

**Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta**

Katedra experimentální biologie rostlin



Bc. Eva Neuwirthová

**Vliv anatomické struktury na optické vlastnosti listu
vybraných dřevin – vztah k vodnímu režimu**

The effect of leaf structure on the leaf optical properties - Implication
for water regime

Diplomová práce

Školitelka: Prof. RNDr. Jana Albrechtová, Dr.

Praha, 2015

Školitelka diplomové práce:

Prof. RNDr. Jana Albrechtová, Dr., Katedra experimentální biologie rostlin PřF UK

Konzultantka diplomové práce:

Mgr. Zuzana Lhotáková, Ph.D., Katedra experimentální biologie rostlin PřF UK

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím citované literatury pod vedením Prof. RNDr. Jany Albrechtové, Dr. a za konzultace Mgr. Zuzany Lhotákové, Ph.D. a souhlasím s jejím zveřejňováním.

V Praze, dne

Eva Neuwirthová

Poděkování:

- V první řadě bych poděkovala své školitelce Prof. RNDr. Janě Albrechtové, Dr. za cenné a poučné rady, které mi byly poskytnuty při psaní textu, podporu a vedení mé práce.
- Mgr. Zuzaně Lhotákové, Ph.D. za neustávající podporu, trpělivost při všech konzultacích, inspirativní nápady při zpracovávání materiálu a podnětné rady při zpracování dat a sepisování práce.
- Dále bych ráda poděkovala Mgr. Drahomíře Bartákové a Mgr. Monice Kovářové za vstřícnost, pomoc a poučné rady při laboratorním zpracování mých vzorků. Děkuji celému skvělému kolektivu laboratoře 207 za neutuchající optimismus a přátelské prostředí, které mě motivovalo k práci.
- Svým rodičům, za stálou podporu a neochvějnou důvěru, že má práce bude zdárně dovedena k cíli a všem blízkým, které mám okolo sebe.
- V neposlední řadě bych ráda poděkovala grantům, které umožnily, aby má práce byla vypracována pod jejich záštitou:
 - Projekt GAČR P504/12/1288: Úloha funkčních vlastností listů rostlin při akumulaci půdní organické hmoty během primární sukcese, jehož hlavním řešitelem je prof. Frouz.
 - Projekt NPUI LO1417 - Centrum experimentální biologie rostlin UK (2015-2019, MSM/LO)

Abstrakt:

V důsledku důlní činnosti dochází k vyvážení substrátu, který často bývá jílovitého charakteru se špatnou propustností vody, je zatížený nedostatkem živin a může být nehostinný pro většinu vegetace. Na Velké podkrušnohorské výsypce (VPS), z materiálu z povrchových uhelných dolů na Sokolovsku, vznikají rozsáhlé lokality vykazující charakteristiky devastované krajiny následkem antropogenní činnosti. Cílem mé práce bylo porovnání strukturálních a biochemických parametrů listu ve vztahu k reflektanci listu dvou pionýrských dřevin *Salix caprea* a *Populus tremula*, s ohledem k vodnímu režimu a jeho přizpůsobení ke ztrátám vody. Z metodického hlediska by práce měla přispět k určení vztahu mezi vybranými strukturálními parametry listu k odrazivosti listu, což je problematika, o které mnoho studií nepojednává.

Materiálem mého studia bylo listoví ze stromů *P. tremula* a *S. caprea*, rostoucí na 30 let starých sukcesních lokalitách S2 a S3. Na tomto materiálu byla pomocí příčných řezů studována anatomická struktura listu (tloušťka vrstev a celého listu) a pomocí stahování spodní pokožky listu byly kvantifikovány rozměry, hustota a plocha průduchů. Dalším sledovaným parametrem byl obsah fotosyntetických pigmentů, specifická listová plocha (SLA), vodní potenciál (VP) a odrazivost ve viditelné a infračervené části spektra v průběhu šesti měsíců během vegetační sezóny 2014. Dále jsem porovnávala vodní potenciál listu v souvislosti se strukturálním přizpůsobením listoví k suchým podmínkám.

Je zřejmé, že vrba jíva se od topolu osiky liší svým xeromorfnějším charakterem listoví, ale zároveň oba druhy vykazují podobné hospodaření s vodou. Hodnoty vodního potenciálu obou druhů se v průběhu jednoho dne pohybovaly v rozmezí -0,5 až -2,3 Mpa. Tato studie ukázala, že vybrané intervaly vlnových délek v NIR korelují s poměrným zastoupením pletiv a tloušťkou listu v závislosti na straně listu, na které je odrazivost měřena.

Zhodnocení fyziologického stavu dřevin může být využito k výběru vhodných dřevin k rekultivaci výsypek. Práce má metodický přínos pro hledání vztahů mezi anatomickou strukturou pokožky listu a odrazivostí listoví, je jedna z hlavních metod dálkového průzkumu Země pro velkoplošné monitorování změn stavu vegetace.

Klíčová slova: Výsypka, sukcese, odrazivost, vodní potenciál, anatomická struktura listu, epidermis, hustota průduchů, biochemické a optické vlastnosti listu

Abstract:

Due to coal mining activities, heap substrates rich in clays with poor water permeability and lack of nutrients are relocated outside of mines representing hostile environment to the majority of vegetation. A material from the surface coal mines in Sokolov forming the Velká Podkrušnohorská Heap (VPS) form large locality showing characteristics of anthropogenically devastated landscape. The aim of the present study was to compare leaf structural and biochemical parameters with relation to a leaf reflectance of two pioneer tree species *Salix caprea* and *Populus tremula* with regard to leaf water regime and leaf adaptation to a water loss. From the methodological point of view, the study aimed on contribution to determine relation of selected leaf structural parameters to leaf reflectance what has not been intensively studied yet.

The foliage of trees *P. tremula* and *S. caprea* grown on succession localities S2 a S3 for 30 years was used as a material for my study. The material was studied for its structure using the leaf cross sections and abaxial epidermal strips (thickness of the leaf tissue layers and of a leaf, stomatal size density and area). Other studied parameters were contents of photosynthetic pigments, specific leaf area (SLA), water potential and leaf reflectance in regions of photosynthetically active and near infrared radiations during the course of six months in vegetation season 2014. Then leaf water potential was related to anatomical parameters corresponding to structural xeromorphic adaptations of foliage.

It is evident that *Salix caprea* showed more xeromorphic character of a leaf in comparison with *Populus tremula*, but at the same time both species showed similar water regime management. Values of the water potential of both species were ranging between -0.5 až -2.3 MPa during the course of the day. The present study indicated that selected intervals of NIR wavelengths correlated with proportional thickness of tissues and leaf thickness depending on a reflected side of a leaf.

Evaluation of physiological state of woody plants could be used for selection of suitable plant species for heap recultivation. The present study also has methodological contribution in search for relation between anatomical structure of leaf epidermis and leaf reflectance, which represents one of the main methods of remote sensing for large monitoring of vegetation status.

Key words: Heap, succession, reflectance, water potential, stomatal density, anatomical structure of leaf, epidermis, stomatal density, biochemical properties of leaf

Obsah

OBSAH	5
SEZNAM ZKRATEK:	9
1. ÚVOD	10
1.1. Cíle mé práce:	11
1.2. Hypotézy:	11
2. LITERÁRNÍ PŘEHLED	13
2.1. Revegetace výsypek po důlní činnosti na Sokolovsku	13
2.1.1. Důlní činnost na Sokolovsku	13
2.1.1. Velká podkrušnohorská výsypka	14
2.1.1.1. Rekultivace / Sukcese.....	15
2.1.1.1.1. <i>Salix caprea</i> L.....	16
2.1.1.1.2. <i>Populus tremula</i> L.	16
2.1.2. Podmínky prostředí sukcesní plochy na sokolovské výsypce.....	17
2.2. Vodní potenciál u dřevin	17
2.2.1. Vodní potenciál v rostlině.....	19
2.2.1.1. Příklady vodního potenciálu u druhů <i>Populus</i> a <i>Salix</i>	21
2.3. Přizpůsobení listu temperátních dřevin k faktorům prostředí.....	22
2.3.1. Anatomická struktura listu u temperátních listnatých dřevin.....	22
2.3.2. Ozáření jako faktor determinující anatomickou strukturu listu dřevin.....	23
2.3.3. Závislost struktury listu na dostupnosti vody	25
2.3.4. Hustota průduchů u druhů <i>Populus tremula</i> a <i>Salix caprea</i>	27
2.4. Optické vlastnosti listu	28
2.4.1. Odrazivost listu a faktory ji ovlivňující	28
2.4.2. Vybrané vegetační indexy se vztahem k obsahu biochemických a biofyzikálních látek v listoví	34
2.4.2.1. Biochemické vlastnosti v souvislosti s odrazivostí	35
2.4.2.2. Biofyzikální vlastnosti v souvislosti s odrazivostí	36
2.4.3. Struktura listu v souvislosti s odrazivostí	38
3. MATERIÁL A METODY	39

Materiál	39
3.1. Terénní výzkum	39
3.1.1. Popis stanovišť.....	39
3.1.2. Odběr listoví	40
3.1.3. Terénní měření vodního potenciálu	41
3.2. Laboratorní zpracování vzorků	42
3.2.1. Měření odrazivosti	42
3.2.2. Stanovení obsahu vody	44
3.3. Anatomické analýzy	45
3.3.1. Příprava preparátů pro světelnou mikroskopii	45
3.3.1.1. topol osika:	45
3.3.1.2. vrba jíva:	46
3.3.2. Stanovení hustoty, velikosti a plochy průduchů	47
3.3.3. Porovnání přizpůsobení poměru palisádového a houbovitého parenchymu na nízký obsah vody u obou druhů	49
3.3.3.1. Příprava preparátů pro světelnou mikroskopii	49
3.3.3.2. Stanovení poměru palisádového a houbovitého parenchymu	49
3.3.4. Plocha listu a určení SLA, LMA a hustoty listu	50
3.4. Biochemické analýzy	50
3.4.1. Stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů.....	50
3.5. Meteorologická data.....	50
3.6. Statistické analýzy	51
4. VÝSLEDKY	51
4.1. Meteorologické údaje na stanovišti.....	51
4.2. Terénní měření vodního potenciálu	53
4.2.1. Dynamika vodního potenciálu v listech vrby jívy a topolu osiky v průběhu dne	54
4.2.2. Vodní potenciál v listech vrby jívy a topolu osiky měřený v poledne	56
4.3. Anatomická struktura listu.....	58
4.3.1. Hustota a velikost průduchů	59
4.3.1.1. Rozdíl mezi druhy	59
4.3.1.2. Hustota, velikost průduchu a plocha průduchů v průběhu sezóny	60
4.3.2. Vnitřní struktura listu.....	61

4.3.2.1.	Rozdíl v poměrech palisádového a houbovitého parenchymu u topolu osiky a vrby jívy v průběhu sezóny.....	65
4.3.2.2.	Rozdíl v tloušťce pokožky u obou druhů v průběhu sezóny	66
4.3.3.	Specifická listová plocha	67
4.4.	Biochemické a biofyzikální parametry listu	69
4.4.1.	Fotosyntetické pigmenty.....	70
4.4.1.1.	Rozdíl mezi druhy	70
3.3.1.2	Obsah fotosyntetických pigmentů v průběhu sezóny u vrby jívy i topolu osiky.....	70
4.4.2.	Relativní obsah vody	73
4.4.2.1.	Rozdíl v obsahu vody mezi druhy	73
4.4.2.2	Rozdíl v obsahu vody v průběhu sezóny	74
4.5.	Odrazivost	75
4.5.1.	Reflektanční křivky	75
4.5.2.	Rozdíl ve vybraných indexech u jívy a osiky	79
4.5.3.	Rozdíl odrazivosti v průběhu sezóny ve vybraných indexech u jívy a osiky.....	83
4.5.3.1.	Topol osika:.....	84
4.5.3.2.	Vrba jíva:.....	87
4.5.4.	Vztah biochemických parametrů a odrazivosti	91
4.5.5.	Vztah anatomických parametrů a odrazivosti	91
5.DISKUSE.....		98
5.1.	Diskuse použitých metodických přístupů	98
5.1.1.	Metody stanovení vodního potenciálu	98
	Metody kvantitativního popisu anatomických struktur	99
5.1.2.1.	Systematicky rovnoměrné vzorkování	100
5.1.2.2.	Zjišťování hustoty průduchů	100
5.2.	Diskuse experimentálních výsledků	101
5.2.1.	Vodní provoz rostlin a vodní potenciál.....	101
5.2.2.	Anatomická struktura listu topolu osiky a vrby jívy	102
5.2.3.	Změny anatomických parametrů listu vrby jívy a topolu osiky v průběhu sezóny.....	104
5.2.4.	Sezónní dynamika biochemických vlastností listu	104
5.2.4.1.	Dynamika fotosyntetických pigmentů.....	104
5.2.5.	Odrazivost listů.....	104
5.2.6.	Vztah vybraných anatomických a biochemických parametrů s vegetačními indexy a vybranými intervaly vlnových délek s ohledem na stranu a vrstvu listů.....	109
5.4.	Ekofyziologická interpretace studie: přizpůsobení k nedostatku vody/časnější nástup na stanoviště	110

5.4.1. Využití monitorování fyziologických vlastností dřevin při sukcesích	111
5.5. Zhodnocení přínosu předkládané práce	111
6. ZÁVĚRY:	112
7. SEZNAM LITERATURY	114

Seznam zkratek:

DMF-Dimethylamid kyseliny mravenčí

DPZ-Dálkový průzkum Země

EWT-(Equivalent water thickness)-množství vody na jednotku plochy

CI-(Chlorophyll index)

IR-(Infra red)-Infračervené záření

LD-(Leaf density)-Hustota listu

MDWI-(Maximum difference water index)-Maximální diferenční vodní index

NDVI-(Normalized difference vegetation index)- Normalizovaný diferenční vegetační index

NDWI-(Normalized difference water index)- Normalizovaný diferenční vodní index

NIR-(Near-infrared)-Oblast blízkého infračerveného záření elektromagnetického spektra

PAR- (Photosynthetic active radiation)-Fotosynteticky aktivní záření

PRI-(Photochemical reflectance index)-Fotochemický reflektanční index

RUE-(The ratio between carbon uptake and light absorbed by vegetation)-poměr mezi množstvím asimilovaného uhlíku a množstvím absorbovaného záření vegetací

RWC-(Relative water kontent)-relativní obsah vody

SRN-systematicky rovnoměrně náhodný výběr

VP- Vodní potenciál (ψ_w)

WI- (Water index)-Vodní index

WUE-(water use efficiency)- Efektivita využití vody

1. ÚVOD

Díky zvyšující se lidské populaci na Zemi a rostoucí antropogenní činnosti vznikají rozsáhlé plochy zdevastované krajiny nepřírozeného rázu. Mezi krajinu ovlivněnou hospodářskou činností člověka můžeme zařadit i Sokolovské výsypky vznikající po těžbě hnědého uhlí z povrchových dolů. Po takto významném ovlivnění celkového ekosystému, který vznikl při důlní činnosti z výsypkového substrátu, což ovšem může být pro většinu vegetace nehostinné, je třeba zajistit rekultivaci krajiny a navrátit její přírozený ráz. Důlní substrát bývá převážně živinově chudý, zatížený nevhodným složením půdy a vzhledem ke své struktuře, je neschopný udržet pro většinu vegetace dostatečné množství vody. S ohledem na nepříznivé půdy, které se na lokalitách výsypky nacházejí, je problematické přistoupit k rekultivaci krajiny lépe, než se tomu děje přírozenou sukcesí a je důležité tuto problematiku studovat. Zjištěné poznatky o konkurenceschopnosti druhů a jejich celkovém „fitness“ – fyziologickém stavu je třeba využít k co nejefektivnější a nejekonomičtější rekultivaci devastovaných ploch.

V rámci přírozené sukcese bývají na výsypkách nejvíce úspěšné pionýrské druhy dřevin, které jsou na podobných stanovištích optimálně přizpůsobeny jak k nedostatku vody, vysoké ozářenosti a povětrnostním podmínkám, tak i k nedostatku živin v půdě. Za účelem porovnání úspěšnosti umělé rekultivace a přírozené sukcese se sleduje nejen fyziologický stav a konkurenceschopnost dřevin, ale i jejich vliv na půdní mikroorganismy, faunu, koloběh živin v půdě a vývoj půdních vlastností, které mohou ovlivňovat schopnost půdy udržet vodu a živiny a jejich vliv k celkové tvorbě, funkcím a službám ekosystému.

Cílem mé diplomové práce bylo studium fyziologického stavu dřevin *Populus tremula* L. a *Salix caprea* L., které jsou obvyklými pionýrskými dřevinami na devastovaných, suchých stanovištích, zatížených nedostatkem živin a vysokou ozářeností. V rámci ekosystému oba druhy vykazují preferenci k oblastem charakteristického kopcovitého mikroreliefu, který vznikl navršením a zanecháním výsypkového materiálu z dolů. Dalším cílem bylo porovnat strukturální, optické a biochemické parametry listu ve vztahu k reflektanci listu dvou pionýrských dřevin topolu osiky a vrby jívy, s ohledem k vodnímu režimu a jeho přizpůsobení ke ztrátám vody.

Předkládaná diplomová práce byla vypracována v rámci projektu GAČR P504/12/1288: Úloha funkčních vlastností listů rostlin při akumulaci půdní organické hmoty

během primární sukcese, jehož hlavním řešitelem je prof. Frouz. Tým profesorky Albrechtové v tomto projektu zajišťuje monitorování fyziologického stavu dřevin. Výsledky mojí práce budou dále využity k práci členů řešitelského kolektivu

1.1. Cíle mé práce:

U vrby jívy (*Salix caprea* L.) a topolu osiky (*Populus tremula* L.) rostoucích na sukcesních plochách na výsypce:

A) Provést experimentální porovnání fyziologických, anatomických a optických parametrů listu za účelem posouzení fyziologického stavu dřevin během vegetační sezóny:

1) Porovnat denní dynamiku vodního potenciálu u obou druhů.

2) Charakterizovat rozdíly ve vybraných parametrech anatomické struktury listu mezi oběma druhy.

-Hustota průduchů

-Poměrné zastoupení pletiv a celková tloušťka listu

3) Porovnat sezónní dynamiku odrazivosti listu ve vztahu k vybraným anatomickým a biochemickým parametrům.

-Povrchová struktura listu, přítomnost trichomů, tloušťka pokožky.

-Poměrné zastoupení jednotlivých pletiv a tloušťka listu.

-Obsah fotosyntetických pigmentů a jejich poměry.

B) Metodický příspěvek práce ohledně interpretace odrazivosti ve vztahu ke strukturálním parametrům listu

4) Charakterizovat závislost odrazivosti listu v NIR na vybraných anatomických parametrech listu.

1.2. Hypotézy:

1) Rozdílný nástup obou druhů na sukcesní stanoviště je podmíněn odlišným vodním režimem obou druhů dřevin.

-Dynamika vodního potenciálu v průběhu dne bude odlišná u obou druhů.

-Rozdíl vodního potenciálu mezi druhy v poledne se bude lišit.

2) Anatomická struktura pokožky listu topolu osiky je méně přizpůsobena ke ztrátám vody než struktura pokožky vrby jívy.

3) Odrazivost listu topolu osiky a vrby jívy bude rozdílná nejen v parametrech podmíněných biochemickým složením a obsahem vody v listu, ale i strukturou listu.

4) Anatomická struktura listu topolu osiky a vrby jívy rozdílně ovlivní odrazivost jejich listů.

-Odrazivost listu bude ovlivněna přítomností trichomů a vnitřní anatomickou strukturou listu, jako je poměrné zastoupení pletiv.

2. LITERÁRNÍ PŘEHLED

První část mé práce je věnována literárnímu přehledu, uvedená literatura je podkladem k mé práci a problematice, které se věnuji.

Literární přehled je členěn do čtyř podkapitol. První z nich pojednává o revegetaci výsypkových ploch vzniklých při důlní činnosti na sokolovské výsypce, rekultivacích a charakteristice obou vybraných druhů dřevin, které na výsypkách rostou ať již spontánně či introdukovaně. V následujících třech podkapitolách jsem přistoupila ke konkrétní problematice, kterou ve své práci řeším. Druhá podkapitola se věnuje rozdílu vodního potenciálu u obou druhů studovaných temperátních dřevin a jeho dynamice v průběhu dne a třetí podkapitola se týká vlivu vybraných faktorů prostředí na vývoj listu u vybraných dřevin. Čtvrtá kapitola s názvem Odrazivost pojednává o vlivu anatomické a biochemické struktury listu na jeho optické vlastnosti, především odrazivost a uvádí vybrané vegetační indexy související s anatomickou a biochemickou strukturou listu.

2.1. Revegetace výsypek po důlní činnosti na Sokolovsku

2.1.1. Důlní činnost na Sokolovsku

Počátek těžební činnosti se na Sokolovsku datuje od 16. století. Kolem roku 1850 vznikla těžební společnost na těžbu převážně hnědého uhlí. V současné době společnost spravuje 4 divize: Divizi Jiří, Družba a divizi zpracování a divizi služby. Divize Jiří má centrum nedaleko obce Vintířov, nachází se na Velké podkrušnohorské výsypce, která je s výměrou 1957 ha největší výsypkovou lokalitou na Sokolovsku (Frouz et al., 2007). Zde se také nachází mnou sledované sukcesní plochy S2 a S3. S těžbou hnědého uhlí, která probíhá v povrchových dolech, je spojena rozsáhlá devastace krajiny a životního prostředí (Obr. 2-1).



Obrázek 2-1 Důlní činnost na Sokolovsku.

2.1.1. Velká podkrušnohorská výsypka

Velká podkrušnohorská výsypka vznikla navážením vydolovaného materiálu z povrchových dolů. Spolu s půdami ze Sokolovských dolů byly přivezeny jíly s vysokým obsahem anorganického uhlíku. Zdrojem anorganického uhlíku jsou schránky vodního korýše skořepatce (*Cypris angusta*), od kterého vychází i název cypřišové jíly. Dále jsou na Velké podkrušnohorské výsypce alkalické jíly s obsahem křemene a vápníku (Šourková et al., 2005).

Chemické a fyzikální vlastnosti půdy jsou příznivě ovlivněny akumulací anorganického uhlíku skrz metabolismus rostlin do organické formy, která je zdrojem potravy pro mikroorganismy. Přírozený koloběh organického uhlíku napomáhá zlepšení kvality půdy zadržovat vodu a zlepšuje odolnost vůči erozi.

V průběhu navážení důlního substrátu z dolů docházelo v rámci rekultivace k modelování terénu výsypky, jako například zarovnání výsypkových hald, nebo odvodňovací příkopy (Frouz et al., 2007).

Plochy na Velké podkrušnohorské výsypce, které podléhají samovolné sukcesi, neprošly těmito úpravami a jejich terén je pravidelně kopcovitý, s tím, že mezi jednotlivými vyvýšeninami, tzv. „vlnami“, je vzdálenost přibližně 3 metry s výškou 1,5 metru (Obr. 2-2).



Obrázek 2-2 Sukcesní plocha S3 na Velké podkrušnohorské výsypce.

2.1.1.1. Rekultivace / Sukcese

Rekultivace je důležitou součástí procesu těžby hnědého uhlí a měla by vést k navrácení přirozeného nebo alespoň přírodního rázu celé krajiny po antropogenním zásahu. Rekultivace na Sokolovsku probíhá zhruba od 50. let minulého století (Frouz et al., 2007).

