru skleníkového efektu, čímž zároveň ovlivňují klima (Seják *et al.*, 2010). Čím je strom větší, tím je poměr absorbovaného CO<sub>2</sub> ku jeho uvolnění při procesu dýchání větší (McPherson and Simpson, 1999). Kapacita uložení CO<sub>2</sub> ve stromu záleží tedy mimo jiné na jeho rychlosti růstu, stáří, druhu stromu a na jeho celkové kondici (McPherson and Simpson, 1999). Aby mohl strom fixovat uhlík co nejdéle, je vhodné vybrat druh, který je dlouhověký, dosahuje velkých rozměrů a podmínky prostředí ho nebudou uvádět do stresu. Pokud bude totiž strom vysazen do nepříznivých podmínek a jeho fyziologické procesy budou probíhat jinak, může dojít k tomu, že se sníží schopnost regulace CO<sub>2</sub> v ovzduší. Pro základní hodnocení fixace CO<sub>2</sub> stromy se používají nejčastěji indikátory jako nadzemní, popřípadě i podzemní primární produkce stromu a hodnoty týkající se fotosyntézy a respirace (Roeland *et al.*, 2019)

Stromy mohou ovlivnit míru emisí CO<sub>2</sub> spojených s výrobou a spotřebou elektrické energie, a to tím, že stíní. Stíněním mohou v letním období zredukovat spotřebu elektrické energie potřebnou na klimatizaci, popřípadě v zimním období zmírňují nápory větru na stěny domů, a tím snižují potřebu vytápění budov (McPherson and Simpson, 1999; Gratani *et al.*, 2016). Tím stromy vlastně regulují emise spojené s výrobou elektrické energie. Největší energetické úspory v letním období díky stínu vytvořenému stromy je dosaženo, pokud jsou stromy vysazeny především na západní, severozápadní a východní straně domu (McPherson and Simpson, 1999). Na jižní straně by se naopak měli vysazovat pouze stromy opadavé,

aby v zimním období nebránily přístupu slunečního záření (McPherson and Simpson, 1999). Mezi druhy vhodné pro vysazení za účelem stínění v létě a přístupu světla a omezení náporů větru v zimě patří například javor klen, bříza bělokorá, líska turecká, jasan ztepilý nebo modřín opadavý (McPherson and Simpson, 1999).

#### **2.2.1.4 PAHs**

Jak již bylo dříve zmíněno, stromy přispívají k odstranění škodlivých PAHs z ovzduší. Nedávno byla uskutečněna studie o toku látek fenantrenu a benzo(a)pyrenu mezi ovzduším a stromy (Terzaghi *et al.*, 2020). Tyto látky se mohou na listech akumulovat a ukládat. Tento proces je ale poměrně složitý a těžko kvantifikovatelný, neboť PAHs se za jistých podmínek mohou z listů zase uvolnit (Terzaghi *et al.*, 2020). Bylo zjištěno, že tok fenantrenu a benzo(a)pyrenu z ovzduší do struktur stromu byl větší u neopadavých druhů (Terzaghi *et al.*, 2020). Důležitou funkci mají také mikroorganismy nacházející se na povrchu listů, neboť dokážou narušit strukturu těchto polutantů. Zajistí tedy jejich biodegradaci (Weyens *et al.*, 2015).

#### **2.2.1.5 Oxidy dusíku**

Oxidy dusíku je souhrnné pojmenování sloučenin tvořených kyslíkem a dusíkem. Mezi nejběžnější patří oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>), přičemž nejčastěji zmiňován v souvislosti s regulačními ES stromů je NO<sub>2</sub>. Zvýšené koncentrace tohoto vzdušného polutantu jsou typické pro lokality s vysokou mírou silničního provozu. Jak už bylo zmíněno v kapitole 2.2.1.1., chemismus NO<sub>2</sub> je úzce spjatý s koncentracemi O<sub>3</sub> a obráceně. Pozitivní vliv stromů na regulaci NO<sub>2</sub> v ovzduší není proto zcela jednoznačný, přičemž je ale rozšířeným diskutovaným tématem. Pozitivní vliv stromů na snížení koncentrací NO<sub>2</sub> konstatuje například Grundström and Pleijel, 2014 a Sicard *et al.*, 2018. Pro regulaci NO<sub>2</sub> jsou v urbánním prostředí vhodné druhy jako javor, slivoň, nebo hloh (Sicard *et al.*, 2018).

#### **2.2.1.6 Oxid uhelnatý a oxid siřičitý**

Tyto dva polutanty jsou zmiňovány v souvislosti s regulačními ES stromů, ale není na ně kladen takový důraz jako na polutanty výše zmíněné, neboť jsou regulovány v menším množství (Nowak, Crane and Stevens, 2006; Escobedo and Nowak, 2009; Russo, Escobedo and Zerbe, 2016). Oxid siřičitý (SO<sub>2</sub>) je v kontextu České republiky (ČR) vnímán spíše jako polutant, který při velké koncentraci stromům škodí. SO<sub>2</sub> se na zemský povrch z ovzduší dostává jak suchou, tak mokrou depozicí, která je známá také pod názvem kyselý déšť (Hruška and Kopáček, 2009). Vysoká depozice SO<sub>2</sub> spolu s NO<sub>x</sub> v minulosti způsobila rozsáhlé poškození jehličnatých porostů, například v oblasti Krušných hor. Proto je kapacita regulace



SO<sub>2</sub> stromy limitována koncentrací polutantu. Pokud je SO<sub>2</sub> v ovzduší velké množství, může to mít na zdravotní stav stromů negativní dopad. Obecně lze říci, že míra depozice SO<sub>2</sub> je největší u jehličnanů (Hruška and Kopáček, 2009).

## **2.2.2 Regulace klimatu**

Stromy přispívají také k regulaci klimatu. V této souvislosti fyziologické procesy stromů, jejich tvar a povrch v regionálním a lokálním měřítku částečně regulují rychlost a směr proudění vzduchu, teplotu vzduchu, albedo povrchu, tepelný tok, relativní vlhkost vzduchu a výšku vrstvy, ve které dochází k míchání vzdušných mas (Heisler *et al.*, 1995; Berman *et al.*, 1997; Nowak *et al.*, 2000). Stromy tak vlastně regulují jak meteorologickou situaci, tak lokální a v některých případech i regionální klima. Ve větším měřítku můžeme říci, že stromy regulují i globální klima, především regulací některých skleníkových plynů (viz kapitola 2.3.1.3.).

### **2.2.2.1 Regulace teploty**

Dnešní urbánní celky se potýkají s problémem tepelného ostrova (Stewart and Oke, 2012). O tepelném ostrově lze hovořit v případě, že průměrné teploty v urbánním prostředí jsou prokazatelně vyšší než teploty v extravilánu (Voogt and Oke, 2003). Tento fenomén je výsledkem zvýšeného podílu šedé infrastruktury, tedy zpevněných a nepropustných ploch a nízkého podílu propustných ploch s vegetací, nebo ploch umožňující postupný výpar (Imhoff *et al.*, 2010). Teplotu vrstvy vzduchu od povrchu do průměrné výšky budov ovlivňují také vlastnosti stavebních materiálů i tvar a uspořádání budov (Dobrovolný and Krahula, 2012). Redukce půdních, nebo vegetačních odparných ploch také narušuje tok latentního tepla a zmenšuje tak odvod tepla výparem (Dobrovolný and Krahula, 2012). Tato skutečnost může poté ovlivnit zdraví obyvatel, funkčnost ekosystémů i lokální meteorologický, popřípadě klimatický systém (Imhoff *et al.*, 2010). Vysazováním stromů může být fenomén tepelného ostrova města do jisté míry regulován. Hlavními principy regulace teploty vzduchu stromy jsou evapotranspirace a poskytování stínu (U.S. Environmental Protection Agency, 2008).

ES stromů spojené s regulací teploty vychází z procesu stínění a z vodního cyklu, který ve stromech a okolním prostředí probíhá. Nejvýznamnějším procesem z hlediska regulace teploty stromy je evapotranspirace.

Transpirace je proces vedení vody stromem a následný výpar vody do okolí. Počet průduchů na 1 mm<sup>2</sup> se u každého druhu liší, čímž se teoreticky liší i možný maximální objem výparu při procesu transpirace (Penka, 1985), přičemž ale každý druh má rozdílný vodní režim, který není závislý jen na hustotě průduchů. Evaporací je myšlen výpar vody zachycené po dešti na ploše listů a kmene (U.S. Environmental Protection Agency, 2008).

Evapotranspirace je pak fyziologický proces probíhající v rostlinách, tedy i dřevinách a je jím označován proces uvolnění vody z rostlin transpirací a evaporací (Penka, 1985; U.S. Environmental Protection Agency, 2008). Konečný ochlazující vliv evapotranspirace na okolí tkví v odebrání energie, a tedy i tepla z okolního vzduchu. Při změně skupenství vody z kapalného na plynné se spotřebuje energie v podobě latentního tepla. To způsobí odebrání energie z okolí a tím stromy napomáhají snížení teplot vzduchu. Výměny energie způsobují změny ve fyzických vlastnostech částic a mas vzduchu a vyvolávají v některých případech pohyb vzdušných mas, který je možné vnímat jako vánek (Forman, 2014). Tento vánek poté snižuje pocitovou teplotu. Na druhou stranu ale stromy mohou také snižovat rychlost proudění vzduchu, neboť představují určitou bariéru. To může negativně ovlivnit tepelný komfort obyvatel zejména v oblastech o nízké zeměpisné šířce (Kong *et al.*, 2017). Okolní teplota vzduchu je díky stromům také redukována odrazem, absorpcí a přenosem krátkovlnného záření, přičemž záleží na tvaru a hustotě jejich koruny, popřípadě celého zápoje korunového patra (Brown and Gillespie, 1995; Novák, 2001). Vytváření stínu stromy je zároveň důležitým jevem, kterým stromy regulují pocitovou teplotu obyvatel měst.

Potenciál redukce teploty má každý druh stromu jiný (Morakinyo *et al.*, 2020). Obecně lze říci, že listnaté stromy mají větší ochlazující potenciál než druhy jehličnaté. Listnaté druhy s velkou mírou transpirace jsou potenciálně pro ochlazování vzduchu nejvhodnější, pokud mají dostatek vody. Mezi tyto druhy patří např. lípa malolistá (Moser-Reischl *et al.*, 2019). U urbánních vodních ploch a toků je vhodné vysazovat vrby, olše a topoly, které mají při trvalém dostatku vody velkou míru transpirace, přičemž z hospodářských dřevin má největší míru transpirace jasan ztepilý (Holkup and Polanská, 2013). S předpokládanými změnami klimatu a pravděpodobným nárůstem sušších period, jsou ale pro výsadbu v urbánním prostředí vhodnější druhy, které dokážou zvládnout suché periody. Mezi tyto druhy patří např. trnovník akát (Moser-Reischl *et al.*, 2019). V ČR je ale trnovník akát invazivním druhem a jeho výsadba tedy není ideálním řešením. Při snaze co nejvíce snížit výsadbou stromů teploty v urbánním prostředí, musí být brán ohled nejen na druh stromu, ale jako zásadní se ukazuje také jeho umístění v zástavbě, (Tan, Lau and Ng, 2017; Morakinyo *et al.*, 2020). Obecně, na otevřená prostranství, jako jsou např. velká náměstí nebo otevřené široké ulice, je nejvhodnější vysazovat druhy stromů s vysokým LAI (Morakinyo *et al.*, 2020). Stromy s vysokou hodnotou LAI mají totiž nejvyšší potenciál redukovat teplotu, přičemž až za 60 % potenciálu redukce teploty zodpovídá právě LAI (Morakinyo *et al.*, 2018). Další důležité parametry jako výška kmene, celková výška stromu, nebo průměr koruny by však neměly být opomíjeny (Morakinyo *et al.*, 2017, 2018).

