



Pedagogická  
fakulta  
Faculty  
of Education

Jihočeská univerzita  
v Českých Budějovicích  
University of South Bohemia  
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích  
Pedagogická fakulta  
Katedra biologie

Bakalářská práce

# Porovnání sezónních změn ekofyziologických charakteristik dvou vybraných stromů pod vlivem stresu městského prostředí

Vypracovala: Lenka Šindelářová  
Vedoucí práce: Mgr. Renata Ryplová, Dr.

České Budějovice 2014

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem 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 – v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Pedagogickou fakultou 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.

Datum: 25. 6. 2014

Podpis studenta .....

## **Poděkování**

Děkuji Mgr. Renatě Ryplové, Dr. za odborné vedení mé práce, za trpělivost, ochotu a čas, který mi věnovala a za pomoc a odborné rady pro vypracování této práce. Také velmi děkuji Gabriele Toncarové za ochotu a pomoc při měření. Velký dík patří celé mé rodině za velkou podporu a povzbuzení při vypracování této bakalářské práce.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá studiem vlivu stresu v městském prostředí na dva druhy listnatých stromů během vegetační sezóny. Zkoumanými druhy byly lípa srdčitá (*Tilia cordata*) a platan javorolistý (*Platanus acerifolia*).

Stromy jsou důležitou součástí městského prostředí, a to jak z hlediska estetického, tak z hlediska snižování negativních účinků městského prostředí. Avšak tyto stromy jsou pod neustálým vlivem stresových faktorů, se kterými se musejí ve městě vyrovnávat (znečištěné ovzduší, voda, teplota). Některé stromy se se stresem vyrovnávají lépe a některé hůře, proto byly zvoleny dva odlišné druhy stromů, které podle literatury odolávají stresu každý po svém.

Jako indikátory fyziologického stavu rostliny pod vlivem stresu byly u jednotlivých stromů sledovány: obsah fotosyntetických pigmentů a fotochemická efektivita PS II (QY a QY'). Měření byla provedena od května do září v roce 2013 na Jiráskově nábřeží v Českých Budějovicích vždy dva dny jdoucí po sobě. Každý měsíc bylo provedeno spektrofotometrické měření ke zjištění pigmentů v listu. Pro spektrofotometrické zjišťování pigmentů bylo odebráno celkem 24 listů a pro fluorescenční měření bylo změřeno celkem 30 listů. Zjištěné hodnoty z obou metod měření byly zaznamenány a vyhodnoceny grafy, které společně s průměrnými hodnotami znázorňují statistickou prokazatelnost rozdílu mezi měřenými stromy ve městě.

Podle těchto naměřených hodnot se na daném stanovišti jako vitálnější strom jevila lípa srdčitá, ačkoliv platan javorolistý je v literatuře označován za odolnější strom vůči městskému stresu.

Klíčová slova: městská zeleň, fluorescence chlorofylu, fotosyntetické pigmenty, stres rostlin, stromy

## Abstract

This thesis deals with the study of impact of stress to the two types of broadleaved trees in urban environment during the growing season. The studied species were Small-leaved Lime (*Tilia cordata*) and London Planetree (*Platanus acerifolia*).

Trees are the important part of the urban environment both from an aesthetic standpoint and from the standpoint of the reduction of negative effects of the urban environment. However, these trees are under the constant influence of stress factors with which they have to deal (air pollution, water, temperature). Some trees deal with stress better but some worse. Because of this fact, two different types of trees were selected, which are able to deal with stress by their own way. As indicators of physiological state of plants under stress, the content of photosynthetic pigments and photochemical efficiency of PS II (QY and QY') were monitored at individual trees. The measurements were carried out always two days consecutively from May to September 2013 in Jiráskovo nábřeží in České Budějovice. Every month, the spectrophotometric measurement to determine the pigments in a leaf was carried out. For the spectrophotometric measurements, twenty-four leaves were measured in total; for the fluorescent measurement, thirty leaves were measured in total. The obtained values of both methods were processed and evaluated by graphs, which together with the average values show the statistic demonstrability of difference between the measured trees in city.

According to these measured values, Small-leaved Lime seemed to be more vital at a given location, although London Planetree is marked in the literature as more resistant one towards the urban stress.

Key words: urban greenery, chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, plant stress, trees

# Obsah

1. Úvod.....	1
2. Literární přehled.....	3
2.1. Stres.....	3
2.1.1 Stresové faktory.....	4
2.1.1.1 Teplota.....	4
2.1.1.2 Voda.....	5
2.1.1.3 Oxid siřičitý SO <sub>2</sub> .....	5
2.1.1.4 Oxidy dusíku NO <sub>x</sub> .....	7
2.1.1.5 Oxid uhličitý CO <sub>2</sub> .....	7
2.1.1.6 Ozon O <sub>3</sub> .....	8
2.1.1.7 Prachové částice.....	8
2.2. Platan javorolistý ( <i>Platanus acerifolia</i> ).....	9
2.3. Lípa srdčitá ( <i>Tilia cordata</i> ).....	10
2.4. Fotosyntéza.....	10
2.4.1 Fotosyntetické pigmenty.....	13
3. Metodika a materiál.....	14
3.1. Fluorescenční měření.....	14
3.1.1 Princip fluorescence.....	15
3.2. Stanovení množství fotosyntetických pigmentů.....	18
3.3. Zpracování dat.....	19
4. Výsledky.....	20
4.1. Obsah chlorofylů.....	20
4.2. Fotochemická efektivita fotosystému II (PS II).....	26
4.3. Průměrné hodnoty látek znečišťujících ovzduší.....	28
5. Diskuze.....	29
6. Závěr.....	32
7. Seznam použité literatury.....	33
8. Přílohy.....	

# 1. Úvod

Městská zeleň je velmi důležitou součástí životního prostředí lidí (Weber a kol., 2014). Je účinným nástrojem ke zlepšení kvality života v hustě obydlených oblastech (Vanuytrecht a kol., 2014). Rostliny byly do měst integrovány lidmi už dříve, a to hlavně kvůli estetické funkci, produkci potravin nebo hydrologické regulaci (Oberndorfer a kol., 2007). Ve městech je zeleň zastoupena v podobě alejí, parků, zahrad a všech dalších prostorů vytvořených člověkem. Má velkou schopnost vyvažovat mnoho negativních účinků zastaveného prostředí. Zeleň má také schopnost ovlivňovat čistotu ovzduší a působit na teplotu vzduchu stíněním a i tím, že místa, kde je vegetace, se pomaleji zahřívají než dlažba. Rostliny svými listy neustále transpirují, čímž zvlhčují ovzduší a ochlazují mikroklima. Stromy ve městě dokonce pomáhají při snižování hluku spolu s protihlukovými stěnami (Balabánová a kol., 2006).

V městských oblastech je prostředí pro stromy velmi stresové a projektanti, kteří navrhují výsadbu stromů pro taková místa, upřednostňují toleranci stresu nad estetikou. Proto se na projektantech vyžadují znalosti o toleranci dřevin na vlivy okolního prostředí (Sjöman a Nielsen, 2010).

Jedním z možných stresů je zpevnění půdy. Zpevněná místa ve městě jsou definována jako místa, kde je povrch utěsněn nepropustnými materiály, jako jsou dlažba, asfalt nebo beton. Tyto lokality jsou komplexním stresovaným prostředím, kde vzájemné působení mezi biotickými a abiotickými faktory činí stromy náchylné na škůdce a různá onemocnění. Stromy jsou v těchto podmínkách do určité meze vystaveny např.: teplu, nedostatku vody, zhutnění půdy, zasolení půdy či emisím (Pauleit, 2003; Sieghardt a kol., 2005). Odrůdy, které nejsou dobře přizpůsobitelné městskému zpevněnému povrchu, jsou zejména více citlivé k onemocnění, a to i na slabé patogeny, kterým by za normálních okolností strom nepodlehl (Richards, 1983).

V současné době je zjištěno, že stromy mohou být použity jako monitory znečištěného životního prostředí. Výhodou stromů je jejich dlouholetost, která zároveň umožňuje i soustavné sledování jejich stavu pod vlivem městského prostředí po několik desetiletí (Ballach a Wittig, 2001).

Cílem mé bakalářské práce bylo porovnat sezónní změny ekofyziologických charakteristik dvou vybraných stromů pod vlivem stresu městského prostředí. V této

práci byly porovnány platan javorolistý (*Platanus acerifolia*) a lípa srdčitá (*Tilia cordata*).

*Platanus acerifolia* byl vybrán z důvodu častého vysazování v městském prostředí a předchozí studie uvádějí, že je tolerantní dřevinou vůči znečištění. (Wittenberghe a kol., 2013) *Tilia cordata* se vyskytuje téměř po celém kontinentu (Radoglou a kol., 2009), avšak v České republice, Německu a Francii je zastoupena nejvíce (Barna, 1996). Je označována za městskou dominantní dřevinu díky své vitalitě (Radoglou a kol., 2009). *Tilia cordata* je hojně vysazována do městských parků a alejí (Koblížek, 2000).

U těchto dvou druhů byly během vegetační sezóny sledovány změny v množství a složení fotosyntetických pigmentů a prostřednictvím měření fluorescence chlorofylu také změny v aktivitě fotosyntetického aparátu.



## 2. Literární přehled

### 2.1. Stres

Stres je stav, kdy je rostlina ovlivňována stresory. Stresory jsou faktory, které nepříznivě ovlivňují rostlinu a významně ji ohrožují. Dělí se na abiotické faktory a biotické faktory. Abiotické faktory se dají rozdělit na fyzikální, kam patří například vítr, nadměrné UV záření, extrémní teploty, a na chemické vlivy, kam patří například nedostatek vody, toxické plyny ve vzduchu, nedostatek živin v půdě a toxické kovy v půdě. Mezi biotické faktory se řadí například vzájemné ovlivňování nebo patogenní organismy (Procházka a kol., 1998).

Rostlina může zaujmout při působení stresorů nového rovnovážného stavu na bázi činnosti reakcí, které se vyrovnávají s určitým stresem. Pokud si rostlina nevytvoří adaptaci na stres, může dojít až k jejímu úhynu. Reakce, které se aktivují při působení stresorů, se nazývají stresové reakce. První fáze je poplachová, která je zahájena hned po vlivu stresoru. Druhou fází je restituční, kde začínají fungovat adaptační mechanismy. Ve fázi rezistence už dochází díky kompenzačním mechanismům k značnější rezistenci rostliny vůči stresorům. Poslední fáze je fáze vyčerpání, kde může dojít znovu ke snížení odolnosti rostliny vůči stresu, který působí dlouhou dobu a intenzivně (Bláha a kol., 2003).

Stresory působící na rostliny se mohou lišit v intenzitě a délce trvání, proto se dělí na mírné a silné. Mírný stres aktivuje buněčný metabolismus a nevyvolává žádné poškození rostlin. Mnoho inhibitorů růstu rostlin vykazuje při nízkých koncentracích podporující účinky pro organismus. Při vyšších koncentracích, inhibitory, které působí na rostliny, způsobují jejich poškození, snížení rostlinné aktivity a může dojít k předčasnému stárnutí a dokonce smrti rostlin (Larcher, 1987).

Slavíková (1986) uvedla, že pro růst a vývoj rostlin je důležitá atmosféra. Avšak v ovzduší jsou ve velkém zastoupení látky, které se do atmosféry dostávají činností člověka nebo přirozenými zdroji (sopečná činnost) a negativně působí jak na přírodu, tak i na zdraví lidí. Látky znečišťující ovzduší se označují emise. Pakliže se tyto látky dostanou do kontaktu s vodou, půdou či organismy, říkáme jim imise. Imise se pak přesouvají větrem nebo vodou a přecházejí na další rostliny. Znečišťující látky se diferencují podle skupenství na tuhé emise (prach, popílek), plynné a kapalné emise

(SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>). Narůstající význam jako zdroj znečištění mají frekventované silnice.

Rostliny, které se dostanou do kontaktu s látkami znečišťujícími ovzduší, mohou na tyto stresory reagovat vyzařováním těkavých látek jako jsou ethylen, ethan nebo monoterpeny. Tyto látky jsou proto označovány jako stresové metabolity (Yunus a Igbal, 1996). Isopren je jedním z nejdůležitějších biogenních těkavých prvků vydaných listy do atmosféry (Guenther a kol., 1995) a zvyšuje toleranci rostlin vůči teplu (Sharkey a Singaas, 1995). Teplota je hlavním faktorem ovlivňujícím rychlost emisí BVOC (Velikova a kol., 2009). Ochranné mechanismy, kterými izopren chrání rostliny ve stresových podmínkách, nejsou známy (Sharkey a Singaas, 1995). Množství BVOCs je ve velkých městech zanedbatelné ve srovnání s antropogenními zdroji (Carter, 1994). Platan emituje izopren významně, lípa jen v zanedbatelném množství (Kulmala, 2003).

### **2.1.1 Stresové faktory**

Přírodní stresové faktory (nízká nebo vysoká teplota, vysoká intenzita světla, zasolené půdy) se často ve svých účincích překrývají s antropogenními stresovými faktory jako jsou látky znečišťující prostředí (SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>) (Lichtenthaler a Rinderle, 1988).

#### **2.1.1.1 Teplota**

Elektromagnetické spektrum přijímané listy se neliší v intenzitě ani tvaru spektra, pokud je přijímáno krátkou dobu při pokojové teplotě (20 – 25 °C) nebo při nižší teplotě (5 – 10 °C). To platí i pro teplotu 30 – 40 °C, pokud je rostlina v této teplotě jen krátkodobě. Jestliže se rostlina v takto vysokých teplotách vyskytuje několik hodin, mohou se projevit příznaky nedostatku vody a odrazit se to na průběhu fluorescence chlorofylu. Situace se výrazně mění, jestliže je rostlina pěstována delší dobu při nízkých (10 °C) či vysokých (38 °C) teplotách. Obsah chlorofylu i funkce fotosyntetického aparátu jsou při těchto teplotách zcela změněny (Lichtenthaler a Rinderle, 1988). Intenzita fluorescence je ovlivněna teplotou, která je výrazně nižší či vyšší než pokojová teplota (Krause a Weis, 1984).