Důlní substrát, který se na výsypkách nachází, je živinově velmi chudý. K obnově ekosystému je důležitá interakce rostlin, půdy a mikroorganismů, které v ní žijí a vzájemně se příznivě ovlivňují (Frouz et al., 2013). Typické dřeviny, které se na Velké podkrušnohorské výsypce využívají k rekultivaci, jsou buk lesní, dub letní, olše lepkavá a olše šedá (Frouz et al., 2015).

Na Velké podkrušnohorské výsypce jsou i oblasti zanechané samovolné sukcesi a můžeme na nich sledovat rozdílný vývoj půdního horizontu i složení biologických společenstev oproti rekultivaci řízené člověkem. Dřeviny, které na Velké podkrušnohorské výsypce dominují oblastem podléhajícím samovolné sukcesi, jsou vrba jíva, topol osika a bříza bělokorá. Pionýrské dřeviny na sukcesních plochách výsypky jsou zhruba 30 let staré (Frouz et al., 2015). Na Velké podkrušnohorské výsypce jsou sledovány 4 stádia sukcese s rozdílným složením vegetace, na kterých lze sledovat rozdílný stupeň vývoje živočišných a rostlinných společenstev (Baldrian et al., 2008). Na čtyři roky staré výsypce vegetace není významná, na 12 let staré lokalitě převažuje porost trávy s dominujícím druhem třtinou křovištní. Poté nastupují pionýrské dřeviny s vysokými nároky na světlo. Ve 21 letém sukcesním stádiu je dominantním druhem vrba jíva, která bývá vytlačena nejprve topolem

osikou a následně celé oblasti dominuje bříza bělokorá. To odpovídá stádiu sukcese 45 let (Baldrian et al., 2008).

K rostlinám účastnících se primární sukcese patří pionýrské dřeviny, které osidlují lokality s nepříznivými podmínkami, vylepšují jejich živinový poměr a jsou součástí vývoje společenstev směřujících ke klimaxovému stádiu. Charakteristikou pionýrských dřevin je jejich vysoká schopnost přizpůsobení se nepříznivým podmínkám, jako je nedostatek živin, vysoká tolerance ke klimatickým výkyvům a zároveň jejich vysoké nároky na oslunění.

Mezi pionýrské dřeviny vyskytující se na výsypce, na které jsem se ve své práci zaměřila, patří vrba jíva (*Salix caprea* L.) a topol osika (*Populus tremula* L.) z čeledi *Salicaceae*. Vrba jíva a topol osika jsou běžně rozšířené druhy nejen na našem území, ale i na velké části Euroasie. Pro nízké nároky vrby jívy a topolu osiky na kvalitu a typ půdy, množství vody, vysokou toleranci k devastovaným substrátům, ale zároveň vysokým požadavkem na oslunění, bývají častými pionýrskými dřevinami v krajině poškozené průmyslem (Úřadníček et al., 2009).

2.1.1.1.1. *Salix caprea* L.

Zvláštností vrby jívy, oproti jiným druhům vrb, je, že vyhledává suchá a významně osluněná místa, kde jí nehrozí zaplavení a snáší jen boční zastínění. Vrba jíva má eliptický tvar listů s hustým oděním trichomů na spodní straně, bývá keřovitěho vzrůstu a nepřesahuje výšku 12 metrů a stáří 40-60 let. Nejčastěji se vrba jíva vyskytuje na skládkách, zbořeništích, pískovnách a jiných devastovaných plochách (Úřadníček et al., 2009) a je první dřevinou, která osidluje sukcesní stanoviště na Velké podkrušnohorské výsypce (Baldrián et al., 2008).

2.1.1.1.2. *Populus tremula* L.

Topol osika rovněž patří mezi pionýrské dřeviny. Ke klíčení potřebuje silně osluněné stanoviště a dožívá se až 150 let s možnou výškou až 25 metrů. Kořeny topolu osiky bývají spíše povrchové, sahající do vzdálenosti 20-30 metrů od kmene, snáší proudící podzemní vodu, ale i stanoviště s nedostatkem vody. Osika má nízké nároky na kvalitu půdy, vyskytuje se na černozemních píscích a rašelinných půdách, nebo na půdách s mírným zasolením (Úřadníček et al., 2009). Topol na současných sukcesních stanovištích na Velké podkrušnohorské výsypce většinou dosahuje stáří 30 let, v tomto stádiu topol osika osidluje a postupně přerůstá a zastiňuje vrbu jívu (Baldrian et al., 2008).

2.1.2. Podmínky prostředí sukcesní plochy na sokolovské výsypce

Sukcesní plocha na sokolovské výsypce je pro vysoké oslunění, které je hlavním kritériem pro růst pionýrských dřevin, příznivou lokalitou pro nenáročné dřeviny. Zároveň jsou sukcesní plochy na sokolovské výsypce zatíženy nižším úhrnem srážek a vyšší teplotou, než jaký je průměr v Karlovarském kraji (<http://www.chmi.cz/>). Jedním ze stresových faktorů, se kterými se musí vegetace na výsypce vyrovnat, je vysoký podíl těžkých jíílů a písků v půdě způsobující špatné zadržování vody na lokalitě, nebo nízké či vysoké pH s nedostatkem organického uhlíku. Nízká schopnost půdy na výsypce udržovat vodu je také dána tímto nízkým obsahem organického uhlíku (Bartuska and Frouz 2015), který je zdrojem energie pro mikroorganismy zvyšující obsah dusíku a fosforu v půdách a tím podporují růst rostlin přispívající ke zlepšení kvality půdy a lepší dostupnosti vody v půdě (Šourková et al., 2005).

2.2. Vodní potenciál u dřevin

Vodní potenciál je základním pojmem při studiu vodního režimu rostlin a vypovídá o stavu vody v systému. Vodní potenciál se používá k výpočtu hydraulické vodivosti v ekofyziologických studiích. Například se vodní potenciál využívá k pochopení reakce lesních ekosystémů stresovaných suchem v souvislosti se změnou klimatu a zvýšením průměrné teploty (<http://www.ipcc.ch>, Anderegg et al., 2014). Vodní potenciál je charakterizován jako rozdíl chemického potenciálu vody v systému a chemického potenciálu čisté vody při stejném atmosférickém tlaku, který je nulový (Slatyer and Taylor 1960). Následné údaje o výpočtu vodního potenciálu byly převzaty z (Pallardy 2008). Vodní potenciál lze tedy vypočítat podle rovnice:

$$\psi_w = (\mu_w - \mu_w^0) / V_w$$

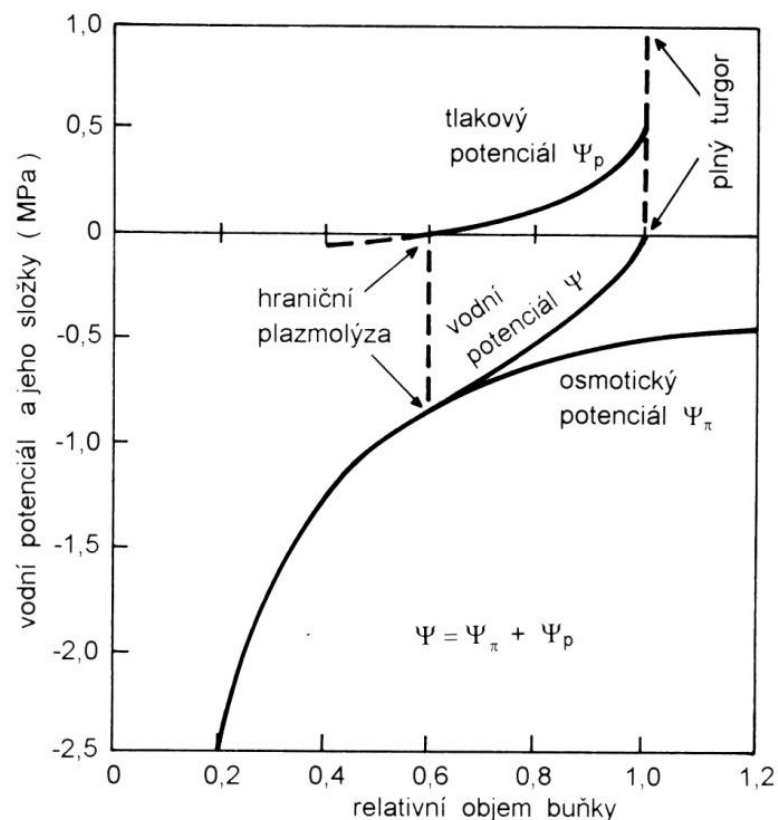
(ψ_w =vodní potenciál, μ_w =chemický potenciál vody v systému, μ_w^0 =chemický potenciál čisté vody, V_w =molární objem vody.)

Chemický potenciál vody je formulován jako množství volné Gibbsovy energie vody v dané soustavě (μ_w). Vodní potenciál je značen ψ_w a je tvořen hodnotami potenciálů osmotického (ψ_s), gravitačního (ψ_g), tlakového (ψ_p) a matričního (ψ_m), dává se v jednotkách tlaku Pa (častěji MPa) a je definován vztahem:

$$\psi_w = \psi_s + \psi_p + \psi_m + \psi_g$$

Osmotický potenciál je dán množstvím rozpuštěných látek ve vodě, které potenciál vody snižují, proto ψ_w je záporný. Rozdíl mezi tlakem vody v soustavě a atmosférickým tlakem se nazývá tlakový potenciál a může být kladný, například v parenchymatických buňkách, kde se nazývá turgor, nebo záporný ve vodivých pletivech xylému. Gravitační potenciál je tím vyšší, čím je větší vzdálenost od země (Pallardy 2008). Matriční potenciál se udává v případech, kdy voda tvoří velmi tenké vrstvy, jako například v kapilárních prostorech půdy. V ekofyziologii je matriční potenciál pro svůj malý význam často zanedbáván (Kramer and Boyer 1995).

Vodní potenciál roztoků se může velice rychle měnit a je závislý i na místě v systému, kde jej měříme. Potenciál půdy se pohybuje od 0 MPa u vlhké půdy a okolo -2,5 MPa u půdy suché (Pallardy and Kozlowski 1981). Hodnoty a vztahy složek vodního potenciálu v rostlinné buňce názorně zobrazuje Hoflerův diagram (Obr. 2-3), který vyjadřuje vztah vodního potenciálu vody a objemu buňky (Procházka et al., 1998).



2-3 Hoflerův diagram: Od 0-1 (Mpa) na ose Y je buňka plně turgescenční. S klesajícím vodním potenciálem buňky se zároveň snižuje její objem a zvyšuje se osmotický potenciál. Převzato z (Procházka et al., 1998).

2.2.1. Vodní potenciál v rostlině

Na příjmu a vedení vody v rostlině se podílí hlavně osmóza a gradienty vodního potenciálu mezi půdou, rostlinou a atmosférou. Příjem vody rostlinou probíhá pouze díky rozdílu vodních potenciálů směrem z míst s vyšším vodním potenciálem do míst s nižším vodním potenciálem.

Vodní potenciál může mít významnou výpovědní hodnotu o hospodaření rostliny s vodou a fyziologickém stavu jedince. Hodnoty vodního potenciálu se mohou významně lišit i v rámci jednoho rodu, například u rodu *Salix*, u kterého byly nalezeny největší rozdíly ve vodním potenciálu u dvou druhů rostoucích za suchých podmínek, než mezi druhy, kdy jeden rostl na suchém stanovišti a druhý na dobře zavlaženém stanovišti.

Dále se mohou projevovat rozdíly ve vodním potenciálu při zjišťování konkurenceschopnosti. Jako příklad je možné uvést druhy *Acer rubrum* L. a *Quercus rubra* L., kteří se účastní stejného stádia sukcese, nacházející se na jedné lokalitě, přesto můžeme pozorovat odlišné hydraulické strategie, které mohou vést k rozdílům v hospodaření s vodou (Thomsen et al., 2013). U několika druhů vrb na jednom stanovišti, kde byl nalezen nejnížší vodní potenciál u suchomilného druhu *Salix discolor*, která měla zároveň nejvyšší růstovou rychlost (Savage and Cavender-Bares 2011). Rozdíl ve vodním potenciálu můžeme nalézt i mezi klony topolu osiky, které mají různý stupeň poškození. U poškozených osik byly nalezeny vyšší hodnoty vodního potenciálu než u zdravých jedinců, což může být dáno jejich špatnou schopností přizpůsobit se k suchu (Anderegg et al., 2014). Na hodnotách vodního potenciálu můžeme sledovat schopnost přizpůsobení k suchým podmínkám, kdy rostliny topolu osiky a topolu bílého pěstované za vysokého sucha, měly nižší hodnoty vodního potenciálu, než rostliny mírně, nebo nestresované suchem, což může být důsledek přizpůsobení k ekologickým podmínkám, kdy suchem stresované osiky a topoly bílé, vykazovaly nejnížší poškození vodivých elementů při nižších hodnotách vodního potenciálu oproti nestresovaným rostlinám (Awad et al., 2010). Také při zjišťování rozdílů dynamiky hydraulické vodivosti u dubu červeného a javoru červeného na jedné lokalitě, byla mezi druhy pozorována odlišná strategie v hospodaření s vodou. Dub červený vykazuje horší hospodaření s vodou, oproti javoru, který má odlišnou strategii v získávání vody a je schopen na ni dosáhnout do nižších vrstev půdy, než dub (Thomsen et al., 2013).

Vodní potenciál xylému listu je závislý na okolních podmínkách, jako je ozáření, evaporace a vlhkost půdy (Pallardy and Kolowski 1981). Vzdušná vlhkost a teplota, která se během dne významně mění, určuje vodní potenciál okolní atmosféry (Obr. 2-4). Mezi

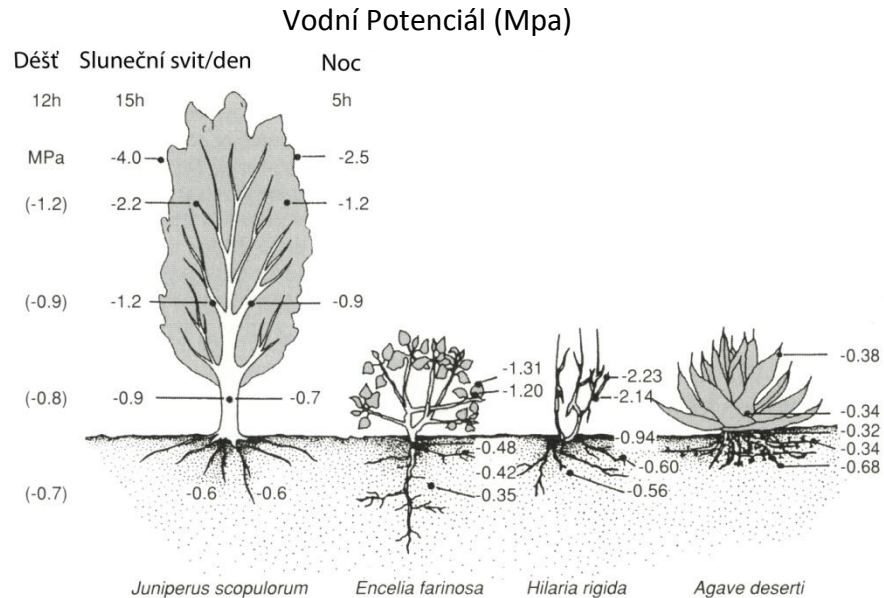
teplotou a vlhkostí vzduchu je exponenciální vztah, kdy se schopnost vzduchu udržet určité množství vody v plynném skupenství zvyšuje s jeho teplotou. Čím méně nasycený je vzduch vodní párou, tím je transpirace vyšší a vodní potenciál v rostlině se naopak snižuje. U dubu červeného bude odpověď na sníženou vlhkost vzduchu výraznější než u javoru červeného. Vodní potenciál dubu se bude v poledne snižovat s vodním potenciálem půdy a snižující se vlhkostí vzduchu, oproti ψ_w javoru, který se za stejných podmínek snížil jen o málo (Thomsen et al., 2013).

Dynamika vodního potenciálu se liší i v průběhu jednoho dne. V poledne může hodnota vodního potenciálu listu dosahovat hodnot, které hraničí se vznikem kavitace v xylému. Za takových podmínek, vzniku kavitace lépe odolávají mírně stresované rostliny osiky a topolu bílého oproti rostlinám kontrolním (Awad et al., 2010). S tím souvisí schopnosti přizpůsobit svůj příjem vody v půdě, která je během noci suchá. Javor je schopen nasávat vodu i ze suché půdy avšak u dubu se projevuje velký rozdíl mezi vodním potenciálem xylému v půdě suché a vlhké. Kořeny javoru dosahují hlouběji a lepší dostupnost k vodě mu zajišťuje lepší hospodaření s vodou (Thomsen et al., 2013).

Proto se také jako referenční hodnota maximálního ψ_w k minimálním hodnotám ψ_w měřeným během dne stanovuje takzvaná „pre-dawn“ hodnota, což je vodní potenciál za neměnných podmínek před úsvitem (Thomsen et al., 2013). Hodnoty vodního potenciálu pro naměření pre-dawn se měří mezi 03-05 hodinou (Anderegg et al., 2014), nebo 04-06 hodinou ranní (Thomsen et al., 2013; Awad et al., 2010), kdy má většina rostlin zavřené průduchy (Larcher 2003). Rostliny, které za tmy neasimilují CO_2 , nepotřebují mít v noci otevřené průduchy pro příjem CO_2 , díky čemuž nedochází k transpiraci a rostlina šetří vodu. V noci se obvykle také sníží teplota, tím i celkový výpar a vodní potenciál půdy se zvyšuje.

Zavíráním průduchů může rostlina regulovat ztráty vody, hodnoty ψ_w a tím reagovat na náhlé sucho. Dub letní vykazuje jen malou regulaci vodivosti průduchů, což za nízké vzdušné vlhkosti a omezené dostupnosti vody v půdě vede ke snížení vodního potenciálu. I zvýšená ozáření má vliv na zvýšení transpirace a tím ztrátu vody, která pohání pasivní transport v xylému, důsledkem je snížení vodního potenciálu (Thomsen et al., 2013).

Hodnoty vodního potenciálu se liší i v jednotlivých orgánech rostliny. Vodní potenciál v buňkách kořene bude méně záporný, než v xylému kořene a ten bude méně záporný, než hodnota v xylému listu (Pallardy 2008). Vodní potenciál v listovém mezofylu a xylému je velice podobný, ale za extrémních podmínek může vodní potenciál xylému dosahovat zápornějších hodnot (Jarvis et al., 1976).



2-4 Vodní potenciál u rostlin s různým ekologickým přizpůsobením. Na obrázku je vidět odlišný vodní potenciál u stromu, keře a byliny. Vodní potenciál se liší i v místě jeho měření na jedné rostlině, například kořeny mají vždy vyšší vodní potenciál, oproti nadzemním částem. Podobně jako se vodní potenciál mění v průběhu jednoho dne, kdy v noci bývá vyšší, než ve dne. Převzato z (Larcher 2003).

Při zkoumání vodního stavu rostliny se zaměřujeme na hodnoty vodního potenciálu ve vodivých pletivech xylému. Tyto hodnoty se zjišťují několika způsoby: termočláňkovým psychrometrem, termočláňkovým hygrometrem rosného bodu nebo tensiometrem (Pallardy 2008). Díky tomu, že má rostlina v cévních svazcích xylému vždy záporný vodní potenciál, jej můžeme velice snadno měřit také pomocí tlakové komory. Měření provádíme na principu vyrovnání záporných hodnot vodního potenciálu (Pallardy 2008), což je metoda, kterou jsem použila ve své práci.

2.2.1.1. Příklady vodního potenciálu u druhů *Populus* a *Salix*

Populus tremula i *Salix caprea*, jsou pionýrské dřeviny, nacházející se na stejných stanovištích ranné sukcese, mírného pásu s širokým areálem rozšíření a schopností přizpůsobit se různým podmínkám prostředí. Jejich strategie v hospodaření s vodou a řízení vodního režimu se může lišit. *P. tremula* a *S. caprea* dobře snáší i sušší oblasti (Úředníček et al., 2009), což se projevuje na hospodaření s vodou i hodnotách vodního potenciálu.

Z literatury jsou konkrétní hodnoty vodního potenciálu zmiňované buď u semenáčků, anebo při pěstování v systémech vzdálených přirozenému prostředí, ve kterém rostou dospělí jedinci (Awad et al., 2010). Studie týkající se měření vodního potenciálu na dospělých stromech, nebo porostech, neuvádí původní data o hodnotách vodního potenciálu, ale spíše

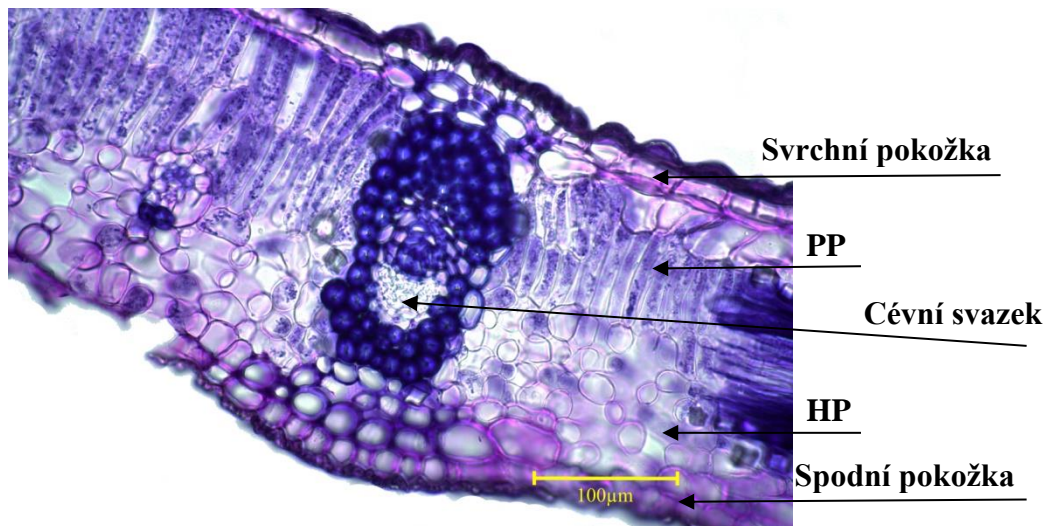
jen přepočty na jiné veličiny (hydraulická vodivost), (Anderegg et al., 2014). Jako orientační data uvádím hodnoty vodního potenciálu semenáčů druhu *P. tremula* při vysokém vodním deficitu -2,5 MPa a kontroly -0,8 MPa (Siemens and Zwiazek 2003).

U semenáčů vrby jívy jsou uváděny konkrétní hodnoty ψ_w , a ve studii týkající se šesti druhů vrb a je ψ_w použit pouze jako nástroj pro určení rozdílů fyziologického stavu u rodu *Salix*. Pre-down hodnoty ψ_w se u šesti druhů vrby pohybovaly v rozmezí -0,59 až -0,71 Mpa. U druhu *S. discolor* (velice příbuzný druh *S. caprei*), vypěstovaného ve skleníku, jsou uváděny hodnoty vodního potenciálu -0,59 MPa (Savage and Cavender-Bares 2011). Nicméně z širokého areálu jejího rozšíření a absenci výskytu u vody můžeme usuzovat, že snáší spíše suché podmínky a hodnoty vodního potenciálu budou také spíše nižší než u osiky.