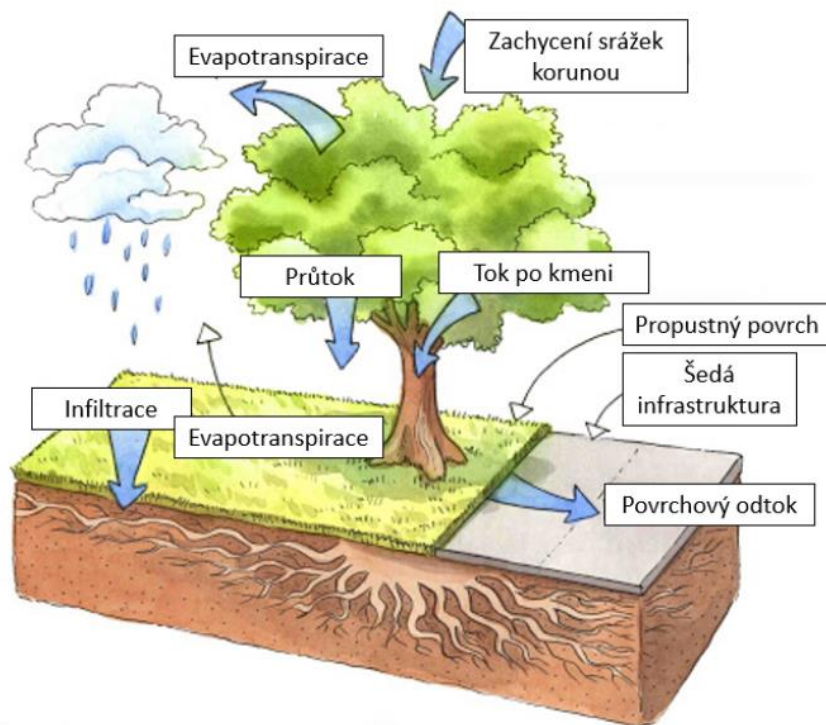
Pro hodnocení ES regulace teploty se používají indikátory jako redukce teploty vzduchu, chladicí kapacita, redukce slunečního záření, nárůst relativní vlhkosti, redukce střední radiační teploty, redukce rychlosti větru a popřípadě redukce fyziologicky ekvivalentní teploty (Maes *et al.*, 2016; Kong *et al.*, 2017).

#### **2.2.2.2 Regulace aerodynamických procesů**

Jak už bylo nastíněno v minulé kapitole, regulace aerodynamických procesů stromy je do jisté míry spojena s regulací teploty, ale i regulací polutantů v ovzduší. Zpomalením rychlosti proudění vzduchu totiž stromy umožňují usazování PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub>. Na druhou stranu vánek a vítr snižují pocitovou teplotu a přispívají tak k většímu komfortu obyvatel. Vánek může vznikat díky evapotranspiraci a následným aerodynamickým změnám (Novák, 2001). Proto je v letních měsících důležité nebránit přirozené cirkulaci vzduchu výsadbou jednodolitě stromové bariery. Pro volnou cirkulaci vzduchu v ulicích je nejvhodnější vysazení malých stromů paralelně s obvyklým směrem větru (Zhang, Zhan and Lan, 2018). Stromy však mohou sloužit i jako větrolamy, převážně v zimním období, kdy zmenšují tepelné ztráty budov, popřípadě zvyšují pocitovou teplotu chodců. V tomto případě jsou vhodné neopadavé druhy stromů. Při výsadbě stromů v ulicích se tedy musí předem zvážit, jakého cíle chceme výsadbou dosáhnout.

#### **2.2.3 Regulace vodního režimu**

Stromy v urbánním prostředí mohou být i důležitým prostředkem, jak regulovat vodní režim, především povrchový odtok srážkové vody. S nárůstem procentuálního zastoupení zástavby a umělých povrchů v urbánním prostředí se města musejí zabývat problematikou odvádění srážkové vody. Voda je často odváděna podzemním systémem kanálů do recipientů, nebo je smíchána s odpadní vodou, přičemž se snižuje její kvalita a zároveň nedochází k retenci vody v území. V těchto případech jde o nevhodné zacházení s vodou, které může mít za následek přetížení kanalizační sítě, zhoršení kvality vody, nebo v některých případech dokonce zvýšení rizika záplav. Správným managementem výsadby stromů může být docíleno zmenšení míry odtoku povrchové vody v zastavěných územích a zmírnění negativních důsledků, kterými jsou povodně (The Green Infrastructure Center Inc., 2019). Stromy regulují odtok srážkové vody zachycením neboli intercepací, vstřebáním, a evapotranspirací, čímž regulují i samotný vodní režim (The Green Infrastructure Center Inc., 2019; Thom *et al.*, 2020).



Obrázek 2: Stromy a vodní režim srážek v urbáním prostředí. Přeloženo dle: The Green Infrastructure Center Inc., 2019.

Během padání srážek se voda zachycuje na listech, větvích i kmenech stromů, přičemž část je vstřebána a část stéká až k zemskému povrchu. Pokud je povrch pod stromy propustný, může se voda stékající po kmeni postupně vsakovat do půdy, ze které ji následně strom postupně čerpá kořeny a procesem transpirace je voda odpařena zpět do vzduchu. Pro regulaci povrchového odtoku vody je tedy důležitá i povaha povrchu v blízkosti stromu. Strom situovaný uprostřed travnatého rozlehlého pozemku vstřebává kořeny více vody, než strom obklopený betonovými obrubníky a povrchem chodníku (The Green Infrastructure Center Inc., 2019). Ve druhém případě je totiž průsak vody půdou ke kořenům silně redukován. Pro vyhodnocení kapacity regulační ES retence vody stromy je možné v modelu povrchového odtoku srážkové vody použít faktor zachycení vody korunou stromu, který vychází z množství zachycené vody na povrchu stromu, které se poté může vstřebat, nebo odpařit (Hynicka and Divers, 2016).

V současné době převládá v urbáním prostředí zájem o přírodě blízká opatření a technologie, které podpoří retenci vody v území. Pozornost se zaměřuje na zvýšení počtu stromů v takzvaných dešťových zahradách, které slouží právě pro zadržení vody. Stromy mají v těchto zahradách nezastupitelnou funkci, neboť transpirací odvádějí vodu z půdy a udržují tak kapacitu pro zadržení další vody během srážek (Berland *et al.*, 2017).

Stále více využívanou technologií jsou uměle vytvořené půdní substráty, které usnadňují prokořenění a zlepšují infiltraci vody v porovnání s klasickými pěstebními substráty a metodami (Bartens *et al.*, 2009). Aplikace vrstvení směsi minerální půdy a jemné frakce kamene umožňuje stromu vytvořit bohatý kořenový systém a zvýšit tak kapacitu transpirace při dostatečném přísunu vody (Day and Dickinson, 2008). Tato opatření mají pozitivní vliv jak na zdraví stromů, tak na regulaci vodního režimu.

#### 2.2.4 Regulace hluku

Zvětšující se míra pozemní dopravy je považována za hlavní příčinu zvýšené hladiny hluku v urbánním prostředí. S touto situací se potýká většina velkých měst po celém světě. Zvýšená hladina hluku může mít přitom negativní vliv na lidské zdraví (Khan *et al.*, 2020). Vysazením stromů kolem zdroje může dojít k výrazné pozitivní regulaci hladiny hluku slyšitelné pro lidské ucho (Pathak, Tripathi and Mishra, 2011; Maes *et al.*, 2016). Stromy regulují hluk absorpcí, refrakcí, odrazem a odchýlením zvukových vln (Aylor, 1972; Fang and Ling, 2003). Kolem rušných silnic je proto vhodné vysazovat stromy v takzvaném zeleném pásu (Kapoor and Gupta, 1984). Bylo však prokázáno, že efektivněji než vysoké stromy jsou schopny redukovat hluk křoviny (Fang and Ling, 2003). Nicméně nevýhodou zelených pásů tvořených pouze křovinami je jejich malá výška, která limituje regulaci hluku a také menší vrstva kůry, která je pro regulaci hluku zásadní (Ow and Ghosh, 2017). Proto je doporučováno vysazovat podél silnic zelené pásy, které budou tvořit v nižším patře křoviny a ve vyšším patře stromy (Fang and Ling, 2003).

Bylo také zjištěno, že největší přínos při redukci hluku mají zelené pásy o šířce min. 5 m (Ow and Ghosh, 2017). Výsadba solitérních stromů pro regulaci hluku je vhodná v centru města, nebo v méně rušných ulicích. Při výběru druhu a formy dřevin pro zvýšení kapacity regulace hluku je nutné brát v úvahu následující parametry: maximalizovat zavětvení koruny, vysazovat druhy s chlupatým či drsnějším povrchem listů a druhy, které mají v dospělosti zvrásněnou a drsnou borku (Huleš, 2006). Těmto parametrům odpovídají druhy jako vrba, topol a olše, které mohou mít husté zavětvení již od země (Huleš, 2006). Účinnými protihlukovými opatřeními kolem silnic se ukázala realizace tzv. ochranných lesních pásů, které jsou tvořeny porosty vrb, popřípadě topolů, doplněných keřovou a travní podsadbou (Huleš, 2006).

### 2.2.5 Další regulační ES

Mimo výše zmíněné regulační ES stromy v urbánním prostředí poskytují i služby, které se na první pohled nezdají v urbánním měřítku tolik podstatné, ale přesto mají pro lidstvo velký význam. Mezi tyto ES patří například regulace eroze půdy nebo podpora procesu opylení.

Stromy mohou tedy v urbánním prostředí pomoci regulovat erozi půdy, i když tento problém se ve větším měřítku týká spíše půd zemědělských a nezastavěných půd na prudkých svazích (Chimaimba *et al.*, 2020). Nicméně i v urbánním prostředí je důležité vysazovat a udržovat stromy a ostatní zeleň na prudkých svazích, kde pomáhají regulovat povrchový odtok vody a vodní erozi. Je důležité, aby byly stromy vysazovány vhodně. Pokud je půda pod stromy holá a zhutnělá, často dochází k její erozi a následnému odhalení kořenů. Proto je vhodné vysazovat stromy v kombinaci s keřovou podsadbou a travními porosty.

Podpora procesu opylení je také často vnímána jako ES (de Groot, Wilson and Boumans, 2002; Milenium Ecosystem Assessment, 2005; Maes *et al.*, 2016) a je chápána v kontextu poskytování habitatu a potravy opylovačům a zároveň opylení plodin, které představují zdroj potravy pro lidstvo. Za příklad mohou sloužit třeba ovocné stromy (Demestihis *et al.*, 2017). Podpora opylovačů je důležitá v celosvětovém měřítku. Řízené vysazování stromů podporující opylovače v urbánním prostředí může pomoci vytvořit jakési hotspoty, které dále podpoří výskyt opylovačů a proces opylení. Hotspoty jsou důležité nejen ve volné krajině, ale i v lokálních soukromých zahradách a urbánním zemědělství (Maes *et al.*, 2016).

### 3 Metody sledování regulačních ekosystémových služeb stromů

K hodnocení regulačních ES stromů se používají různé indikátory a matematické modely. Indikátorů je velká řada, přičemž každá studie používá trochu rozdílné. Stručný přehled indikátorů používaných pro hodnocení regulačních ES stromů obsahuje Tabulka 1 a vychází z reportu MAES (Maes *et al.*, 2016).

Tabulka 1: Rámec používaných indikátorů pro hodnocení regulačních ES stromů odvozený od přehledu regulačních ES ekosystémů. Upraveno dle: Maes *et al.*, 2016.