Při teplotě nad 40 °C dochází u rostlin ke změnám vlastností buněčných membrán i bílkovin. Nejrychleji zasaženými jsou tylakoidní membrány

v chloroplastech, kdy lze počínající stres pozorovat na porušení fotosystému II, které zjistíme měřením fluorescence chlorofylu v živém organismu. Při teplotě, která se zvyšuje, dochází nejdříve k zániku individuálních částí fotosystému a až o něco déle ke změnám struktury proteinů (Procházka a kol., 1998).

Vysoká teplota ovlivňuje tvorbu stresových proteinů, které způsobují zvýšení termostability rostlin. Část stresových proteinů je přenesena do chloroplastů, kde brání PS II (Bláha a kol., 2003).

Teplota také ovlivňuje množství látek znečišťujících ovzduší. Např. Akbari a kol. (2001) uvedl, že teplota může být jedním z faktorů kontrolujících koncentraci troposférického ozonu. Pokud byla teplota do 22 °C, koncentrace ozonu se pohybovala kolem standartních hodnot. Avšak pokud teplota přesáhla 35 °C, všechny dny byly považovány za smogy.

#### **2.1.1.2 Voda**

Listy jsou velmi citlivým orgánem, který je ovlivňován podmínkami prostředí. Reagují na prostředí anatomickými změnami a funkcí fotosyntetického aparátu. Obzvláště nedostatek vody má za následek změny fyziologických vlastností listů (Lee a kol., 1990). Listy minimalizují ztrátu vody a vodních par zavíráním průduchů (Ryan a Yoder, 1997). Úbytek vody má na fotosyntézu přímý potlačující účinek. Výrazným důsledkem úbytku vody je zavření průduchů, kdy zároveň dochází k přerušení příjmu oxidu uhličitého. Rychlost fotosyntézy se zvyšuje s příjmem vody (Larcher, 1988). Při delším suchu půda vysychá a vzniká tak deficit vody, který vede k poškození funkce chloroplastů, která je detekována fluorescencí chlorofylu (Lichtenthaler a Rinderle, 1988).

Voda je transportována do listů a v korunách stromů může klesat vlivem gravitace (Chunxia a kol., 2008). Podle Ryan a Yoder (1997) vodní stres způsobený zvýšenou gravitací je hlavním důvodem pro změnu anatomické stavby a fyziologických vlastností listu.

#### **2.1.1.3 Oxid siřičitý SO<sub>2</sub>**

Oxid siřičitý se dostává do ovzduší hlavně spalováním uhlí se značným podílem síry. Do listů vstupuje zejména otevřenými průduchy. Poté, co oxid siřičitý projde

buněčnou stěnou, mění se na siřičitanové anionty, které vcházejí do chloroplastů (Procházka a kol., 1998).

Podle Darralla (1989) je situace pronikání  $\text{SO}_2$  přes buněčnou stěnu složitější. Při nízkých koncentracích oxidu siřičitého dochází k většímu otevření průduchů a naopak při velké koncentraci oxidu siřičitého se průduchy uzavírají.

Bylo zjištěno, že rostliny, které jsou vystavené působení  $\text{SO}_2$ , část atmosférického  $\text{SO}_2$  pohlcují (Materna, 1966). Četné studie prokázaly, že sirovodík ( $\text{H}_2\text{S}$ ) je převládající sloučeninou síry, která je uvolněna z  $\text{SO}_2$ . Toto uvolňování sirovodíku je jev vyskytující se u všech vyšších rostlin. Průzkumy metabolických cest vzniku  $\text{H}_2\text{S}$  ukázaly, že kromě cysteinu mohou být podkladem pro syntézu  $\text{H}_2\text{S}$  sírany nebo siřičitany. Vzhledem k tomu, že přeměna síranu a siřičitanu na  $\text{H}_2\text{S}$  je závislá na světle, předpokládá se, že probíhá v chloroplastech (Rennenberg, 1991).

Bez ohledu na to, jestli  $\text{SO}_2$  vstupuje přímo přes plasmalemu nebo je nejprve metabolizován na síran a aktivně transportován do cytoplazmy, může být částečně v chloroplastu převeden na  $\text{H}_2\text{S}$  a emitován do ovzduší. Vznikem sirovodíku z  $\text{SO}_2$  a jeho emitováním se rostliny zbavují přebytečné síry a zároveň si kontrolují hladinu této látky (Rennenberg, 1991). Sirovodík je zřejmě součástí cyklu síry a je důležitou součástí pro udržení homeostatické koncentrace cysteinu v rostlinných buňkách (Rennenberg a kol., 1982). Cyklus síry umožňuje rostlinným buňkám udržovat cystein ve vhodných koncentracích a to tím, že vypouští přebytečný  $\text{H}_2\text{S}$  do atmosféry. Tato strategie rostlin je závislá na dostatečném koncentračním gradientu pro  $\text{H}_2\text{S}$  mezi rostlinou a atmosférou a nelze ji využít, pokud je v atmosféře velké množství  $\text{H}_2\text{S}$  (Rennenberg, 1984).

Nedávné studie ukazují, že působení  $\text{SO}_2$  významně ovlivňuje procesy v kořenovém systému (Herschbach a Rennenberg, 1991).

Při určitém množství siřičitanových iontů dochází k zamezení aktivity karboxylačního enzymu Rubisco a tím je zabráněno průběhu druhotných reakcí fotosyntézy (Procházka a kol., 1998). Největší porušení vzniká na tylakoidní membráně a v chloroplastu, kdy se zvětšují tyto membrány a začíná se pozměňovat podoba chloroplastů. V poslední fázi dojde ke snížení chlorofylu. Anatomické změny chloroplastů vedou ke zmenšování účinnosti fotosyntézy (Bláha a kol., 2003).

Díky měření bylo shledáno, že prvotní znaky intoxikace při dlouhém působení byly už při koncentraci 0,05 ppm  $\text{SO}_2$ . Zřetelné porušení rostlin nastává při koncentraci 0,15 ppm až 0,2 ppm  $\text{SO}_2$ . V místech, kde převažuje průmyslová výroba, stoupá

koncentrace  $\text{SO}_2$  až na 1 ppm. V těchto podmínkách dochází k velké inhibici růstu a celkovému odumření rostlin. U těch, které jsou pod vlivem oxidu siřičitého, často dojde i k poklesu odolnosti k nízkým zimním teplotám a k letnímu suchu (Slavíková, 1986).

I přes výrazné snížení emisí je oxid siřičitý stále důležitou atmosférickou sloučeninou, která proniká do vegetace (Fowler, 1985).

#### **2.1.1.4 Oxidy dusíku $\text{NO}_x$**

Oxidy dusíku, zejména  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$  jsou látky toxické a znečišťující ovzduší. Oxid dusnatý ( $\text{NO}$ ) se v atmosféře oxiduje na oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ ), který při vysokých koncentracích v blízkosti průduchů zvyšuje odpor k příjmu  $\text{CO}_2$  (Srivastava a kol., 1975).

Oxidy dusíku vznikají v důsledku spalování fosilních paliv a mohou tvořit pozemní ozon, který způsobuje dýchací potíže u lidí, předčasná úmrtí a u rostlin snížené výnosy plodin (US EPA, 1998). Vlivem oxidů dusíku dochází k poškození, které je ihned zřetelné. Jedná se hlavně o úbytek listové zeleně, protože dochází k odbarvení listů a k odumírání orgánů nebo celých rostlin (Bláha a kol., 2003).

#### **2.1.1.5 Oxid uhličitý $\text{CO}_2$**

Při spalování fosilních paliv dochází ke zvyšování teploty vzduchu, kdy se jako vedlejší produkt uvolňuje  $\text{CO}_2$ . Ten je jedním z atmosférických plynů, který je jednou z příčin vedoucí ke skleníkovému efektu.  $\text{CO}_2$  pohlcuje zemskou energii, aby neunikla do vesmíru a tím se zvyšuje teplota vzduchu. (IPCC, 2007). Zesílení koncentrace  $\text{CO}_2$  v ovzduší vede ke zrychlení karboxylace a zároveň indukuje vyšší potlačení dýchání a tím dochází k nárůstu rychlosti fotosyntézy (Kincl a Krpeš, 2006).

Koncentrace oxidu uhličitého ve městě se výrazně liší od koncentrace v přírodních podmínkách (Gratani a Varone, 2005). Lidskou činností a automobilovou dopravou se do ovzduší ve městech dostane až 80 % oxidu uhličitého (Koerner a Klopatek, 2002).

Podle Idso (1988) v důsledku spalování fosilních paliv by mohlo během příštích 100 let dojít k nárůstu  $\text{CO}_2$  v atmosféře na dvojnásobek.

Prostřednictvím zelených povrchů dochází ke snížení energetické potřeby jednotlivých objektů ve městech a zmírňují městské teplo (Rowe, 2011). Stromy

přispívají ke snížení oxidu uhličitého v závislosti na svém habitu (Gratani a Varone, 2005).

#### **2.1.1.6 Ozon O<sub>3</sub>**

Ozon je toxický plyn stejně jako SO<sub>2</sub> a hodnoty koncentrací těchto plynů bývají ve spodních vrstvách atmosféry srovnatelné. Fotolýzou oxidů dusíku vzniká větší podíl ozonu. Velké množství ozonu vzniká ve vrchních vrstvách znečištěného ovzduší díky rozpadu oxidů dusíku vlivem ultrafialového záření. Koncentrace O<sub>3</sub> v ovzduší má často četné denní odchylky s vrcholem v odpoledních hodinách. Ozon se do rostliny dostává díky listům přes průduchy, kde se v mezibuněčných prostorách ve styku s navlhými buněčnými stěnami okamžitě rozkládá. Vysoké koncentrace ozonu v buňkách způsobují porušení buněčných struktur. Často bývají porušeny organely, hlavně tedy chloroplasty. Na postižených listech jsou malé stopy, nakonec listy žloutnou a hynou. (Procházka a kol., 1998)

Nejčastěji pozorovanými změnami vyvolanými ozonem je zničení chlorofylu (Guderian a kol., 1985). Chlorofyl *b* je nejcitlivější, chlorofyl *a* a karotenoidy jsou méně citlivé na O<sub>3</sub> (Runeckles a Chevone, 1992). Stres vyvolaný ozonem způsobuje viditelná poškození rostlin. Dlouhodobým a trvalým působením ozonu dochází ke snížení fotosyntézy (Dizengremel, 2001). Zvýšené hodnoty ozonu byly zaznamenány především během slunečných dnů v závislosti na automobilové dopravě (Stockwell a kol., 1997). Bylo prokázáno, že sucho chrání strom proti poškození ozonem (Tingey a Hogsett, 1985).

Troposférický ozon je jedním z nejvíce znečišťujících látek ovzduší. Způsobuje vážné zdravotní komplikace a poškození vegetace (EEA, 2011). Po krátkodobém vystavení stromů vysokým koncentracím ozonu může dojít k vážným poškozením listů jako je buněčná smrt, což vede k rychlé chlorotické skvrnitosti. Chronická dlouhodobá expozice může mít vliv na fyziologické procesy jako je předčasné stárnutí. Listnaté stromy jsou velmi citlivé na působení ozonu (Langebartels a kol., 1997).

#### **2.1.1.7 Prachové částice**

Prachové částice (PM) jsou tvořeny pevnou látkou, která se skládá z půdy, kovové složky a z přírodního biologického materiálu (Ferreira-Baptista a DeMiguel, 2005). PM pochází z přírodních (např. vulkanismus) nebo antropogenních zdrojů

(např. spalování fosilních paliv, automobilová doprava) (Gorbachevskaya a kol., 2007). Přesto hlavním zdrojem prachových částic ve městech je silniční doprava (Bucko a kol., 2010). Tyto částice pokrývají listovou plochu a snižují absorpci CO<sub>2</sub> a sluneční záření (Yunus a Iqbal, 1996).

Částice prachu se ukládají na listech a tím dochází k ucpání průduchů. Tímto je difuzi plynů z listů a do listů zamezeno a veškeré pochody rostlin, které pro své fungování potřebují vyměňování plynů (např. fotosyntéza, dýchání), se zmenšují. Když dojde ke zvlhčení prachových částic na rostlině, dojde k jejich částečnému rozpuštění a prostupování do pletiv, kde působí velmi toxicky. Mohou poškozovat chlorofyl a díky tomu omezovat fotosyntézu (Slavíková, 1986)

PM jsou ze všech znečišťujících látek nejzávažnější hrozbou pro lidské zdraví, které se lidé snaží snižovat tím, že vysazují rostliny v městských oblastech (Weber a kol., 2014). Silniční vegetace se skládá hlavně ze stromů, které imobilizují prachové částice (Litschke a Kuttler, 2008). Stromy byly ve městech propagovány jako biologické filtry vzhledem k jejich velkým listovým plochám (Beckett a kol., 1998).

Částice jsou klasifikovány podle velikosti, a to na částice nejmenší ( $\leq 0,1 \mu\text{m}$ ), jemné (0,1- 2,5  $\mu\text{m}$ ), částice hrubé (2,5- 10  $\mu\text{m}$ ) a na částice velmi hrubé ( $> 10 \mu\text{m}$ ). PM v ovzduší je obvykle označeno jako PM<sub>2,5</sub> a PM<sub>10</sub> (EPA, 2009).

Stromy na frekventovaných místech ve městech jsou vystaveny stresorům, které mají za následek pokles vitality stromů a následně poškození funkce metabolismu (Pauleit, 2003). V městských oblastech ale díky stromům dochází ke snižování znečišťujících látek v ovzduší (Nowak, 2006). Různé druhy rostlin mohou měnit svoji strukturu listů podle kvality životního prostředí. Tyto změny ve vlastnostech listů mohou být dále použity ke stanovení kvality daného stanoviště rostliny (Falla a kol., 2000; Honour a kol., 2009).