2.3. Přizpůsobení listu temperátních dřevin k faktorům prostředí

2.3.1. Anatomická struktura listu u temperátních listnatých dřevin

Anatomická stavba listu u temperátních listnatých dřevin, které jsou převážně dvouděložné rostliny, představuje obvykle dorziventrální typ listu a je tvořena pletivy krycími, vodivými a základními (Obr. 2-5). Mezi pletiva krycí patří jednovrstevná pokožka, kryta kutikulou, která poskytuje ochranu před vysycháním a nadměrnou ozářeností. Vodivá pletiva tvoří žilnatinu listu a zajišťují transport vody do listu a odvod asimilátů z fotosyntézy, která probíhá v pletivech základních asimilačních. Pletiva základní v listu tvoří mezofyl, který má obvykle charakter dvojího typu dle tvaru buněk-houbovitý parenchym z válcovitých buněk a palisádový parenchym s buňkami nepravidelně laločnatého tvaru.



Obrázek 2-5 Příčný řez listem topolu osiky. Na povrchu je svrchní (adaxiální) epidermis, pod ní dvouvrstevný palisádový parenchym (PP), houbovitý parenchym (HP) a spodní (abaxiální) epidermis. Uprostřed je cévní svazek, tvořený kolaterálním cévním svazkem se sklerenchymatickými výztužemi zasahujícími až pod pokožku. Barveno toluidinovou modří, světlé pole, zvětšení 400x.

Vnější podmínky, kterým jsou dřeviny při svém růstu vystaveny, podmiňují anatomickou a morfologickou stavbu listu (Kröber et al., 2014). Faktory prostředí ovlivňující konkrétní anatomické parametry listu jsou zejména ozáření, dostupnost vody, obsah minerálních látek v půdě, pH půdního roztoku, nebo okolní teplota. Tato kapitola je zaměřena na ozáření jako jeden z hlavních činitelů determinujících vývoj struktury listu na anatomické úrovni. Anatomická struktura listu ovlivňuje schopnost listu vstřebávat, propouštět a odrážet světlo, které na list dopadá. Dále je zde kladen důraz na vodní režim rostliny a stav vody v listu jako faktor přispívající k optickým vlastnostem listu.

2.3.2. Ozáření jako faktor determinující anatomickou strukturu listu dřevin

Ozáření je jeden z faktorů, které jsou při studiu ekofyziologie dřevin nezanedbatelné (Hanba et al., 2002). U dřevin jsou důležité vnější podmínky na počátku sezóny, kdy se vyvíjí většina listů. Mladé listy topolu osiky a lípy srdčité jsou přizpůsobeny takové ozáření, která na počátku sezóny ovlivňuje tvorbu nových asimilačních orgánů (Niinemets et al., 2004). S listy vyvinutými za určitých vnějších podmínek musí strom pracovat celou vegetační sezónou, během které se podmínky mění. Topol osika je k zastínění netolerantní, zatímco lípa srdčitá stín snáší dobře. Osika má vyšší suchou hmotnost na plochu listu, než lípa srdčitá, což také potvrzuje slunnější charakter listu osiky oproti lípě srdčité (Niinemets et al., 2004). Bylo potvrzeno, že vývoj listů může záležet i na ozáření, jaká byla v daném místě minulou

sezónu. Ukázalo se, že parenchym v pupenech druhu *Fagus crenata* Blume tvoří dvě vrstvy delších buněk palisádového parenchymu na místě listů, které byly minulý rok vystaveny vysoké ozáření, oproti pupenům nevyvíjejících se za vysoké ozáření a měly jen jednu vrstvu palisádového parenchymu (Uemura et al., 2000). S tím souvisí i klíčení semen a rychlost nástupu na sukcesní stanoviště. Pionýrské dřeviny, které nastupují na sukcesní stanoviště v rané fázi, jsou na vysokou ozáření přizpůsobeny anatomickou strukturou listu vyšší tloušťkou a větší plochou mezibuněčných prostor v mezofylu, než druhy s pozdějším nástupem. Semenáče pionýrských druhů jsou schopny vyklíčit jen za vysoké ozáření, oproti později nastupujícím dřevinám, které snášejí stín (Augspurger 1984 cit. dle Hanba et al., 2002).

Prostředí, ve kterém dřeviny rostou, má vliv na anatomickou strukturu, hustotu a tloušťku listu (Castro-Díez et al., 2000). U listnatých dřevin, jako je topol osika, bříza bělokorá a lípa srdčitá, zvýšená ozáření vede k vyšší specifické listové hmotnosti (LMA- „Leaf mass per area“), (Hallik et al., 2009), která u temperátních listnatých dřevin, mezi něž bříza bělokorá patří, koreluje s hustotou listu, ale ne s tloušťkou listu. Hustota listu je vyjádřena jako poměr mezi specifickou hmotností listu LMA a tloušťkou listu. Specifická hmotnost listu je obrácená hodnota ke specifické listové ploše (SLA), (Vohland et al., 2010). Specifická listová plocha pozitivně koreluje s listovou hustotou u 52 druhů temperátních dřevin, mezi kterými je například vrba jíva, olše lepkavá, nebo bříza bělokorá (Castro-Díez et al., 2000).

$$\frac{\text{Plocha}}{\text{Suchá hmotnost}} = \text{Specifická listová plocha (SLA)}$$

$$\frac{\text{Suchá hmotnost}}{\text{Plocha}} = \text{Specifická listová hmotnost (LMA)}$$

$$\frac{\text{LMA}}{\text{Tloušťka listu}} = \text{hustota listu}$$

Z výše zmíněné studie je zřejmé, že vrba jíva má nejmenší LMA ze všech studovaných druhů, a bříza bělokorá, olše lepkavá mají LMA jen o něco vyšší (Castro-Díez et al., 2000). Závěrem studie, zabývající se vlivem zvýšené ozáření na LMA je, že LMA se exponenciálně zvyšuje s ozářením, kdy hodnoty LMA u břízy bělokoré a lípy srdčité jsou nižší než hodnoty u topolu osiky (Hallik et al., 2008). Z toho můžeme usuzovat, že listy topolu osiky mají slunnější charakter, než listy vrby jívy.

Při příliš vysoké ozáření, kdy rostlina nedokáže zpracovat tak velké množství dodávané energie, může dojít k fotopoškození listu na úrovni fotosystémuII a xantofylového cyklu, což bylo prokázáno u druhů *Betula platyphylla* Sukatchev, *Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb a *Acer mono* Maxim. (Kitao et al., 2000).

Vysoká ozáření není jediný stresový faktor fotosyntetického aparátu, kterému se musí rostlina bránit. V prostředí s příliš vysokou ozáření může být rostlina vystavena též suchu. Při nedostatku vody bylo prokázáno, že vyvíjející se topol osika má nižší počet chloroplastů, než při dostatečné závlaze, aby nedošlo k jeho poškození suchem. Za nízké dostupnosti vody, topol osika, zvyšuje tloušťku buněčné stěny v průměru o 5-10 μm , v závislosti na ozáření. Při nedostatku vody má vyšší ozáření pozitivní vliv na tloušťku buněčné stěny (Tosens et al., 2012). List se tím stává kompaktním a odolnějším.

Přizpůsobení k vysoké ozáření bylo prokázáno též prodloužením buněk u druhu *Fagus* ssp. (Uemura et al., 2000) a zvýšením tloušťky mezofylu u tří druhů javorů (*Acer rufinerve* Siebold., *A. mono* Maxim. a *A. palatum* Thunb.). Změny v anatomické struktuře listů tří druhů javoru se projevily zvýšením tloušťky mezofylu a plochy chloroplastů, což pozitivně ovlivnilo i rychlost fotosyntézy, hospodaření s CO_2 a s vodou. Ozáření má na transpiraci u třech druhů javorů pozitivní vliv, během noci je transpirace značně potlačena. Ale při vysoké ozáření javory zavírají průduchy během dne, čímž je transpirace omezena a pozitivním způsobem je ovlivněno využití vody (WUE-, „water use efficiency“), (Hanba et al., 2002). Efektivita využití vody se obecně popisuje jako množství vody, které rostlina spotřebovala na produkci jednotky biomasy. S WUE souvisí i vodivost listu pro CO_2 a rychlost fotosyntézy. Při nižší ozáření se u topolu osiky snižuje vodivost listu i rychlost asimilace CO_2 . Toto snížení vodivosti průduchů i rychlost asimilace CO_2 u topolu osiky lze vysvětlit tím, že při nižší ozáření je horší vývoj chloroplastů, větší mezibuněčné prostory (Tosens et al., 2012) a celkově nižší tloušťka mezofylu a listu se projevuje i u třech druhů javorů (Hanba et al., 2002).

2.3.3. Závislost struktury listu na dostupnosti vody

Dostupnost vody a její využití ovlivňuje anatomickou strukturu listu. Subtropické opadavé stromy s tenkými listy, které mají větší specifickou listovou plochu, jsou náchylnější k poškození suchem více, než rostliny se silnějšími listy. Čím větší plocha listu subtropických opadavých dřevin, tím nižší rezerva vody, díky čemuž je u nich vyšší rychlost transpirace. Nejen celková tloušťka listu, ale i tloušťka buněčné stěny, je ovlivněna množstvím dostupné vody a má vliv na hospodaření opadavých dřevin s vodou (Kröber et al., 2014). Při nedostatku

vody se u topolu osiky projevují odlišná uspořádání buněk v listu, jako třeba modifikace buněčné stěny v listech, které se projevují jejím tloušťnutím (Tosens et al., 2012). Při nedostatku vody se u javoru *Acer rufinerve* může snížit pórovitost mezofylu, zmenší se velikost mezibuněčných prostora, a tím je i prostor pro difuzi plynů v listu omezen. Vodivost plynů a rychlost asimilace CO₂ uvnitř listu je u rostlin ovlivněna vodivostí průduchů, ale i anatomickou strukturou listu a tloušťkou buněčné stěny mezofylových buněk. (Hanba et al., 2002).

Předpokládalo by se, že rostliny s nižší SLA budou mít silnější listy, menší plochu odparu a měly by méně transpirovat. Toto bylo prověřováno s šesti druhy topolů, kdy vyšší rychlost transpirace povede k nižší WUE, která souvisí s rychlostí asimilace CO₂. Oproti ostatním studovaným pěti topolům, u topolu černého byla transpirace i vodivost průduchů nejvyšší, ale WUE byla signifikantně vyšší u topolu euroamerického, který měl nejnižší vodivost CO₂ v listu. Bylo prokázáno, že tloušťka listu a SLA u topolů nemá na WUE tak velký vliv, jako hustota průduchů na abaxiální straně listu (Cao et al., 2012), což bylo potvrzeno i na topolu *Populus trichocarpa* Torr., že při snížení hustoty průduchů se WUE zvýšilo (Lawson et al., 2014).

Je stále předmětem mnoha zkoumání, jak rostlina reguluje výdej vody prostřednictvím funkce průduchů (Lawson et al., 2014; Kröber et al., 2014; Cao et al., 2012; Brodribb and McAdam 2011). Vodivost průduchů je regulována dvěma mechanismy, hydraulickými a metabolickými signály. První, čistě fyzikální, souvisí s dostupností vody, která má přímý vliv na turgor svěřacích buněk a jejich otevřenost. Na druhé straně metabolické procesy, mezi něž patří fytohormonální signalizace a rychlost fotosyntézy, jsou ovlivněny ozářeností. Tyto signály také vyvolávají turgorové změny ve svěřacích buňkách pomocí toku iontů. (Brodribb and McAdam 2011). Řízení vodivosti průduchů vlivem dostupnosti vody bude zřejmě evolučně starší. U šesti druhů opadavých dřevin, mezi které patřila i vrba jíva a topol osika, bylo zjištěno, že stomatální vodivost je především závislá na okolní vlhkosti a až poté, o něco méně, na dostupnosti CO₂, nebo rychlosti fotosyntézy (Aasamaa and Sober 2011).

Ovlivňování transpirace, za účelem regulace WUE a hospodaření rostliny s vodou, je v současné době předmětem mnoha studií, které se týkají zemědělských plodin za účelem zvýšení jejich výnosů při snížené spotřebě vody. Nejen u typických zemědělských plodin, ale i u některých dřevin, například druhů topolů, které jsou náchylné k vodnímu stresu, je snaha porozumět regulaci hustoty průduchů, což úzce souvisí s jejich vodním režimem (Lawson et al., 2014).

2.3.4. Hustota průduchů u druhů *Populus tremula* a *Salix caprea*

Na hospodaření rostlin s vodou mají vliv parametry anatomické struktury listu, především pokožka listu tvořena zpravidla jednou vrstvou epidermálních buněk, jež bývají doplněny specializovanými strukturami, mezi které patří průduchy a trichomy. Hustota trichomů a tloušťka buněčné stěny pokožky listu, stejně jako hustota a velikost průduchů, ovlivňují hospodaření s vodou. Tloušťka buněčné stěny pokožky listu a hustota trichomů zvyšují odrazivost listu, jeho hraniční vrstvu pro difuzi plynů mezi vnitřním prostorem listu a atmosférou a celkově pomáhají při regulaci teploty listu. Ekofyziologie dřevin má vliv na anatomickou strukturu listu, která následně ovlivňuje vodivost průduchů a xylému u *P. trichocarpa* (Kröber et al., 2014).

Struktura listu, velikost a hustota průduchů se liší v závislosti na prostředí, druhu i konkrétním genotypu, a je využívána v taxonomii (Chen et al., 2008; Ghahremaninejad et al., 2012). Hustota průduchů listu, jako taxonomický znak, může být také využita k identifikaci konkrétního, nejrychleji rostoucího genotypu topolu, což je ekonomicky výhodné (Yu 2001). Rychle rostoucí druhy topolů jsou často využívány jako zdroj energie (Cao et al., 2012). Hustota průduchů listu topolu (*P. tremula* x *P. alba*) je nesmírně variabilní, liší se nejen mezi druhy, ale i mezi klony jednoho druhu, pozicí na stromě a také záleží na konkrétním listu. Je dáno přirozenou expanzí listu, že mladé, vyvíjející se listy mají mnohem vyšší hustotu průduchů, než plně vyvinuté listy. Na počátku sezóny je vývin listů topolu (*P. tremula* x *P. alba*) důležitý pro včasné zahájení transpiračního toku a asimilace. V pozdějších fázích vývoje se list topolu (*P. tremula* x *P. alba*) zvětšuje jen do plochy a hustota průduchů se příliš nemění, nebo se zmenšuje (Lawson et al., 2014).

Hustota průduchů u křížence *P. tremula* x *P. tremuloides* se pohybuje okolo 211/mm² u jednoletých semenáčů z lesa (Yu 2001), nebo okolo 100 μm/mm² u semenáčů *P. tremula* kříženého s *P. alba* pěstovaných ve skleníku (Lawson et al., 2014). Tento rozdíl může být dán odlišným druhem a hlavně podmínkami pěstování, kdy můžeme očekávat, že ve skleníku byly semenáče vystaveny optimálním podmínkám vývoje.

Nalezená literatura zmiňuje pouze jeden příklad hustoty průduchů u druhu *S. caprea*. Konkrétní studie pochází z Iráku a udává nepřítomnost průduchů na adaxiální straně listu a hustotu 235/mm² na straně abaxiální. Velikost průduchů *S. caprea*, se v tomto případě pohybuje 20,1 x 13μm (Ghahremaninejad et al., 2012). Vzhledem k místu pěstování, kterým je aridní oblast Iráku, můžeme očekávat vysoké teploty a nízkou vzdušnou vlhkost.

Přizpůsobení k možnému přehřátí bývá změna hustoty průduchů, což se projeví redukcí počtu průduchů. Nicméně u rodu *Salix* je rozpětí v hustotě průduchů značné, pohybuje se od 74-1304 průduchů na mm² (Ghahremaninejad et al., 2012).

Právě hustota průduchů na abaxiální, spodní straně listu, a jejich vodivost, je u dubu letního klíčová pro asimilaci uhlíku. To je doloženo efektivitou využití vody, která pozitivně koreluje s hustotou průduchů (Roussel et al., 2009).

2.4. Optické vlastnosti listu

Záření, které dopadá na list, z části listem prochází (transmitance), z části je pohlceno (absorpce) a z části je odraženo (reflektance). V oblasti fotosynteticky aktivního záření (PAR), což je 380-760 nm, bývá u rostlin všeobecně rozdělení mezi pohlcování 75 % záření, 15 % záření listem projde a 15 % je odraženo (Gates et al., 1965).

Ve své práci se budu zabývat hlavně složkou záření, která se od listu odráží a je hlavní veličinou pro dálkový průzkum Země (DPZ). Odrazivost je možné v laboratorních podmínkách snadno měřit spektrometrem s kontaktní sondou, který získává stejná data o odrazivosti na nižší úrovni listu, než při DPZ, kdy údaje dodává odrazivost celé koruny či zápoje a společenstev. Na odrazivost listu má vliv hlavně obsah opticky aktivních látek v listu, jako jsou fotosyntetické pigmenty, fenolické látky a lignin. Také množství vody v listu ovlivňuje odrazivost významně a v neposlední řadě anatomická struktura listu (Gates et al., 1965). Pod pojmem povrchová struktura listu si můžeme představit složení a strukturu pokožky, přítomnost trichomů a jiných xerofytních adaptací dotvářejících vzhled listu. Odrazivost od vnitřní struktury listu ovlivňuje podíl mezofylu k mezibuněčným prostorům, objem mezibuněčných prostor, tvar buněk a poměr palisádového a houbovitého parenchymu. Není jednoduché zjistit, od jaké konkrétní vnitřní struktury listu se záření odráží, protože v mezibuněčných prostorech se od buněk může vícenásobně odrazit a následně projít z prostoru listu ven, nebo být pohlceno jinou buňkou v mezofylu.

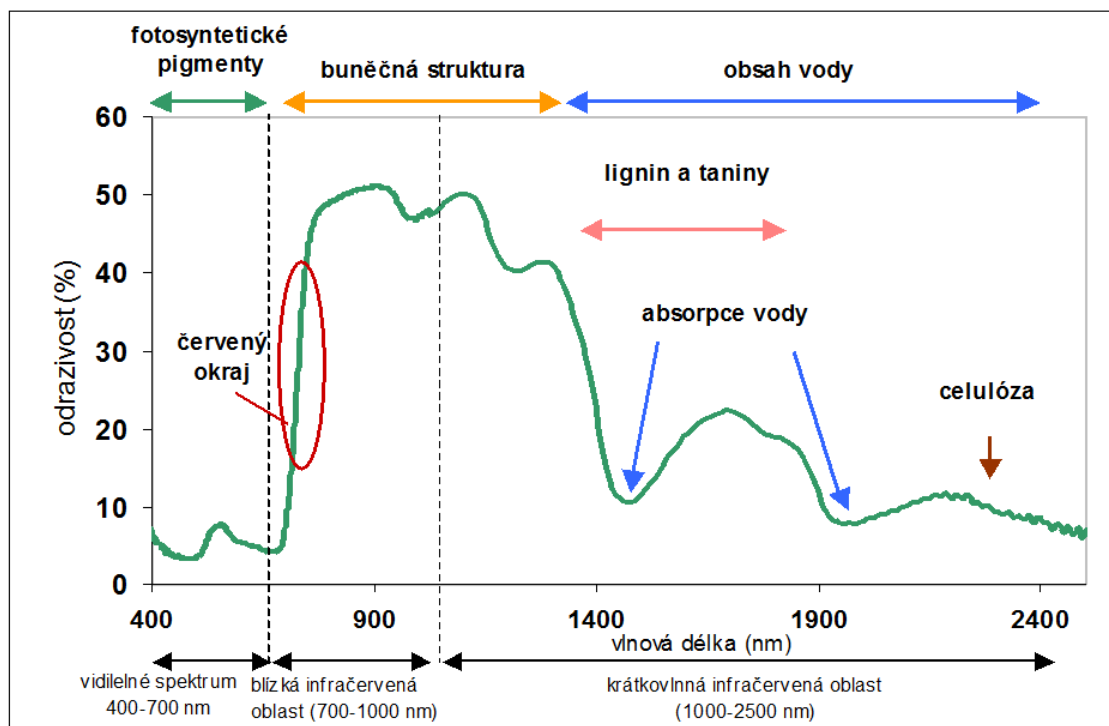
2.4.1. Odrazivost listu a faktory ji ovlivňující

List je z optického hlediska nesmírně složitá struktura na porovnávání reflektance. Odrazivost listu závisí na mnoha proměnných, mezi které patří typ listu, jeho tloušťka, zastoupení typů pletiv, tloušťka svrchní i spodní pokožky a také struktura povrchu listu, jako jsou trichomy a kutikula (Klančnik et al., 2014; Slaton et al., 2001). Další proměnné přispívající k odrazivosti, jsou biochemické parametry listu, mezi které patří fotosyntetické

pigmenty, jako jsou chlorofyly, karotenoidy a fotosynteticky neaktivní, antokyany (Bushman et al., 2012; Gitelson et al., 2003). Do celkové odrazivosti můžeme zahrnout i biochemické struktury listu, které nemají fotosynteticky aktivní charakter, což jsou celulóza, lignin a proteiny. V neposlední řadě se na odrazivosti listu podílí i obsah vody v listu (Kokaly et al., 2009).

Fyziologický stav rostlinných společenstev, fenologický vývoj rostlin a pokryvnost lesních porostů i zemědělských ploch, druhové složení společenstva se v posledních několika letech sleduje pomocí metod dálkového průzkumu země (DPZ). Při DPZ se monitoruje pokryvnost zemského povrchu rostlinami pro odvětví zemědělství, lesnictví, ale i kartografii, geologii a jiná odvětví. První satelit monitorující povrch země, Landsat 1 byl vypuštěn v roce 1972 a v průběhu let ho následovaly další. Pomocí senzorů z družic a letadel, se posledních 30 let získávají informace o záření, které se odrazí od porostu vegetace. Díky dálkovému průzkumu lze získat informace o fyziologickém stavu rostlin, nebo obsahu vody v rostlinách na úrovni celého porostu, bez nutnosti zkoumání každého jedince zvlášť (Ždímal et al., 2011).

Hodnoty odraženého záření se vztahují k odrazivosti, kterou měříme na materiálech s co nejvyšší odrazivostí, jedním z takových materiálů je lambertiánský spektralon s odrazivostí >95 % v oblasti 250-2500 nm a >99 % v oblasti 400-1500 nm. Senzory získají hodnoty, které jsou zobrazovány v oblasti viditelného a blízkého infračerveného záření, v podobě spektrální křivky vegetace a jsou hojně využívány v ekofyziologických studiích (Rapaport et al., 2014), (Obr. 2-7).



Obrázek 2-6 Reflektanční křivka vegetace (Lhotáková 2009, převzato z Gates et al., 1965.)

Spektrální křivka vegetace má výpovědní hodnotu o pohlceném a odraženém záření listem v jednotlivých vlnových délkách v celém spektru používaných vlnových délek, což je obvykle v intervalu 200-2400 nm. Záření, které listem projde, spektrální křivka odrazivosti vegetace nezaznamenává. Senzory měřící odrazivost pokrývají většinu viditelného 430-790 nm a infračerveného 700-1000 nm spektra, existují i senzory, pokrývající oblast blízkého infračerveného spektra až do 2500 nm (Rapaport et al., 2014). Spektrální křivka vegetace udává hodnoty v rozmezí 350-2500 nm a odrazivost listu je v jednotlivých vlnových délkách udávána v % odrazivosti a může mít významnou výpovědní hodnotu o druhu rostlin, fyziologickém stavu rostliny (Gitelson et al., 2003), o ontogenetické fázi rostliny (Ždímal et al., 2011; Castro and Sanchez-Azofeifa 2008), nebo ekofyziologickém přizpůsobení rostliny a listů (Klančnik et al., 2014). Pro interpretaci dat získaných z dálkového průzkumu země, je nutné zjistit významy odrazivosti konkrétních vlnových délek ve spektrální křivce vegetace, což se provádí spektrální analýzou odebraného vzorku listoví z pozorované oblasti. Pomocí biochemických a analytických metod se stanoví obsah zájmových látek v listu (Rapaport et al., 2014; Buschman et al., 2012). Stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů v listoví pomáhá k interpretaci fyziologického stavu porostu, nebo rostliny. Obsah pigmentů v listu je nespecifickým indikátorem různých stresů, například poměr chlorofylu *a/b* se v listu při nespecifickém stresu zvyšuje, protože chlorofyl *b* je na stres citlivější (Gitelson and Merzlyak et

al., 1994). Vysoký obsah karotenoidů i antokyanů v listech vypovídá o obrané reakci proti biotickým patogenům, nebo nástupu senescence listoví. Dalším důsledkem zvýšeného obsahu karotenoidů v listech může být vysoká ozářenost. Uhlíkaté deriváty karotenoidů, xanofyly, mají v listech ochrannou funkci při vysoké ozářenosti (Ustin et al., 2009). Spektrofotometrické, či jakékoli biochemické stanovení obsahu sledovaných látek je ale metodou destruktivní a může zahrnovat chyby v extrakcích, nebo nestabilitu pigmentů (Merzlyak et al., 2003a).