<b>CICES členění</b>		
Třída	Druh třídy (urbánní ES)	Indikátor
<b>Regulace odpadních, toxických nebo jiných nepříjemných produktů</b>		
Filtrace/sekvestrace/uložení/akumulace ekosystémem	Regulace kvality ovzduší urbánními lesy a stromy	Polutanty odstraněné vegetací ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ )
		Rychlost suché depozice ( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
Regulace pachu/hluku/výhledu	Snížení hluku urbánní vegetací	Index listové plochy (LAI), vzdálenost k silnici (m)
		Redukce míry hluku urbánní zelenou infrastrukturou (UGI) kolem silnic ( $\text{Db(A)}\cdot\text{m}^{-2}$ vegetace) (Derkzen, van Teeffelen and Verburg, 2015)
<b>Regulace toků – toků kapalin</b>		
Hydrologický cyklus a udržování koloběhu vody	Regulace koloběhu vody a odtoku	Retenční vodní kapacita vegetace a půdy ( $\text{l}\cdot\text{m}^{-2}$ )
		Intercepce (% zachycených srážek)
		Povrchový odtok (mm)
Ochrana před povodněmi	Ochrana před povodněmi díky náležitému půdnímu pokryvu	Zastoupení zelených/zalesněných ploch v zónách ohrožených povodněmi (%)
<b>Udržování fyzikálně chemicko-biologických podmínek – Udržování životních cyklů, ochrana habitatového a genetického zásobníku</b>		
Opylení a rozšíření semen	Opylení hmyzem	Kapacita ekosystému udržovat aktivitu hmyzích opylovačů (bezrozměrné) (Zulian, Maes and Paracchini, 2013)
		Relativní četnost (počet na plochu nebo za čas)
<b>Udržování fyzikálních, chemických, biologických podmínek – Složení atmosféry a regulace klimatu</b>		
Regulace globálního klimatu redukcí koncentrace skleníkových plynů	Regulace klimatu redukcí oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ )	Sekvestrace uhlíku ( $\text{tuna C}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ )
Lokální a regionální regulace klimatu	Regulace teploty v urbánním prostředí	LAI
		Snížení teploty plochou stromu ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ )
		Kapacita UGI k ochlazení (Derkzen, van Teeffelen and Verburg, 2015)

S rostoucím zájmem vědců o hodnocení ES vznikla také řada matematických modelů. Nejpoužívanější modely hodnotící regulační ES stromů jsou ENVI-met, výpočetní mechanika tekutin (CFD, computational fluid dynamics) a i-Tree (Lin *et al.*, 2019). ENVI-met a CFD hodnotí ES na základě simulací různých parametrů a chování systému. Zohledňují charakter okolní zástavby, a jsou proto hojně využívány v architektonickém a environmentálním urbánním plánování. Kvantifikace regulačních ES stromů v modelu i-Tree je založena na parametrech stromů a prostředí a na modelově vygenerovaných koeficientech. Přehled hodnocených regulačních ES stromů jednotlivých modelů je zobrazen v Tabulce 2. Ve své práci se budu zabývat právě modelem i-Tree, neboť je celosvětově nejpoužívanějším modelem a jeho potenciál použití na území ČR není zcela plně využit.

Tabulka 2: Přehled hodnocených regulačních ES stromů jednotlivých modelů.

Regulační ekosystémové služby	ENVI-met	CFD	i-Tree
Regulace polutantů v ovzduší	✓	✓	✓
Regulace aerodynamických procesů	✓	✓	
Regulace teploty	✓	✓	
Bilance slunečního záření	✓		
Regulace vodního režimu			✓
Sekvestrace uhlíku			✓
Energetické úspory			✓

Prvotní model i-Tree byl vyvinut v roce 2006 skupinou USDA Forest Service a v současné době patří k celosvětově nejužívanějším urbánním modelům hodnotícím regulační ES stromů (Lin *et al.*, 2019). Je možné jej použít na hodnocení ES jednotlivých stromů nebo souboru stromů na malých i větších územích. Model i-Tree nabízí 6 základních submodelů a to Eco, MyTree, Landscape, Design, Canopy a Hydro.

Submodel i-Tree Eco je celosvětově použitelným, komplexním nástrojem pro hodnocení základních regulačních ES stromů (Tabulka 3). Pro jejich vyhodnocení vyžaduje určité vstupní parametry jako informace o druhu stromu, informace o lokalitě, srážkách, koncentracích vzdušných polutantů a parametry stromů naměřené v terénu (Tabulka 3). Submodel i-Tree Eco je vlajkovou lodí modelu i-Tree a jeho vývoj směřuje k možnosti poskytnutí nástroje pro hodnocení ES stromů po celém světě.



Tabulka 3: Parametry pro vyhodnocení regulačních ES stromů submodelem i-Tree Eco.

Parametry		Dostupnost informací	Regulační ES vyhodnocované submodelem
Informace o druhu	<u>rod, druh, taxonomické zařazení, charakteristika olistění, charakteristiky listu, rychlost růstu, délka dožití, přirozené rozšíření, výška v dospělosti</u>	Existující databáze, charakteristiky jsou dostupné pro většinu evropských druhů v databázi submodelu i-Tree Eco	Roční sekvestrace uhlíku stromy Množství uloženého uhlíku v biomase stromů Regulace vodního režimu (povrchový odtok, evaporace evapotranspirace, intercepce) Množství odstraněných polutantů z ovzduší Energetické úspory
Lokalita	<u>kontinent, stát, administrativní jednotka státu, název lokality, měna, souřadnice lokality, výška nad mořem, klimatický region, emisní faktor oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) pro elektřinu, průměrná minimální denní teplota, délka vegetační sezony, převod místního času na GMT, <u>zda jsou průměrné letní teploty vyšší než 25 °C, zda je pokrývnost vegetace větší než 50 %, průměrná výška sněhové pokrývky, zda jsou roční úhrny srážek vyšší než 1000 mm, stav ozonu (O<sub>3</sub>) v atmosféře</u></u>	ČHMÚ, odborná literatura	Roční sekvestrace uhlíku stromy Množství uloženého uhlíku v biomase stromů Regulace vodního režimu (povrchový odtok, evaporace evapotranspirace, intercepce) Množství odstraněných polutantů z ovzduší Energetické úspory
Srážky	hodinová data pro celý kalendářní rok (m/h)	ČHMÚ	Regulace vodního režimu (povrchový odtok, evaporace evapotranspirace, intercepce) Množství odstraněných polutantů z ovzduší
Polutanty v ovzduší	hodinová data koncentrace pro celý kalendářní rok pro polutanty v ovzduší: prachové částice PM <sub>2,5</sub> a PM <sub>10</sub> , ozon (O <sub>3</sub> ), oxid uhelnatý (CO), oxid dusičitý (NO <sub>2</sub> ), oxid siřičitý (SO <sub>2</sub> )	ČHMÚ	Množství odstraněných polutantů z ovzduší
Data naměřená v terénu	vzdálenost stromu k nejbližší budově, orientace budovy vůči stromu	GIS	Energetické úspory
	<u>rod a druh, výčetní tloušťka, výška, výška kmene k základu koruny, šířka koruny, procento chybějící koruny, procentuální odumření koruny, stav koruny, expozice koruny vůči slunečnímu záření</u>	Měření v terénu	Množství uloženého uhlíku v biomase stromů Regulace vodního režimu (povrchový odtok, evaporace evapotranspirace, intercepce) Množství odstraněných polutantů z ovzduší Energetické úspory

Pozn.: Parametry lze dělit na povinné a volitelné. Povinné parametry jsou v tabulce podtrženy.

Zjednodušenými verzemi i-Tree Eco jsou submodely MyTree a Canopy, které nevyžadují výše uvedené vstupní parametry (Tabulka 3), ale jsou postaveny na odvozených parametrech. Submodel MyTree je dostupný jen pro lokality ve Spojených státech amerických (USA) a Kanadě. Tento submodel slouží k odhadnutí ES jednotlivých stromů, které souvisejí s regulací množství CO<sub>2</sub> v ovzduší, včetně některých dalších polutantů, které vybraný jednotlivý strom dokáže z ovzduší odstranit. Zároveň submodel slouží k vyhodnocení základních regulační ES jednotlivých stromů z pohledu vodního režimu. Další jednodušší formou je submodel Canopy. Tento submodel počítá základní regulační ES podobně jako submodel MyTree, nicméně pro skupiny stromů, a to na základě plochy průmětu korun stromů na zem. Submodely Landscape, Design a Hydro jsou používány převážně jen na území USA a Kanady.

### 3.1 Pilotní studie

V pilotní studii byl použit pro hodnocení regulačních ES submodel i-Tree Canopy, který je volně dostupný na webových stránkách modelu i-Tree. Tento submodel je nástrojem pro stanovení regulačních ES stromů na základě odhadu plochy průmětu korun stromů, která je stanovena pomocí analýzy submodelem náhodně vygenerovaných bodů na satelitním snímku zájmového území. Uživatel pak subjektivně vyhodnocuje, zda se náhodně vygenerovaný bod nachází na ploše průmětu korun stromů, nebo na jiném typu krajinného pokryvu. Studie byla prováděna na území parku „U kovošrotu“ v Novém Vráťě, v Českých Budějovicích (Obrázek 3). Rozloha parku je 2,41 ha včetně vodní plochy a 1,24 ha bez vodní plochy. Vyskytují se zde jednotlivě vysazované stromy i skupinky stromů.



Obrázek 3: Lokalizace parku v Novém Vráťě.

#### 3.1.1 Cíle pilotní studie

Cílem pilotní studie bylo:

- 1) Otestovat přesnost odhadu plochy průmětu korun stromů submodelem i-Tree Canopy na území parku v Novém Vráťě, v Českých Budějovicích. Následně pak vyzkoušet vyhodnocení regulačních ES submodelem i-Tree Canopy.
- 2) Zjistit časovou a s ní spojenou finanční náročnost terénního šetření, které bude nutné pro zjištění vstupních parametrů pro plánovaný projekt (Kapitola 6), ve kterém bude využit model i-Tree Eco.

### 3.1.2 Metodika

#### *Příprava dat pro submodel i-Tree Canopy*

Nejprve jsem provedla analýzu odhadu plochy průmětu korun stromů ve webovém rozhraní submodelu i-Tree Canopy. V rámci submodelu jsou dostupné satelitní snímky a pro práci s ním je nutné vložit shapefilovou vrstvu obsahující hranice zájmové lokality. Tato vrstva byla vytvořena v programu ArcGIS Pro. Submodel i-Tree Canopy v dalším kroku automaticky vygeneroval náhodné body a ty jsem subjektivně vyhodnotila, zda se náhodný bod vyskytuje na ploše koruny stromu, nebo ne. Před zahájením analýzy jsem stanovila počet náhodně vygenerovaných bodů na 2020. Tento počet pak nemůže být v průběhu analýzy měněn, aby nedošlo k ovlivnění výsledků. Počet vygenerovaných bodů zadává uživatel modelu libovolně. Pro získání přesných dat je ale doporučován minimální počet bodů 300. Po ukončení analýzy, submodel i-Tree Canopy automaticky vygeneroval výsledky plochy průmětu korun stromů a od tohoto údaje byly odvozeny základní regulační ES stromů. Vyhodnocovanými regulačními ES stromů jsou: sekvestrace uhlíku, regulace vzdušného znečištění (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>) a regulace vodního režimu (regulace povrchového odtoku, evaporace, intercepce, potenciální evaporace, potenciální evapotranspirace). Vyhodnocení regulačních ES stromů probíhá na základě parametrů submodelu vycházejících z databáze submodelu i-Tree Eco.

Pro účely vyhodnocení přesnosti stanovení plochy průmětu korun stromů submodelem, jsem zdigitalizovala plochu průmětu korun stromů v programu ArcGIS Pro. Tuto plochu jsem poté porovnávala s výstupy submodelu i-Tree Canopy. Jako podkladové mapy byly použity: ortofotomapa z roku 2017 a pro zpřesnění ortofotomapa v rozlišení CIR získaná z prohlížečské služby WMS, na které má vegetace červenou barvu, čímž byla umožněna přesnější identifikace korun stromů. Tato mapa vznikla pomocí leteckých snímků v nepravých barvách.

#### *Příprava dat pro submodel i-Tree Eco*

Dále, abych mohla odhadnout časovou a finanční náročnost terénního šetření, které bude nutné pro zjištění vstupních parametrů do modelu i-Tree Eco pro plánovaný projekt, jsem provedla terénní sběr dat. Zaměřila jsem stromy na území o rozloze 1 ha v parku Nové Vráto a výsledky jsem přenesla do bodové vrstvy stromů v programu ArcGIS Pro. K zaměření polohy stromů jsem použila laserový dálkoměr LTI TruPulse 360B, který byl připojen přes bluetooth k zařízení GPS Trimble TDC100. Počátek měření byl v bodě podrobného polohového bodového pole ČR, jehož souřadnice byly převzaty z databáze

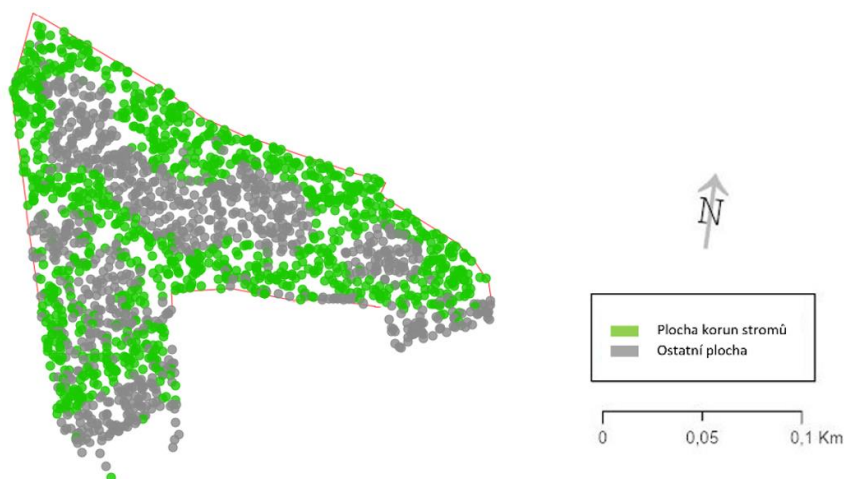
bodových polí ČR (bod 789, v k.ú. České Budějovice 4). Od tohoto bodu jsem dálkoměrem měřila úhly a vzdálenosti k jednotlivým stromům, čímž byly dopočítány přesné souřadnice stromů. Na zařízení GPS bylo možné sledovat mapu se zaměřenými stromy a připisovat k nim zjištěné parametry. U zaměřovaných stromů jsem zaznamenávala parametry: rod a výčetní tloušťka. Výčetní tloušťku jsem měřila průměrkou ve výšce 1,3 m od paty kmene.