## **2.2. Platan javorolistý (*Platanus acerifolia*)**

Platan javorolistý (*P. acerifolia*) je mohutný listnatý strom, který dorůstá do výšky kolem 30 m. Koruna je rozlehlá a u starších stromů objemná. Borka bývá světle hnědá, která se odlupuje v rozsáhlých plátech, po kterých na kmenech zůstávají žlutavé stopy. Listy jsou 15- 20 cm dlouhé, střídavé a dlanitě se člení v různě velké laloky. Jejich květy jsou kulovité hlávky (Kremer, 1984).

*P. acerifolia* se ve střední Evropě vyskytuje hlavně v alejích a parcích a také lemují kraje silnic ve městech. Snáší stresované prostředí bezesporu lépe než ostatní dřeviny, a proto se zasazuje na frekventovaných místech ve městech. Odolává prostředím, která jsou znečištěná výfukovými plyny a prachem (Kremer, 1984).

### **2.3. Lípa srdčitá (*Tilia cordata*)**

Lípa srdčitá (*Tilia cordata*) je listnatý opadavý strom, který dorůstá výšky až 30 m. Její koruna je nepravidelného tvaru. Borka je u mladších stromů jemná a do šeda, naopak u starších zástupců je šedohnědá s rovně probíhajícími rýhami. *Tilia cordata* má listy srdčité, střídavé, jednoduché a s tenkou krátkou špičkou. Listové kraje bývají nahoru ohnuté a pilovité. U starších stromů se větve sklánějí k zemi (Kremer, 1984).

*Tilia cordata* je rozšířená především v Evropě, a to hlavně v oblasti středohoří. Bývá často zasazována v parcích nebo ulicích (Kremer, 1984). Podle Zadeh a kol. (2013) je pravděpodobné, že je lípa citlivá na kvalitu stanoviště.

### **2.4. Fotosyntéza**

Zásadním fyziologickým dějem, vypovídajícím o aktuálním stavu rostliny pod vlivem okolního prostředí, je fotosyntéza (Lichtenthaler a Rinderle, 1988). Fotosyntéza je sled biochemických pochodů, kdy  $\text{CO}_2$  reaguje s atomy vodíku a tvoří se cukr glukóza. Při rozštěpení molekuly vody vznikají elektrony a vodíkové protony, kdy elektrony nahrazují odešlé elektrony z molekul chlorofylu. Také dochází ke vzniku kyslíku, který odchází do ovzduší (Závodská, 2006). Při fotosyntéze dochází k vyměňování minerálních látek, oxidu uhličitého, kyslíku, vody a energie s okolím. Protože pro rostliny je hlavním zdrojem energie záření, patří mezi autotrofní organismy (Procházka a kol., 1998). Energie záření je během fotosyntézy pohlcována a transformována na chemickou. Obsahuje reakce fotochemické, které vyžadují světlo, reakce enzymatické (temnostní reakce) a difúzi, kdy dochází mezi vzduchem a chloroplasty k přechodu  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$  (Larcher, 1988).

Místem, kde dochází k fotosyntéze, jsou chloroplasty, což jsou organely, které se nacházejí jen u rostlin a řas a jsou součástí plastidů. Chloroplasty nelze najít v každém orgánu rostliny, ale jen v zelených součástích rostliny, jako jsou stonky a listy. Chloroplasty jsou čočkovitého vzhledu a mají dvě membrány. V každém chloroplastu



se nacházejí ploché váčky, které se označují jako tylakoidy. Ty na sebe nasedají a tvoří grana. Uvnitř chloroplastů mezi tylakoidy a grany se ještě nachází polotekutá hmota, která se uvádí jako stroma. V chloroplastech jsou uloženy pigmenty, které jsou schopné pohlcovat energii viditelného spektra (Závodská, 2006).

Fotosyntéza probíhá ve dvou fázích, které na sebe navazují a jsou od sebe oddělené. Jedna se nazývá světelná fáze a druhá je temnostní fáze neboli Calvinův cyklus. V tylakoidech chloroplastů dochází k první fázi, a to světelné reakci. Světelná fáze je děj, který se zakládá na přeměně energie světelné na energii chemickou, respektive přeměně energie fotonů slunečního záření na energii chemickou, kdy vznikají makroergické sloučeniny jako je ATP a NADPH (Kutík a Beneš, 1991). Nejdříve ale dojde ke změně energie záření na energii excitovaných elektronů, která se později užívá na vznik ATP a NADPH (Vodrážka, 2002). Fáze, která probíhá na světle je realizována pigmentovými soustavami, které se nazývají fotosystém I a fotosystém II. Fotosystém II (PS II) pohlcuje nejvíce světlo o vlnových délkách 680 nm, značí se P 680. Fotosystém I (PS I) vstřebává světlo o vlnové délce 700 nm, tudíž P 700. Tyto fotosystémy mají ve své struktuře komplex jádra a sběrné systémy světla. Ty jsou vytvářeny z lišících se pigmento-bílkovinných komplexů. Oba fotosystémy obsahují molekuly chlorofylu *a* a chlorofylu *b* (Procházka a kol., 1998) a jsou doplněné pigmenty – karotenoidy někdy fykobiliny (Larcher, 1988).

Záření, které dopadne na chloroplasty, je absorbováno chlorofyl-proteinovými světlosběrnými komplexy. Excitační energie je soustředěna do reakčního centra fotosystému II, a to způsobí uvolnění elektronu, který je posunut na vnější stranu membrány, kde redukuje akceptor Q (quinone-chinon), který je zhášedčem fluorescence. Elektron chybějící ve fotosystému II je doplněn z molekul vody (fotolýza vody). Z akceptoru Q putují elektrony přes elektron-transportní řetězec do reakčního centra fotosystému I. Z fotosystému I pak přejdou elektrony na následující akceptor, odkud cestují elektrony po potenciálním spádu přes přenašeče na posledního příjemce elektronů (Kutík a Beneš, 1991).

Temnostní fáze je složena z řady enzymových reakcí, které využívají redukční činidlo a energii ze světelné fáze, kde byly vyrobeny, k redukci oxidu uhličitého a tvorbě sacharidu. V této fázi dochází k fixaci CO<sub>2</sub> na ribulosa-1,5-bisfosfát, kdy se vzniklá sloučenina rozpadá na dvě tříuhlíkaté molekuly. Ty jsou díky ATP a NADPH přeměněny na 3-fosfoglyceraldehyd, který se použije na vznik glukózy (Kutík a Beneš,

1991). Při fixaci CO<sub>2</sub> je důležitou látkou enzym Rubisco, který váže CO<sub>2</sub> na ribulózu-1,5-bisfosfát. Tento enzym je aktivní jen na světle (Procházka a kol., 1998).

Fotosyntéza probíhá už při malém množství světelného záření. Rostliny se adaptovaly na odlišnou světelnou intenzitu. S adaptací na osvětlení se u různých druhů rostlin vyskytují rozdíly v obsahu chlorofylů. Menší intenzitě světla jsou přizpůsobené rostliny, jejichž listy obsahují hodně žlutých a zelených pigmentů a to díky vyššímu obsahu xantofylu a chlorofylu *b*. Listy přizpůsobené větší intenzitě světla se projevují poklesem obsahu karotenoidů. Mezi světломilné rostliny patří *Platanus* a mezi stínomilné patří *Tilia*, která využívá hlavně modrofialové světlo, díky němuž se adaptují podmínkám prostředí (Šebánek a kol., 1983).

Jako ukazatele aktivity fotosyntézy se používají rozdíly v množství a složení fotosyntetických pigmentů a hodnoty fluorescence chlorofylu (Lichtenthaler a kol., 2007). Fluorescence chlorofylu poskytuje přímou diagnostiku funkčního stavu vegetace a tedy i fotosyntézy. Umožňuje neinvazivní detekci fyziologického stavu rostlin v různě stresovaném prostředí (Wittenberghe a kol., 2013).

Pigmenty jsou přímo zapojeny do procesu fotosyntézy. Koncentrace chlorofylů mají velký význam pro růst a vývoj rostlin. Změny pigmentů v listu mohou být detekovány pomocí absorpčních vlastností záření (Carter a Knapp, 2001). Chlorofyl je nejhojnější pigment na zemi a je klíčovou složkou fotosyntézy potřebné pro absorpci slunečního záření (Hörtensteiner a Kräutler, 2011).

### 2.4.1 Fotosyntetické pigmenty

Mezi fotosyntetické pigmenty patří chlorofyly, fykobiliny a karotenoidy. Všechny pigmenty jsou uloženy v chloroplastech (Procházka a kol., 1998). Nejvýznamnějšími barvivy, která existují v rostlinách, jsou zelená barviva chloroplastů. Existuje chlorofyl *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, baktéroviridin a bakteriochlorofyl. Nejdůležitějšími jsou chlorofyl *a* a *b*. Chlorofyl *a* má modrozelenou barvu a chlorofyl *b* má žlutozelenou barvu. Součástí chlorofylu je hořčík, který je navázán ve středu molekuly. Chlorofylu *a* je v rostlině více a má větší aktivitu než chlorofyl *b*. Oba pigmenty se při fotosyntéze stále inovují (Šebánek a kol., 1983).

Do skupiny karotenoidů se zahrnují karoteny a xantofyly. Jejich barva je červená, žlutá a někdy až červenofialová. Systém konjugovaných vazeb zapříčiňuje jejich barevnou rozmanitost. Jsou tvořeny 40 atomy uhlíku složených z 8 kondenzovaných isoprenových dílů. Mezi nejvíce se objevované karotenoidy patří  $\beta$ -karoten, zeaxantin, violaxantin, neoxantin a lutein. Karotenoidy jsou pouze pomocné pigmenty, které předávají energii chlorofylu *a*, čímž je chráněn fotosyntetický aparát (Leblová a Sofrová, 1982).

Fykobiliny se vyskytují u ruduch, sinic a skrytěnek a jsou pouze pomocnými barvivy. Ve vodním prostředí jsou dobře rozpustné a tvoří biliproteiny. Jsou spojeny pevnou vazbou s bílkovinou. Fykobiliny zahrnují fykoerytrin a fykocyanin. Energie, kterou absorbovaly je opět transportována na chlorofyl *a* (Procházka a kol., 1998).

### 3. Metodika a materiál

Pro práci byly vybrány dva druhy stromů- *Platanus acerifolia* a *Tilia cordata*. Oba dva se nacházely na stejné lokalitě a přibližně ve stejné vzdálenosti od komunikace. Místo, kde se tyto stromy vyskytují, je Jiráskovo nábřeží v Českých Budějovicích (viz Příloha č. 2). Blízko této lokality se nachází meteorologická stanice, která je důležitým informačním centrem aktuálního stavu ovzduší a počasí pro danou oblast. V den, kdy se měřila fluorescence, byla také zaznamenána meteorologická data ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_{10}$  – Příloha č. 1). Pro měření byly vybírány listy z obou druhů stromů, které byly zdravé a dobře osluněné. Měření bylo prováděno od května do září v roce 2013, vždy dva dny jdoucí po sobě, aby se výsledky z měření daly porovnat v rámci stejných podmínek, za kterých se měřilo. Jeden den probíhalo měření fluorescence a druhý den měření fotosyntetických pigmentů, které se uskutečnilo v laboratoři. Cílem bylo zjistit, jak list, později tedy celý strom, zvládá stres, který na něj působí.

#### 3.1. Fluorescenční měření

Z obou druhů byly vybrány 3 stromy, celkem bylo tedy 6 stromů a z každého stromu bylo měřeno 5 listů. Listy byly vybírány tak, aby všechny byly na pohled zdravé, stejně vysoko a vždy na osluněné straně stromu. Měření probíhalo jen za slunečného dne a vždy v poledních hodinách (cca 11 – 15 hodin). Fluorescence byla měřena pomocí kapesního fluorometru Fluorpen (PSI, CZ). Po každém fluorescenčním měření byly zaznamenány hodnoty z meteorologické stanice pro daný den (dostupné online, ČHMÚ).

Listy byly nejdříve na 15 minut zastíněny černým papírem, který byl připevněn na listech kolíky na prádlo. Po 15 minutách byl papír z listu sundán a na list byl nasazen leaf clip od fluorpenu, kterým se fluorescence měřila. Po nasazení leaf clipu na list, se počkalo asi 1 minutu a hned poté proběhlo měření hodnoty QY. Tato hodnota byla zaznamenána ke každému listu do tabulky. Po změření všech listů byly změřeny tytéž listy, které už nebyly adaptované na tmu – QY'. Opět byly získané hodnoty zapsány do tabulky.

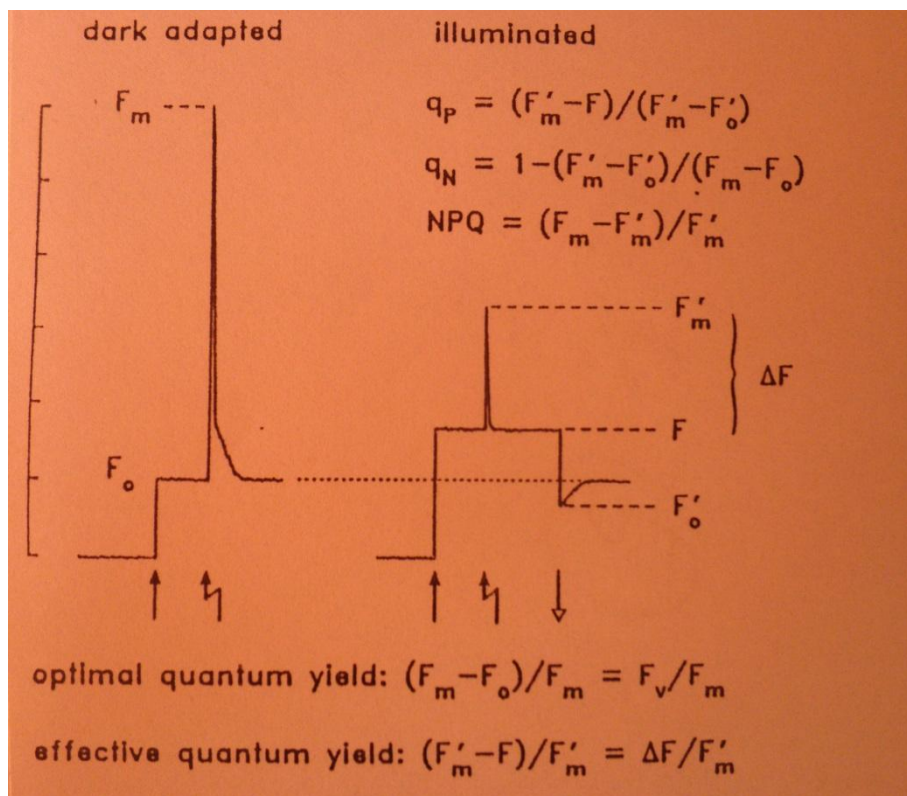
### 3.1.1 Princip fluorescence

Rostliny se přizpůsobují světelnému prostředí, kterému byly vystavovány v průběhu jejich vývoje. Přizpůsobení se týká růstu, listů a hlavně chloroplastů a jejich strukturních uspořádání a složení fotosyntetických pigmentů (Boardman, 1977; Meier a Lichtenthaler, 1981). Ve velkém množství případů má list, který se vyvinul v plném slunci, vyšší fotosyntetickou aktivitu, protože přijímal větší množství záření než list, který se vyvinul ve stínu (Lichtenthaler a Babani 2000; Sarijeva a kol., 2007). Rostliny emitují slabé červené záření nazývané fluorescence chlorofylu. Je součástí fotosyntetických procesů a vzniká při absorbování světla listem (Lichtenthaler a Rinderle, 1988).