Pro lepší pochopení hodnot získaných z DPZ může předcházet spektrální analýza pigmentů na úrovni jedince/jednoho listu. Data odrazivosti získávaná na úrovni listu pomocí spektrometru v terénu, či laboratoři slouží například pro určení rozdílů v odrazivosti mezi jednotlivými listy v různých částech koruny, porovnání stinných a slunných listů, nebo listů různého ontogenetického vývoje, což jsou rozdíly, které se při DPZ neprojeví. Díky modelu radiativního transferu je možné na základě hodnot odrazivosti naměřené na jednom listu, odvodit odrazivost celé koruny stromu a dále i odrazivost porostu (Ustin et al., 2009; Malenovský et al., 2009).

Tvar reflektanční křivky je u vegetace dost podobný, ale v detailech může být druhově specifický (Klančnik et al., 2014; Slaton et al., 2001) například *Quercus virginiana* Mill. má v oblasti 550 nm nižší odrazivost listu, než *Quercus lobata* Née (Ustin et al., 2009). Reflektanční křivka vegetace také závisí na stáří listu (Rapaport et al., 2014), kdy se u starších listů vinné révy odrazivost postupně snižuje, oproti mladším listům. I umístění listu v koruně hraje roli v jeho odrazivosti, slunné listy topolu osiky mají vyšší odrazivost než stinné listy (Tosens et al., 2012) a v neposlední řadě je odrazivost listu ovlivněna fyziologickým stavem jedince (Ustin et al., 2009).

Bylo prokázáno, že u vinné révy mají starší listy nižší odrazivost v oblasti 750-1850 nm, než listy z posledních nodů a že odrazivost listů se v průběhu třicetidenního pozorování dále snižovala asi o 5-10 % (Rapaport et al., 2014). U rostlin stresovaných suchem se neprojevily rozdíly v odrazivosti listů. Mezi listy na jednotlivých nodech nebyl signifikantní rozdíl v odrazivosti zřejmě proto, že při stresu listy neprochází významným vývojem a obsah fotosyntetických pigmentů v listu se příliš nemění (Rapaport et al., 2014).

Dále můžeme pozorovat rozdíly v odrazivosti mezi adaxiální a abaxiální stranou listu. Adaxiální strana listu měla u všech pozorovaných druhů (buk lesní červenolistý, nahovětvec dvoudomý, břechťan popínavý), nižší odrazivost, než abaxiální strana listu. Tento rozdíl v odrazivosti mezi abaxiální a adaxiální stranou listu buku, nahovětvece a břechťanu, může být dán vnitřním složením listu. Listy s bifaciálním charakterem mají na abaxiální straně listu hustou síť protáhlých parenchymatických buněk palisádového parenchymu s minimálními

mezibuněnými prostory a vyšším obsahem chlorofylů a karotenoidů, než je na spodní straně listu v houbovitém parenchymu. Na abaxiální straně listu dochází k lepší absorpci záření v oblastech, které absorbují fotosyntetické pigmenty. Ze spodní strany listu, v houbovitém parenchymu, je více mezibuněčných prostor, umožňujících intenzivnější odrazení záření v oblastech, které nebývají pohlceny pigmenty, mezi buňkami ven mimo list. U buku, nahovětvce a břechťanu nenacházíme odění listu, pokud je odění přítomno, bývá ze spodní strany listu hustší, než z vrchní strany, což také zvyšuje odrazivost záření od povrchu. Na adaxiální straně listu buku lesního červenolistého, byla odrazivost záření v oblasti 550 nm a 690 nm signifikantně nižší, oproti straně abaxiální. Listy buku červenolistého, které mají nižší obsah antokyanů a jeví se spíše jako zelené, než červené, například stinné listy, měly odrazivost ve vlnových délkách 550 nm a 690 nm stejnou na obou stranách listu. Rostliny s ekvifaciálním typem listu (jinan dvoulaločný a kukuřice setá), mají odrazivost ve všech vybraných vlnových délkách, což bylo 440 nm, 550 nm, 690 nm a 800 nm na obou stranách listu stejnou (Buschman et al., 2012). Rozdíly v odrazivosti v oblasti viditelného a NIR záření mohou nastat i u listů rostlin, jež tvoří odlišné struktury listu v závislosti na vlivu prostředí. U rdesna obojživelného byl nalezen signifikantní rozdíl v odrazivosti ve vlnových délkách 300-900 nm mezi listy splývavými a terestrickými. Terestrické listy rdesna obojživelného měly odrazivost v oblasti 300-500 nm a 760-900 nm nižší, než listy splývavé. Se stupňujícím přizpůsobením k terestrickým podmínkám, měly emerzní listy nižší odrazivost, což u stulíku žlutého, odpovídalo jen částečně. U stulíku žlutého, měly listy se stoupajícím terestrickým charakterem nižší odrazivost pouze v oblasti vlnových délek 500-600 nm, naopak v oblastech 300-400 nm a 760-900 nm, při zvyšujícím se terestrickém charakteru listů, se zvyšovala odrazivost těchto listů. Vyšší odrazivost u terestričtějších listů stulíku, oproti rdesnu, může být dána tím, že u rdesna se porovnával terestrický charakter listu se splývavým listem a u stulíku splývavý list s ponořeným listem. List stulíku pod hladinou bude mít jistě horší zásobení zářením, než ostatní typy listů a tudíž i nižší odrazivost, než splývavý list stulíku. Mezi druhy stulíku žlutého a rdesna obojživelného byly největší rozdíly v odrazivosti splývavých listů ve vlnových délkách 300-500 nm, což přibližně odpovídá oblastem, kde je detekována absorpce pigmenty (Klančnik et al., 2012).

Rozmezí vlnových délek je pro určité struktury listu a přítomnost biochemických látek specifické. Pro lepší představu přikládám tabulku (Tab. 2-1).

	nm	Druh	Citace
Chlorofyly	520-550; 695-705	Javor, kaštan, buk	Gitelson et al., 2003
	550-650; 690-705	Jabloň-plod	Merzlyak et al., 2003b
	440-450; 670-680	Jabloň-list	Merzlyak et al., 2003a
Chlorofyly- extrahované	Chl. <i>a</i> : 430; 662 Chl. <i>b</i> : 453; 642	Extrakce v diethyletheru	Ustin et al., 2009
	Karotenoidy- Extrahované		
Karotenoidy	480; 455; 425; 520-530	Jabloň-plod	Merzlyak et al., 2003b
Antokyany	550		
	550; 690	Buk lesní červenolistý	Buschmann et al., 2012
Celulóza	2100	Jabloň-plod	Merzlyak et al., 2003b
Lignin	2150	Jehličnan	Kokaly et al., 2009
Proteiny	2050; 2170		
Voda	980;1200;1450;1930		
	900;1200;1400;1900	Borovice (pokroucená)	
	700-1300	<i>Populus deltoides x nigra</i>	Eitel et al., 2006
Mezibuněčné prostor	800	Nahovětvec dvoudomý, buk červenolistý	Buschmann et al., 2012
		Vinná réva	Rapaport et al., 2012
Tloušťka listu	Koreluje s NIR (800nm)	Topol osika a balzámový	Castro and Sanchez-Azofeifa 2008
		Alpské byliny	Slaton et al., 2001

Tabulka 2-1 Biochemické a anatomické vlastnosti rostlin a jejich odrazivost v určité vlnové délce.

V některých případech se k porovnání určitých fotosyntetických nebo anatomických parametrů používají konkrétní vlnové délky, jako například pro porovnání obsahu antokyanů ve slupce plodu jablka, kdy byla sledována odrazivost pouze ve vlnové délce 550 nm (Merzlyak et al., 2003b). Také je možné využívat určitého rozmezí specifických vlnových délek odrazivosti, například 520-550 nm a 695-705 nm pro stanovení chlorofylů *a* a *b* u javoru, kaštanu a buku (Gitelson et al., 2003). Nejčastěji se ke kvantitativní detekci konkrétního parametru listu, jako ukazatel, používají vegetační indexy odrazivosti. Indexy dávají do poměru hodnoty vlnových délek, které specificky odpovídají sledovanému

parametru. Indexy často využívají rozdíly mezi zdravou a stresovanou vegetací ve viditelné oblasti, která odpovídá červenému okraji (Ustin et al., 2009). Poměry vlnových délek odrazivosti, ze kterých byly vypočítány jednotlivé indexy, je možné vidět v tabulce 3-1 (kapitola materiál a metody).

2.4.2. Vybrané vegetační indexy se vztahem k obsahu biochemických a biofyzikálních látek v listoví

Nejvíce rozšířené vegetační indexy, vypovídající o obsahu biochemických látek a vody v listu, jsou: NDVI („Normalized difference vegetation index“) a WI („Water index“), (Rapaport et al., 2014). NDVI má výpovědní hodnotu o obsahu fotosyntetických pigmentů, obsahu dusíku v listech, ale také o struktuře koruny (Gamon et al., 1995). Z hodnot WI se dá odvodit relativní obsah vody (RWC „relative water content“). K detekci obsahu fotosyntetických pigmentů v listu můžeme dále připojit index PRI („Photochemical reflectance index“), vztahující se k celkovému poměru chlorofylů a karotenoidů (Letts et al., 2008) a změnám v xantofylovém cyklu pigmentů (Sims and Gamon et al., 2002), které mohou mít, stejně jako antokyany, ochranný efekt proti poškození listu radiací ve viditelné části spektra (Merzlyak et al., 2003a). Proto tento index PRI nevypovídá pouze o obsahu pigmentů, ale má i výpovědní hodnotu o stavu fotosyntetického aparátu a jeho reakci na stresové podmínky.

Dalším indexem, korelujícím s obsahem pigmentů v listu, je CI (Chlorophyll index), který je definován jako množství chlorofylu na jednotku plochy (Shibayama and Akiyama 1986). Indexy NDVI, WI, PRI, CI byly použity k pozorování změn reflektance a obsahu vody mezi samčimi a samičimi rostlinami topolu úzkolistého v průběhu jednoho roku při vodním deficitu. Mezi zavlažovanými a suchem stresovanými rostlinami topolu nebyl nalezen signifikantní rozdíl v listové odrazivosti, nicméně mezi samčimi a samičimi rostlinami topolu byl rozdíl v indexu NDVI. Samčí jedinci topolu úzkolistého měli vyšší hodnoty NDVI, než samičí jedinci. Samičí jedinci topolu jsou náchylnější k suchu, díky delší reprodukční fázi (Letts et al., 2008).

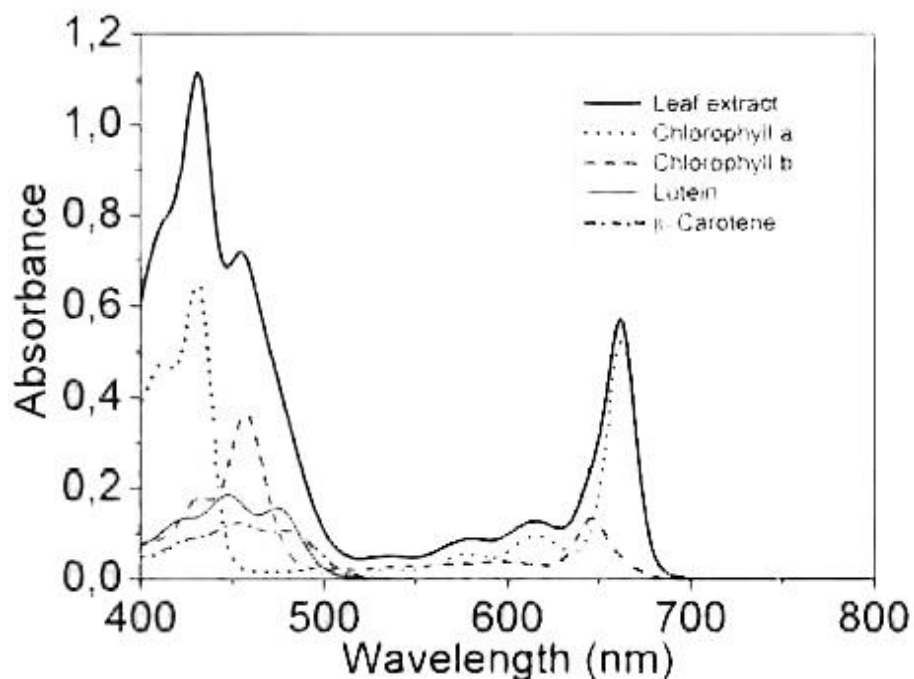
Další index korelující s obsahem vody je NDWI („Normalized difference water index“), který stejně jako WI vypovídá o obsahu vody v listu. U jalovce jednosemenného NDWI koreluje s vodním potenciálem listu (Stimson et al., 2005). Index MDWI („Maximum difference water index“), vypovídá o rozdílu v obsahu vody koruny a listu. Bylo prokázáno, že u dobře zavlažovaného topolu, byla na úrovni listu nalezena vysoká korelace ($r^2=0,94$)

mezi MDWI a RWC, oproti koruně, kde ve stejném případě byla korelace nižší ($r^2=0,60$). Naproti tomu u stresovaných rostlin topolu se ukázala vyšší korelace mezi MDWI a RWC na úrovni koruny ($r^2=0,37$) než na úrovni listu ($r^2=0,05$), (Eitel et al., 2006). Vztahy vybraných vegetačních indexů k biochemickým parametrům listů bývají i druhově specifické a vždy je nutné vztahy mezi indexy a biochemickými parametry statisticky testovat pro možnosti předpovídat biochemické parametry, pouze na základě vegetačních indexů (Gitelson et al., 2003).

2.4.2.1. Biochemické vlastnosti v souvislosti s odrazivostí

Mezi biochemické vlastnosti listu, které ovlivňují jeho odrazivost, patří obsah fotosynteticky aktivních pigmentů, jako jsou chlorofyly *a* a *b*, karotenoidy a antokyany.

Absorpční spektra chlorofylu jsou v oblasti 400-500 nm, což je maximum absorpce pro chlorofyl *b* a v oblasti 600-700 nm, maximum absorpce pro chlorofyl *a*. Přesto, že karotenoidy mají mnohem nižší absorpci než chlorofyly, jejich absorpční maximum se také nachází v oblasti 400-500 nm a absorpční maximum antokyanů v oblasti 550 nm (Buschmann et al., 2012), (Obr. 2-7).



2-7 Absorpční maxima jednotlivých fotosyntetických pigmentů, chlorofylu *a*, *b* luteinu a β -karotenu v různých vlnových délkách v intervalu 400-800 nm (převzato z Buschmann 2012).

Díky fotosynteticky aktivním pigmentům v listu, můžeme v oblastech 400-500 nm a 600-700 nm vidět propad v odrazivosti ve spektrální křivce vegetace. Záření se ve vlnových délkách 400-500 nm a 600-700 nm od listu méně odráží, protože je pohlceno právě příslušnými chlorofyly (Obr. 2-6).

U nahovětvce dvoudomého, jehož listy mají různou intenzitu zeleného zbarvení, bylo prokázáno, že světlejší listy dosahují vyšších hodnot odrazivosti ve vlnových délkách 449 nm, 550 nm a 690 nm než temně zbarvené listy, což je důsledkem vyššího obsahu pigmentů v listech a vyšší absorpce záření ve vlnových délkách 449 nm, 550 nm a 690 nm. U buku lesního červenolistého, byla na adaxiální straně červeně zbarvených listů prokázána nižší intenzita odrazivosti v oblasti 550 nm a 690 nm. Je to dáno vyšším obsahem antokyanů v epidermis buku červenolistého na adaxiální straně listu. Rozdíl v množství antokyanů buku červenolistého se projeví i mezi abaxiální a adaxiální stranou jednoho listu (Bushman et al., 2012).

Odrzivost listu se v průběhu ontogeneze rostliny může měnit, což odpovídá přirozené sezónní dynamice obsahu pigmentů, jejich poměrů a dalších opticky aktivních látek v listech u topolu osiky a topolu balzámového. U osiky a topolu balzámového se v průběhu sezóny v listech snižoval obsah chlorofylů *a*, *b* i poměr chlorofylů *a/b*. Bylo pozorováno, že odrazivost v oblasti 550-700 nm je citlivá na změny, které se udávají v listu během senescence, odpovídá to změně obsahu chlorofylů, které v průběhu sezóny probíhají. U topolu balzámového, byl na základě změny v odrazivosti listu v oblasti 550-700 nm určen nižší obsah chlorofylů a dřívější nástup senescence listů, oproti topolu osice (Castro and Sanchez-Azofeifa 2008).

K odrazivosti listu přispívají i jiné biochemické látky, které nejsou fotosynteticky aktivní, a patří mezi ně obsah dusíku, celulózy a ligninu. U jehlic borovice byla nalezena absorpční maxima ve vlnových délkách 2100 nm, která odpovídají obsahu celulózy v listech a 2150 nm, která odpovídají obsahu ligninu v listech a další dvě maxima v 2050 nm a 2170 nm, která odpovídají obsahu proteinů v listech (Kokaly et al., 2009).

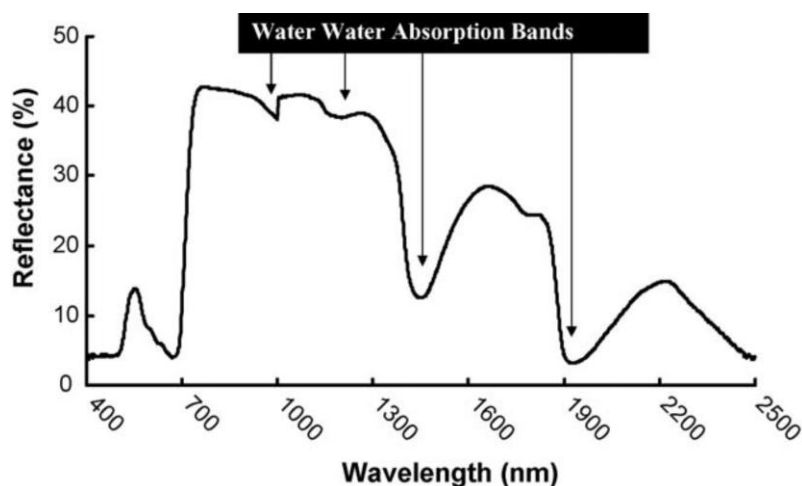
2.4.2.2. Biofyzikální vlastnosti v souvislosti s odrazivostí

V neposlední řadě není možné zanedbávat schopnost vody absorbovat záření, která má velký vliv na celkovou odrazivost porostu, ale i listu. Voda absorbuje nejvíce záření v NIR (Eitel et al., 2006). Například mladší listy vinné révy obsahují o 30-40 % více vody, než ty starší, což může v důsledku vést k nadhodnocení výsledků odrazivosti listů (Rapaport et al., 2014).

Obsah vody v listu není vhodné zahrnovat mezi biochemické, ani strukturní vlastnosti listu, ačkoli je s nimi úzce spjat, což dokazuje i velmi široké rozmezí vlnových délek, které je v mnoha studiích zmiňováno v souvislosti s absorpčním maximem vody (Gao and Goetz 1995; Stimson et al., 2005; Eitel et al., 2006; Kokaly et al., 2009). Pro odhad obsahu vody v oblasti 400-2500 nm byl stanoven parametr EWT (Equivalent water thickness), který se vypočítává z čerstvé, suché hmotnosti listu a jeho plochy. Je dán vztahem (Mobasher and Fatemi 2013):

$$\text{EWT} = \frac{\text{Čerstvá hmotnost} - \text{Suchá hmotnost}}{\text{Plocha}} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Odrazivost čerstvé vegetace v oblasti přibližně 1000-2500nm je velmi ovlivňována právě obsahem vody, ale i obsahem ligninu a celulózy, jak je zmíněno výše. Což je možné potvrdit i korelací mezi EWT s vlnovými délkami 1600nm, která byla vyšší, oproti odrazivosti v oblasti 1000 nm (Gao and Goetz 1995). Ze studie na jehlicích borovice (Kokaly et al., 2009) je zřejmé, že v oblasti 400-2500 nm má voda nejvyšší absorpční maxima v intervalech vlnových délek: 970-980 nm, 1190-1200 nm, 1440-1450 nm a 1920-1930 nm. (Gao and Goetz 1995), což potvrzuje i studie (Eitel et al., 2006) na topolu spp. při studiu rostlin stresovaných suchem (Obr. 2-8).



Obrázek 2-8 Absorpční maxima vody, zjištěná pomocí měření odrazivosti, v oblastech: 970-980 nm, 1190-1200 nm, 1440-1450 nm a 1920-1930 nm. Převzato z (Eitel et al., 2006).

2.4.3. Struktura listu v souvislosti s odrazivostí

Při spektrální analýze listoví rostlin je velmi důležité odlišovat odrazivost na úrovni anatomické struktury listu, oproti biochemickému složení listu a obsahu vody (Rapaport et al., 2014). Ačkoli obsah pigmentů v listech má vyšší vliv na odrazivost než anatomická struktura listu, která koreluje spíše s transmitancí, její vliv na odrazivost nemůžeme zanedbávat. Submerzní listy šípatky střelolisté, mají v oblasti 300-800 nm vyšší odrazivost oproti submerzním listům pryskyřníku velkého, který má oproti šípatce tlustší listy, vyšší tloušťku palisádového parenchymu a nižší SLA. Nižší SLA souvisí s vyšší hustotou listu pryskyřníku, oproti šípatce, která má větší mezibuněčné prostory, což může pozitivně ovlivnit odrazivost (Klančnik et al., 2014).

Bylo zjištěno, že velikost mezibuněčných prostor a tloušťka houbovitého parenchymu může být využita k odhadu odrazivosti v jedné vlnové délce NIR (near infra red) 800 nm, u druhů, s odlišnou morfologií listu, což se dobře projevilo u dvou druhů topolů balzámového a osiky. Topol balzámový měl prokazatelně tlustší listy, než topol osika a více mezibuněčných prostor v houbovitém parenchymu, což mělo vliv na vyšší odrazivost listu v 800 nm. Právě celkový povrch buněk může mít na odrazivost v 800 nm větší vliv než objem mezibuněčných prostor (Castro and Sanchez-Azofeifa 2008).