### 3.1.3 Výsledky

#### *Přesnost odhadu plochy průmětu korun stromů submodelem i-Tree Canopy*

V submodelu i-Tree Canopy jsem provedla analýzu plochy průmětu korun stromů (Obrázek 4). Obrázek znázorňuje náhodně vygenerované body submodelem, které jsem identifikovala jako plochu průmětu korun stromů (zeleně), nebo jako ostatní plochu (šedě). Plocha průmětu korun stromů byla submodelem stanovena na 1,30 ha  $\pm$  0,03 SE. Procentuální zastoupení plochy průmětu korun stromů v parku bylo submodelem stanoveno na 53,96 (%)  $\pm$  1,11 SE. Tyto výsledky se téměř shodují s výsledky, které jsem získala na základě digitalizace ortofotomapy v programu ArcGIS Pro (Obrázek 5). Na základě digitalizace jsem stanovila plochu průmětu korun stromů na 1,29 ha. Procentuální zastoupení plochy průmětu korun stromů bylo stanoveno na 53,70 %. Rozdíl mezi výsledky analýzy plochy průmětu korun stromů submodelem i-Tree Canopy a digitalizace v programu ArcGIS Pro byl zanedbatelný s ohledem na možnosti přesnosti obou analýz (Tabulka 4). Z výsledků analýz je tedy patrné, že odhad plochy průmětu korun stromů submodelem i-Tree Canopy při dostatečném počtu bodů je poměrně přesný.

Submodel i-Tree Canopy na základě plochy průmětu korun stromů vypočítal automaticky základní regulační ES (Příloha 2a, Příloha 2b). Hodnota roční sekvestrace uhlíku stromy byla submodelem vyhodnocena na 3,98  $\pm$  0,08 t. Submodel dále vyhodnotil, že stromy odstraní z ovzduší dohromady 111,72  $\pm$  2,30 kg vzdušného znečištění (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>) za rok a že ročně zabrání povrchovému odtoku o objemu 6,29  $\pm$  0,13 l. Detailnější výsledky obsahuje Příloha 2a a 2b. Vygenerované hodnoty regulačních ES jsou však pouze orientační, neboť model nebere v úvahu místní koncentrace polutantů, meteorologické podmínky, ani parametry stromů. Vhodnost využití submodelu i-Tree Canopy pro hodnocení regulačních ES stromů na území Českých Budějovic je dále řešeno v diskusi.



Obrázek 4: Ukázka výstupu náhodně vygenerovaných bodů v submodelu i-Tree Canopy v rámci odhadu plochy průmětu korun stromů na území parku Nové Vráto.



Obrázek 5: Ukázka výstupu digitalizace plochy průmětu korun stromů v programu ArcGIS Pro.

Tabulka 4: Výsledky analýz plochy průmětu korun stromů v parku Nové Vráto.

<b>Digitalizace GIS</b>			
Krycí třída	Plocha (ha)	Zastoupení (%)	
Celková plocha	2,41	100	
Plocha průmětu korun stromů	1,29	53,70	
Ostatní plocha	1,12	46,30	
<b>Analýza i-Tree Canopy</b>			
Krycí třída	Plocha (ha) ± SE	Zastoupení (%) ± SE	Body
Celková plocha	2,41	100	2020
Plocha průmětu korun stromů	1,30 ± 0,03	53,96 ± 1,11	1090
Ostatní plocha	1,11 ± 0,03	46,04 ± 1,11	930

*Časová a finanční náročnost terénního šetření pro zjištění vstupních parametrů pro submodel i-Tree Eco*

Terénní šetření zahrnující zaměření stromů a změření 2 uvedených parametrů na ploše 1 ha v parku Nové Vráto trvalo 12 hodin, a to i s přípravou dat a cestou na místo. Samotné šetření v terénu trvalo 10 hodin. S předpokladem, že hodinová taxa za práci i s povinnými zákonnými odvody je 240 Kč a terénní šetření provádějí 2 pracovníci zároveň, finanční náročnost terénního šetření byla 5 760 Kč (Tabulka 5).

Tabulka 5: Finanční a časová náročnost terénního šetření.

<b>Rozloha (ha)</b>	<b>Měření (h)</b>	<b>Příprava + cesta (h)</b>	<b>Kč</b>
1	10	2	5 760

## 4 Diskuse

V předešlých kapitolách byla přiblížena problematika poskytování regulačních ES stromy v urbánním prostředí. Stromy poskytují celou škálu prospěšných ES. Regulují znečištění ovzduší především polutanty jako ozon ( $O_3$ ), prachové částice ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ), oxid uhličitý ( $CO_2$ ), polyaromatické uhlovodíky (PAHs), oxidy dusíku ( $NO_x$ ) oxid siřičitý ( $SO_2$ ), oxid uhelnatý (CO) a sloučeniny olova a dalších těžkých kovů. Stromy mají také nezastupitelnou roli při regulaci teploty, aerodynamických procesů a vlhkosti vzduchu, čímž často zlepšují teplotní komfort obyvatel. Regulují vodní režim, čímž mohou zmenšovat riziko povodní. Dále snižují hladinu hluku, zmírňují erozi půdy a podporují proces opylení.

Poskytování regulačních ES stromy je úzce provázané a závislé na podmínkách prostředí, kterými jsou například možnost dobrého zakořenění, optimální dostatek vody a optimální teplota prostředí (Donovan *et al.*, 2005; Bodnaruk *et al.*, 2017; The Green Infrastructure Center Inc., 2019; Morakinyo *et al.*, 2020). Z literární rešerše ale také vyplývá, že mezi jednotlivými druhy stromů existují výrazné rozdíly v kapacitě poskytování jednotlivých regulačních ES. Pokud budeme chtít v urbánním prostředí zvýšit poskytování těchto služeb, je možné aspoň pro některé z nich poskytnout seznam druhů stromů, které jsou pro jejich poskytování nejvhodnější (Tabulka 6). Při záměru maximalizovat regulační ES stromů je tedy důležité vybrat správné druhy a zároveň je vhodně umístit (Morakinyo *et al.*, 2020). Správný strom na správném místě dokáže být velice výkonný a užitečný. Nicméně, může nastat i situace, kdy se klady stromu změň v negativum, jako například v bilanci  $CO_2$ , nebo úspoře elektrické energie v letních a zimních měsících (McPherson and Simpson, 1999).



Tabulka 6: Shrnutí vhodných druhů stromů pro poskytování regulačních ES v urbánním prostředí.

Regulační ES stromů		Nejvhodnější druhy
Regulace kvality ovzduší	Ozon (O <sub>3</sub> )	Druhy dobře snášející podmínky urbánního prostředí: javor, slivoň, hloh (Sicard <i>et al.</i> , 2018)
	Prachové částice (PM <sub>10</sub> a PM <sub>2,5</sub> )	Druhy s chlupatými, nebo vrásčitými listy: bříza, buk, lípa (Mitchell, Maher and Kinnersley, 2010; Kardel <i>et al.</i> , 2011) Druhy dobře snášející podmínky urbánního prostředí: javor, slivoň, hloh (Sicard <i>et al.</i> , 2018)
	Oxid dusičitý (NO <sub>2</sub> )	Druhy dobře snášející podmínky urbánního prostředí: javor, slivoň, hloh (Sicard <i>et al.</i> , 2018)
Regulace klimatu	Teplota	Druhy s velkou transpirací (při dostatku vody) dobře snášející urbánní podmínky: lípa malolistá (Moser-Reischl <i>et al.</i> , 2019), dále vrba, olše, topol, jasan ztepilý (Holkup and Polanská, 2013)
Regulace množství opylovačů		Ovocné stromy (Demestihis <i>et al.</i> , 2017)
Regulace hluku		Druhy s chlupatým či drsnějším povrchem listů, druhy se zvrásněnou a drsnou borkou: porosty vrby nebo topolu doplněné podsadbou křovin a travním porostem (Huleš, 2006)

K vyhodnocení ES bylo vytvořeno množství modelů a indikátorů, které jsou závislé na řadě parametrů, které je v případě některých modelů třeba pro hodnocení regulační ES stromů získat (Tabulka 1, Tabulka 3). Při analýzách je vhodné přizpůsobit výběr indikátorů vytyčeným cílům práce a hodnoceným regulačním ES stromů. Pro orientační vyhodnocení regulačních ES je vhodné na větší ploše využít submodel i-Tree Canopy, který je založen na odhadu parametru plochy průmětu korun stromů. Pro přesnější vyhodnocení regulačních ES je pak vhodné použít submodel i-Tree Eco, který vyžaduje změření minimálně 2 parametrů stromů v terénu, kterými jsou druh a výčetní tloušťka. Z těchto parametrů pak submodely vyhodnocují indikátory jako intercepce, sekvestrace uhlíku a množství polutantů odstraněných vegetací. Pro vyhodnocení ES regulace teploty je vhodné využít modely ENVI-met a CFD, které do modelu započítávají i vlivy okolní zástavby (Lin *et al.*, 2019). Pro budoucí hodnocení regulačních ES stromů v urbánním prostředí je nezbytné průběžně zaznamenávat parametry stromů, ze kterých se následně vypočítávají jednotlivé indikátory, neboť jejich terénní měření je poměrně časově náročné a drahé (Scholz, Hof and Schmitt, 2018). Parametry stromů by bylo vhodné zaznamenávat v rámci pasportizace zeleně a umožnit tak rozšíření hodnocení ES. Tento postup již funguje například v některých německých městech, kde se v rámci péče o městskou zeleň automaticky zaznamenávají základní parametry stromů jako druh, obvod a výčetní tloušťka, popřípadě poškození koruny, kmene a kořenů (Scholz, Hof and Schmitt, 2018).

Z výsledků pilotní studie provedené na dílčím území Českých Budějovic vyplývá, že submodel i-Tree Canopy je vhodný pro odhad plochy průmětu korun stromů v rámci nejrůznějších analýz zalesnění urbánního území českých měst, ale pro přesnější vyhodnocení regulačních ES stromů na malém území, kterým byl park Nové Vráto, je nevhodný, neboť nebere v úvahu místní koncentrace polutantů, meteorologické podmínky, ani parametry stromů, které jsou pro stanovení kapacity regulačních ES stromů zásadní. Submodel i-Tree Canopy je vhodný pro odhad regulačních ES stromů na větším územním celku, kde není možné provést detailní terénní analýzu (Hirabayashi, 2014; Mills *et al.*, 2015). Pro přesnější vyhodnocení regulačních ES stromů na menším území je vhodné využít například submodel i-Tree Eco, který při výpočtech bere v úvahu parametry lokality, meteorologických podmínek i parametrů stromu (Tabulka 3). Nicméně tento model je díky potřebě terénního sběru dat časově i finančně náročnější. V ČR, na rozdíl od jiných evropských států, není potenciál submodelu i-Tree Eco zcela využit. V projektové části je proto navržen projekt, který se zabývá použitím submodelu i-Tree Eco na dílčím území v města České Budějovice.