Fluorescence chlorofylu je choulostivý indikátor všech parametrů, který nějakým způsobem působí na reakce fotosyntézy. Fluorescence indikuje účinky hlavně na úrovni antény PS II a reakčních center a nepřímé účinky v metabolismu fotosyntézy. Stres však nemusí směřovat k trvalému poklesu fotosyntetické aktivity, protože fungují mechanismy, které mají sklon k vyrovnání omezení způsobené stresem. Předpokládá se, že působení stresu a indukčních usměrňujících reakcí se nějakým postupem zobrazí ve fluorescenci. Proto se fluorescence využívá pro diagnostiku fyziologie rostlin, které podléhají stresu (Schreiber a Bilger, 1992).

Jestliže zatemníme fotosynteticky aktivní chloroplasty na 20 minut, koordinační fluorescence PS I a PS II zanikne. Reakční centrum fotosystému PS II bude otevřené, jestliže jsou primární elektronové akceptory zcela oxidovány. Pokud je fotosyntéza opět uvedena v činnost ozáření, pak jsou oba fotosystémy synchronizovány, což podporuje přímý elektronový transport prostřednictvím obou systémů od vody k NADP (Lichtenthaler, 1988).

Fluorescence se dělí na fluorescenci pozadí a fluorescenci variabilní nacházející se pouze ve fotosynteticky aktivních tkáních (Lichtenthaler a Rinderle, 1988). Jednoelektronový akceptor, přemísťující elektron na dvouelektronový akceptor, je na světle redukován. Oba akceptory a plastochinon jsou redukovány při nejvyšší fluorescenci. Na tylakoidní membráně dochází k nárůstu pH gradientu a fluorescence je snížena během několika následujících minut do vyvážené hladiny (zhášení). Zmenšení fluorescence (zhášení) se skládá ze dvou částí- fotochemické (qP) a nefotochemické (qN) zhášení (Schreiber a kol., 1988).



**Obr. 1:** Fluorescenční indukční křivka (Schreiber a Bilger, 1992)

$F_0$ - fluorescence vzorku adaptovaného na tmu

$F_m$ - maximální fluorescence adaptovaného vzorku na tmu po vyslání saturačního pulsu

$F'_m$ - maximální fluorescence vzorku na světle

$F'_0$ - minimální výtěžek fluorescence po vypnutí záření

Změřením fluorescence chlorofylu byla zjištěna hodnota QY, což je maximální fotochemická efektivita fotochemie fotosystému II, která se dá vyjádřit vztahem  $F_v / F_m$ , kde  $F_v = F_m - F_0 / F_m$  (Kitajima a Butler, 1975; Krause a Weis, 1991).

Výnos fluorescence je sledován slabým měřicím paprskem, který sám o sobě nevyvolá žádné zvýšení fluorescence. Úroveň fluorescence  $F_m$  a  $F'_m$  jsou vyvolané úplným snížením  $q_p$  se saturačním pulsem 0,5 – 1 s (Obr. 1). Optimální kvantový výtěžek  $F_v / F_m$  se získá pomocí vzorku adaptovaného na tmu. Pokles této hodnoty udává, že rostlina je stresována. Fotochemické zhášení ( $q_p$ ) je ekvivalentem energie absorbované v PS II. Efektivní kvantový výtěžek, který se měří v průběhu osvětlení, je dán sníženým množstvím otevřených center a zachycení excitace v otevřených centrech (Genty a kol., 1989).

Právě pro inverzní vztah mezi fluorescencí chlorofylu a fotosyntézou můžeme fluorescenci chlorofylu listů použít ke stanovení míry, v jaké výši je vegetace

stresována a jestli je vůbec stresována. Fluorescence poskytuje první rychlé prověření, zdali na rostlinu působí stres. Ve fungujícím fotosyntetickém aparátu se fluorescence chlorofylu pohybuje mezi 2 až 5 % absorbované světelné energie. Pokud je proces fotosyntézy snížen v důsledku působení stresu životního prostředí, dojde ke zvýšení fluorescence chlorofylu (Lichtenthaler a Rinderle, 1988).

V mé práci byly zjišťovány parametry QY a QY', kdy  $QY = F_v / F_m$  byl měřen po adaptaci listů ve tmě a  $QY' = F_v' / F_m'$  byl měřen po adaptaci listů na světle.

### 3.2. Stanovení množství fotosyntetických pigmentů

Z každého stromu bylo odebráno po 4 listech, celkem jich tedy bylo 24. Jednotlivé listy byly vybírány tak, aby všechny měly přibližně stejné podmínky. Každý list byl zabalen do navlhčeného filtračního papíru a dán do termotašky s ledem. Nejrychlejším způsobem byly listy dopraveny do laboratoře, kde se pokračovalo ve stanovení fotosyntetických pigmentů.

Listy, se kterými se nepracovalo, byly uloženy v chladu, aby byly co nejdéle po utrnutí zachovány jejich struktury. Z jednotlivých listů byly korkovrtem vyříznuty terčíky (10), vždy mimo hlavní žilky na listu, a byla stanovena listová plocha. Poté byly v 80% acetonu extrahovány fotosyntetické pigmenty podle metody Lichtenthalera a Wellburna (1983). Stanovení fotosyntetických pigmentů bylo prováděno spektrofotometricky (spektrofotometr UV- 1202, Shimadzu, Japonsko).

Obsah fotosyntetických pigmentů byl stanoven podle rovnic:

$$\text{Chlorophyll a } (\mu\text{g/ ml}) = 12,21 (A_{663}) - 2,81 (A_{646})$$

$$\text{Chlorophyll b } (\mu\text{g/ ml}) = 20,13 (A_{646}) - 5,03 (A_{663})$$

$$\text{Carotenoids } (\mu\text{g/ ml}) = (1000A_{470} - 3,27 [\text{chl a}] - 104 [\text{chl b}]) / 227$$

(Lichtenthaler a Wellburn, 1983)



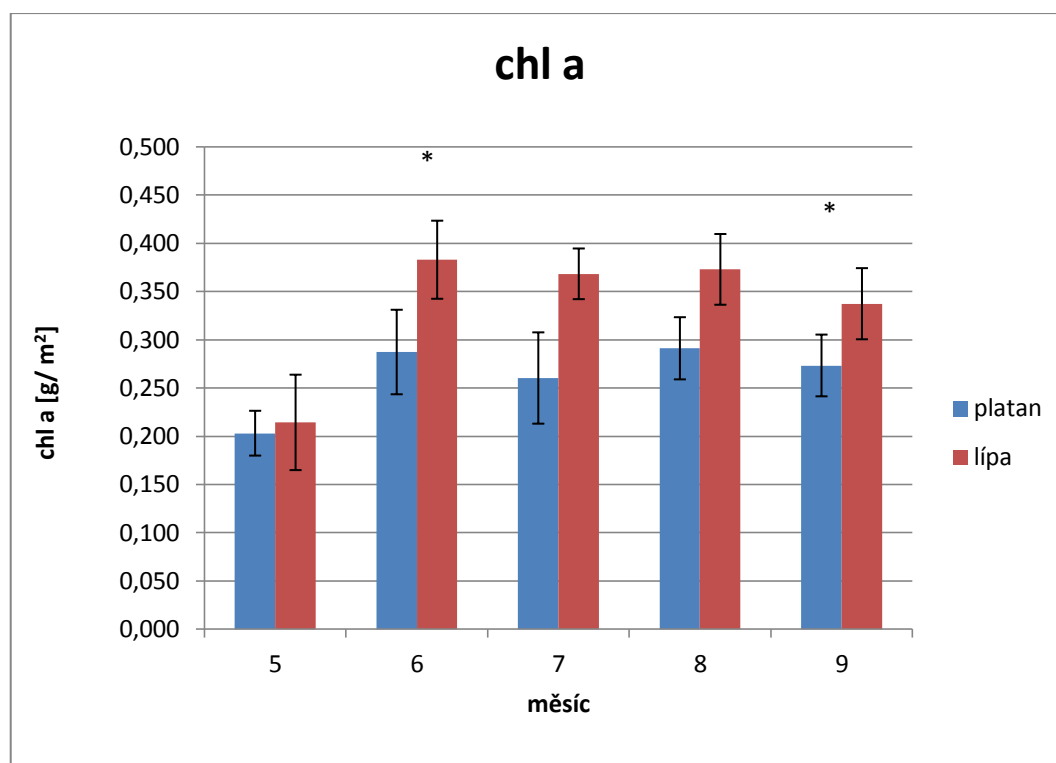
### **3.3. Zpracování dat**

V této práci byly mezi sebou porovnávány výsledné průměrné hodnoty měřených parametrů u 2 druhů stromů *Platanus acerifolia* a *Tilia cordata*. Výsledná data byla zadána do grafů a porovnána dvouvýběrovým t-testem s nerovností rozptylu aplikací Microsoft Excel 2010.

## 4. Výsledky

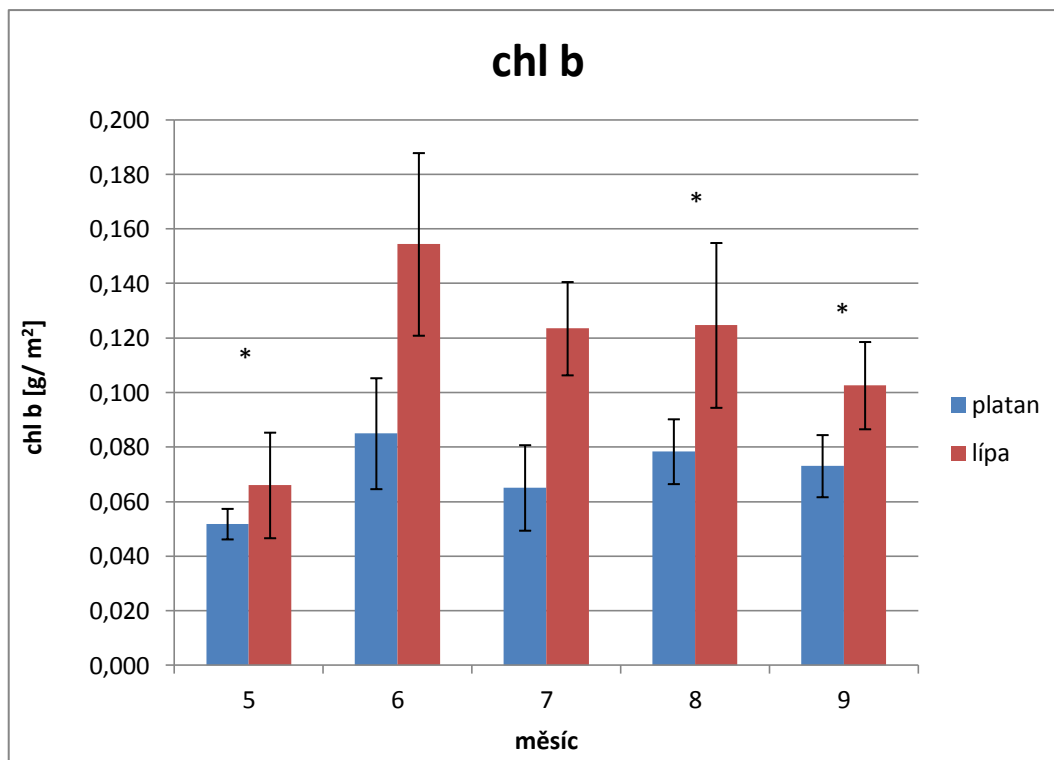
### 4.1. Obsah chlorofylů

Byly změřeny obsahy chlorofylů v listech z jednotlivých stromů (lípa a platan). Měření proběhlo od května do září (5, 6, 7, 8, 9) vždy jeden den v měsíci. Průměrné hodnoty obsahu chlorofylů byly zaznamenány do grafů a statisticky vyhodnoceny. Rozdíly mezi stromy byly porovnávány pomocí Studentova t-testu na hladině významnosti 0,05 (Obr. 2 – Obr. 7).