I v případě tmavě zbarveného listoví nahovětvce i červenolistého buku se odrazivost v 800 nm příliš nelišila od jejich méně zbarvených protějšků. Odrazivost v 800 nm, je zodpovědná za odrazivost související s mezibuněčnými prostory listu a tloušťkou listu, což nebývá tak variabilní, jako obsah pigmentů (Buschmann et al., 2012). Při ontogenetickém vývoji listu vinné révy, kdy narůstá objem mezibuněčných prostor houbovitého parenchymu, se snížila odrazivost v NIR. Mnoho studií potvrzuje, že odrazivost v 800 nm spíše koreluje s objemem mezibuněčných prostor než s tloušťkou listu (Slaton et al., 2001; Sims and Gamon et al., 2002; Rapaport et al., 2014). Naopak ve studii pracující s 6 alpskými bylinami (*Kalmia microphylla* Kalm, *Oxyria digina* (L.) Hill, *Phleum alpinum* L., *Potentilla concinna* Nieuwl, *Thlaspi montanum* L., and *Trifolium dasyphyllum* L.), byla prokázána malá korelace mezi odrazivostí v 800 nm a hustotou trichomů, tloušťkou listu, poměrem palisádového a houbovitého parenchymu a velikostí mezibuněčných prostor. Korelace byla prokázána spíše mezi vlnovou délkou 800 nm s podílem mezibuněčných prostor k ploše listu a mezi tloušťkou kutikuly (Slaton et al., 2001).

Na odrazivost listu mají vliv i strukturní vlastnosti povrchu listu a nejen velikost mezibuněčných prostor. U čistce vlnatého, jehož povrch je hustě pokryt trichomy, byla

mnohem vyšší odrazivost ve vlnových délkách 440 nm, 550 nm, 690 nm, než v těch samých vlnových délkách poté, co se trichomy z čistce odstranily. Podobný efekt jako je zapříčiněný voskovým povrchem, což je zvýšená odrazivost v 440 nm, 550 nm a 690 nm byl nalezen u listu brukve zelené, který má silně vyvinutou kutikulu, s ojíňným vzhledem. Místa na listu brukve zelené s kutikulou vykazovala ve vlnových délkách 440 nm, 550 nm, 690 nm vyšší odrazivost, než místa, ze kterých byla pokožka odstraněna. Naopak na odrazivost listu v 800 nm trichomy čistce, nebo kutikula brukve neměly velký vliv (Buschmann et al., 2012).

Na obrázku reflektanční křivky (2-6) můžeme vidět, jak velká oblast (700-1300 nm) odpovídá odrazivosti od buněčné struktury listu. Podle známé literatury, dosud nebyly určeny konkrétní anatomické struktury listu, korelující s oblastí 700-1300 nm, kromě oblastí korelující s obsahem vody. Strukturní vlastnosti listu jsou druhově velmi specifické a analýza anatomických vlastností listu je velmi pracná, proto neexistuje mnoho studií zaměřených na vztah optických vlastností listu související s anatomickou strukturou listu.

3. MATERIÁL A METODY

Materiál

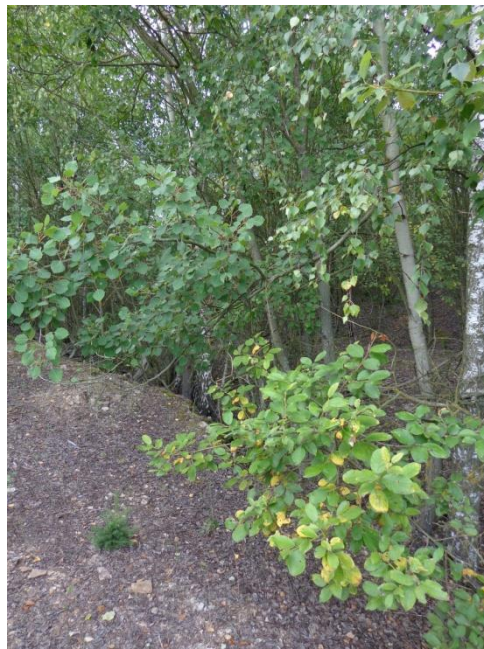
Terénní výzkum probíhal na dvou vybraných sukcesních plochách na lokalitě Velké podkrušnohorské výsypky v oblasti Sokolovské pánve. Experimentálním materiálem pro mou práci jsou druhy topol osika (*Populus tremula* L.) a vrba jíva (*Salix caprea* L.) jako zástupci dřevin účastníci se rané sukcese na půdách chudých na živiny.

3.1. Terénní výzkum

3.1.1. Popis stanovišť

Velké podkrušnohorská výsypka vznikala v průběhu posledních 30 let navážením srůvky z těžby hnědé uhlí ze Sokolovských povrchových dolů, zejména z divize Jiří. Substrát na sokolovské výsypce je složen převážně z jílu, štěrku, písku a zbytků hnědé uhlí (Šourková et al., 2005). Na sokolovské výsypce se vyskytují mírně alkalické substráty, cyprisové jíly, jež jsou příznivé pro další rozvoj půd (Frouz et al., 2007; Šourková et al., 2005) a dominantním složením těchto jílu je organický uhlík pocházející z vodního korýše skořepatce. Terénní výzkum byl uskutečněn na sukcesních plochách, nacházejících se na

Velké podkrušnohorské výsypce, S2 a S3, o rozloze cca 200 m², vzdálených od sebe cca pět set metrů a dosahující stáří zhruba 25let. Díky vysokému podílu jílu je substrát na výsypce zatížen nejen nedostatkem živin, ale i nedostatkem vody. Výsypkové plochy S2 a S3 nebyly rekultivovány, jako některé jiné oblasti na Velké podkrušnohorské výsypce, ale byly zanechány samovolné sukcesi. Tomu odpovídá i velice heterogenní kopcovitý terén na obou plochách S2 i S3, který vznikl v důsledku navážení substrátu z povrchových dolů. Vegetace na plochách S2 a S3 je tvořena pionýrskými druhy dřevin, jako jsou topol osika, vrba jíva a bříza bělokorá (Obr. 3-1).



Obrázek 3-1 Složení vegetace na sukcesní ploše S3. Topol osika, vrba jíva a bříza bělokorá.

V oblastech sukcesních ploch, které nejsou zastíněny pionýrskými dřevinami, je v podrostu v menší míře zastoupena třtina křovištní (*Calamagrostis epigeios* L.) a mechové patro. Plochy S2 a S3 jsou v blízkém okolí obklopeny oblastmi odpovídající mladšímu stádiu sukcese, stáří zhruba 5 let. Okolo sukcesních ploch se nachází směs travnaté vegetace s převahou třtiny křovištní, bylinnému patru dominuje podběl lékařský (*Tusilago farfara* L.) a semenáče pionýrských dřevin. Díky nízké a převážně travnaté vegetaci v okolí jsou sukcesní plochy zcela vystaveny všem meteorologickým podmínkám.

3.1.2. Odběr listoví

V roce 2014 bylo na sukcesních plochách S2 a S3 provedeno šest terénních odběrů v průběhu vegetační sezóny v termínech 26. 5., 17. 6., 8. 7., 12. 8., 9. 9., a 1.10. Zahájení odběrů bylo plánováno tak, aby plocha listů vybraných dřevin v této době byla již plně

vyvinuta. Odběr vzorků listoví probíhal na deseti stromech od druhů topol osika a vrba jíva, na obou plochách S2 a S3. Pro pokus byly vybrány stromy v dobrém fyziologickém stavu s přibližně stejným průměrem kmene, což je předpoklad pro jejich podobné stáří. Stromy vrby jívy a topolu osiky dosahují výšky cca 5-7 metrů, stáří 20-25let. Vzorky byly odebrány ze země pomocí teleskopických nůžek na větve, ze střední části korunového porostu. Odebrané listy odpovídaly přechodové zóně mezi slunnou a zastíněnou částí koruny.

Čerstvé listoví pro měření odrazivosti bylo uloženo do sáčků se zavírací lištou, a bylo vloženo do chladicího boxu. Dále byly z čerstvého listoví vystříženy čtvercové segmenty pro anatomické analýzy. Segmenty listů o velikosti 1cm^2 ze střední části plochy listu, mimo hlavní žilnatinu, byly dány do uzavíratelné plastové lahvičky s fixačním roztokem FAA (směs: 70% ethanol, formaldehyd, kyselina octová v poměru 90:5:5 ml) a byly použity na anatomické analýzy. Dále byly odebrány listy na analýzu pigmentů a obsah sušiny. Listy byly nastříhány na malé kousky, dány do malých mikrozkušavek a uskladněny v chladicím boxu.

3.1.3. Terénní měření vodního potenciálu

Měření vodního potenciálu pomocí Scholanderovy bomby (M600, PMS Instrument Company, USA) probíhalo na ploše S2 v termínech 8. 7., 12. 8., a 9. 9. na třech stromech od každého druhu. Stromy byly zvoleny z 10 jedinců vybraných k předchozím odběrům a zároveň s co nejpodobnější tloušťkou kmene, jako stromy s instalovanými přírůstoměry, které náleží k dlouhodobému pokusu prof. Frouze. Tento pokus není předmětem mé práce, ale data z přírůstoměrů mohou být v budoucnu využita pro lepší interpretaci vodního režimu topolu osiky a vrby jívy.

Měření vodního potenciálu v termínu 8.7. a 9.9. probíhalo přibližně v poledne, v termínu 12.8-13.8., v průběhu celého dne s šesti opakováními cca každé dvě hodiny od 14:00, 12.8. až do 11:00 dalšího dne, což je 13.8.

Z vybraných stromů byly odebrány koncové výhony větví, na jejichž listech byl do 15 minut od odstřížení naměřen vodní potenciál. List byl vložen do tlakové komory řapíkem vně a upevněn pomocí těsnícího šroubu. Pomalým pouštěním vzduchu do komory byl vyrovnáván podtlak v xylému listu (Obr. 3-2). Po objevení menisku xylémové šťávy na vrcholu řapíku byl tlak odečten z barometru a přepočítán na zápornou hodnotu, která odpovídala vodnímu potenciálu listu. Změřený počet barů se rovná obrácené hodnotě vodního potenciálu na $^{-1}$.



Obrázek 3-2 Scholanderova tlaková bomba- xylémová šťáva vytlačená z listu topolu osiky zvýšeným tlakem.

Metody

3.2. Laboratorní zpracování vzorků

3.2.1. Měření odrazivosti

Odrazivost listová v intervalu 350-2500 nm byla měřena v laboratoři pomocí spektrometru (ASD Fieldspec 4 Wide-Res), s využitím kontaktní sondy ASD Plant Probe. Tato kontaktní sonda, s velikostí zorného pole přibližně 1cm², je díky světelnému zdroji s nižší intenzitou speciálně uzpůsobena nedestruktivnímu měření odrazivosti vegetace a jiných materiálů citlivých k zahřívání. Spektrometr slouží k bodovému měření optických vlastností objektu v rozsahu 350-2500 nm ve spektrálním rozlišení 1nm. Měření odrazivosti listu probíhá na principu detekce záření, vycházejícího ze sondy, odraženého od povrchu listu. Hodnoty odrazivosti jsou udávány v procentech, přičemž jako reference se používá lambertiánský kalibrační spektralon, jehož odrazivost se blíží k 100 %.

Bylo provedeno pět měření odrazivosti na pěti listech od obou druhů osiky i jívky z abaxiální i adaxiální strany. Pro simulaci odrazivosti listové v koruně stromů bylo navíc těchto pět listů naskládáno na sebe a opět provedeno pět měření. Měření odrazivosti probíhalo druhý den po odběru, za stálé ochrany jednotlivých listů proti přehřívání v nejkratší možné době cca 6 hodin.

Vzhledem k menšímu poměru zorného pole sondy, vůči ploše listu, se pro optimální zachycení celé plochy listu a dosažení průměru v případě heterogenity listu, odrazivost

každého listu měřila na pěti místech. Spektrální data odrazivosti byla zpracována pomocí programu View Spec, dodávaného k tomuto modelu spektrometru, a převedena do tabulkového souboru v programu Excel. Z pěti křivek, které odpovídaly odrazivosti ve všech vlnových délkách, z každého listu byly vytvořeny mediány a ty byly dále používány k výpočtu vegetačních indexů, korelující s obsahem fotosyntetických pigmentů (Tab. 3-1) a obsahem vody (Tab. 3-2).

Z literatury jsem si zvolila vegetační indexy využívané k interpretaci podobné problematiky, jakou se zabývá můj výzkum, které byly již dříve aplikovány především na listnaté stromy. Konkrétní vegetační indexy, podle kterých by bylo možné interpretovat anatomickou strukturu listu, nejsou v literatuře známy. Proto jsem si pro lepší interpretaci závislosti odrazivosti listu na anatomické struktuře listu vybrala rozmezí vlnových délek, které odpovídají struktuře listu, s ohledem na vyjmutí oblastí odpovídající absorpčním maximům vody, která jsou dobře známa. Jedná se o odrazivosti ve třech intervalech vlnových délek, jejichž hodnoty byly dále použity ve statistických analýzách: 760-880 nm, 1010-1120 nm a 1250-1270 nm.

Index	Název	Vzorec (nm)	Zdroj	Fyziologický parametr
NDVI	<i>Normalized difference vegetation index</i>	$\frac{860 - 690}{860 + 690}$	Letts et al., 2008	Červený okraj, NIR, obsah chlorofylů
PRI	<i>Photochemical reflectance index</i>	$\frac{531 - 570}{531 + 570}$	Letts et al., 2008	Poměr celkových chlorofylů a karotenoidů
CI	<i>Chlorophyll index</i>	$\frac{750 - 705}{750 + 705}$	Letts et al., 2008	Obsah chlorofylu- <i>a</i>

Tabulka 3-1 Indexy korelující s obsahem fotosyntetických pigmentů

Index	Název	Vzorec (nm)	Zdroj	Fyziologický parametr
NDWI	<i>Normalized difference water index</i>	$\frac{860 - 1240}{860 + 1240}$	Stimson et al., 2005	Obsah vody
MDWI	<i>Maximum difference water index</i>	$\frac{\max(1500 - 1705) - \min(1500 - 1705)}{\max(1500 - 1705) + \min(1500 - 1705)}$	Eitel et al., 2006	Změny vodního režimu
WI	<i>Water index</i>	$\frac{900}{970}$	Letts et al., 2008	Obsah vody

Tabulka 3-2 Indexy korelující s obsahem vody

3.2.2. Stanovení obsahu vody

V běžné literatuře (Procházka et al., 1998; Pavlová 2005) je pod pojmem RWC myšleno, kolik procent vody z maximálního možného množství je aktuálně v rostlině. Pro toto stanovení je ovšem nutné každou rostlinu/list nejprve zvážit, poté nechat plně saturovat vodou a následně zvážit její suchou hmotnost. RWC je dáno vztahem:

$$RWC (\%) = \frac{\text{Hmotnost po nasycení vodou} - \text{hmotnost sušiny}}{\text{Čerstvá hmotnost} - \text{hmotnost sušiny}} \cdot 100$$

Při mé práci nebylo možné technicky zajistit měření této hodnoty, přistoupila jsem proto ke stanovení aktuálního obsahu vody, který je dán vztahem:

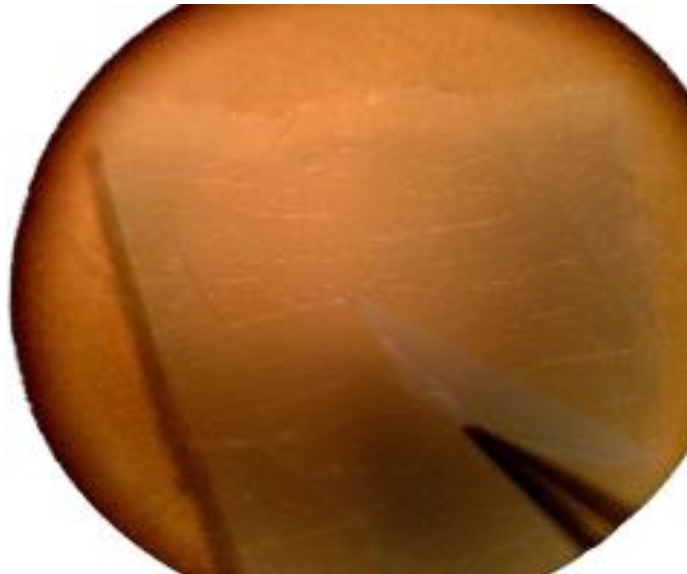
$$\text{Obsah vody}(\%) = \frac{\text{Čerstvá hmotnost} - \text{hmotnost sušiny}}{\text{Čerstvá hmotnost}} \cdot 100$$

3.3. Anatomické analýzy

Porovnání anatomického přizpůsobení povrchu listů na nízký obsah vody u obou druhů.

3.3.1. Příprava preparátů pro světelnou mikroskopii

Pro porovnání odlišného přizpůsobení povrchu listu k nedostatku vody, byl vybrán parametr hustota průduchů. K vizualizaci povrchu listu topolu osiky i vrby jívy byla použita metoda stahování pokožky na abaxiální straně listu (Obr. 3-3).



Obrázek 3-3 Stahování pokožky topolu osiky pod binokulární lupou, pomocí pinzety.

Z fixačního roztoku bylo od osiky i jívy vybráno 5 stromů, z každého stromu vybrány tři segmenty o velikosti $0,5\text{cm}^2$, se šesti opakováními z každého pozorovaného měsíce. Pro komplikace způsobené odlišným povrchem listu u vrby jívy, zejména vysokou hustotu trichomů, musel být postup přizpůsoben konkrétnímu materiálu.

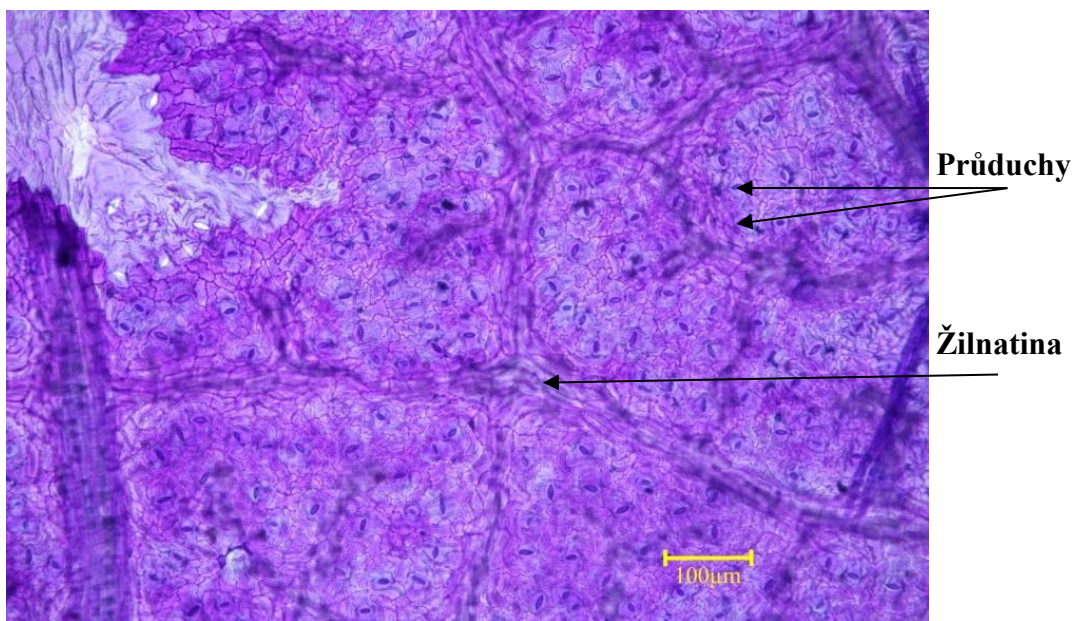
3.3.1.1. topol osika:

Segmenty listů osiky byly vloženy do chlornanu sodného (SAVO) cca na 24h a poté cca na 24h do vody. Následně byla pod binokulární lupou stažena pokožka na abaxiální straně listu, nabarvena toluidinovu modří (0,05%), promyta ve vodě a byl vytvořen dočasný preparát. Pokožka byla pro lepší manipulaci montována mezi dvě krycí sklíčka do kapky vody a následně na podložní sklíčko.

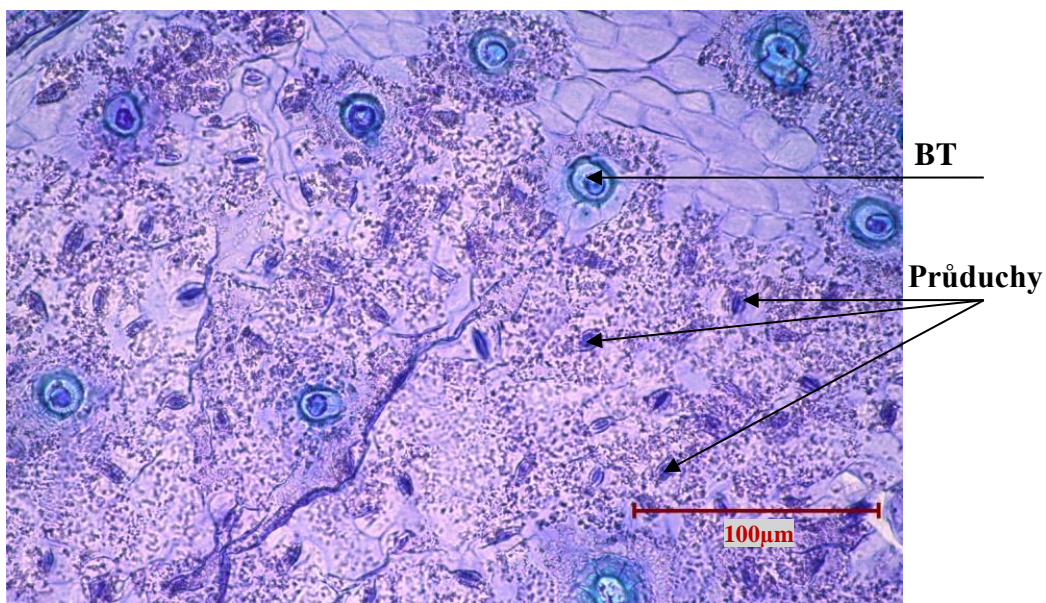
3.3.1.2. vrba jíva:

Segmenty listů byly vloženy na cca 26h do chlornanu sodného (SAVO) a poté cca na 24h do vody. Po stažení pokožky z adaxiální strany následovalo barvení abaxiální pokožky toluidinovou modří smíchanou se 100% glycerolem v poměru: (0,7 %). Barvení bylo provedeno velice opatrně pomocí malého štětce a barva byla nanášena pouze z vnitřní strany vyschlé abaxiální pokožky. Díky vyšší viskozitě a hustotě barvy a barvení pouze na jednu stranu bylo zamezeno nabarvení trichomů, které by znemožňovalo vizualizaci průduchů. Poté byl preparát promyt vodou, pro lepší přilnavost sklíček zbaven žilnatiny a montován do 60% glycerolu s orientací vnější strany pokožky směrem k podložnímu sklíčku.

Vzorky byly pozorovány pomocí světelného mikroskopu Olympus (BX40) při zvětšení 200x topol osika (Obr. 3-4) a 600x vrba jíva (Obr. 3-5). Pro příliš tenkou pokožku jívy bylo obtížné zajistit přesné zaostření průduchů při stejném zvětšení jako u osiky tak, aby celá oblast zorného pole snímala jednu optickou rovinu. Obraz byl pořízen kamerou Canon (EOS 100D) za pomoci programu EOS Utility byl snímán obraz na pěti místech z každého segmentu.



Obrázek 3-4 Pokožka listu topolu osiky, průduchy se jeví jako tmavé body, protáhlé buňky tvoří žilnatinu. Barveno toluidinovou modří, světlé pole, zvětšení 200x.