## **5 Závěr**

Stromy mají prostřednictvím poskytovaných regulačních ES přímý pozitivní vliv na lidské zdraví a životní styl, jakož i na celkovou funkčnost urbánních ekosystémů. Z těchto poznatků vyplývá, že stromy mají v urbánním prostředí důležitou roli, a proto by měla být podporována jejich výsadba a udržování již existujících stromů. Zároveň je důležitý průběžný sběr dat například v rámci pasportizace zeleně, který umožní méně nákladnou realizaci vyhodnocení regulačních ES stromů v urbánním prostředí. Hodnocení regulačních ES stromů může sloužit jako podklad pro budoucí management městské zeleně. Kapacita stromů poskytovat regulační ES záleží částečně na podmínkách prostředí. V budoucnu je tedy potřeba další detailní výzkum zaměřující se na vhodnost druhů pro poskytování regulačních ES stromů v urbánním prostředí střední Evropy za měnících se klimatických podmínek.

## 6 Návrh projektu

Projekt navazuje na pilotní studii a její výsledky. Jeho podstatou je využití potenciálu submodelu i-Tree Eco pro detailní vyhodnocení regulačních ES stromů na dílčím území města České Budějovice. Shrnutí projektu zobrazuje Tabulka 7.

Hodnocení ES stromů ve městech je v poslední době světově rozšířeným tématem, přičemž ČR za ostatními evropskými zeměmi trochu zaostává. Navrhovaný projekt má potenciál názorně předvést možnosti využití moderního nástroje pro hodnocení regulačních ES stromů a umožnit tak další rozvoj hodnocení regulačních ES stromů v dalších českých městech. Projekt má velký význam, neboť během něho dojde i k pasportizaci stromů v rámci větších parků města České Budějovice, což umožní v budoucnu jejich efektivnější management. V neposlední řadě výsledky projektu zhodnotí pozitiva stromů v souvislosti se zdravým životním prostředím, čímž může projekt zásadně ovlivnit přístup vedení města v dalším postupu managementu městské zeleně.

Tabulka 7: Shrnutí projektu.

<b>Název projektu:</b>	Vyhodnocení regulačních ES stromů na území parků větších než 1 ha v Českých Budějovicích.
<b>Lokalizace:</b>	České Budějovice
<b>Celková doba trvání projektu:</b>	8 měsíců
<b>Požadovaný příspěvek od poskytovatele</b>	519 000 Kč
<b>Hlavní cíle projektu</b>	Vyhodnotit regulační ES stromů Upozornit na výhody stromů v urbánním prostředí v rámci prezentace výsledků s důrazem na využitelnost modelu i-Tree Eco
<b>Předpokládané výsledky</b>	Vyhodnocení regulačních ES v jednotlivých parcích Paspport zeleně – vytvoření GIS vrstvy se zaměřenými stromy Vyhodnocení možností využití submodelu i-Tree Eco i v dalších českých městech
<b>Hlavní aktivity</b>	Příprava vstupních dat Terénní šetření – zaměření stromů, změření parametrů Analýza dat – i-Tree Eco Prezentace výsledků
<b>Výstupy projektu</b>	GIS vrstvy se zaměřenými stromy Paspport zeleně Závěrečná zpráva s vyhodnocením regulačních ES

## 6.1 Cíle projektu

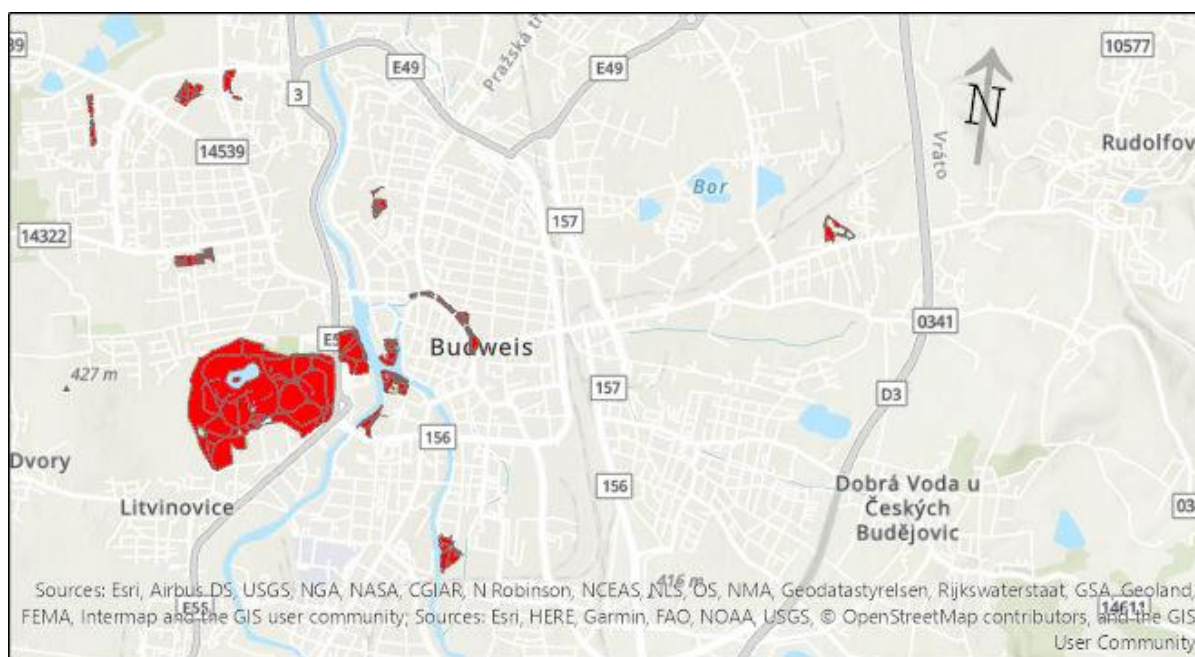
Cílem projektu je s použitím submodelu i-Tree Eco vyhodnotit vybrané regulační ES stromů na území parků s rozlohou větší než 1 ha nacházejících se v Českých Budějovicích. Vyhodnocovanými regulačními ES stromů bude redukce polutantů v ovzduší ( $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $O_3$ ,  $NO$ ,  $SO_2$ ), regulace vodního režimu (regulace povrchového odtoku, evaporace, evapotranspirace, intercepce) a sekvestrace uhlíku. Druhým cílem je prezentace výsledků s důrazem na možnosti využití submodelu i-Tree Eco.

## 6.2 Metodika

Projekt bude probíhat na základě metodiky submodelu i-Tree Eco, který je volně dostupný na: [www.itreetools.org/tools/i-tree-eco/i-tree-eco-international](http://www.itreetools.org/tools/i-tree-eco/i-tree-eco-international). Jednotlivé kroky jsou popsány v následujících kapitolách.

### 6.2.1 Zájmové území

Projekt bude probíhat v parcích větších než 1 ha na území města České Budějovice (Obrázek 6). Přehled parků větších než 1 ha na území města obsahuje Tabulka 8. Jedná se o parky s rozlohou od 1 do 5 ha. Výjimkou je park Stromovka, který má rozlohu cca 61 ha. Parky jsou tvořeny skupinkami stromů i solitéry, jakož i keři a další vegetací typickou pro urbánní parky.



Obrázek 6: Parky větší než 1 ha na území města České Budějovice.

Tabulka 8: Přehled parků větších než 1 ha na území města České Budějovice.

Název území	Rozloha (ha)
Háječek	1,91
Na Sadech	2,37
Park Čtyři dvory	1,85
Park Dlouhá louka	4,95
Sokolský ostrov	1,54
Staroměstský park	1,06
Stromovka	61,01
U kovošrotu	1,24
Univerzitní park	1,89
Park Malý Jez	2,29
Park ul. Fr. Ondříčka	1,09
V. Volfa a N. Frýda	1,05
Za Koh-i-noorem	1,06

### 6.2.2 Příprava dat

Pro vyhodnocení regulačních ES stromů submodelem i-Tree Eco jsou nutná lokální klimatická hodinová data (úhrn srážek) a hodinová data o koncentraci polutantů (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, NO, SO<sub>2</sub>) v rámci 1 kalendářního roku. Tato data budou získána od ČHMÚ. Takto získaná data budou poté vložena do databáze i-Tree Eco. To umožní jejich využití během projektu, popřípadě je může v budoucnosti využít každý uživatel submodelu i-Tree Eco. Data musí být do databáze vložena na začátku projektu, neboť si správci databáze i-Tree Eco vyhražují právo kontroly vložených dat. Kontrola může trvat až několik měsíců a bez ní není možné data při analýze submodelem využít.

V rámci přípravy dat dojde také k přípravě podkladových materiálů a vrstev v programu ArcGIS Pro, které budou využity při terénním šetření.

### 6.2.3 Terénní šetření

Terénní šetření v parcích bude provedeno společně 2 pracovníky. Šetření se skládá ze dvou částí. První dojde k zaměření stromů stejně jako v pilotní studii, tedy za použití laserového dálkoměru LTI TruPulse 360B a zařízení GPS Trimble TDC100. Následně budou u jednotlivých stromů měřeny parametry, které submodel pro co nejpřesnější vyhodnocení regulačních ES vyžaduje (Tabulka 9). Submodel také vyžaduje určení původu stromu. Pro všechny stromy bude status určen jako strom vysazený s ohledem na to, že se všechny nachází v parku. Po každém terénním šetření budou získaná data vložena do vrstvy v programu ArcGIS Pro a bude zkontrolována jejich přesnost porovnáním s vrstvou ortofotomapa. V rámci terénního měření budou využity následující přístroje, které budou zapůjčeny PŘF JU: průměrka, dálkoměr LTI TruPulse 360B, GPS Trimble TDC100.

Tabulka 9: Měřené parametry stromu v rámci terénního šetření.

Parametry stromu	Metoda
Druh	Určení klíčem
Výčetní tloušťka	Průměrka (ve výšce 1,3 m)
Šířka koruny	Dálkoměr
Chybějící koruna (%)	Subjektivní odhad
Odumření koruny (%)	Subjektivní odhad
Výška nasazení koruny	Dálkoměr
Výška stromu	Dálkoměr
Expozice koruny ke světlu	Počet stran, ze kterých má strom přístup k slunečnímu záření (max. 5)

### 6.2.4 Vyhodnocení regulačních ES stromů submodelem i-Tree Eco

V první fázi vyhodnocení regulačních ES stromů se získaná data vloží do submodelu. Pak bude následovat samotné vyhodnocení submodelem i-Tree Eco. Submodel po vyhodnocení výsledků automaticky vygeneruje report s výsledky v anglickém jazyce. Ten bude následně přeložen do češtiny a na jeho základě bude zpracována závěrečná zpráva projektu.

### 6.2.5 Prezentace výsledků

Poslední fází bude prezentace výsledků a závěrů a následná diskuse dalších možností využití i-Tree Eco v rámci Odboru ochrany životního prostředí Magistrátu města České Budějovice.

### 6.3 Časový harmonogram projektu

Celková délka projektu je 8 měsíců. Terénní šetření bude probíhat během vegetačního období, od května do srpna. Odhad časové náročnosti vychází z výsledků pilotní studie. Pro vyhodnocení regulačních ES stromů submodelem i-Tree Eco byl vyhrazen jeden měsíc a na dokončení a zpracování výsledků 2 měsíce. Presentace výsledků proběhne v listopadu. Časový harmonogram znázorňuje Tabulka 10.

Tabulka 10: Časový harmonogram projektu.

Aktivity	Měsíc							
	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.
Příprava dat								
Terénní šetření								
Vyhodnocení regulačních ES stromů submodelem i-Tree Eco								
Zpracování výstupů, Presentace výsledků								

### 6.4 Náklady

Celkové náklady na realizaci projektu činí 519 000 Kč. V nákladech jsou započítány mzdy pro 2 zaměstnance, kteří budou pracovat na 100% úvazek. První pracovník bude zaměstnán po celou dobu projektu. Druhý pracovník bude zaměstnán po dobu 4 měsíců v rámci terénního šetření. Hrubá mzda pro oba pracovníky zvlášť bude 35 000 Kč za měsíc. Náklady projektu zobrazuje Tabulka 11.

Tabulka 11: Náklady.