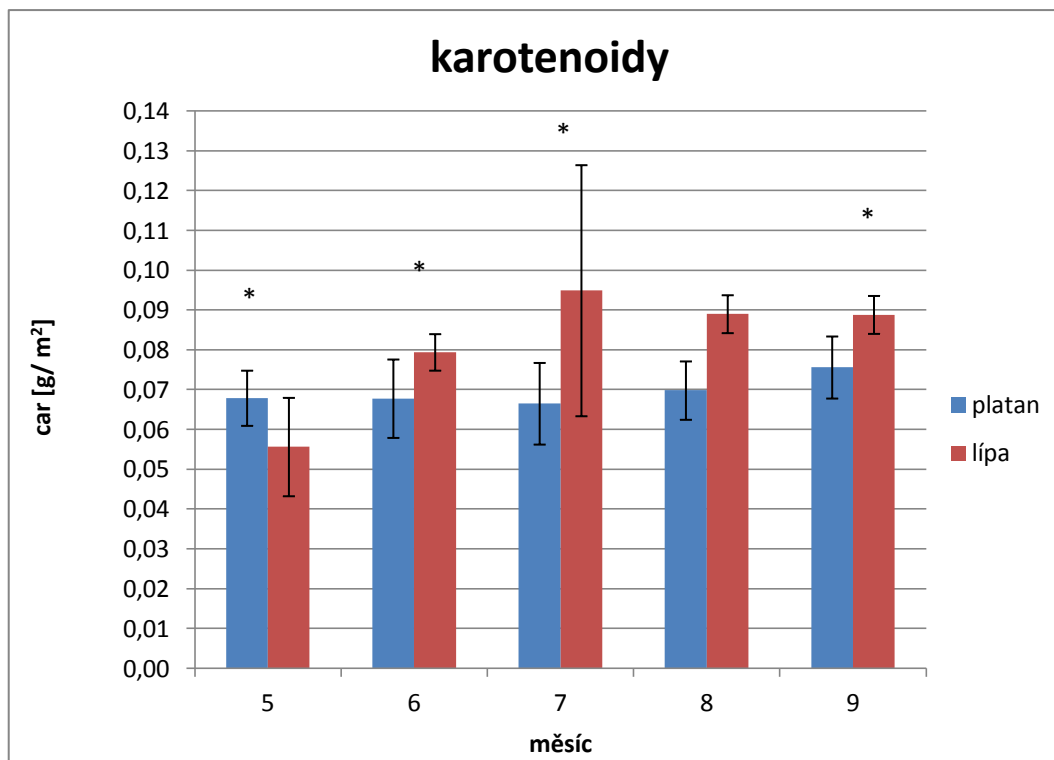
**Obr. 2:** Průměrné hodnoty obsahu chlorofylu *a* v průběhu vegetační sezóny u listů lípy a platanu.  $n=12$   
\* = statisticky významný rozdíl mezi oběma stromy (Studentův  $t$  - test  $\alpha=0,05$ )

Obsah chlorofylu *a* u lípy a platanu byl měřen během vegetační sezóny (Obr. 2). V květnu se lípa i platan svými průměrnými hodnotami chlorofylu *a* nelišily. V červnu došlo k nárůstu obsahu chlorofylu *a* u lípy. Průměrná hodnota platanu také vzrostla, ale lípa dosahovala větší hodnoty. V červenci došlo k mírnému poklesu obsahu chlorofylu *a* u lípy i platanu. V srpnu se průměrné hodnoty u lípy a platanu nepatrně zvýšily. V září se hodnoty obou stromů snížily. Průměrné hodnoty platanu se pohybovaly kolem stejné hodnoty po celou vegetační sezónu. Statisticky významný rozdíl se mezi stromy projevil v červnu a září.



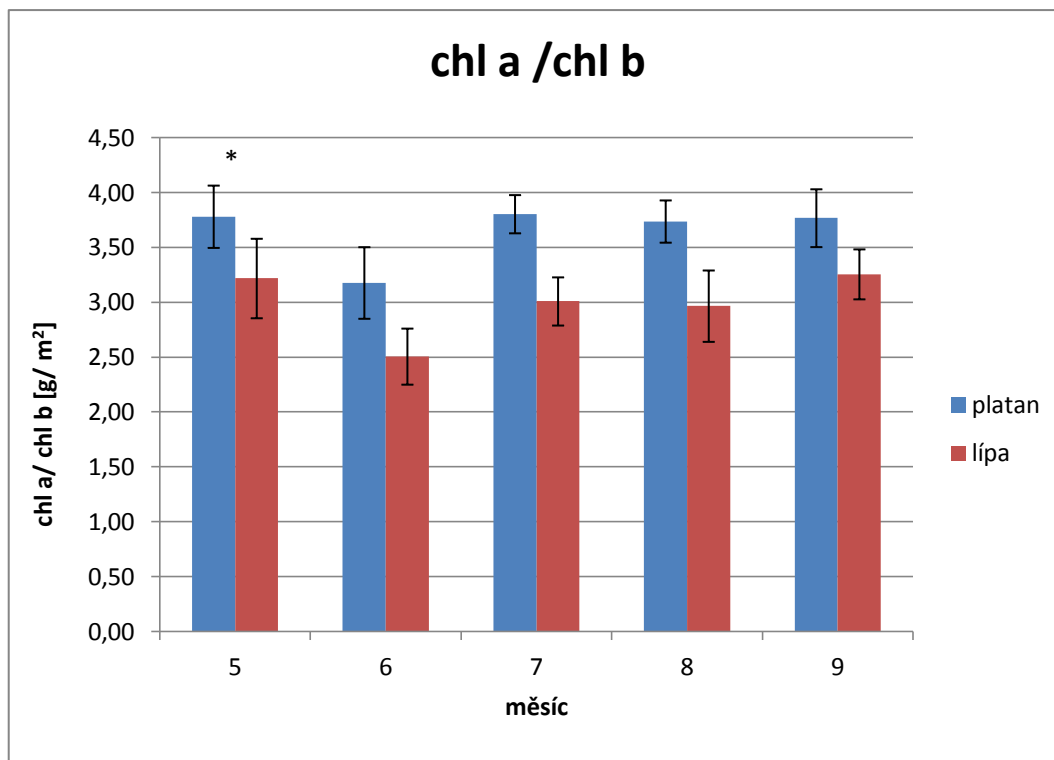
**Obr. 3:** Průměrné hodnoty obsahu chlorofylu *b* v průběhu vegetační sezóny u listů lípy a platanu.  $n=12$   
 \*= statisticky významný rozdíl mezi oběma stromy (Studentův *t* - test  $\alpha=0,05$ )

Průměrné hodnoty chlorofylu *b* v závislosti na vegetační sezóně už byly více proměnlivé (Obr. 3). V květnu byly hodnoty jak u lípy, tak u platanu podobné. V červnu došlo u lípy k většímu zvýšení obsahu chlorofylu *b* než u platanu, jeho hodnoty se zvýšily jen nepatrně. Červencové hodnoty ukazují, že obsah chlorofylu *b* u lípy i platanu klesá, ale obsah chlorofylu *b* u lípy zůstává větším než u platanu. V srpnu došlo u obou stromů k zvýšení obsahu chlorofylu *b*, i když u lípy dost nevýrazně. Obsah chlorofylu *b* v září u lípy i platanu klesl. Statistické rozdíly mezi lípou a platanem se prokázaly v měsíci květnu, srpnu a září.



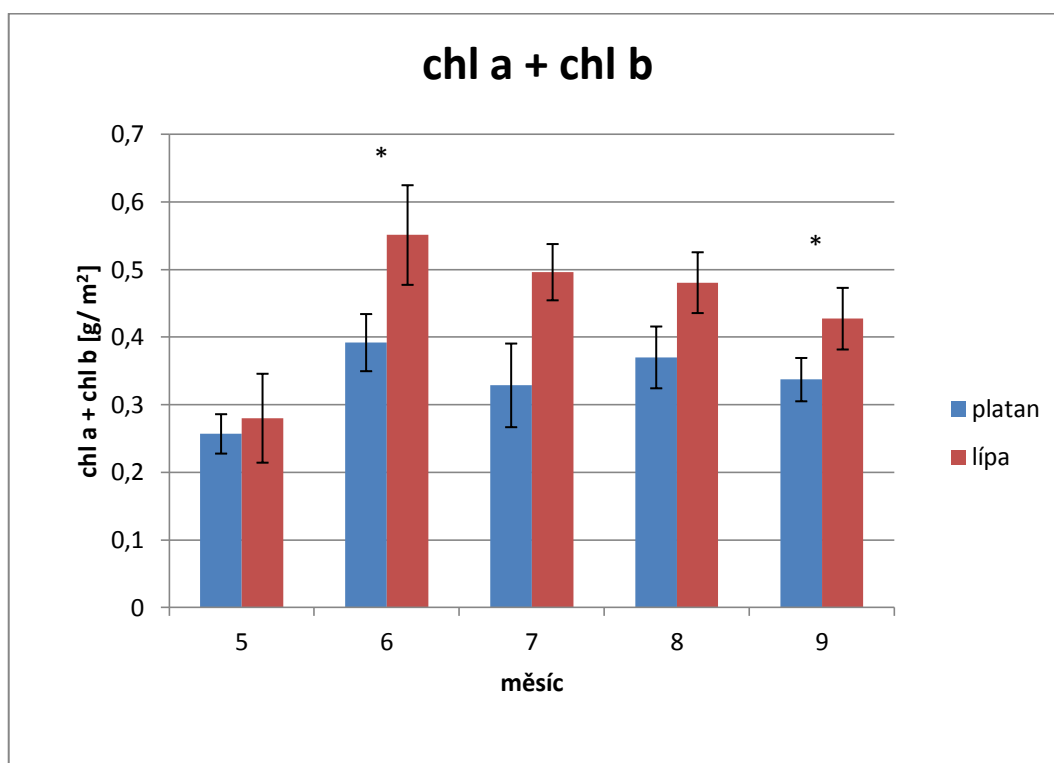
**Obr. 4:** Průměrné hodnoty obsahu chlorofylu karotenoidů v průběhu vegetační sezóny u listů lípy a platanu. n= 12 \*= statisticky významný rozdíl mezi oběma stromy (Studentův t - test  $\alpha= 0,05$ )

Průměrné hodnoty karotenoidů ze zkoumaných listů ukazují, že kromě května měla lípa větší obsah karotenoidů než platan (Obr. 4). V květnu se průměrné hodnoty lípy a platanu od sebe lišily tak, že platan měl vyšší hodnotu karotenoidů. V červnu došlo k obrácení situace, kdy lípa zaujala místo s vyšším obsahem karotenoidů vůči platanu. V červenci hodnota u lípy výrazně stoupla oproti platanu, který se pohybuje svými průměrnými hodnotami karotenoidů na téměř stejné pozici jako v květnu a červnu. V srpnu se u lípy průměrné hodnoty karotenoidů snížily a u platanu mírně stouply. V září byly průměrné hodnoty karotenoidů víceméně podobné jako v srpnu, jen u platanu došlo k mírnému vzrůstu, ale to nemění nic na situaci, že i v září má lípa větší průměrné hodnoty. Statisticky významný rozdíl mezi stromy byl po celou vegetační sezónu kromě srpna, kdy se tento rozdíl neprokázal.



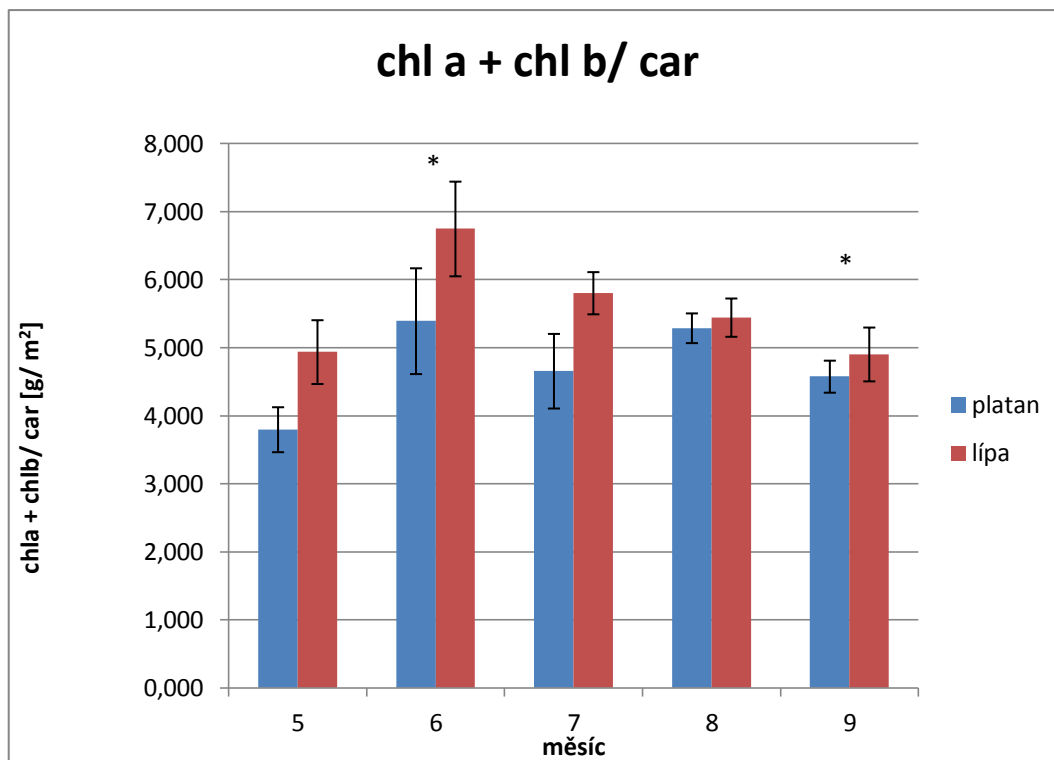
**Obr. 5:** Průměrné hodnoty obsahu chlorofylu *a*/ chlorofylu *b* v průběhu vegetační sezóny u listů lípy a platanu. n= 12 \*= statisticky významný rozdíl mezi oběma stromy (Studentův t - test  $\alpha= 0,05$ )

Průměrné hodnoty poměru chlorofylu *a*/ chlorofyl *b* jsou znázorněny na Obr. 5. Platan má po celou vegetační sezónu vyšší průměrné hodnoty než lípa. Květnové hodnoty ukazují, že platan má nepatrně větší průměrnou hodnotu chl *a*/ chl *b* než lípa. V červnu došlo u obou stromů k poklesu průměrných hodnot. Rozdíl mezi nimi je podobný jako v květnu. V červenci vzrostla průměrná hodnota u obou stromů. V srpnu se průměrné hodnoty u obou stromů oproti červenci nepatrně snížily a platan měl téměř stejnou hodnotu, jakou měl v květnu. Průměrné hodnoty chl *a*/ chl *b* se na konci vegetační sezóny u obou stromů nepatrně zvýšily. Rozdíl průměrů se mezi stromy během vegetační sezóny významně nelišil, byl víceméně pořád stejný. Avšak statisticky významný rozdíl se mezi stromy prokázal jen v květnu.