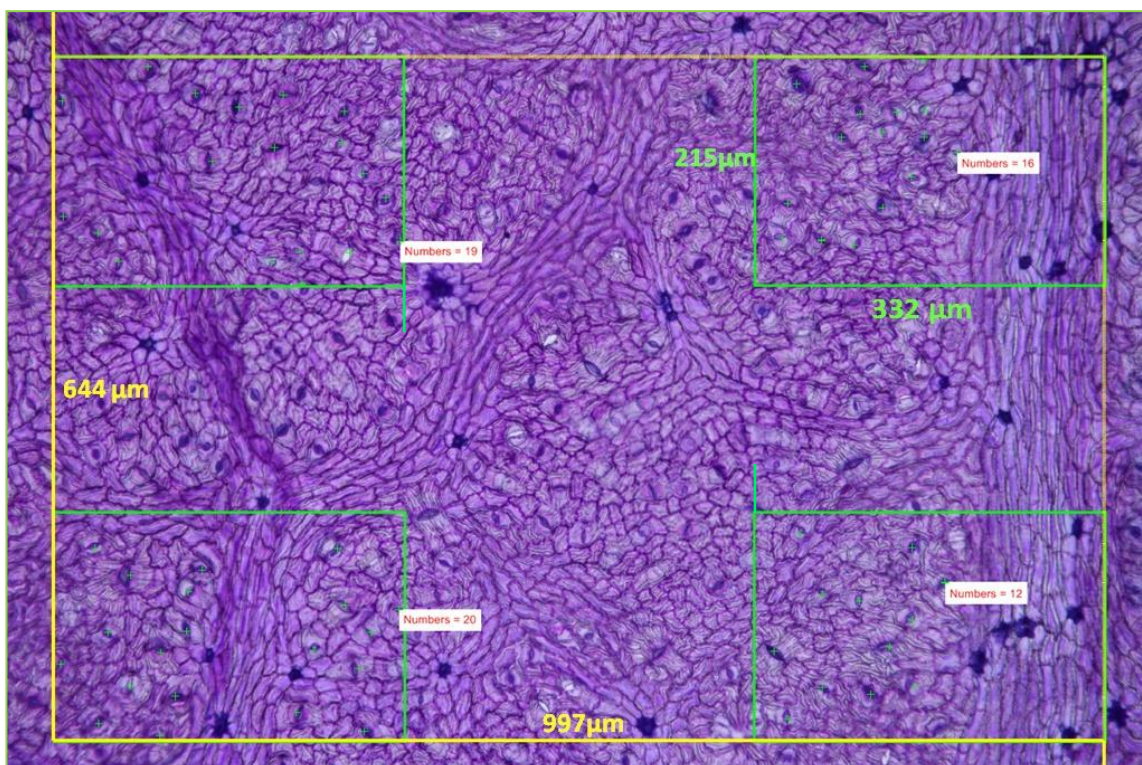


Obrázek 3-5 Pokožka listu vrby jívy, báze trichomů (BT) se zbarvily do modra, průduchy jsou vidět jako tmavší objekty. Barveno toluidinovou modří, světlé pole, zvětšení 600x.

3.3.2. Stanovení hustoty, velikosti a plochy průduchů

Pro stanovení hustoty průduchů na abaxiální straně listu u osiky i jívy byla použita metoda systematicky rovnoměrně náhodného výběru pomocí vzorkovacích oken v programu NIS-Elements (AR 3.2).

Od každého z 5 stromů od jívy a osiky z 6 měsíců (60 stromů) byly vytvořeny tři dočasné preparáty (180 preparátů) stažených listových pokožek, z nichž bylo nasnímáno pět oblastí (900snímků). Pro lepší odlišení jednotlivých průduchů, na okraji snímku, byl použit pomocný rámeček o velikosti 4748x3069px, do kterého byla vložena čtyři vzorkovací okna o velikosti 1582x1023px (Obr. 3-6).



Obrázek 3-6 Kvantifikace hustoty průduchů topolu osiky, pomocí vzorkovacích oken v program NIS-Elements.

Průduchy byly počítány uvnitř vzorkovacího okna a v případě protnutí okraje průduchem započítány pouze na jedné polovině hrany, podle principu vzorkovacího okénka. Tím bylo zajištěno započítání každého průduchu právě jednou v případě, že by byla vzorkovací okna na celé ploše.

Pro kvantifikaci velikosti průduchu byla spočítána délka a šířka průduchu z každého odběru na dvou stromech, třech pokožkách z čehož byl vybrán jeden snímek a změřeny tři průduchy. Plocha jednoho průduchu byla vypočítána následujícím vztahem:

$$\pi \times \text{šířka} \times \text{výška} = \text{Plocha 1 průduchu } (\mu\text{m}^2)$$

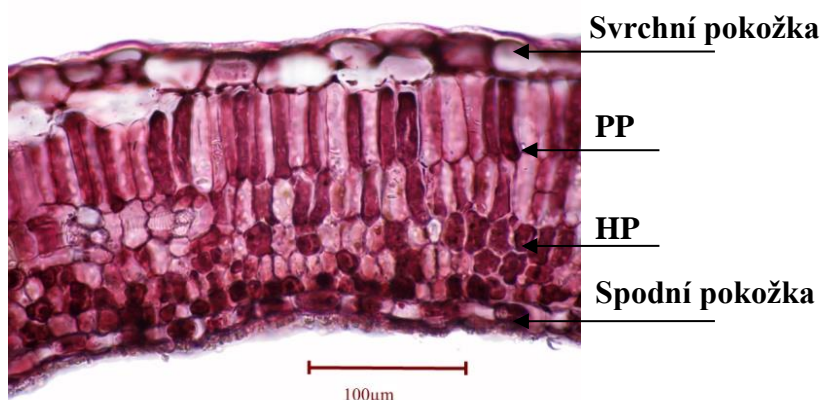
Celková plocha průduchů v % byla vypočítána:

$$\frac{\text{Plocha 1 průduchu} \times \text{hustota průduchů}}{\text{Celková plocha listu}} \times 100 = \text{Plocha průduchů } (\%)$$

3.3.3. Porovnání přizpůsobení poměru palisádového a houbovitého parenchymu na nízký obsah vody u obou druhů

3.3.3.1. Příprava preparátů pro světelnou mikroskopii

Pro stanovení poměru palisádového a houbovitého parenchymu byly použity vzorky ze 3 odběrů, 3 stromů od osiky i jívy, z každého stromu vybrány 3 listy a z každého listu vytvořeny 2 řezy a z každého řezu nasnímány 2 fotografie (216 snímků). Příčné řezy listů osiky a jívy byly připraveny na ručním mikrotomu a barveny toluidinovou modří. Fixovaný materiál byl vložen mezi bezovou duši a na ručním mikrotomu, pomocí břitvy, byly nařezány příčné řezy o tloušťce zhruba 50 μ m. Pro lepší vizualizaci materiálu byl vzorek na pár minut vložen do SAVA, nabarven toluidinovou modří a montován do 60% glycerolu. Z každého listu byly kamerou Canon nasnímány 2 snímky ze dvou řezů, při zvětšení 400x (Obr. 3-7).



Obrázek 3-7 Příčný řez listem vrby jívy, na povrchu je svrchní (adaxiální) pokožka, pod ní dvouvrstevný palisádový parenchym (PP), houbovitý parenchym (HP) a spodní (abaxiální) pokožka. Barveno toluidinovou modří, (červená brava vznikla reakcí toliudinivé modři se zbytky SAVA, kterým byl preparát odbarvován) světlé pole, zvětšení 400x

3.3.3.2. Stanovení poměru palisádového a houbovitého parenchymu

Stanovení poměru palisádového a houbovitého parenchymu proběhlo v programu NIS-Elements (AR 3.2). Pro horší kvalitu řezů listů nebyla použita metoda rovnoměrného výběru, ale tloušťky jednotlivých vrstev listu byly měřeny na třech místech, přibližně stejně daleko od sebe, aby byl rovnoměrný výběr alespoň částečně simulován. Nejprve byla naměřena celková šířka listu, poté tloušťka vrchní a spodní pokožky listu a nakonec tloušťky houbovitého a palisádového parenchymu listu.

3.3.4. Plocha listu a určení SLA, LMA a hustoty listu

Specifická listová plocha (SLA) se stanoví jako podíl plochy listu a jeho suché hmotnosti. (LMA) specifická listová hmotnost je obrácená hodnota k SLA. Hustota listu se vypočítá jako podíl specifické listové hmotnosti a celkové tloušťky listu. Listy, které byly využity k měření reflektance, byly naskenovány a následně usušeny a zváženy. V programu ImageJ byl sečten počet jejich obrazových bodů, který byl převeden na plochu v cm^2 , z čehož se vypočítala SLA a parametry LMA a hustota listu se dopočítaly ze SLA.

3.4. Biochemické analýzy

3.4.1. Stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů

Biochemické stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů bylo provedeno společně s Mgr. Markétou Pikorovou. Listy osiky a jívky nastříhané na malé kousky byly extrahovány v 10ml dimethylamidu kyseliny mravenčí (DMF), (Porra et al., 1989) po dobu 7 dní, ve tmě, při 4°C ve skleněných lahvičkách zakrytých parafilmem. Z extraktu byla na spektrofotometru (Unicam Helios α) naměřena absorbance fotosyntetických pigmentů v rozmezí vlnových délek 400-800 nm. Do programu Vision 3.31 byly zaznamenány absorbance fotosyntetických pigmentů ve vlnových délkách 480 nm, 647 nm, 664 nm a 750 nm.

Na základě rovnic dle Wellburna (1994) a hmotnosti suché biomasy listů byly vypočteny koncentrace fotosyntetických pigmentů: Chlorofylu *a*, *b* a celkových karotenoidů a poměry těchto pigmentů.

Obsah pigmentů byl vyjádřen na množství suché biomasy, k čemuž byl využit odebraný a vysušený materiál z druhé mikrozkuhavky, ze kterého byla pomocí trojčlenky dopočítána suchá hmotnost extrahovaného materiálu.

3.5. Meteorologická data

Pro lepší interpretaci výsledků ze sukcesní plochy, mi byla od pana J. Kučery (servisní pracoviště Environmental measuring system, Brno) poskytnuta podrobná data o abiotických podmínkách získaná přímo z meteorologické stanice na ploše S2. Meteorologická data náleží k dlouhodobému pokusu prof. Frouze. Mně poskytnutá data jsou: hodnoty vypovídající o množství srážek (mm), vzdušné vlhkosti (%), teplotě ($^\circ\text{C}$) a radiaci (W/m^2) v intervalech 10min, hodin a dnů na sukcesní ploše S2.

3.6. Statistické analýzy

Vyhodnocení mnou zpracovaných dat z Velké podkrušnohorské výsypky z šesti odběrů listové osiky a jívy proběhlo ve statistickém programu NCSS 9. Sezónní dynamika vybraného parametru byla vyhodnocována pomocí jednovýběrové analýzy rozptylu (one way ANOVA), rozdíly mezi topolem a osikou pomocí T-testu a v poslední části vyhodnocování signifikantních korelací mezi vybranými vegetačními indexy a anatomickými a biochemickými parametry listu bylo přistoupeno k lineárním regresím. Veškeré signifikantní rozdíly byly prokazovány na hladině významnosti o „p“ hodnotě 0,05.

4. VÝSLEDKY

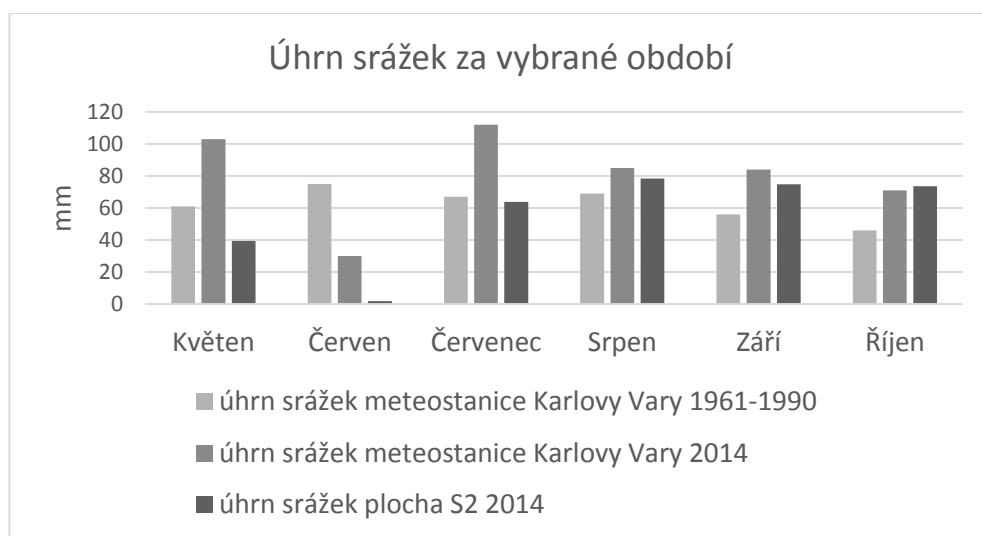
V kapitole Výsledky jsou uvedena, zpracována a graficky znázorněna veškerá data, získaná z odebraných listových vzorků ze stromů topolu osiky a vrby jívy během terénních odběrů na sokolovské výsypce. Kapitola výsledky je členěna na 6 podkapitol, které jsou řazeny dle logické návaznosti. První podkapitola se věnuje rozboru meteorologických dat na stanovišti S2 v průběhu vegetační sezóny 2014. Tato data mají úzký vztah s vodním hospodařením místní vegetace. S vodním provozem rostlin souvisí i jejich vodní potenciál, proto je druhá podkapitola věnována dynamice vodního potenciálu u vybraných dřevin.

Třetí podkapitola je zaměřena na rozdíly v anatomické struktuře listu a zastoupení vnitřních pletiv v listu mezi topolem osikou a vrbou jívou. Ve čtvrté podkapitole je pojednáno o sezónní dynamice biochemických vlastností listu u topolu osiky a vrby jívy. Předposlední, pátá podkapitola, je věnována rozdílům v optických vlastnostech listu mezi abaxiální a adaxiální stranou jednotlivých listů osiky a jívy a také vybraným vegetačním indexům, které korelují s obsahem vody a obsahem fotosyntetických pigmentů. Poslední část, šestá podkapitola, je zaměřena na závislost vegetačních indexů vrby jívy a topolu osiky na vybraných anatomických parametrech listu, které ovlivňují jeho optické vlastnosti.

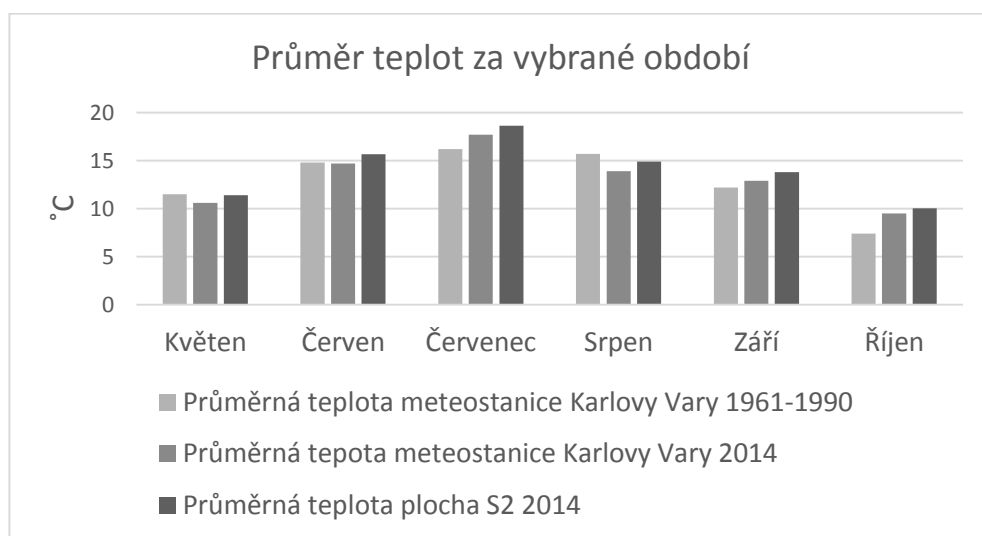
4.1. Meteorologické údaje na stanovišti

Pro přesnější interpretaci výsledků a lepší představu o celkovém prostředí na sokolovské výsypce, přikládám data o meteorologických podmínkách, zaměřená na parametry - teplotu a srážky.

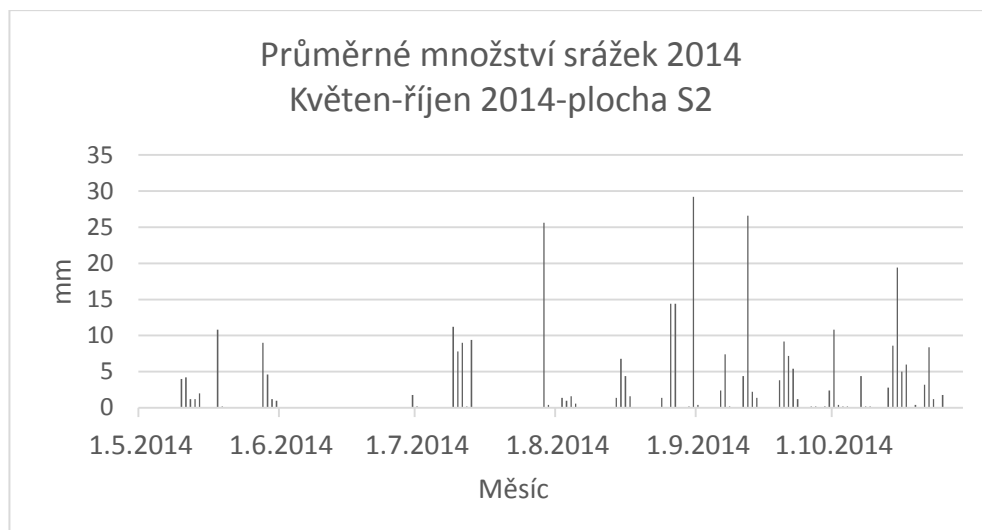
Nejprve přikládám dlouhodobé výsledky srážkového úhrnu (Graf 4-1) a průměrných teplot (Graf 4-2) z nejbližší hydrometeorologické stanice v Karlových Varech z CHMI z let 1961-1990 ve vybraných měsících. Dále přikládám grafy o množství srážek (Graf 4-3) a teplotní průměry (Graf 4-4) z roku 2014 přímo z meteorologické stanice na výsypkové lokalitě S2, kde se nacházejí sledované stromy topolu osiky a vrby jívy. Můžeme pozorovat, že v roce 2014 byl srážkový úhrn přímo na lokalitě S2 za sledované období nižší, oproti dlouhodobému průměru. Také teploty v roce 2014 byly na lokalitě S2, oproti dlouhodobému průměru, mírně zvýšené, ale nedosahovaly extrémních hodnot.



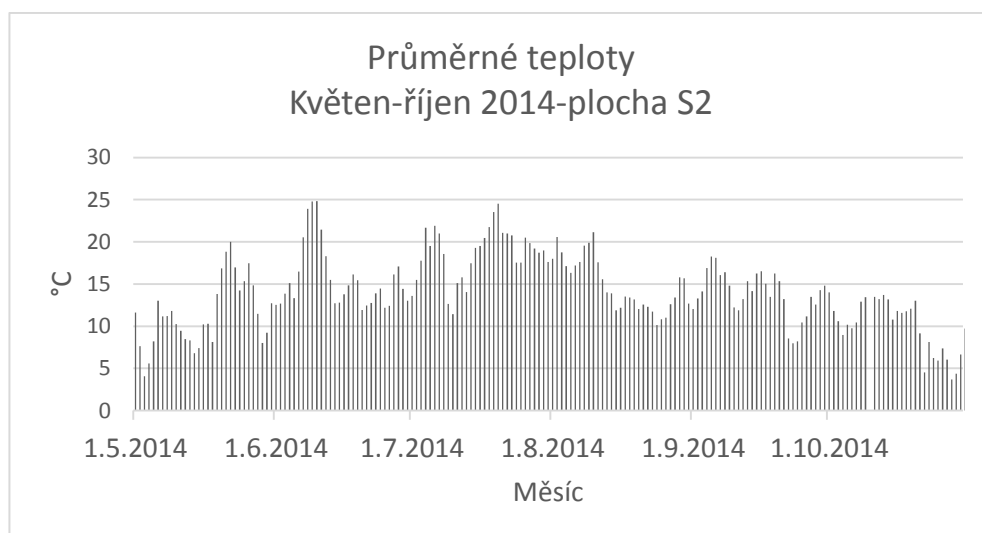
Graf 4-1 Úhrn srážek v jednotlivých měsících za vybrané období 1961-1990 a rok 2014, údaje: meteorologická stanice Karlovy Vary CHMI a meteostanice plocha S2. Sloupce označují průměrné měsíční úhrny srážek v mm ve vybraných měsících.



Graf 4-2 Průměrná měsíční teplota za vybrané období 1961-1990 a rok 2014, údaje: meteorologická stanice Karlovy Vary CHMI a meteostanice plocha S2. Sloupce označují průměrné teploty v °C ve vybraných měsících.



Graf 4-3 Srážky v roce 2014 ve vybraných měsících na ploše S2. Sloupce označují množství srážek v mm.



Graf 4-4 Teploty v roce 2014 ve vybraných měsících na ploše S2. Sloupce označují teploty v °C.

4.2. Terénní měření vodního potenciálu

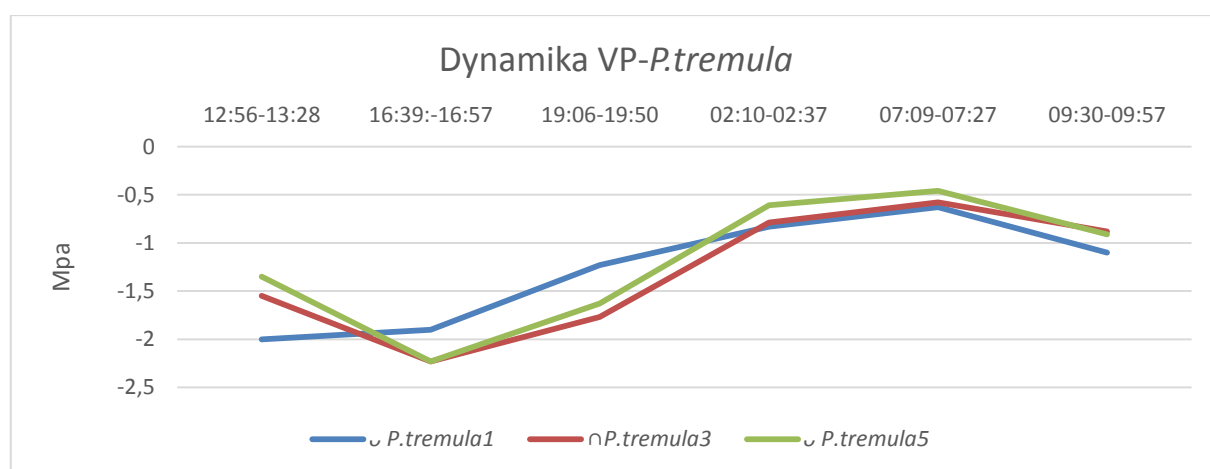
Vodní potenciál vypovídá o aktuálním stavu vody v konkrétní měřené části rostliny, jako je například vodní potenciál v listu. Ve druhé podkapitole je uveden rozdíl ve vodním potenciálu v listech u druhů topol osika a vrba jíva a jejich denní dynamika vodního potenciálu. Dále jsou uvedeny rozdíly vodního potenciálu mezi osikou a jívou měřených v poledne ve třech dnech s intervalem jednoho měsíce.