Věcné náklady		
Provozní náklady	Specifikace	Požadováno (Kč)
Materiál	Kancelářské potřeby	1 000
Doplňkové (režijní) náklady	20 % z celkové částky	87 00
Služby	ČHMÚ poskytnutí klimatických dat a dat o koncentraci polutantů	8 000
Cestovní náklady	ČB MHD pro 2 pracovníky na 4 měsíce	3 000
Celkem věcné náklady		<b>99 000</b>
Mzdové náklady		
Pracovník 1	Hrubá mzda, 100% úvazek, 8 měsíců	280 000
Pracovník 2	Hrubá mzda, 100% úvazek, 4 měsíce	140 000
Z toho povinné zákonné odvody	34 % z hrubého platu	142 800
Celkem mzdové náklady		<b>420 000</b>
<b>CELKEM</b>		<b>519 000</b>



## 7 Zkratky

BVOC	Biogenní těkavé organické látky ( <i>Biogenic volatile organic compounds</i> )
CFD	Počítačová mechanika tekutin ( <i>Computational fluid dynamics</i> )
CICES	Common International Classification of Ecosystem Services
CO	Oxid uhelnatý ( <i>Carbon monoxide</i> )
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý ( <i>Carbon dioxide</i> )
ČR	Česká republika ( <i>Czech Republic</i> )
EF	Ekosystémové funkce ( <i>Ecosystem function</i> )
ES	Ekosystémové služby ( <i>Ecosystem services</i> )
LAI	Index listové plochy ( <i>Leaf area index</i> )
MEA	The Milenium Ecosystem Assesment
MAES	Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services
NMVOC	Nemethanové těkavé organické látky ( <i>Non methane volatile organic compounds</i> )
NO	Oxid dusnatý ( <i>Nitric oxide</i> )
NO <sub>x</sub>	Oxidy dusíku ( <i>Nitrogen oxides</i> )
NO <sub>2</sub>	Oxid dusičitý ( <i>Nitrogen dioxide</i> )
O <sub>3</sub>	Ozon ( <i>Ozone</i> )
PAHs	Polyaromatické uhlovodíky ( <i>Polycyclic aromatic hydrocarbons</i> )
PM	Prachové částice ( <i>Particulate matter</i> )
SO <sub>2</sub>	Oxid siřičitý ( <i>Sulfur dioxide</i> )
TEEB	The economics of ecosystems and biodiversity
UGI	Urbánní zelená infrastruktura ( <i>Urban green infrastructure</i> )
USA	Spojené státy americké ( <i>United States of America</i> )

## 8 Seznam literatury

- Aylor, D. (1972) 'Noise reduction by vegetation and ground', *Journal of the Acoustical Society of America*, 51, pp. 197–205.
- Bartens, J. *et al.* (2009) 'Transpiration and root development of urban trees in structural soil stormwater reservoirs', *Environmental Management*, 44(4), pp. 646–657. doi: 10.1007/s00267-009-9366-9.
- Berland, A. *et al.* (2017) 'The role of trees in urban stormwater management', *Landscape and Urban Planning*. Elsevier B.V., 162, pp. 167–177. doi: 10.1016/j.landurbplan.2017.02.017.
- Berman, S. *et al.* (1997) 'Uncertainties in estimating the mixing depth - Comparing three mixing-depth models with profiler measurements', *Atmospheric Environment*, 31(18), pp. 3023–3039. doi: 10.1016/S1352-2310(97)00118-0.
- Bodnaruk, E. W. *et al.* (2017) 'Where to plant urban trees? A spatially explicit methodology to explore ecosystem service tradeoffs', *Landscape and Urban Planning*. Elsevier B.V., 157, pp. 457–467.
- Bottalico, F. *et al.* (2016) 'Air Pollution Removal by Green Infrastructures and Urban Forests in the City of Florence', *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. Elsevier Srl, 8, pp. 243–251. doi: 10.1016/j.aaspro.2016.02.099.
- Bouma, J. A. and van Beukering, P. J. H. (2015) 'Ecosystem services: from concept to practise', in Bouma, Jestke A. and van Beukering, P. J. H. (eds) *Ecosystem services: from concept to practise*. Cambridge University Press, pp. 3–21.
- Boyd, J. and Banzhaf, S. (2007) 'What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units', *Ecological Economics*, 63(2–3), pp. 616–626.
- Brown, R. D. and Gillespie, T. J. (1995) *Microclimatic landscape design: Creating thermal comfort and energy efficiency*. New York: John Wiley Sons.
- Chimaimba, F. B. *et al.* (2020) 'Urban tree species composition and diversity in Zomba city, Malawi: Does land use type matter?', *Urban Forestry and Urban Greening*. Elsevier, 54(1), p. 126781. doi: 10.1016/j.ufug.2020.126781.
- Cieslik, S., Paoletti, E. and Omasa, K. (2009) 'Why and how terrestrial plants exchange gases with air: a review', *Plant Biology*, 11(1), pp. 24–34. doi: 10.1111/j.1438-8677.2009.00262.x.
- Clarke, R. (1994) *Europe's environment: the Dobris assessment - An overview*. Copenhagen. Available at: <http://www.aughty.org/pdf/dobris.pdf> (Accessed: 6 March 2021).
- Day, S. D. and Dickinson, S. B. (2008) *Managing Stormwater for Urban Sustainability Using Trees and Structural Soils*, Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA.
- Demestihias, C. *et al.* (2017) 'Ecosystem services in orchards. A review', *Agronomy for Sustainable*

*Development. Agronomy for Sustainable Development*, 37(2). doi: 10.1007/s13593-017-0422-1.

Derkzen, M. L., van Teeffelen, A. J. A. and Verburg, P. H. (2015) 'REVIEW: Quantifying urban ecosystem services based on high-resolution data of urban green space: An assessment for Rotterdam, the Netherlands', *Journal of Applied Ecology*, 52(4), pp. 1020–1032. doi: 10.1111/1365-2664.12469.

Dobrovolný, P. and Krahula, L. (2012) 'Vliv geometrie zástavby na pole teploty vzduchu a intenzitu tepelného ostrova města na příkladu Brna', *Meteorologické zprávy*, 65(2), pp. 51–57.

Donovan, R. G. *et al.* (2005) 'Development and Application of an Urban Tree Air Quality Score for Photochemical Pollution Episodes Using the Birmingham, United Kingdom, Area as a Case Study', *Environmental Science and Technology*, 39(17), pp. 6730–6738. doi: 10.1021/es050581y.

Emberson, L. D. *et al.* (2000) 'Modelling stomatal ozone flux across Europe', *Environmental Pollution*, 109(3), pp. 403–413. doi: 10.1016/S0269-7491(00)00043-9.

Escobedo, F. J. and Nowak, D. J. (2009) 'Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest', *Landscape and Urban Planning*, 90(3–4), pp. 102–110. doi: 10.1016/j.landurbplan.2008.10.021.

European Agency for Environment (2016) *Air quality in Europe - 2016 report*. Luxembourg. doi: 10.2800/80982.

Fang, C. F. and Ling, D. L. (2003) 'Investigation of the noise reduction provided by tree belts', *Landscape and Urban Planning*, 63(4), pp. 187–195. doi: 10.1016/S0169-2046(02)00190-1.

Fisher, B. and Turner, R. K. (2008) 'Ecosystem services: Classification for Valuation', *Biological Conservation*, 141(5), pp. 1167–1169. doi: 10.1016/j.biocon.2008.02.019.

Forman, R. T. T. (2014) *Urban Ecology: Science of cities*. New York: Cambridge University Press.

Geron, C. *et al.* (2000) 'Temporal variability in basal isoprene emission factor', *Tree Physiology*, 20(12), pp. 799–805. doi: 10.1093/treephys/20.12.799.

Gratani, L. *et al.* (2016) 'Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Sequestration and Air Temperature Amelioration Provided by Urban Parks in Rome', *Energy Procedia*, 101, pp. 408–415. doi: 10.1016/j.egypro.2016.11.052.

de Groot, R. S. (1992) *Functions of nature: evaluation of nature in environmental planning, management and decision making*. Groningen: Wolters-Noordhoff.

de Groot, R. S., Wilson, M. A. and Boumans, R. M. J. (2002) 'A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services', *Ecological Economics*, 41(3), pp. 393–408. doi: 10.1016/S0921-8009(02)00089-7.

Grundström, M. and Pleijel, H. (2014) 'Limited effect of urban tree vegetation on NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>

concentrations near a traffic route’, *Environmental Pollution*. Elsevier Ltd, 189(2), pp. 73–76. doi: 10.1016/j.envpol.2014.02.026.

Guenther, A. *et al.* (2006) ‘Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)’, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, pp. 3181–3210. doi: 10.5194/acp-6-3181-2006.

Haines-Young, R. and Potschin, M. (2013) *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4, August-December 2012*. Available at: [https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2012/07/CICES-V43\\_Revised-Final\\_Report\\_29012013.pdf](https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2012/07/CICES-V43_Revised-Final_Report_29012013.pdf) (Accessed: 6 March 2021).

Haines-Young, R. and Potschin, M. (2018) *CICES V5. 1. Guidance on the Application of the Revised Structure*. Available at: <https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2018/01/Guidance-V51-01012018.pdf> (Accessed: 1 March 2021).

Heisler, G. M. *et al.* (1995) ‘Urban forests-Cooling our communities?’, in Kollin, C. and Barratt, M. (eds) *Proceedings of the Seventh National Urban Forestry Conference*. Washington, DC: American Forests, pp. 31–34.

Hirabayashi, S. (2014) *i - Tree Canopy Air Pollutant Removal and Monetary Value Model Descriptions, i-Tree Canopy Air Pollutant Removal and Monetary Value Model Descriptions*. Available at: [https://www.itreetools.org/documents/560/i-Tree\\_Canopy\\_Air\\_Pollutant\\_Removal\\_and\\_Monetary\\_Value\\_Model\\_Descriptions.pdf](https://www.itreetools.org/documents/560/i-Tree_Canopy_Air_Pollutant_Removal_and_Monetary_Value_Model_Descriptions.pdf) (Accessed: 7 February 2021).

Hofman, J. *et al.* (2013) ‘Spatial distribution assessment of particulate matter in an urban street canyon using biomagnetic leaf monitoring of tree crown deposited particles’, *Environmental Pollution*. Elsevier Ltd, 183, pp. 123–132. doi: 10.1016/j.envpol.2012.09.015.

Hofman, J. *et al.* (2014) ‘On the relation between tree crown morphology and particulate matter deposition on urban tree leaves: A ground-based LiDAR approach’, *Atmospheric Environment*. Elsevier Ltd, 99, pp. 130–139. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.09.031.

Holkup, J. and Polanská, L. (2013) *Učební texty z předmětu Lesnická botanika*. Písek. Available at: <https://www.clatrutnov.cz/index.php/cs/skola/dokumenty/category/22-ucebni-texty> (Accessed: 24 February 2021).

Hruška, J. and Kopáček, J. (2009) ‘Účinky kyselého deště na lesní a vodní ekosystémy I . Emise a depozice okyselujících sloučenin’, *Živa*, 2, pp. 93–96.

Huleš, L. (2006) *Vrby a topoly v ochraně životního prostředí proti hluku*. Available at: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vrby-a-topoly-v-ochrane-zivotniho-prostredi-proti-hluku>

(Accessed: 4 February 2021).

Hůnová, I. (2018) 'Přízemní ozon', *Chemické listy*, 112, pp. 598–604.

Hynicka, J. and Divers, M. (2016) 'Appendix B: Relative Reductions in non-point source pollution loads by urban trees', in *Recommendations of the Expert Panel to Define BMP Effectiveness for Urban Tree Canopy*, pp. 48–71.

Imhoff, M. L. *et al.* (2010) 'Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA', *Remote Sensing of Environment*. Elsevier B.V., 114(3), pp. 504–513. doi: 10.1016/j.rse.2009.10.008.

Kapoor, R. K. and Gupta, V. K. (1984) 'A pollution attenuation coefficient concept for optimization of green belt', *Atmospheric Environment*, 18(6), pp. 1107–1113. doi: 10.1016/0004-6981(84)90142-2.

Kardel, F. *et al.* (2011) 'Leaf saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) as a proxy for particulate matter monitoring: Inter-species differences and in-season variation', *Atmospheric Environment*. Elsevier Ltd, 45(29), pp. 5164–5171. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.06.025.

Khan, J. *et al.* (2020) 'The spatial relationship between traffic-related air pollution and noise in two Danish cities: Implications for health-related studies', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 726, p. 138577. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138577.

Koetse, M. J., Brouwer, R. and van Beukering, P. J. H. (2015) 'Economic valuation methods for ecosystem services', in Bouma, J. A. and van Beukering, P. J. H. (eds) *Ecosystem services: from concept to practise*. Cambridge University Press, pp. 108–131.

Kong, L. *et al.* (2017) 'Regulation of outdoor thermal comfort by trees in Hong Kong', *Sustainable Cities and Society*. Elsevier B.V., 31, pp. 12–25. doi: 10.1016/j.scs.2017.01.018.