**Obr. 6:** Průměrné hodnoty obsahu chlorofylu *a* + chlorofyl *b* v průběhu vegetační sezóny u listů lípy a platanu.  $n=12$  \*= statisticky významný rozdíl mezi oběma stromy (Studentův *t* - test  $\alpha=0,05$ )

Průměrné hodnoty chlorofylu *a* + chlorofyl *b* byly větší po celou dobu vegetační sezóny u lípy (Obr. 6). V květnu byly hodnoty mezi lípou a platanem téměř vyrovnané. V červnu došlo k většímu nárůstu průměrné hodnoty u lípy, hodnota platanu se zvýšila jen částečně. V červenci se hodnoty u obou stromů snížily jen nepatrně. Průměrná hodnota platanu se v srpnu zvýšila a u lípy nepatrně poklesla. Zářím znázorňuje snížení průměru chlorofylu *a* + chlorofyl *b* u lípy i u platanu oproti srpnu. Statisticky významný rozdíl mezi stromy se projevil v červnu a září.

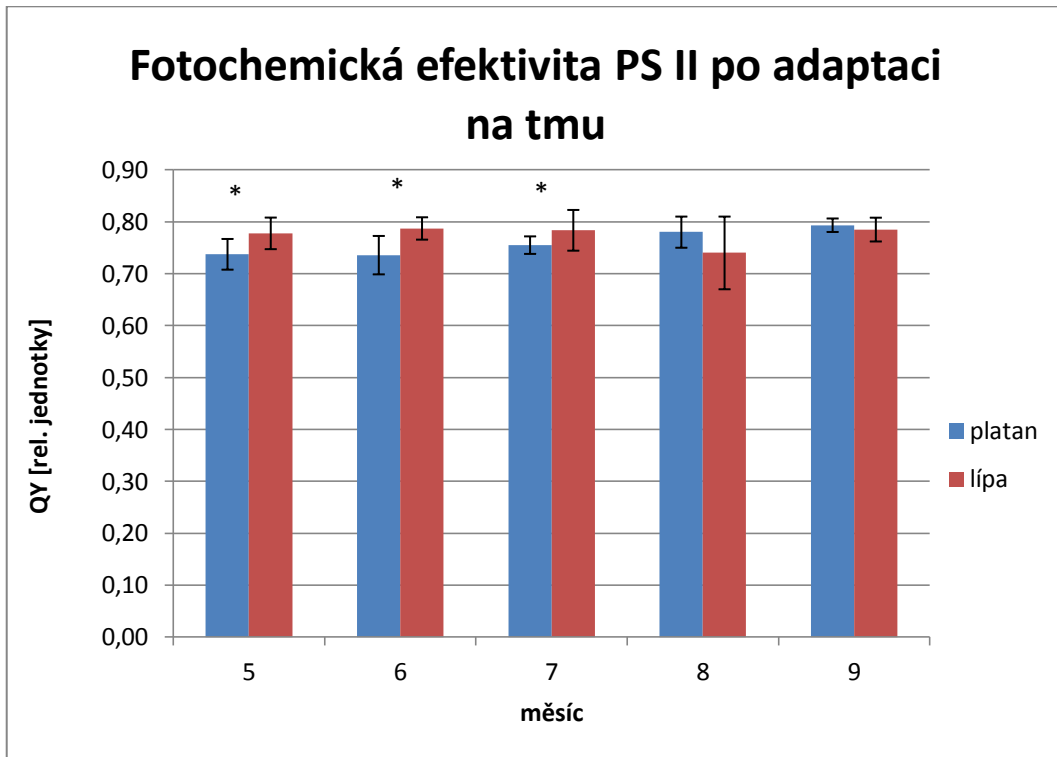


**Obr. 7:** Průměrné hodnoty obsahu chlorofylu *a* + chlorofyl *b*/ *car* v průběhu vegetační sezóny u listů lípy a platanu.  $n=12$  \*= statisticky významný rozdíl mezi oběma stromy (Studentův  $t$  - test  $\alpha=0,05$ )

Obr. 7 znázorňuje vývoj průměrných hodnot chlorofylu *a* + chlorofyl *b*/ *car* v závislosti na vegetační sezóně. V květnu se průměrné hodnoty obou stromů lišily a to tak, že lípa měla větší průměrnou hodnotu než platan, ale rozdíl mezi nimi nebyl v květnu statisticky průkazný. V červnu došlo u obou stromů k nárůstu hodnot. Platan měl stále nižší hodnotu než lípa. Červenec pro oba stromy znázorňuje pokles průměrných hodnot chlorofylu *a* + chlorofyl *b*/ *car*. V srpnu se průměry oproti červenci celkem vyrovnaly, pro platan to znamená zvýšení průměrné hodnoty a pro lípu snížení průměrné hodnoty. V září průměrné hodnoty lípy a platanu ještě poklesly. Platan měl po celou vegetační sezónu menší průměrné hodnoty chl *a* + chl *b*/ *car* než lípa. Statisticky významný rozdíl mezi stromy byl průkazný v červnu a září.

## 4.2. Fotochemická efektivita fotosystému II (PS II)

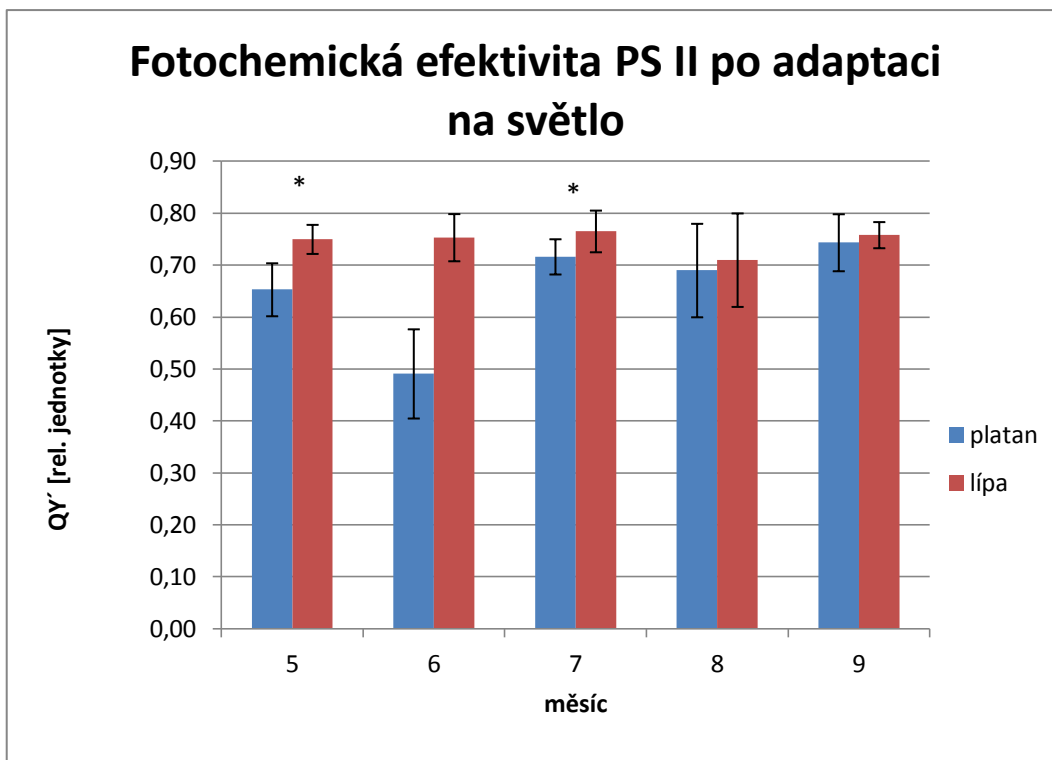
Byla změřena fluorescence chlorofylu u listů obou druhů stromů (lípa a platan). Fluorescence byla měřena od května do září (5, 6, 7, 8, 9) během jednoho dne (Obr. 8 – Obr. 9).



**Obr. 8:** Průměrné hodnoty fotochemické efektivity PS II po adaptaci na tmu v průběhu vegetační sezóny u listů lípy a platanu. n= 12 \*= statisticky významný rozdíl mezi oběma stromy (Studentův t- test  $\alpha= 0,05$ )

Obr. 8 vyjadřuje průměrné hodnoty fotochemické efektivity PS II po adaptaci listů na tmu (QY) u lípy a platanu v závislosti na vegetační sezóně. Lípa měla téměř po celou vegetační sezónu vyšší průměrné hodnoty kromě srpna, to měl vyšší průměr hodnot platan. Průměrné hodnoty (QY) se vyskytují v rozmezí od 0,73 – 0,79. Statisticky významný rozdíl se prokázal v květnu, červnu a červenci.





Obr. 9: Průměrné hodnoty fotochemické efektivity PS II po adaptaci na světlo v průběhu vegetační sezóny u listů lípy a platanu. n= 12 \*= statisticky významný rozdíl mezi oběma stromy (Studentův t - test  $\alpha= 0,05$ )

Průměrné hodnoty fotochemické efektivity PS II po adaptaci listů na světlo (QY') u lípy a platanu jsou znázorněny na Obr. 9. V květnu se hodnoty mezi lípou a platanem lišily. Platan měl nižší hodnotu než lípa. V červnu došlo k velkému poklesu průměrné hodnoty u platanu. Lípa má stejnou hodnotu jako v květnu. V červenci došlo u platanu k nárůstu průměrné hodnoty do takové úrovně, že jsou na tom s lípou svými průměrnými hodnotami podobně. Srpen pro oba dva stromy znamenal snížení průměrného QY', ale opět jsou si hodnoty velmi blízké. V září došlo u obou stromů k nárůstu hodnot, kdy má lípa nepatrně větší průměrnou hodnotu QY'. Významný statistický rozdíl se projevil v květnu a červenci.

### 4.3. Průměrné hodnoty látek znečišťujících ovzduší

**Tab. I:** Průměrné hodnoty látek znečišťujících ovzduší naměřené v den, kdy probíhalo měření. Hodnoty ovzduší jsou zaznamenány v závislosti na měsíci, ve kterém bylo měřeno. Každý den měření byla zaznamenána venkovní teplota

	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	teplota °C
	1h	24h	1h	1h	8h	1h	24h	1h	
<b>květen</b>	3,1	5,9	6,03	152,4	101,03	14,3	15,3	18,3	22,1
<b>červen</b>	1,3	1,9	3,35	67,7	52,95	13,5	15,9	7,5	19,1
<b>červenec</b>	3,5	3,2	10	100,8	57,63	20,7	22,9	21,3	30,5
<b>srpen</b>	3,45	2,8	5,15	69,7	25,4	12,5	14,65	10	18,5
<b>září</b>	23,55	7,15	8,05	48,9	14,65	8	15,5	13,5	15,1

Ve dnech, kdy probíhalo měření, byly zaznamenávány hodnoty látek v ovzduší. Byly zaznamenány hodnoty oxidu siřičitého (SO<sub>2</sub>), oxidu dusičitého (NO<sub>2</sub>), ozonu (O<sub>3</sub>) a polétavého prachu o velikosti (PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub>). Každý měsíc byla naměřena teplota ovzduší (Tab. 1).

## 5. Diskuze

V tomto experimentu byly zjišťovanými parametry u *Tilia cordata* a *Platanus acerifolia* obsahy fotosyntetických pigmentů a fluorescence chlorofylu. Tyto získané hodnoty by měly nastínit funkci fotosyntetického aparátu listů (Lichtenthaler a kol., 2013).

Lípy a platany na Jiráskově nábřeží musí překonávat různá stresová prostředí. Vzhledem k tomu, že rostou blízko u sebe a v přibližně stejné vzdálenosti od silnice, lze předpokládat, že jsou oba dva rostlinné druhy vystavovány přibližně stejným stresovým podmínkám. Stromy se nachází v aleji kolem rušné silnice a jejich kořenový systém je díky ní utěsněn. Sæbø a kol. (2005) uvedl, že v současné době je velkým problémem pro městské plánovače hledání druhů stromů, které snesou drsné podmínky na městských udusaných místech. Podle Craul (1999) jsou stromy na udusaných místech ve městě vystaveny teplu a nedostatku vody.

Podle předchozích studií bylo zjištěno, že *Tilia cordata* je poměrně citlivá na znečištěné ovzduší (Taylor a kol., 1975) zatímco *Platanus acerifolia* je hodnocen jako druh stromu tolerující různé stresové podmínky (Stavretović a kol., 2010). V tomto experimentu se tato informace ale nepotvrdila.

*Tilia cordata* vykazovala oproti *Platanu acerifolia* vyšší poměr obsahu  $a + b / car$  pouze v červnu a září. Lichtenthaler a Buschmann (2001) uvedli, že nízké hodnoty pro poměr obsahu chlorofyl  $a + chlorofyl b / car$  jsou ukazatelem stresu rostlin a poškození fotosyntetického aparátu rostlin. V mém experimentu se to projevilo nízkými hodnotami platanu v červnu a září, kdy jsou rozdíly lípy a platanu mezi sebou statisticky průkazné. Rozdíly mezi ostatními hodnotami nebyly statisticky průkazné.

Obsah chlorofylu  $b$  byl u obou stromů (lípa a platan) v květnu vždy nižší než v ostatních měsících. Tyto nízké průměry mohou být způsobené intenzivním působením  $O_3$ , kdy se právě v květnu u tohoto plynu naměřily nejvyšší hodnoty (Tab. 1). McLaughlin (1994) uvedl, že důkaz vztahu mezi ozonem a poškozením stromů a lesa existuje pouze v Kalifornii a velké množství dat spojené s úbytkem lesů ve východní Evropě potvrzuje roli této troposférické znečišťující látky. V dřívějších studiích bylo zjištěno, že obsah chlorofylu  $b$  se sníží po chronické expozici výfukovými plyny nebo podle Gajic a kol. (2009) těžkými kovy. Podle Joshi a Swami (2009) by ke snížení chlorofylu  $b$  mohlo dojít v důsledku silniční komunikace, která se nachází přímo mezi

stromy a je poměrně frekventovaná. V porovnání s mými výsledky dochází ke snížení chlorofylu *b* u platanu, a to významným rozdílem v květnu, srpnu a září.