4.2.1. Dynamika vodního potenciálu v listech vrby jívy a topolu osiky v průběhu dne

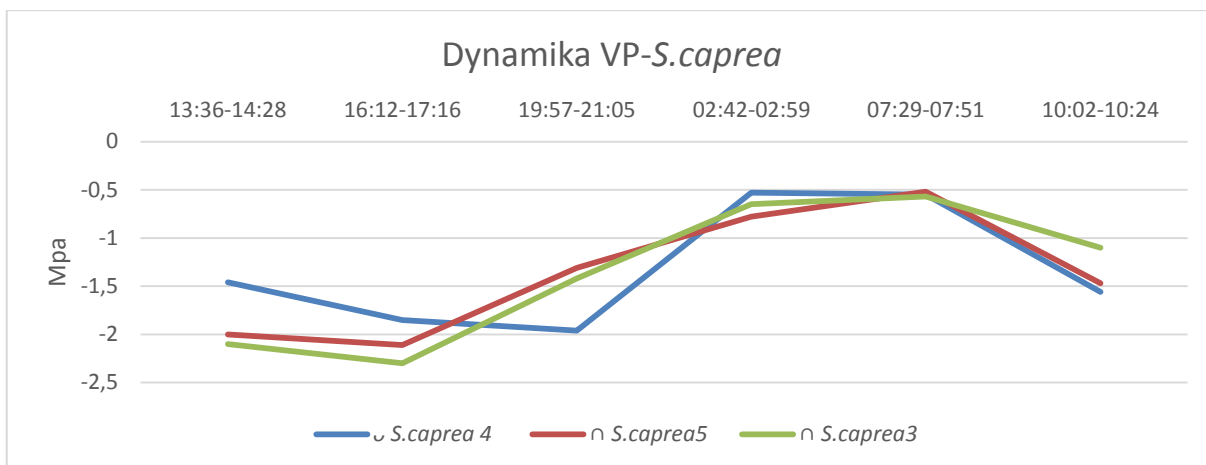
Graf 4-5 a 4-6 zachycuje změny vodního potenciálu v průběhu jednoho dne v listech topolu osiky a vrby jívy. U všech šesti stromů (tři osiky a tři jívy) je podobný trend průběhu změn vodního potenciálu. Po zprůměrování hodnot vodního potenciálu naměřených na třech stromech osiky a jívy (Graf 4-7) je vidět, že oba druhy mají v průběhu dne téměř stejnou dynamiku vodního potenciálu. Signifikantní rozdíl ve vodním potenciálu mezi osikou a jívou byl nalezen pouze v dopoledních hodinách (10:00), kdy se vodní potenciál jívy prokazatelně dostával do zápornějších hodnot než vodní potenciál osiky.

Měření denní dynamiky vodního potenciálu osiky a jívy probíhalo 12. - 13. srpna 2014. Z meteorologických dat, naměřených přímo z plochy S2, můžeme na grafu Graf 4-8 vidět vývoj teploty a vlhkosti v průběhu měření vodního potenciálu. Z Graf 4-3 a Graf 4-4 je patrné, že měření vodního potenciálu nepředcházelo období extrémních teplot a sucha, což by také mohlo ovlivnit výsledek.

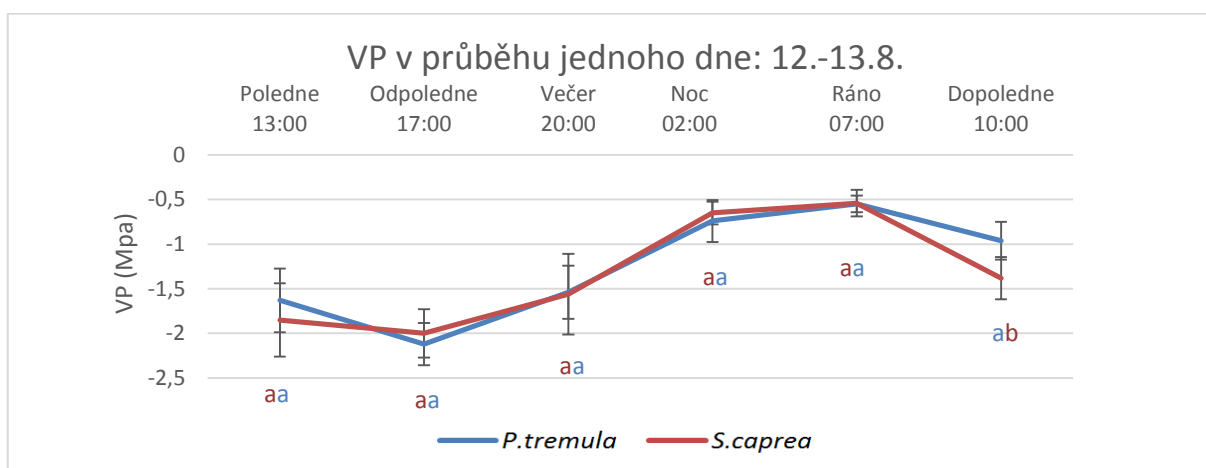
Jak je patrné z obrázku 2-2, terén na stanovišti S2 je vlivem navážky z povrchových dolů zvlněný. Některé mnou sledované stromy osiky a jívy, rostou na vyvýšeninách, což je v legendě grafů 4-5 a 4-6 znázorněno \cap a některé v prohlubních, což značí \cup . Sledovala jsem, jestli rozdíly v poloze mnou vybraných stromů mají vliv na jejich vodní potenciál. Pro statistické vyhodnocení vlivu vyvýšené, nebo snížené polohy stromů byl vodní potenciál měřen u příliš nízkého počtu stromů na ploše S2, ale grafy 4-5 a 4-6 naznačují, že poloha stromů nemá žádný vliv.



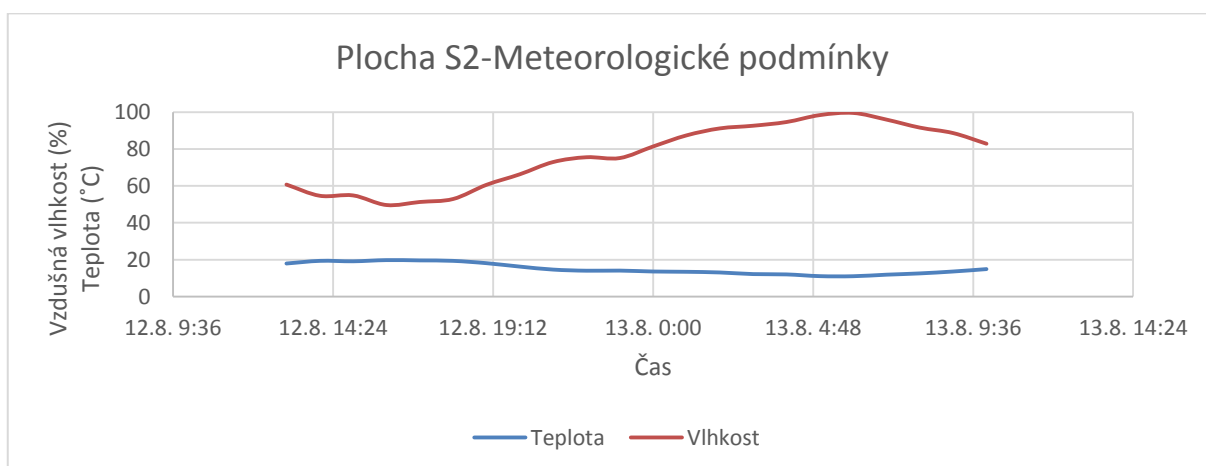
4-5 Dynamika vodního potenciálu (Mpa) u topolu osiky v závislosti na čase u tří stromů. Poloha stromů je vyjádřena \cap pro stromy rostoucí na vrcholcích navážky. Stromy rostoucí v nižších polohách jsou značeny \cup .



4-6 Dynamika vodního potenciálu (Mpa) u vrby jívy v závislosti na čase u tří stromů. Poloha stromů je vyjádřena \cap pro stromy rostoucí na vrcholcích navážky. Stromy rostoucí v nižších polohách jsou značeny \cup .



Graf 4-7 Dynamika vodního potenciálu (Mpa) v průběhu dne. Průměr ze tří stromů u topolu osiky a vrby jívy.



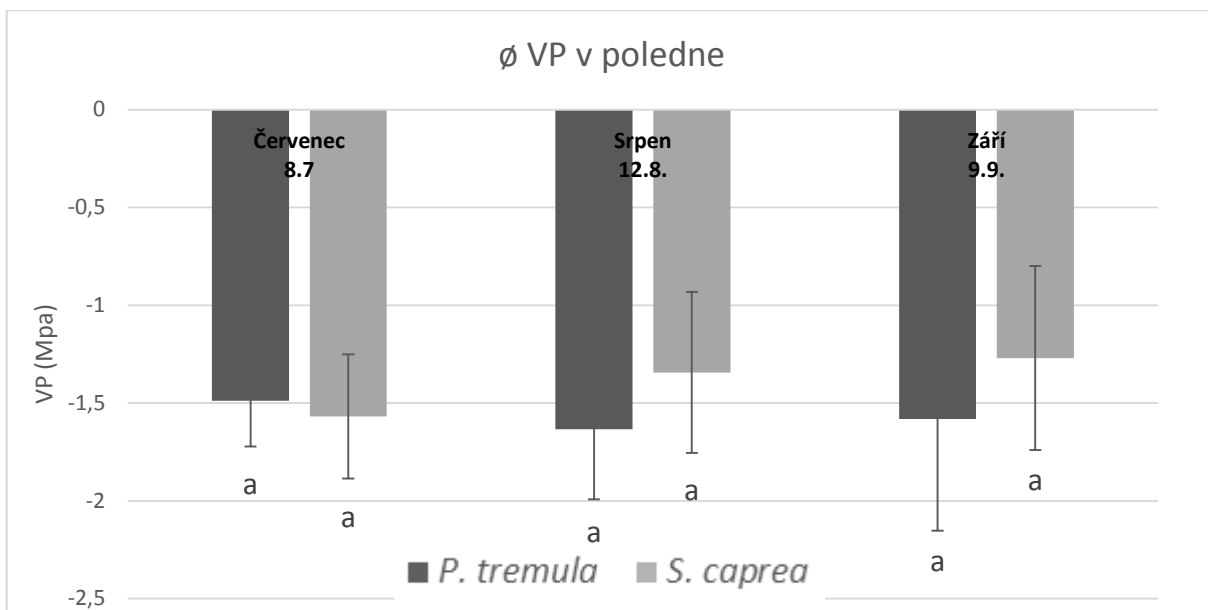
Graf 4-8 Meteorologické podmínky na ploše S2 v době měření vodního potenciálu. Teplota (°C) a vlhkost vzduchu (%).

4.2.2 Vodní potenciál v listech vrby jívy a topolu osiky měřený v poledne

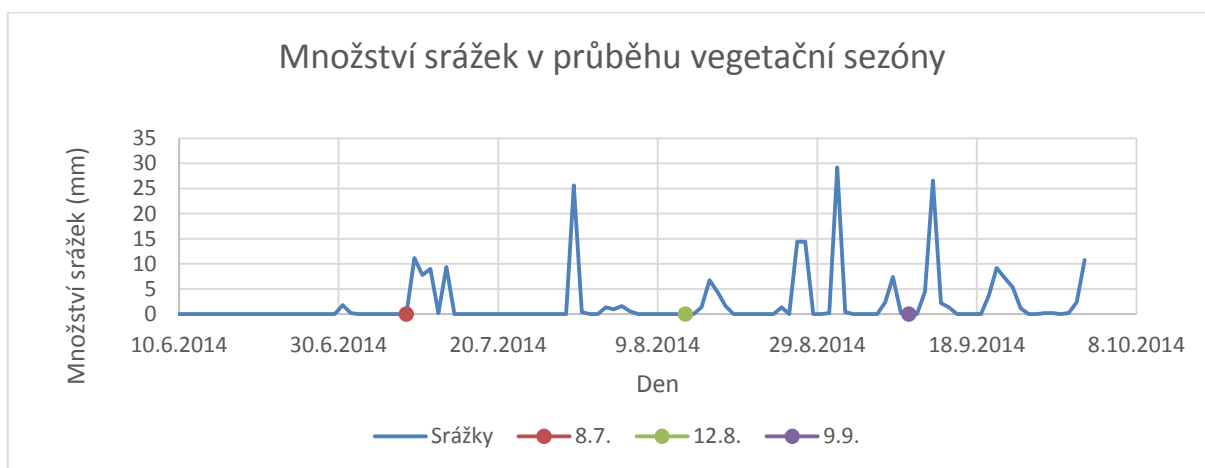
Vodní potenciál listu se u temperátních dřevin měří nejčastěji v poledne proto, že dosahuje nejnižších hodnot a vypovídá o nejnižším vodním potenciálu v rostlině během dne. Transpirace listoví je nejvyšší z celého dne kolem poledne a vodní potenciál rostliny by měl být nejnižší a právě v tuto dobu a měly by se projevit rozdíly mezi druhy. Nejnižší hodnoty vodního potenciálu v poledne jsou dány tím, že se během dopoledne odpaří ranní vlhkost z půdy, sníží se její potenciál a zároveň strom má pravděpodobně již několik hodin otevřené průduchy a transpiruje, což snižuje vodní potenciál v xylému. Jako referenční hodnota pro hodnoty vodního potenciálu rostlin se vodní potenciál stanovuje před úsvitem (pre-dawn), který je měřen v časných ranních hodinách 04-06, kdy by měly být hodnoty ψ_w nejvyšší (Thomsen et al., 2013).

Vodní potenciál u topolu osiky a vrby jívy naměřený v poledne ve třech dnech v intervalu přibližně jednoho měsíce, neprokázal u těchto dvou druhů signifikantní rozdíl v hospodaření s vodou. Ve dvou ze třech měření vodní potenciál listů osiky dosahoval více záporných hodnot, než listy jívy (Graf 4-9).

Měření vodního potenciálu osiky a jívy na sukcesní ploše S2 se uskutečnilo od začátku července do začátku září, ve snaze zachytit rozdílné reakce stromů, probíhalo měření v době s odlišnými meteorologickými podmínkami. Zachytit změny vodního potenciálu u osiky a jívy po různých meteorologických podmínkách, se podařilo jen částečně, kdy měření v červenci i v srpnu následovalo po šesti dnech nulových srážek a měření v září následovalo po třech dnech srážek, které byly v průměru 3,3mm (Graf 4-10).



Graf 4-9 Vodní potenciál (Mpa) ve třech poledních v průběhu třech měsíců.



Graf 4-10 Množství srážek (mm) na ploše S2 v průběhu vegetační sezón.

4.3. Anatomická struktura listu

V této podkapitole se budu zabývat rozdílnou anatomickou strukturou listu topolu osiky a vrby jívy a změnou anatomické struktury listu v průběhu šesti měsíců vegetační sezóny v roce 2014.

Anatomická struktura obou dřevin představuje typické dorziventrální uspořádání listu. Na povrchu listu se nachází pokožka, mající průduchy pouze na adaxiální straně listu. Dále můžeme na obou druzích pozorovat klasickou anatomickou strukturu dorziventrálního listu, což jsou v případě osiky i jívy dvě vrstvy buněk palisádového parenchymu z adaxiální strany a houbovitý parenchym z abaxiální strany listu (Obr. 4-1 a 4-2). V případě vrby jívy je součástí pokožky na abaxiální straně listu husté odění trichomů.

V další podkapitole se zaměřím na povrch listu osiky a jívy a jeho kvantitativní parametry - distribuce průduchů, hustota a velikost průduchů osiky a jívy. Dále budu pokračovat zhodnocením mocnosti jednotlivých pletiv v listech osiky a jívy: zastoupení adaxiální a abaxiální pokožky listu, palisádového a houbovitého parenchymu listu a celkovou tloušťkou listu. Poměry jednotlivých pletiv listu osiky a jívy mohou také vypovídat o přizpůsobení rostliny okolním podmínkám a hospodaření s vodou. Poslední část podkapitoly věnované anatomické struktuře listů osiky a jívy se zaměřuje na rozdíl ve specifické listové ploše (SLA), mezi topolem osikou a vrbou jívou, která vyjadřuje poměr mezi plochou a suchou hmotností listu a ještě více nám přibližuje rozdíly ve struktuře listu mezi oběma druhy.

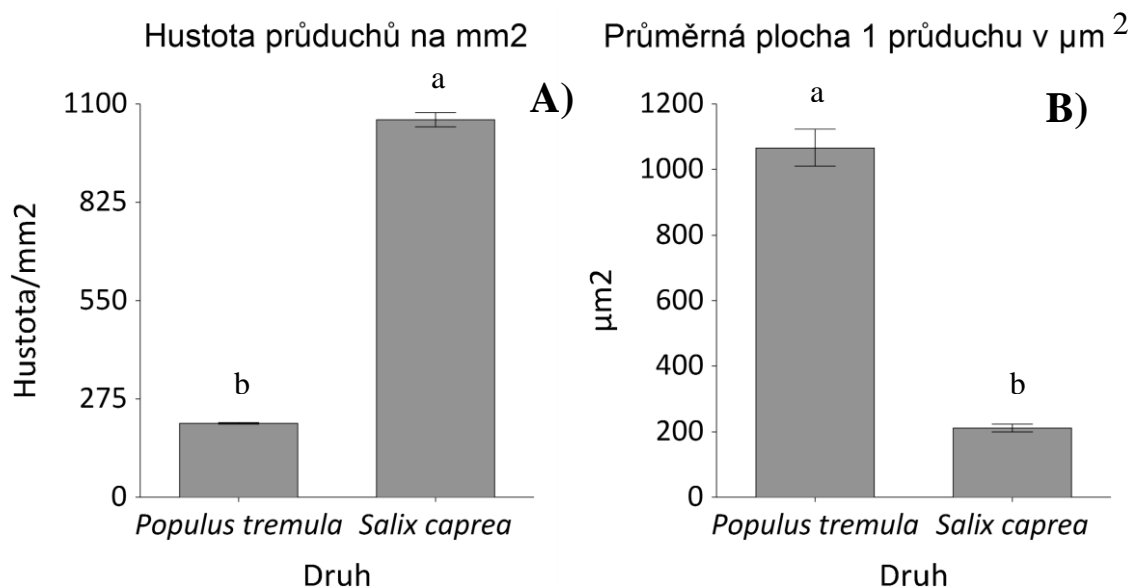
4.3.1. Hustota a velikost průduchů

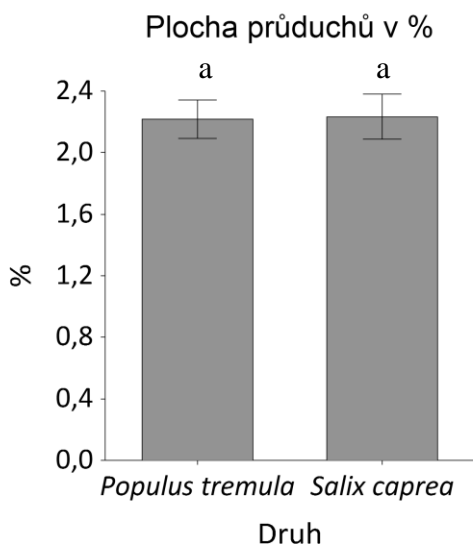
Parametr hustoty průduchů jsem si vybrala proto, že souvisí s hospodařením konkrétní rostliny s vodou a s jejím přizpůsobením k okolním podmínkám. Hustota průduchů bývá přímo závislá na jeho velikosti, která bývá tím menší, čím vyšší je hustota průduchů (Wagner et al., 1996). Velikost i hustota průduchů a jejich rozložení v průběhu sezóny do jisté míry vypovídá o ontogenetickém vývoji listu.

4.3.1.1. Rozdíl mezi druhy

Graf 4-11 A) znázorňuje rozdíl v hustotě průduchů mezi topolem osikou a vrbou jívou. Mezi osikou a jívou byl nalezen signifikantní rozdíl v hustotě průduchů, kdy jíva má výrazně vyšší počet průduchů na jednotku plochy oproti osice. Opačný rozdíl mezi osikou a jívou můžeme vidět ve velikosti jejich průduchů v grafu 4-11 B). Osika má sice signifikantně méně průduchů, než jíva, ale její průduchy jsou signifikantně větší než nacházíme u jívy. Těmto výsledkům odpovídá i pravidlo, že menší velikost průduchů, je kompenzována jejich počtem.

Při přepočítání celkové plochy průduchů u vrby jívy a topolu osiky v % a statistickém vyhodnocení jsem došla k závěru, že celková plocha průduchů se u vrby jívy a topolu osiky signifikantně neliší (Graf 4-11 C)).





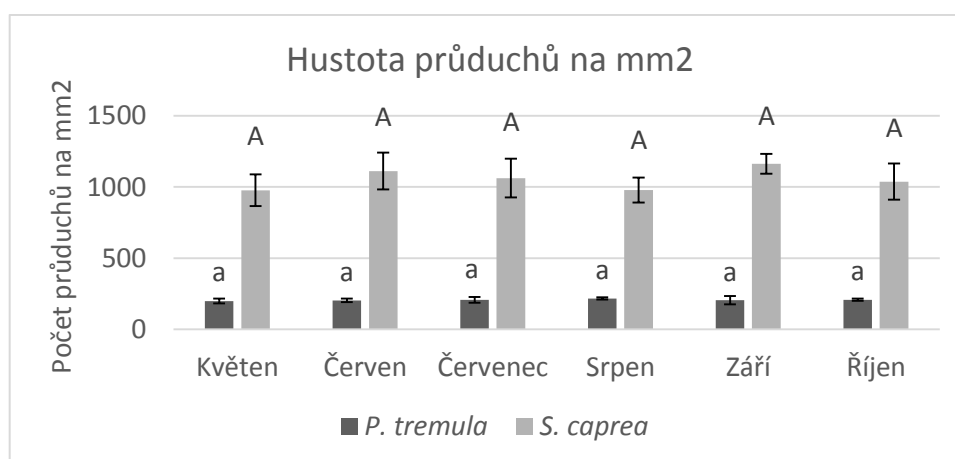
C)

Graf 4-11 A) Hustota průduchů na mm². B) průměrná plocha 1 průduchu v μm² C) Celková plocha průduchů u vrby jívy a topolu osiky v % u druhů topol osika a vrba jíva.