Lin, J. *et al.* (2019) 'A review of urban forest modeling: Implications for management and future research', *Urban Forestry and Urban Greening*, 43, p. 126366. doi: 10.1016/j.ufug.2019.126366.

Liu, J. *et al.* (2018) 'An investigation of the leaf retention capacity, efficiency and mechanism for atmospheric particulate matter of five greening tree species in Beijing, China', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 616–617, pp. 417–426. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.314.

Maes, J. *et al.* (2016) *Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services. Urban Ecosystems*. Luxembourg. Available at: [https://ec.europa.eu/environment/nature/knowledge/ecosystem\\_assessment/pdf/102.pdf](https://ec.europa.eu/environment/nature/knowledge/ecosystem_assessment/pdf/102.pdf) (Accessed: 7 March 2021).

Manes, F. *et al.* (2012) 'Urban ecosystem services: Tree diversity and stability of tropospheric ozone removal', *Ecological Applications*, 22(1), pp. 349–360. doi: 10.1890/11-0561.1.

- McPherson, E. G. and Simpson, J. R. (1999) *Carbon Dioxide Reduction Through Urban Forestry: Guidelines for Professional and Volunteer Tree Planters, United States Department of Agriculture, Forest Service*. Albany. Available at: [https://www.fs.fed.us/psw/topics/urban\\_forestry/products/cufr\\_43.pdf](https://www.fs.fed.us/psw/topics/urban_forestry/products/cufr_43.pdf) (Accessed: 7 March 2021).
- Milenium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press. Available at: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf> (Accessed: 7 March 2021).
- Mills, G. *et al.* (2015) 'The green "signature" of Irish cities: An examination of the ecosystem services provided by trees using i-Tree canopy software', *Irish Geography*, 48(2), pp. 62–77. doi: 10.2014/igj.v48i2.625.
- Mitchell, R., Maher, B. A. and Kinnersley, R. (2010) 'Rates of particulate pollution deposition onto leaf surfaces: Temporal and inter-species magnetic analyses', *Environmental Pollution*. Elsevier Ltd, 158(5), pp. 1472–1478. doi: 10.1016/j.envpol.2009.12.029.
- Morakinyo, T. E. *et al.* (2017) 'A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort', *Building and Environment*. Elsevier Ltd, 115, pp. 1–17. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.01.005.
- Morakinyo, T. E. *et al.* (2018) 'Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving', *Building and Environment*. Elsevier, 137, pp. 157–170. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.04.012.
- Morakinyo, T. E. *et al.* (2020) 'Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation', *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 719, p. 137461. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137461.
- Moser-Reischl, A. *et al.* (2019) 'Growth patterns and effects of urban micro-climate on two physiologically contrasting urban tree species', *Landscape and Urban Planning*. Elsevier, 183, pp. 88–99. doi: 10.1016/j.landurbplan.2018.11.004.
- Myong, J. P. (2016) 'Health Effects of Particulate Matter', *The Korean Journal of Medicine*, 91(2), pp. 106–113. doi: 10.3904/kjm.2016.91.2.106.
- Norgaard, R. B. (2010) 'Ecosystem services: From eye-opening metaphor to complexity blinder', *Ecological Economics*. Elsevier B.V., 69(6), pp. 1219–1227. doi: 10.1016/j.ecolecon.2009.11.009.
- Novák, Z. (2001) *Dřeviny na veřejných prostranstvích: použití dřevin v ulicích a na náměstích památkově chráněných měst*. Praha: Státní ústav památkové péče v Praze.
- Nowak, D. J. *et al.* (2000) 'A modeling study of the impact of urban trees on ozone', *Atmospheric*

*Environment*, 34(10), pp. 1601–1613. doi: 10.1016/S1352-2310(99)00394-5.

Nowak, D. J., Crane, D. E. and Stevens, J. C. (2006) ‘Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States’, *Urban Forestry and Urban Greening*, 4(3), pp. 115–123. doi: 10.1016/j.ufug.2006.01.007.

Ow, L. F. and Ghosh, S. (2017) ‘Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation’, *Applied Acoustics*. Elsevier Ltd, 120, pp. 15–20. doi: 10.1016/j.apacoust.2017.01.007.

Pathak, V., Tripathi, B. D. and Mishra, V. K. (2011) ‘Evaluation of Anticipated Performance Index of some tree species for green belt development to mitigate traffic generated noise’, *Urban Forestry and Urban Greening*. Elsevier GmbH., 10(1), pp. 61–66. doi: 10.1016/j.ufug.2010.06.008.

Penka, M. (1985) *Transpirace a spotřeba vody rostlinami*. Praha: Academia.

Potschin, M. and Haines-Young, R. (2011) ‘Ecosystem services: Exploring a geographical perspective’, *Progress in Physical Geography*, 35(5), pp. 575–549. doi: 0.1177/0309133311423172.

Roeland, S. *et al.* (2019) ‘Towards an integrative approach to evaluate the environmental ecosystem services provided by urban forest’, *Journal of Forestry Research*, 30(6), pp. 1981–1996. doi: 10.1007/s11676-019-00916-x.

Rötzer, T. *et al.* (2019) ‘Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions’, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 676, pp. 651–664. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.235.

Russo, A., Escobedo, F. J. and Zerbe, S. (2016) ‘Quantifying the local-scale ecosystem services provided by urban treed streetscapes in Bolzano, Italy’, *AIMS Environmental Science*, 3(1), pp. 58–76. doi: 10.3934/environsci.2016.1.58.

Scholz, T., Hof, A. and Schmitt, T. (2018) ‘Cooling Effects and Regulating Ecosystem Services Provided by Urban Trees — Novel Analysis Approaches Using Urban Tree Cadastre Data’, *Sustainability*, 10(3). doi: 10.3390/su10030712.

Seják, J. *et al.* (2010) *Hodnocení funkcí a služeb ekosystémů České republiky*. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta životního prostředí. Available at: <http://fzp.ujep.cz/projekty/hodnocenifunkciaslužebekosystemuCR.pdf> (Accessed: 8 March 2021).

Šerá, B. (2015) ‘Pozitivní vliv zeleně na uživatele městských sídlišť’, *Životné prostredie*, 49(2), pp. 100–105.

Sicard, P. *et al.* (2018) ‘Should we see urban trees as effective solutions to reduce increasing ozone levels in cities?’, *Environmental Pollution*. Elsevier Ltd, 243, pp. 163–176.

Sillman, S. (1999) ‘The relation between ozone, NO<sub>x</sub> and hydrocarbons in urban and polluted rural

- environments’, *Atmospheric Environment*, 33(12), pp. 1821–1845. doi: 10.1016/S1474-8177(02)80015-8.
- Sillman, S. and He, D. (2002) ‘Some theoretical results concerning O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOC chemistry and NO<sub>x</sub>-VOC indicators’, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(22), p. ACH 26-1-ACH 26-15. doi: 10.1029/2001JD001123.
- Stewart, I. D. and Oke, T. R. (2012) ‘Local climate zones for urban temperature studies’, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), pp. 1879–1900. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- Tan, Z., Lau, K. K. and Ng, E. (2017) ‘Planning strategies for roadside tree planting and outdoor comfort enhancement in subtropical high-density urban areas’, *Building and Environment*. Elsevier Ltd, 120, pp. 93–109. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.05.017.
- TEEB (2008) *The economics of ecosystems and biodiversity, An interim report*. Available at: [http://www.teebweb.org/wp-content/uploads/Study and Reports/Additional Reports/Interim report/TEEB Interim Report\\_English.pdf](http://www.teebweb.org/wp-content/uploads/Study_and_Reports/Additional_Reports/Interim_report/TEEB_Interim_Report_English.pdf) (Accessed: 8 March 2021).
- TEEB (2010) *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB*. Available at: [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7851/-The TEEB Synthesis Report-2010982.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7851/-The_TEEB_Synthesis_Report-2010982.pdf?sequence=5&isAllowed=y) (Accessed: 8 March 2021).
- Terzaghi, E. *et al.* (2020) ‘Role of photo- and biodegradation of two PAHs on leaves: Modelling the impact on air quality ecosystem services provided by urban trees’, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 739, p. 139893. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139893.
- The Green Infrastructure Center Inc. (2019) *Trees to offset stormwater, Summary of A Study of 12 Communities*. Available at: <http://www.gicinc.org/PDFs/TreesStormwaterSummaryReportJune2019.pdf> (Accessed: 13 March 2021).
- Thom, J. K. *et al.* (2020) ‘Transpiration by established trees could increase the efficiency of stormwater control measures’, *Water Research*. Elsevier Ltd, 173, p. 115597. doi: 10.1016/j.watres.2020.115597.
- U.S. Environmental Protection Agency (2008) *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies Trees and Vegetation*. Available at: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-05/documents/reducing\\_urban\\_heat\\_islands\\_ch\\_2.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-05/documents/reducing_urban_heat_islands_ch_2.pdf) (Accessed: 8 March 2021).
- Urbat, M., Lehndorff, E. and Schwark, L. (2004) ‘Biomonitoring of air quality in the Cologne conurbation using pine needles as a passive sampler - Part I: Magnetic properties’, *Atmospheric Environment*, 38(23), pp. 3781–3792. doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.03.061.
- Voogt, J. A. and Oke, T. R. (2003) ‘Thermal remote sensing of urban climates’, *Remote Sensing of*



*Environment*, 86(3), pp. 370–384. doi: 10.1016/S0034-4257(03)00079-8.

Wallace, K. J. (2007) ‘Classification of ecosystem services: Problems and solutions’, *Biological Conservation*, 139(3–4), pp. 235–246. doi: 10.1016/j.biocon.2007.07.015.

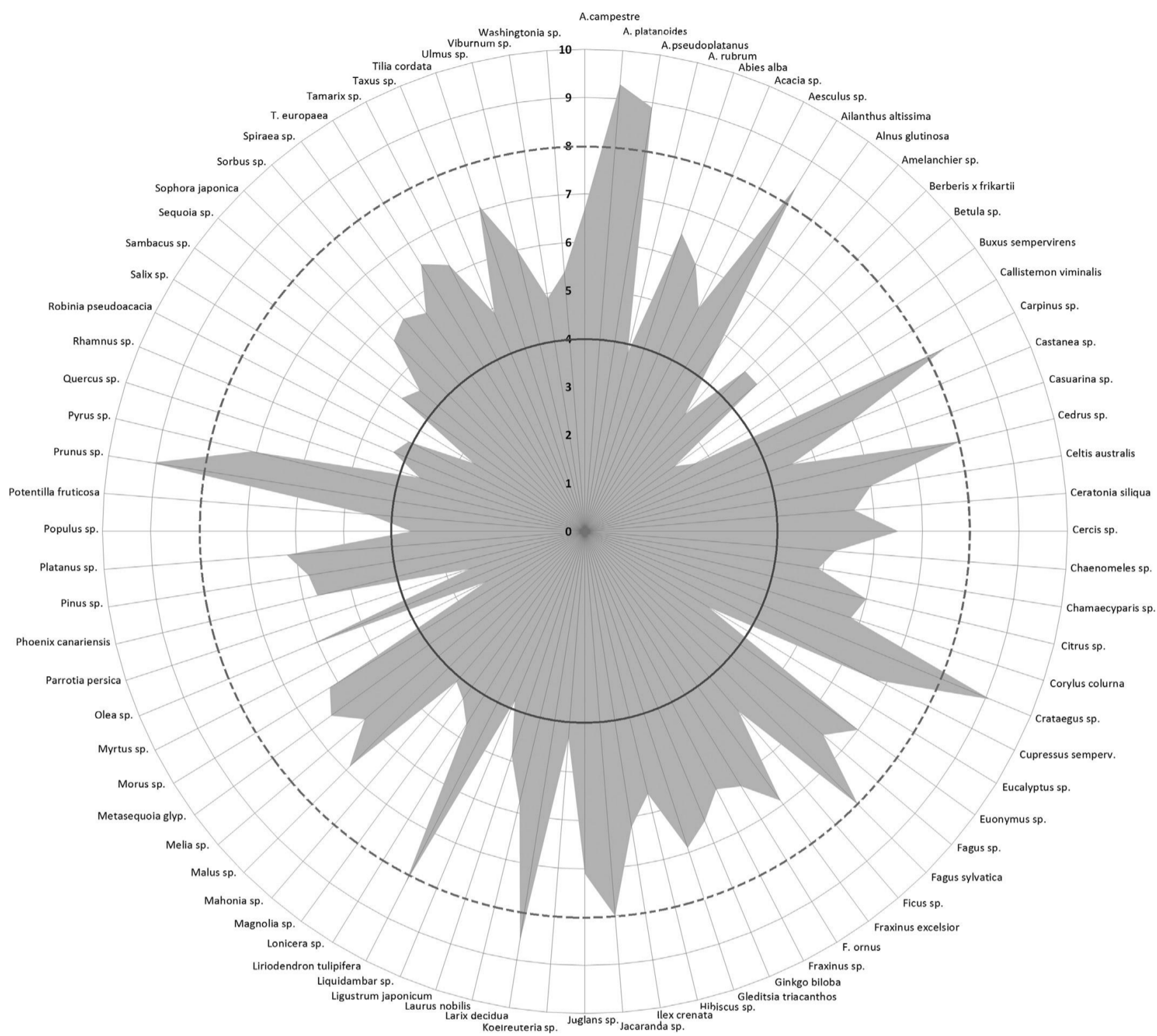
Weyens, N. *et al.* (2015) ‘The Role of Plant–Microbe Interactions and Their Exploitation for Phytoremediation of Air Pollutants’, *International Journal of Molecular Sciences*, 16(10), pp. 25576–25604. doi: 10.3390/ijms161025576.