*Tilia cordata* vykazovala během celé vegetační sezóny kromě května, zvýšené průměrné hodnoty karotenoidů. Významný rozdíl se projevil v květnu, červnu, červenci a září. V květnu měl vyšší obsah karotenoidů platan. To by mohlo být následkem nástupu pozdního jara, kdy se s tím platan špatně vyrovnával. Kirchgebner a kol. (2003) uvádí, že různé typy karotenoidů korelují s rostlinným stresem a bylo zjištěno, že se karotenoidy zvyšují při intenzivním působení záření nebo při vysokých teplotách. Podle (Tab. 1) je průměrná hodnota teploty v červenci velmi vysoká a v souvislosti s tím, nejspíše lípa procházela velkým stresem. K přispění k většímu stresu v červenci mohlo dojít i vzhledem k vysokým hodnotám látek znečišťujících prostředí (Tab. 1). Významný rozdíl v červenci vypovídá, že se opravdu lípa a platan svými hodnotami karotenoidů mezi sebou lišily. Lípa má zřejmě schopnost syntetizovat ve stresových podmínkách více karotenoidů než platan, což ji může chránit proti stresu.

Zadeh a kol. (2013) zjistili, díky experimentu který prováděli, že různé druhy lípy se chovají ve stresovém prostředí odlišně. Lípa s ochlupenými listy je pravděpodobně vhodnějším bioindikátorem prostředí než lípa bez ochlupených listů. *Tilia cordata*, která byla jedním ze vzorků při tomto experimentu, není ochlupená, to znamená, že méně zachycovala polévaté částice ze vzduchu. Možná díky tomu nedošlo k očekávanému snížení odolnosti u *Tilia cordata*.

V tomto experimentu byla měřena maximální fotochemická efektivita PS II po adaptaci na tmu (QY) a maximální fotochemická efektivita PS II po adaptaci na světlo (QY'). Měření parametru QY a QY' probíhalo vždy v přímých poledních hodinách. V těchto hodinách byly zaznamenány hodnoty látek znečišťujících ovzduší a průměrné teploty ovzduší. Podle výsledků z měření se QY mezi lípou a platanem v květnu, červnu a červenci téměř nelišily. Jejich hodnoty se pohybovaly od 0,73 – 0,79. Lichtenthaler a kol. (2013) uvedl, že hodnoty pro normální rozmezí maximální fotochemické efektivy PS II se pohybují mezi 0,74 – 0,83. Podle této informace se dá tedy usoudit, že hodnoty QY, které byly naměřeny v tomto experimentu, spadají do rozmezí hodnot, které nedetekují žádný stres ve fotosyntetickém aparátu v závislosti na vegetační sezóně. Na druhou stranu u QY' tomu bylo už jinak. V květnu je průměrná hodnota *Platanus acerifolia* nízká. Stromy se od sebe lišily významným rozdílem, tudíž je předpokládáno, že na *Platanus acerifolia* působil stres. I v červenci byla naměřena nižší hodnota (QY') u platanu, ale rozdíl, který byl statisticky průkazný, nebyl až tak

velký, aby strom podléhal velkému stresu. Wittenberghe a kol. (2013) ve svém experimentu, který byl prováděn ve Valencii uvedl, že i přesto, že je *Platanus acerifolia* velmi odolným stromem proti znečištění, je citlivý na dopravní napětí, kde by mohl být strom oslaben v důsledku stresu ze sucha. Tyto hypotézy je však nutno prověřit dalším výzkumem.

## 6. Závěr

Předpokládalo se, že *Tilia cordata* bude hůře reagovat na znečištěné prostředí v městské části Jiráskova nábřeží. Avšak tento fakt se v mém experimentu neprojevil. Hodnoty  $F_v/F_m$  mluví o tom, že ani jeden ze stromů nebyl příliš stresován, avšak lípa se na Jiráskově nábřeží jevila jako vitálnější druh. Více chlorofylů ve svém fotosyntetickém aparátu obsahovala právě lípa. Fotochemická efektivita PS II (QY) se u obou stromů pohybovala v rozmezí hodnot, které neodhalily žádný stres. I přesto, že většina literárních pramenů uvádí, že platan je celkově více odolný vůči stresu než lípa, na tomto stanovišti se lípa projevila celkově vitálněji.

Do budoucna je tedy potřeba provést na tomto stanovišti detailnější průzkum jednotlivých stresových podmínek a i reakcí obou dvou druhů stromů na ně.

## 7. Seznam použité literatury

Akbari H., Pomerantz M., Taha H., 2001: Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70 (3), s. 295 – 310.

Balabánová P., Kyselka I., Rozmanová N., Vorel I., 2006 [online]: Principy a pravidla územního plánování: Zeleň. Brno: [cit. 17. 3. 2014]. Dostupné z: <http://www.uur.cz/images/5-publikacni-cinnost-a-knihovna/internetove-prezentace/principy-a-pravidla-uzemniho-planovani/kapitolaC/C5-2013.pdf>

Ballach H. J., Wittig R., 2001: Twenty-five years of biomonitoring lead in the Frankfurt/ Main area. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 8, s. 136 – 142.

Barna T. 1996: Gene conservation and silviculture of broadleaved mixture species in Hungary. In Turok J., Eriksson G., Kleinschmit J., Canger S., – compilers: Noble Hardwoods Network (Report of the first meeting, 24–27 March 1996, Escherode, Germany). International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy, 1996. Germany: s. 64 – 67.

Beckett K. P., Freer-Smith P., Taylor G., 1998: Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environ. Pollut.*, 99, s. 347 – 360.

Bláha L., Bocková R., Hnilička F., Hniličková H., Holubec V., Möllerová J., Štolcová J., Zieglerová J., 2003: Rostlina a stres. Praha: VÚRV, 156 s.

Boardman N. K., 1977: Comparative photosynthesis of sun and shade plants. *Annu Rev Plant Physiol*, 28, s. 355 – 377.

Bucko M. S., Magiera T., Pesonen L. J., Janus B., 2010: Magnetic, geochemical, and microstructural characteristics of road dust on roadsides with different traffic volumes-case study from Finland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 209, s. 295 – 306.

Carter W. P. L., 1994: Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds. *Journal of the Air Waste Management Association*, 44, s. 881 – 899.

Carter G. A., Knapp A. K., 2001: Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *Am. J. Bot.*, 88, s. 677 – 684.

Chunxia H., Jiyue L., Ming G., Yutao W, Chong Ch., 2008: Changes in leaf photosynthetic characteristics and water use efficiency along with tree height of 4 tree species. *Acta ecologica sinica*, 28(7), s. 3008 – 3016.

Craul P. J., 1999: *Urban Soil - Applications and Practices*. John Wiley and Sons, Toronto.

ČHMÚ: Chmi.cz [online]: Český hydrometeorologický ústav [cit. 2013]. Dostupné z: [http://www.chmi.cz/portal/dt?portal\\_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P1\\_0\\_Home](http://www.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P1_0_Home)

Darrall N. M., 1989: The effect of air pollutants on physiological processes in plants. *Plant, Cell Environ*, 12, s. 1 – 30.

Dizengremel P., 2001: Effects of ozone on the carbon metabolism of forest trees. *Plant Physiol. Biochem*, 39, s. 729 – 742.

EEA 2011: *Air quality in Europe, 2011 report*. European environmental agency technical report no 12/2011, s. 80.

EPA, 2009: *Integrated Science Assessment for Particulate Matter (First external review draft)*. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA/600/R-08/139, 2008.

Falla J., Laval-Gilly P., Henryon M., Morlot D., Ferard J. F., 2000: Biological air quality monitoring: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 64, s. 627 – 644

Ferreira-Baptista L., DeMiguel E., 2005: Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment. *Atmospheric Environment*, 39, s. 4501 – 4512.

Fowler D., 1985: Deposition of SO<sub>2</sub> onto plant canopies. In Winner W. E., Mooney H. A., Goldstein R. A. (Eds): *Sulphur dioxide and vegetation*. Stanford university Press, s. 389 – 402.



- Gajic G., Mitrovic M., Pavlovic P., Stevanovic B., Djurdjevic L., Kostic O., 2009: An assessment of the tolerance of *Ligustrum ovalifolium* Hassk. to traffic-generated Pb using physiological and biochemical markers. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72, s. 1090 – 1101.
- Genty B., Briantais J. M., Baker N. R., 1989: *Biochim Biophys Acta*, 990, s. 87 – 92.
- Gorbachevskaya O., Schreiter H., Kappis C., 2007: Wissenschaftlicher Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential von Pflanzen (qualitativ und quantitativ)-Ergebnisse der Literaturstudie. *Berliner Geographische Arbeiten*, 109, s. 71 – 82.
- Gratani L., Varone L., 2005: Daily and seasonal variation of CO<sub>2</sub> in the city of Rome in relationship with the traffic volume. *Atmos. Environ.* 39, s. 2619 – 2624.
- Guderian R., Tingey D. T., Rabe R., 1985: Effects of photochemical oxidants on plants. In Guderian R. (Ed.): *Air Pollution by Photochemical Oxidants*. Berlin, Springer-Verlag, s. 111 – 128.
- Guenther A., Hewitt C. N., Erickson D., Fall R., Geron C., Graedel T., Harley P., Klinger L., Lerdau M., McKay W., Pierce T., Scholes B., Steinbrecher R., Tallamraju R., Taylor J., Zimmerman P., 1995: A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal Geophysical Research*, 100, s. 8873 – 8892.
- Herschbach C., Rennenberg H., 1991: Influence of glutathione on sulphate influx, xylem loading and exudation in excised tobacco roots. *J. Exp. Bot.* 42, s. 1021 – 1029.
- Honour S. L., Bell J. N. B., Ashenden T. W., Cape J. N., Power S. A., 2009: Responses of herbaceous plants to urban air pollution: effects on growth, phenology and leaf surface characteristics. *Environmental Pollution*, 157, s. 1279 – 1286.
- Hörtensteiner S., Kräutler B., 2011: Chlorophyll breakdown in higher plants. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1807, s. 977 – 988.
- Idso S. B., 1988: Three phases of plant response to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment. *Plant Physiol.*, 87, s. 5 – 7.
- IPCC, 2007: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, New York.

- Joshi, P. C., Swami, A., 2009: Air pollution induced changes in the photosynthetic pigments of selected plant species. *Journal of Environmental Biology*, 30, s. 295 – 298.
- Kincl M., Krpeš V., 2006: *Základy fyziologie rostlin*. Ostrava: Katedra biologie a ekologie, Přírodovědecká fakulta, Ostravská univerzita, 3. vydání, 220 s.
- Kirchgebner H. D., Reichert K., Hauff K., Steinbrcher R., Schnitzler J. -P., Pfündel E. E. 2003: Light and temperature, but not UV radiation, affect chlorophylls and carotenoids in Norway spruce needles (*Picea abies* (L.) Karst.). *Plant, Cell and Environment*, 26, s. 1169 – 1179.
- Kitajima H., Butler W. L., 1975: Quenching of chlorophyll fluorescence and primary photochemistry in chloroplasts by dibromothymoquinone. *Biochim. Biophys Acta*, 376 s. 105 – 115.
- Koblížek J., 2000: *Jehličnaté a listnaté dřeviny našich zahrad a parků*. Brno: SURSUM, 448 s.
- Koerner, B., Klopatek, J., 2002: Anthropogenic and natural CO<sub>2</sub> emission sources in an arid urban environment. *Environ. Pollut.*, 116, s. 45 – 51.
- Krause G. H., Weis E., 1984: Chlorophyll fluorescence as a tool in plant physiology. II. Interpretation of fluorescence signals, *Photosynthesis Res*, 5, 139 s.
- Krause G. H., Weis E., 1991: Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annu Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 42 s. 313 – 349.
- Kremer B. P., 1984: *Průvodce přírodou. Stromy*. Praha: Knižní klub ve spolupráci s Ikar Praha, přeložil Poláček J., 290 s.
- Kulmala M., Suni T., Lehtinen K. E. J., Dal Maso M., Boy M., Reissel A., Rannik U., Aalto P., Hakola H., Bäck J., Hoffmann T., Vesala T., Hari P., 2003: A new feed-back mechanism linking forests, aerosols and climate. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 3, 6093 – 6107s.
- Kutík J., Beneš K., 1991: Chloroplasty – fotosyntetizující organely rostlinných buněk. *Biologické listy*, 56(4), s. 292 – 318.

Langebartels C., Ernst D., Heller W., Lütz C., Payer H. D., Sandermann H., 1997: Ozone responses of trees: results from controlled chamber exposures at the GSF phytotron. In Sandermann H., Wellburn A. L., Heath R. L. (Eds.): Forest Decline and Ozone, Ecological Studies. Berlin, Springer-Verlag, 127, s. 163 – 200.

Larcher W., 1987: Stres bei Pflanzen. Naturwissenschaften, 74, 158 s.

Larcher W., 1988: Fyziologická ekologie rostlin. Praha: Academia, 368 s.

Leblová S., Sofrová D., 1982: Biochemie fotosynthesy. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 161 s.

Lee D. W., Bone R. A., Tarsis S. L., 1990: Correlates of leaf optical properties in tropical forest sun and extreme-shade plants. American Journal of Botany, 77, s. 370 – 380.

Lichtenthaler H. K., 1988: In vivo Chlorophyll Fluorescence as a Tool for Stress Detection in Plants. In Lichtenthaler H. K., (Ed): Applications of Chlorophyll Fluorescence. Kluwer Academic Publishers, New York, London, s. 129 – 142.

Lichtenthaler H. K., Babani F., 2000: Detection of photosynthetic activity and water stress by imaging the red chlorophyll fluorescence. Plant Physiol. Biochem., 38, s. 889 – 895.

Lichtenthaler H. K., Babani F., Langsdorf G., 2007: Chlorophyll fluorescence imaging of photosynthetic activity in sun and shade leaves of trees. Photosynth Res, 93, s. 235 – 244.