Wilson, M. A. and Carpenter, S. R. (1999) ‘Economic valuation of freshwater ecosystem services in the United States 1971–1997’, *Ecological Applications*, 9(3), pp. 772–783. doi: 10.1890/1051-0761(1999)009[0772:EVOFES]2.0.CO;2.

Zhang, L., Zhan, Q. and Lan, Y. (2018) ‘Effects of the tree distribution and species on outdoor environment conditions in a hot summer and cold winter zone: A case study in Wuhan residential quarters’, *Building and Environment*, 130, pp. 27–39. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.12.014.

Zulian, G., Maes, J. and Paracchini, M. L. (2013) ‘Linking land cover data and crop yields for mapping and assessment of pollination services in Europe’, *Land*, 2(3), pp. 472–492. doi: 10.3390/land2030472.

## **9 Přílohy**

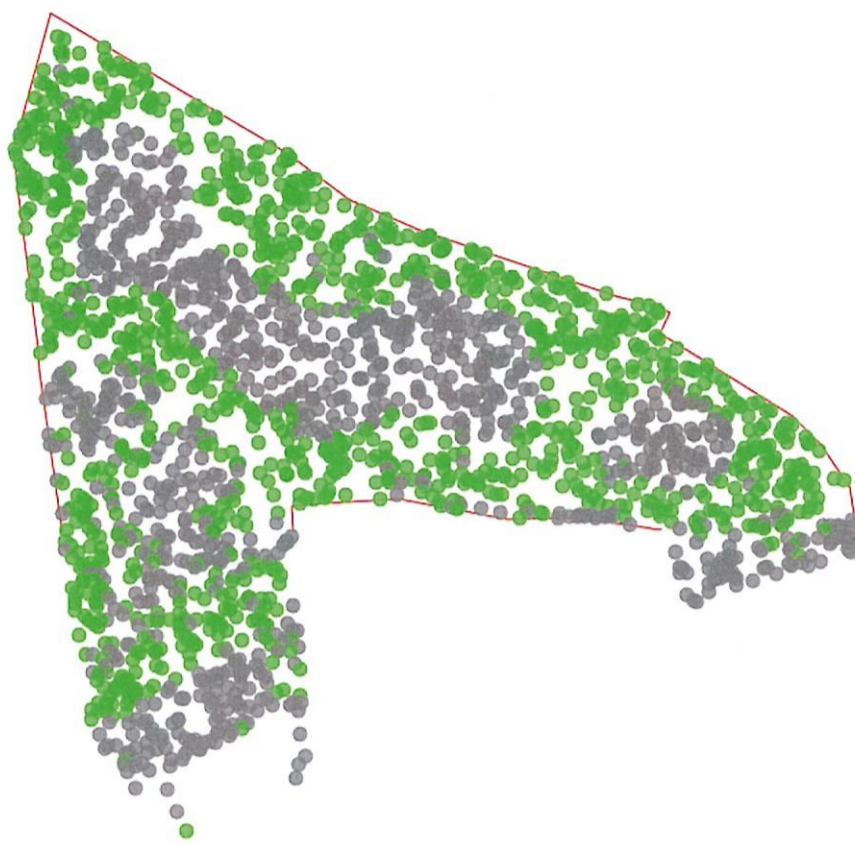


Příloha 1: Dřeviny vhodné pro efektivní redukci vzdušného znečištění v urbánním prostředí (v diagramu dřeviny dosahující šedou barvou hodnot 8 až 10). Převzato: Sicard et al., 2018.

# i-Tree Canopy v7.0

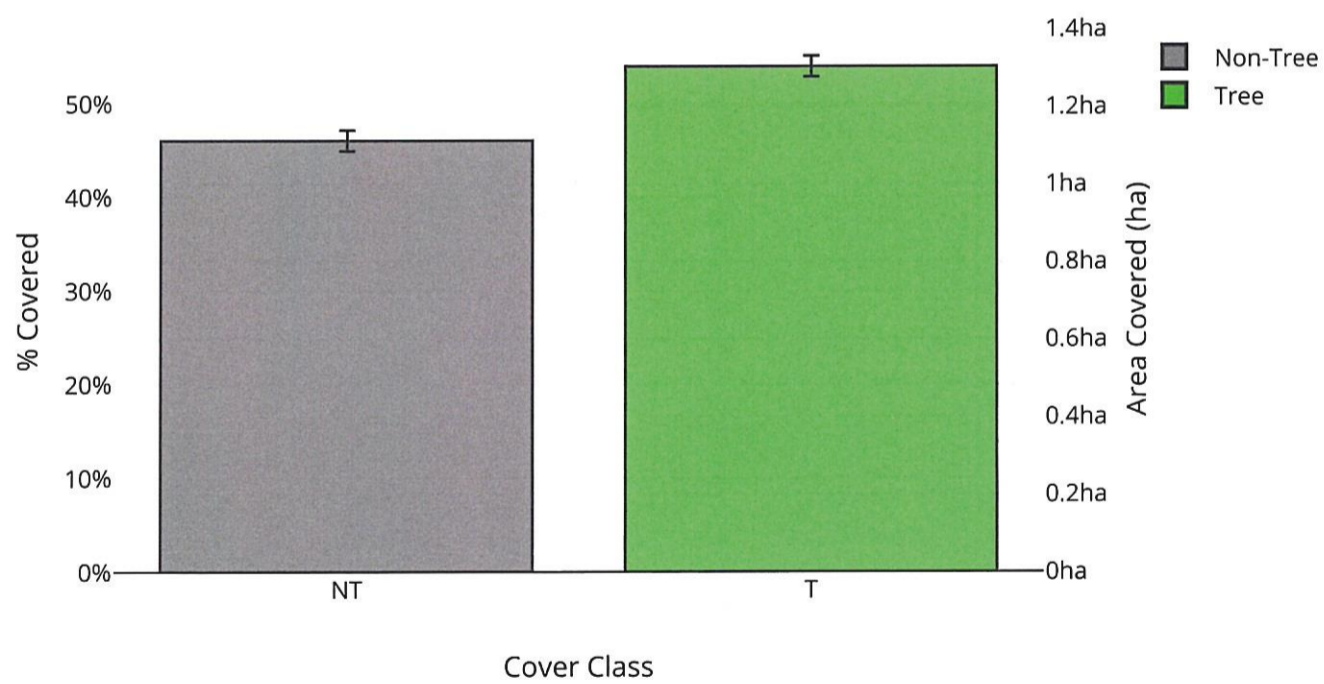
## Cover Assessment and Tree Benefits Report

Estimated using random sampling statistics on 12/21/2020



Google

Land Cover



Abbr.	Cover Class	Description	Points	% Cover ± SE	Area (ha) ± SE
NT	Non-Tree	All other surfaces	930	46.04 ± 1.11	1.11 ± 0.03
T	Tree	Tree, non-shrub	1090	53.96 ± 1.11	1.30 ± 0.03
<b>Total</b>			<b>2020</b>	<b>100.00</b>	<b>2.41</b>

### Tree Benefit Estimates: Carbon (Metric units)

Description	Carbon (t)	±SE	CO <sub>2</sub> Equiv. (t)	±SE	Value (USD)	±SE
Sequestered annually in trees	3.98	±0.08	14.59	±0.30	\$748	±15
Stored in trees (Note: this benefit is not an annual rate)	99.91	±2.05	366.33	±7.53	\$18,783	±386

Currency is in USD and rounded. Standard errors of removal and benefit amounts are based on standard errors of sampled and classified points. Amount sequestered is based on 3.060 t of Carbon, or 11.220 t of CO<sub>2</sub>, per ha/yr and rounded. Amount stored is based on 76.848 t of Carbon, or 281.776 t of CO<sub>2</sub>, per ha and rounded. Value (USD) is based on \$188.00/t of Carbon, or \$51.27/t of CO<sub>2</sub> and rounded. (Metric units: t = tonnes, metric tons, ha = hectares)

### Tree Benefit Estimates: Air Pollution (Metric units)

Abbr.	Description	Amount (kg)	±SE	Value (USD)	±SE
CO	Carbon Monoxide removed annually	1.31	±0.03	\$0	±0
NO <sub>2</sub>	Nitrogen Dioxide removed annually	7.16	±0.15	\$0	±0
O <sub>3</sub>	Ozone removed annually	71.36	±1.47	\$11	±0
SO <sub>2</sub>	Sulfur Dioxide removed annually	4.51	±0.09	\$0	±0
PM <sub>10</sub> *	Particulate Matter greater than 2.5 microns and less than 10 microns removed annually	23.90	±0.49	\$8	±0
PM <sub>2.5</sub>	Particulate Matter less than 2.5 microns removed annually	3.47	±0.07	\$23	±0
<b>Total</b>		<b>111.72</b>	<b>±2.30</b>	<b>\$42</b>	<b>±1</b>

Currency is in USD and rounded. Standard errors of removal and benefit amounts are based on standard errors of sampled and classified points. Air Pollution Estimates are based on these values in kg/ha/yr @ \$/kg/yr and rounded:

CO 1.011 @ \$0.09 | NO<sub>2</sub> 5.511 @ \$0.03 | O<sub>3</sub> 54.886 @ \$0.15 | SO<sub>2</sub> 3.473 @ \$0.01 | PM<sub>10</sub>\* 18.385 @ \$0.34 | PM<sub>2.5</sub> 2.667 @ \$6.59 (Metric units: kg = kilograms, ha = hectares)

### Tree Benefit Estimates: Hydrological (Metric units)

Abbr.	Benefit	Amount (l)	±SE	Value (USD)	±SE
AVRO	Avoided Runoff	6.29	±0.13	\$0	±0
E	Evaporation	519.19	±10.67	N/A	N/A
I	Interception	522.10	±10.73	N/A	N/A
T	Transpiration	702.54	±14.44	N/A	N/A
PE	Potential Evaporation	3,934.13	±80.85	N/A	N/A
PET	Potential Evapotranspiration	3,209.92	±65.97	N/A	N/A

Currency is in USD and rounded. Standard errors of removal and benefit amounts are based on standard errors of sampled and classified points. Hydrological Estimates are based on these values in l/ha/yr @ \$/l/yr and rounded:

AVRO 4.837 @ \$0.00 | E 399.355 @ N/A | I 401.590 @ N/A | T 540.389 @ N/A | PE 3,026.089 @ N/A | PET 2,469.035 @ N/A (Metric units: l = liters, ha = hectares)

#### About i-Tree Canopy

The concept and prototype of this program were developed by David J. Nowak, Jeffery T. Walton, and Eric J. Greenfield (USDA Forest Service). The current version of this program was developed and adapted to i-Tree by David Ellingsworth, Mike Binkley, and Scott Maco (The Davey Tree Expert Company)

#### Limitations of i-Tree Canopy

The accuracy of the analysis depends upon the ability of the user to correctly classify each point into its correct class. As the number of points increase, the precision of the estimate will increase as the standard error of the estimate will decrease. If too few points are classified, the standard error will be too high to have any real certainty of the estimate.



Use of this tool indicates acceptance of the [EULA](#).