Lichtenthaler H. K., Babani F., Navrátil M., Buschmann C., 2013: Chlorophyll fluorescence kinetics, photosynthetic activity, and pigment composition of blue-shade and half-shade leaves as compared to sun and shade leaves of different trees. Photosynth Res, 117, s. 355 – 366.

Lichtenthaler H. K., Buschmann C., 2001: Extraction of photosynthetic tissues: chlorophylls and carotenoids. In Wrolstad R. E., Acree T. E., Decker E. A., Penner M. H., Reid D. S., Schwarts S. J., (Eds.): Current protocols in food analytical chemistry. New York: John Wiley and Sons, s. 1 – 6.

Lichtenthaler H. K., Rinderle U., 1988: The role of chlorophyll fluorescence in the detection of stress conditions in plants. *CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry*. Vol. 19(1), s. 30 – 85.

Lichtenthaler H. K., Wellburn A. R., 1983: Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11, s. 591 – 592.

Litschke T., Kuttler W., 2008: On the reduction of urban particle concentration by vegetation- a review. *Meteorol. Z.*, 17, s. 229 – 240.

Materna M., 1966: Die Ausscheidung des durch Fichtennadeln absorbierten Schwefeldioxids. *Arch. Forstwesen*, 15, s. 691 – 692.

McLaughlin S. B., 1994: Forest declines: some perspectives on linking processes and patterns, In Alscher R. G., Wellburn A. R. (Eds.): *Plant Response to the Gaseous Environment. Molecular, Metabolic and Physiological Aspects*. London, Chapman and Hall, s. 315 – 338.

Meier D., Lichtenthaler H. K., 1981: Ultrastructural development of chloroplasts in radish seedlings grown at high and low light conditions and in the presence of the herbicide bentazon. *Protoplasma*, 107, s. 195 – 207.

Nowak D. J., 2006: Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening*, 4, s. 115 – 123.

Oberndorfer E., Lundholm J., Bass B., Coffman R. R., Doshi H., Dunnett N., 2007: Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *Bioscience*, 57, s. 823 – 833.

Pauleit S., 2003: Urban street tree plantings: identifying the key requirements. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers-Municipal Engineers*, 156 (1), s. 43 – 50.

Procházka S., Macháčková I., Krekule J., Šebánek J., Gloser J., Havel L., Nátr L., Prášil I., Sladký Z., Šantrůček J., Tesařová M., Vyskot B., 1998: *Fyziologie rostlin*. Praha: Academia, 484 s.

- Radoglou K., Dobrowolska D., Spyroglou G., Nicolescu V. - N., 2009: A review on the ecology and silviculture of limes (*Tilia cordata* Mill., *Tilia platyphyllos* Scop. and *Tilia tomentosa* Moench.) in Europe. Greece: Die Bodenkultur, 60(3), s. 9 – 19.
- Rennenberg, H., 1991: The significance of higher plants in the emission of sulfur compounds from terrestrial ecosystems. In Sharkey 'T., Holland E. & Mooney H. (Eds): Trace Gas Emissions by Plants. San Diego, Academic Press, s. 217 – 260.
- Rennenberg H., Sekyia J., Wilson L. G., Filner P., 1982: Evidence for an intracellular sulphur cycle in cucumber leaves. *Planta*, 154, s. 516 – 524.
- Rennenberg H., 1984: The fate of excess sulphur in higher plants. *Annu. Rev.Plant Physiol.* 35, s. 121 – 153.
- Richards N. A., 1983: Diversity and stability in a street tree population. *Urban Ecology*, 7, s. 159 – 171.
- Rowe D. B., 2011: Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 159, s. 2100 – 2110.
- Runeckles V. C., Chevone B. I., 1992: Crop response to ozone. In Lefohn A. S. (Ed.): Surface Level Ozone Exposures and Their Effect on Vegetation. Chelsea, Lewis Publishers, s. 189 – 269.
- Ryan M. G., Yoder B. J., 1997: Hydraulic limits to tree height and tree growth. *Bioscience*, 47, s. 235 – 242.
- Sarijeva G., Knapp M., Lichtenthaler H. K., 2007: Differences in photosynthetic activity, chlorophyll and carotenoid levels, and in chlorophyll fluorescence parameters in green sun and shade leaves of Ginkgo and Fagus. *J. Plant Physiol.*, 164, s. 950 – 955.
- Schreiber U., Neubauer C., Klughammer C., 1988: New Ways of Accessing Photosynthetic Activity with a Pulse Modulation Fluorometer. In Lichtenthaler H. K., (Ed): Applications of Chlorophyll Fluorescence. Kluwer Academic Publishers, New York, London, s. 63 – 69.
- Schreiber U., Bilger W., 1992: Progress in Chlorophyll Fluorescence Research: Major Developments During the Past Years in Retrospect. *Progress of Botany*, s. 151 – 173.

- Sharkey T. D., Singaas E. L., 1995: Why plants emit isoprene. *Nature*, 374, s. 769.
- Sieghardt M., Mursch-Radlgruber E., Paoletti E., Couenberg E., Dimitrakopoulos A., Rego F., Hatzistathis A., Randrup T., 2005: The abiotic urban environment: impact of urban growing conditions on urban vegetation. In Konijnendijk C. C., Nilsson K., Randrup T. B., Schipperijn J. (Eds.): *Urban Forests and Trees*. Berlin: Springer, s. 281 – 323.
- Sjöman H., Nielsen A. B., 2010: Selecting trees for urban paved sites in Scandinavia – A review of information on stress tolerance and its relation to the requirements of tree planners. *Sweden: Urban Forestry and Urban Greening*, 9, s. 281 – 293.
- Slavíková J., 1986: *Ekologie rostlin*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 368 s.
- Srivastava H. S., Jolliffe P. A., Runeckles V. C., 1975: The effects of environmental conditions on the inhibition of leaf gas exchange by NO<sub>2</sub>. *Can J. Bot.*, 53, s. 475 – 482.
- Stavretović N., Vučković M., Stajić B., 2010: Classification of trees and tree species in Obrenovac “Mali Park“ by the elements of growth, vitality and ornamentalness. *Belgrade: Arch. Biol. Sci.*, 62 (4), s. 1119 – 1024.
- Stockwell W. R., Kramm G., Scheel H. E., Mohnen V. A., Seiler W., 1997: Ozone formation, destruction and exposure in Europe and the United States. In Sandermann H., Wellburn A. L., Heath R. L. (Eds.): *Forest Decline and Ozone, Ecological Studies*. Berlin, Springer-Verlag, 127, s. 1 – 38.
- Sæbo A., Zelimir B., Ducatillion C., Hatzistathis A., Lagerstrom T., Supuka J., Garcis - Valdecantos J. L., Rego F., Slycken J., 2005: The selection of plant materials for street trees, park trees and urban woodlands. In Konijnendijk C. C., Nilsson K., Randrup T. B., Schipperijn J. (Eds.): *Urban Forests and Trees*. Berlin, Springer, s. 257 – 280.
- Šebánek J., Gréc L., Javor A., Švihra J., 1983: *Fyziologie rostlin*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 560 s.
- Taylor O. C., Tompson C. R., Tingey D. T., Reinert R. A., 1975: Oxides of nitrogen. In Mudd J. B., Kozlowski (Eds.): *Responses of Plants to Air Pollution*. Academic Press, University of California, s. 121 – 139.

Tingey D. T., Hogsett W. E., 1985: Water stress reduces ozone injury via a stomatal mechanism. *Plant Physiol.*, 77, s. 944 – 947.

US EPA, 1998: U. S. Environmental Protection Agency, 1998: NO<sub>x</sub>. EPA-456/F-98e005. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Research, Washington, D. C.

Vanuytrecht E., Van Mechelen C., Van Meerbeek K., Willems P., Hermy M., Raes D., 2014: Runoff and vegetation stress of green roofs under different climate change scenarios. Belgium: *Landscape and Urban Planning*, 122, s. 68 – 77.

Velikova V., Tsonev T., Barta C., Centritto M., Koleva D., Stefanova M., Busheva M., Loreto F., 2009: BVOC emissions, photosynthetic characteristics and changes in chloroplast ultrastructure of *Platanus orientalis* L. exposed to elevated CO<sub>2</sub> and high temperature. *Environmental Pollution*, 157, s. 2629 – 2637.

Vodrážka Z., 2002: *Biochemie*. Praha: Academia, Kniha první, 170 s., Kniha druhá, 124 s., Kniha třetí, 182 s.

Weber F., Kowarik I., Säumel I., 2014: A walk on the wild side: Perceptions of roadside vegetation beyond trees. Berlin: *Urban Forestry and Urban Greening*, s. 1 – 8.

Wittenberghe V. S., Alonso L., Verrelst J., Hermans I., Delegido J., Veroustraete F., Valcke R., Moreno J., Samson R., 2013: Upward and downward solar-induced chlorophyll fluorescence yield indices of four tree species as indicators of traffic pollution in Valencia. *Environmental Pollution*, 173, s. 29 – 37.

Yunus M., Igbal M., 1996: *Plant response to air pollution*. India: Wiley and Sons, s. 492.

Zadeh A. R. K., Veroustraete F., Buytaert J. A. N., Dirckx J., Samson R., 2013: Assessing urban habit quality using spectral characteristics of *Tilia* leaves. *Environmental Pollution*, 178, s. 7- 14.

Závodská R., 2006: *Biologie buněk: základy cytologie bakteriologie virologie*. Praha: Scientia, 160 s.

## 8. Přílohy

### *Seznam příloh*

Příloha č. 1 – seznam použitých zkratk v práci

Příloha č. 2 – fotodokumentace

**Foto 1:** *P. acerifolia* a *Tilia cordata* na Jiráskově nábřeží u frekventované silnice (foto autor)

**Foto 2:** Zatemněné listy u *Tilia cordata* na Jiráskově nábřeží u frekventované komunikace (foto autor)

**Foto 3:** *Tilia cordata* na Jiráskově nábřeží (foto autor)

**Foto 4:** Alej *T. cordata* (vlevo) a *P. acerifolia* (vpravo) na Jiráskově nábřeží, mezi nimi pozemní komunikace (foto autor)



## Příloha č. 1 – seznam použitých zkratk v práci

QY – maximální fotochemická efektivita fotosystému II

QY' – fotochemická efektivita fotosystému II po adaptaci listu na světle

PS II – fotosystém II

PS I – fotosystém I

ATP – adenosintrifosfát

NADPH – nikotinamidadeninukleotidfosfát

NADP – akceptor elektronu

Rubisco – enzym ribulosa-1,5-bisfosfát-karboxylasa

Q – akceptor elektronů

O<sub>2</sub> – kyslík

SO<sub>2</sub> – oxid siřičitý

NO<sub>x</sub> – oxidy dusíku

NO<sub>2</sub> – oxid dusičitý

NO – oxid dusnatý

CO<sub>2</sub> – oxid uhličitý

O<sub>3</sub> – ozon

PM – prachové částice

PM<sub>2,5</sub> – prachové částice o velikosti do 2,5 μm

PM<sub>10</sub> – prachové částice o velikosti do 10 μm

qP – fotochemické zhášení

qN – nefotochemické zhášení

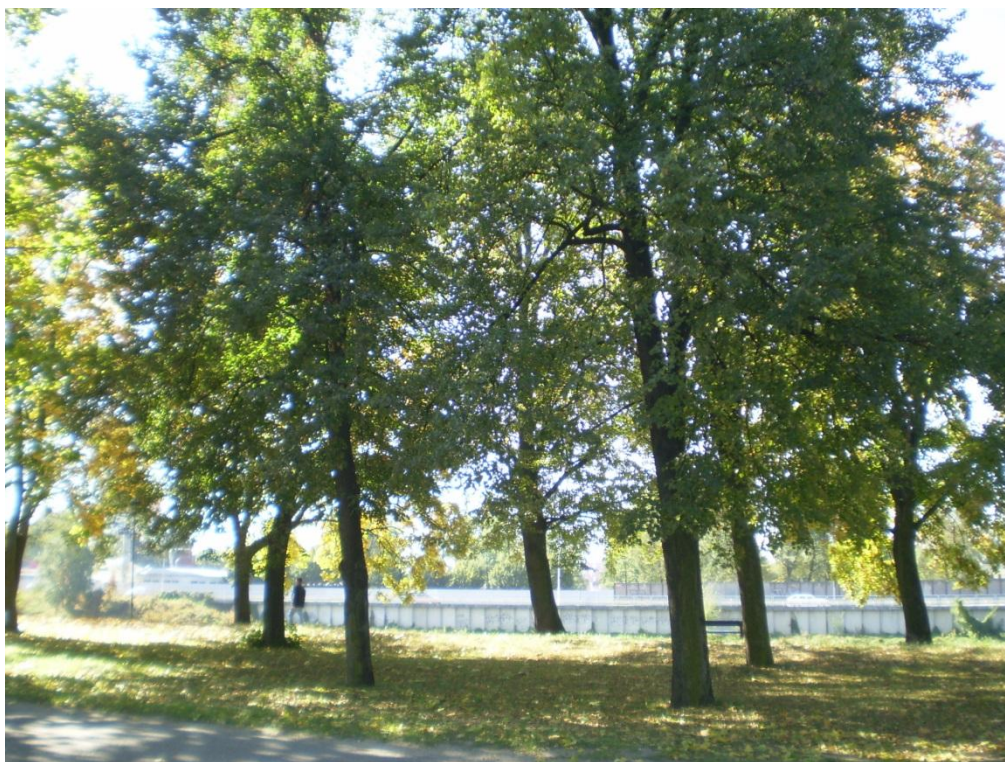
Příloha č. 2 – fotodokumentace



**Foto 1:** *P. acerifolia* a *Tilia cordata* na Jiráskově nábřeží u frekventované silnice (foto autor)



**Foto 2:** Zatemněné listy u *Tilia cordata* na Jiráskově nábřeží u frekventované komunikace (foto autor)



**Foto 3:** *Tilia cordata* na Jiráskově nábřeží (foto autor)



**Foto 4:** Alej *T. cordata* (vlevo) a *P. acerifolia* (vpravo) na Jiráskově nábřeží, mezi nimi pozemní komunikace (foto autor)