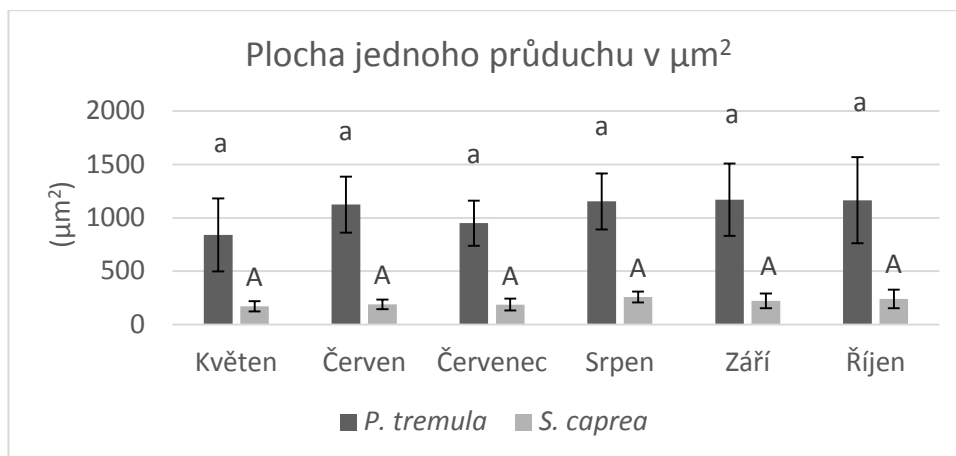
Sloupce vyjadřují průměrný počet průduchů na mm² A), průměrnou plochu v μm² B) a plochu průduchů v % C). Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině p=0,05, one way ANOVA, n pro hustotu průduchů bylo pro každý druh n=90 (6 odběrů z pěti stromů x 3 pokožky; n pro velikost průduchů n=36 (6 odběrů x 2 stromy x 3 pokožky)

4.3.1.2. Hustota, velikost průduchu a plocha průduchů v průběhu sezóny

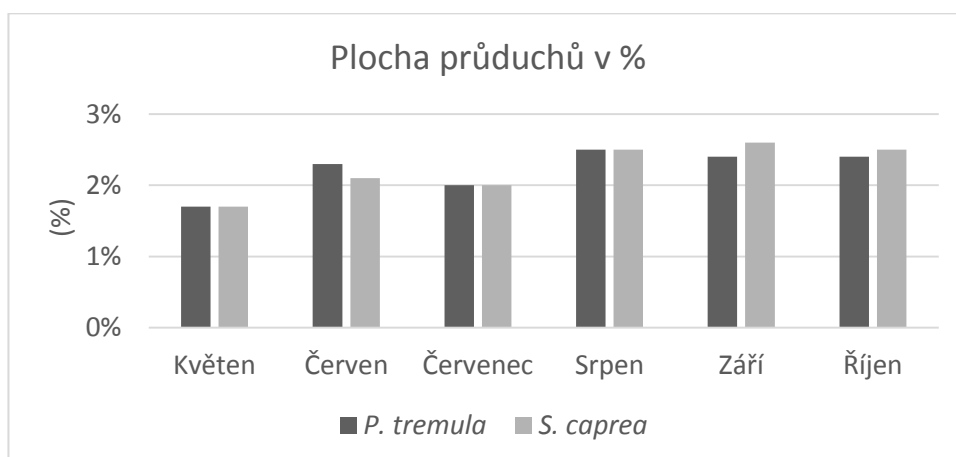
Jak je zřejmé z grafu 4-12, hustota průduchů osiky a jívy se v části sezóny 2014, kterou jsem sledovala, signifikantně neliší. U osiky a jívy nebyl nalezen signifikantní rozdíl mezi plochou jednoho průduchu v průběhu sezóny, jak je vidět z grafu 4-13. Z grafů 4-12 a 4-13 je zřejmé, že v době odběrů listů, byly průduchy plně vyvinuty a ani u jívy, ani u osiky dále nedocházelo ke zvětšování plochy listu a snižování hustoty průduchů. Graf 4-14 vyjadřuje průměrnou plochu průduchů v % u obou druhů, pro rozdílné počty listů, na kterých byla naměřena plocha jednoho průduchu a listů a hustota průduchů, nebylo možné parametr plochy průduchů v % statisticky porovnat. Nicméně z grafu je patrné, že přestože oba druhy mají rozdílně velké průduchy, i rozdílné počty průduchů, jejich plocha je téměř stejná.



4-12 Hustota průduchů na mm² u druhů topol osika a vrba jíva v průběhu sezóny. Sloupce vyjadřují průměrný počet průduchů na mm². Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině p=0,05, one way ANOVA.



4-13 Plocha jednoho průduchu v μm^2 u druhů topol osika a vrba jíva v průběhu sezóny. Sloupce vyjadřují průměrnou plochu jednoho průduchu v μm^2 . Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.



4-14 Plocha průduchů v procentech u druhů topol osika a vrba jíva. Sloupce vyjadřují průměrnou plochu průduchů. Nehodnoceno statisticky.

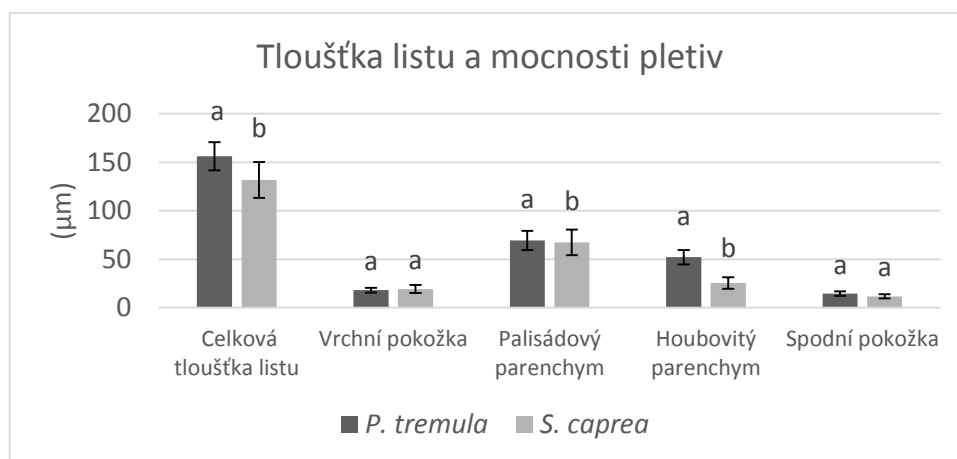
4.3.2. Vnitřní struktura listu

V rámci zhodnocení vnitřní anatomické struktury listu osiky a jívy jsem se zaměřila na parametry celkové tloušťky listu, mocnost adaxiální a abaxiální pokožky listu a poměry palisádového a houbovitého parenchymu listu.

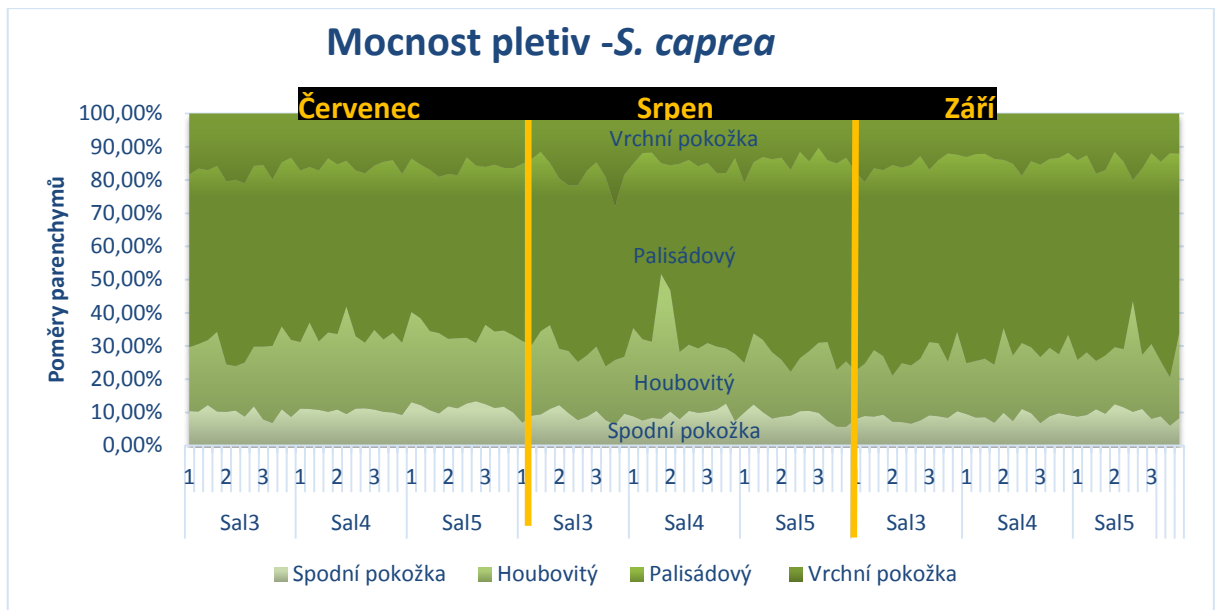
Z grafu 4-15 jsou patrné signifikantní rozdíly mezi topolem osikou a vrbou jívou v následujících anatomických parametrech: celková tloušťka listu, houbovitý parenchym a tloušťka spodní pokožky listu, ve všech těchto parametrech, dosahovala osika signifikantně vyšších hodnot, než jíva. Tloušťka vrchní pokožky listu a tloušťka palisádového parenchymu listu, se mezi osikou a jívou signifikantně neliší.

Anatomické řezy osiky a jívy byly prováděny na vzorcích odebraných v průběhu 3 měsíců, kdy se mezi jednotlivými měsíci ukázaly signifikantní rozdíly v tloušťce listu (graf 4-18) u osiky i u jívy. U osiky i u jívy byl vidět rostoucí trend tloušťky listu od července do září, který byl u obou druhů v srpnu signifikantně větší, než v červenci.

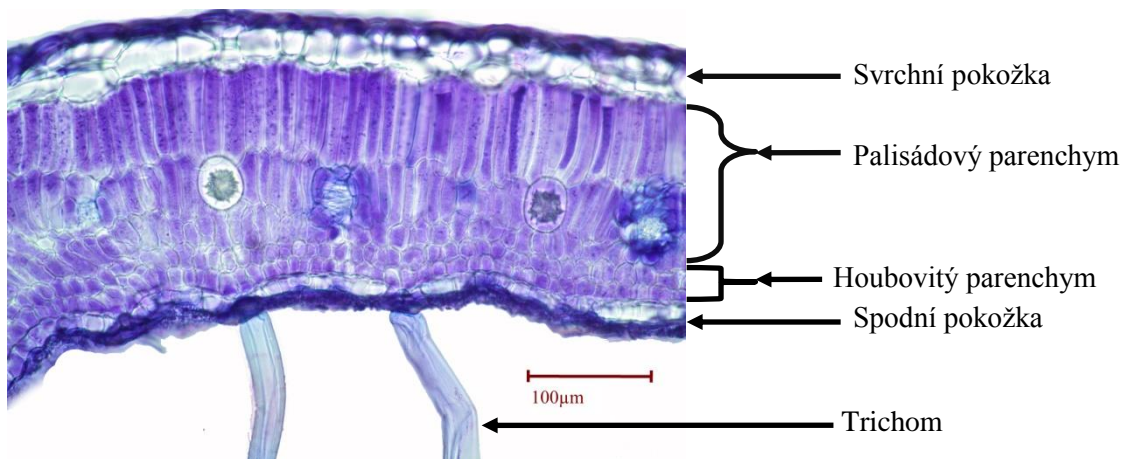
Na grafu 4-16 a 4-17 můžeme vidět schematické zastoupení pletiv listu topolu osiky a vrby jívy ve třech měsících sezóny. Zastoupení mocnosti parenchymů a pokožek byly pořízeny na konkrétních příčných řezech listu topolu osiky a vrby jívy, údaje jsou v % a vizuálně odpovídají skutečnému rozložení pletiv v listu konkrétního druhu, které lze vidět na příčném řezu vrby jívy (Obrázek 4-1) a příčném řezu topolu osiky (Obrázek 4-2). Dále můžeme na grafu 4-19 pozorovat poměrné zastoupení palisádového a houbovitého parenchymu, kde topol osika má signifikantně vyšší poměr houbovitého/palisádového parenchymu než vrba jíva.



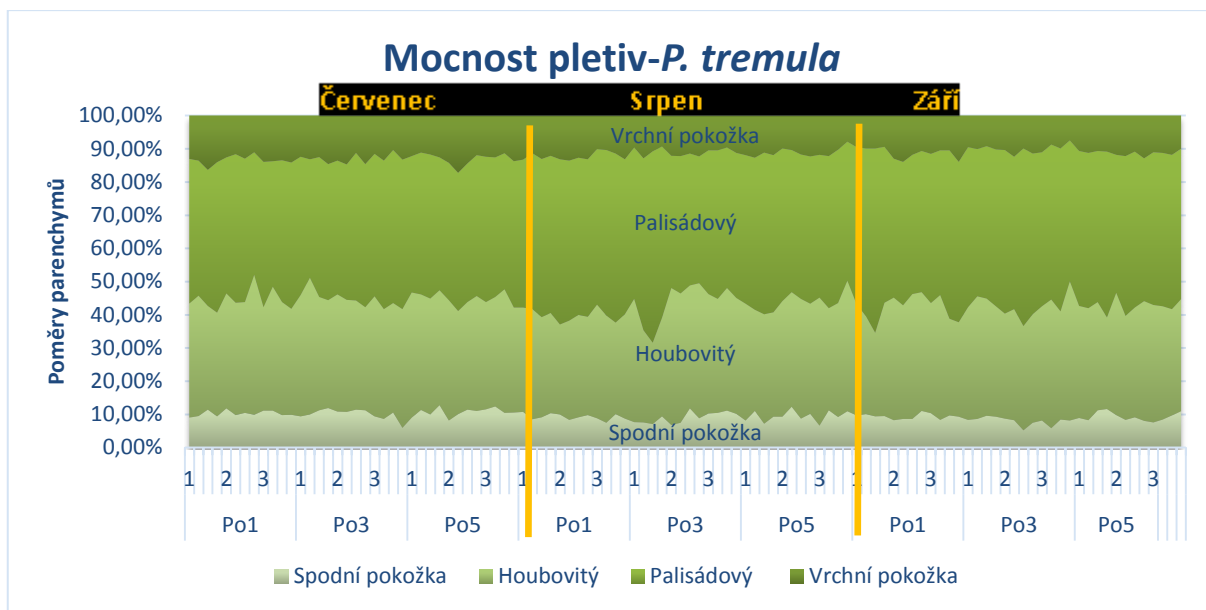
4-15 Zastoupení mocnosti jednotlivých pletiv a pokožek u druhů topol osika a vrba jíva. Sloupce vyjadřují průměrnou tloušťku pletiva v µm. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.



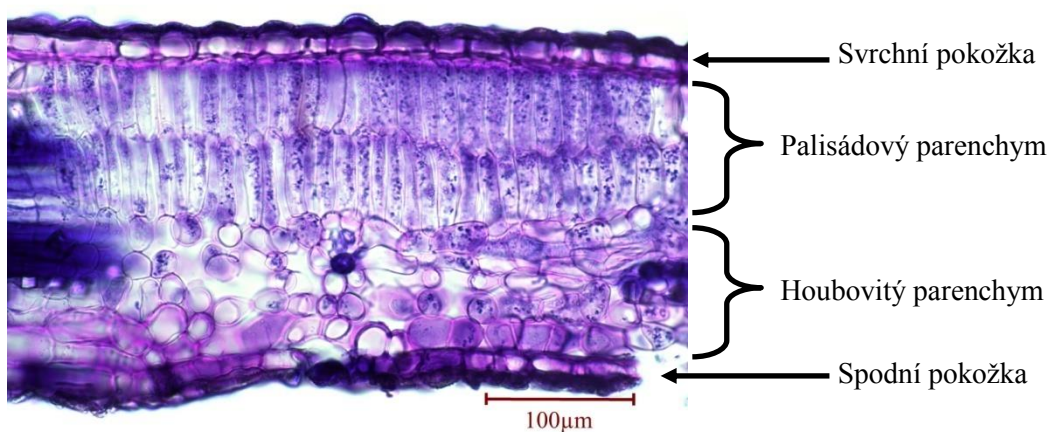
4-16 Mocnost pletiv listu vyjádřená v % celkové tloušťky listu. Měřeno na příčném řezu listem vrby jívy. Grafické znázornění zdrojových hodnot u všech měřených řezů. V červenci, srpnu a září byly ze tří vybraných stromů (Sal 3,4,5) vytvořeny 2 řezy na třech listech a z každého řezu vytvořeny dva snímky, na kterých byly změřeny poměry jednotlivých pletiv v % u listu jívy.



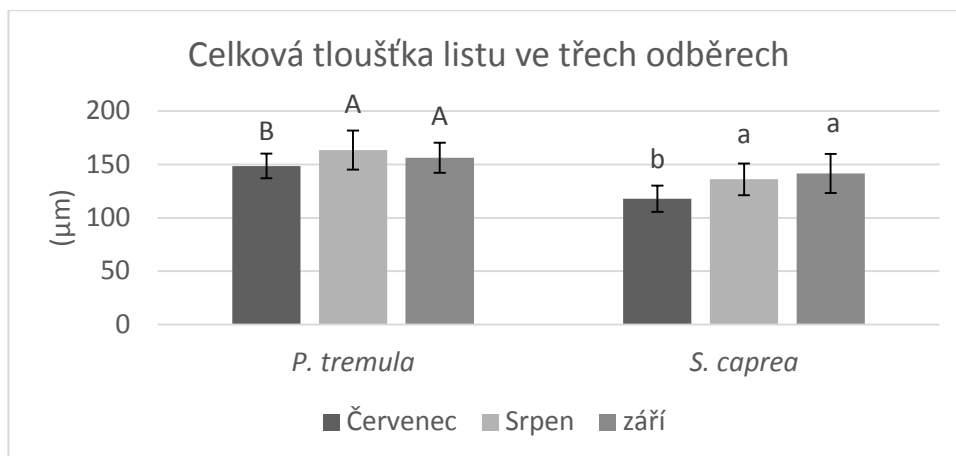
Obrázek 4-1 Příčný řez listem vrby jívy, na povrchu je svrchní (adaxiální) epidermis, pod ní dvouvrstevný palisádový parenchym, houbovitý parenchym, spodní (abaxiální) epidermis. Uvnitř palisádového parenchymu jsou patrné krystaly šťavelanu vápenatého (hvězdicovité útvary). Barveno toluidinovou modří, foceno kamerou Canon (EOS 100D) na mikroskopu Olympus (BX40), světlé pole, zvětšení 400x.



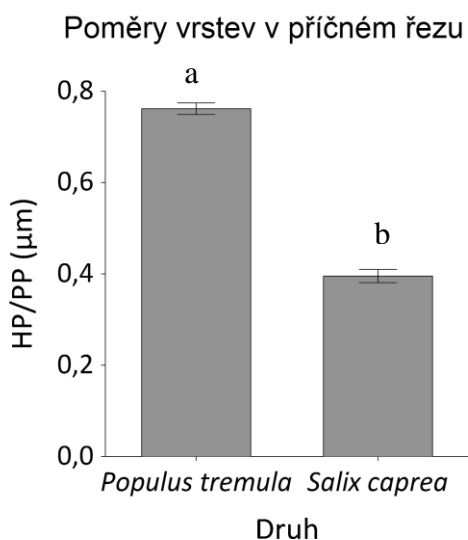
4-17 Mocnost pletiv listu vyjádřená v % celkové tloušťky listu. Měřeno na příčném řezu listem topolu osiky. Grafické znázornění zdrojových hodnot u všech měřených řezů. V červenci, srpnu a září byly ze tří vybraných stromů (*Populus* 1,3,5) vytvořeny 2 řezy na třech listech a z každého řezu vytvořeny dva snímky, na kterých byly změřeny poměry jednotlivých pletiv v % u listu osiky.



Obrázek 4-2 Příčný řez listem topolu osiky, na povrchu je svrchní (adaxiální) epidermis, pod ní dvouvrstevný palisádový parenchym, houbovitý parenchym, spodní (abaxiální) epidermis. Barveno toluidinovou modří, foceno kamerou Canon (EOS 100D) na mikroskopu Olympus (BX40), světlé pole, zvětšení 400x.



4-18 Celková tloušťka listu v μm u druhů topol osika a vrba jíva ve třech měsících. Sloupce vyjadřují průměrnou tloušťku listu v μm v měsíci červenci, srpnu a v září. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA



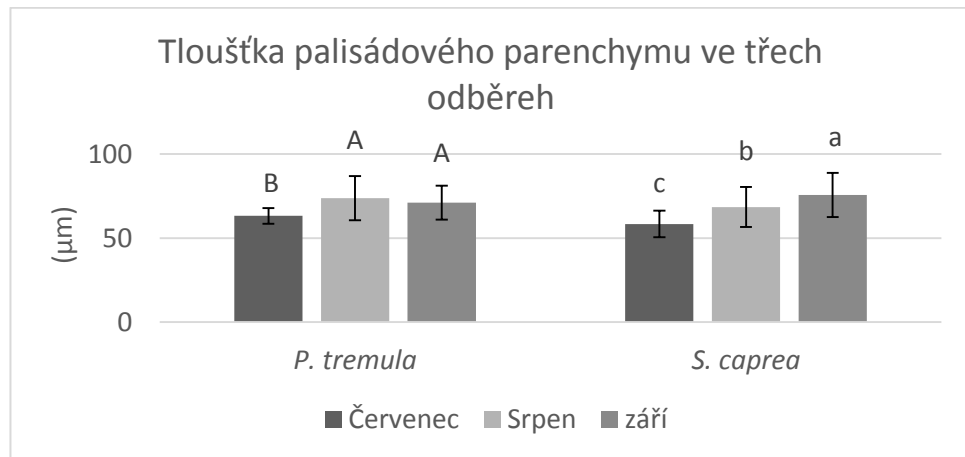
4-19 Poměry vrstvy houbovitého/palisádového parenchymu v příčném řezu listu topolu osiky a vrby jívy. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.

4.3.2.1. Rozdíl v poměrech palisádového a houbovitého parenchymu u topolu osiky a vrby jívy v průběhu sezóny

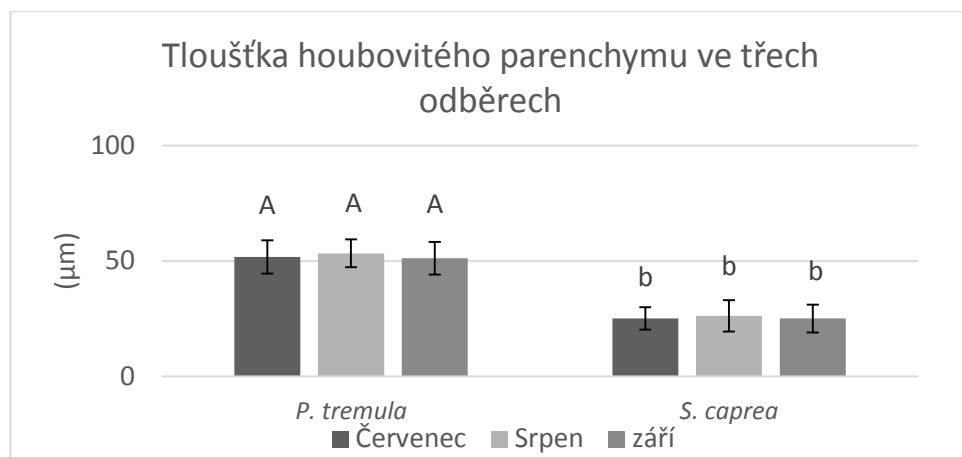
Po zhodnocení celkové tloušťky listu osiky a jívy, se podrobněji věnují jednotlivým pletivům listu. Nejprve vyhodnotím mocnosti palisádového a houbovitého parenchymu ve vybraných třech měsících, v červenci, srpnu a září a zároveň mezi oběma druhy.

V tloušťce palisádového parenchymu se v průběhu sezóny našly signifikantní rozdíly u osiky, i u jívy, graf 4-20. U osiky i jívy byl pozorován rostoucí trend mocnosti palisádového parenchymu. Palisádový parenchym u osiky narůstá stejně, jako jeho tloušťka listu, což znamená, že chování tloušťky listu odpovídá chování palisádového parenchymu. U vrby jívy tloušťka palisádového parenchymu signifikantně narůstala po celé sledované období.

U houbovitého parenchymu, graf 4-21 v průběhu třech měsíců nebyl nalezen signifikantní rozdíl ani u osiky, ani u jívy.



4-20 Tloušťka palisádového parenchymu v µm u topolu osiky a vrby jívy ve třech měsících. Sloupce vyjadřují průměrnou tloušťku palisádového parenchymu v µm v měsíci červenci, srpnu a v září. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA



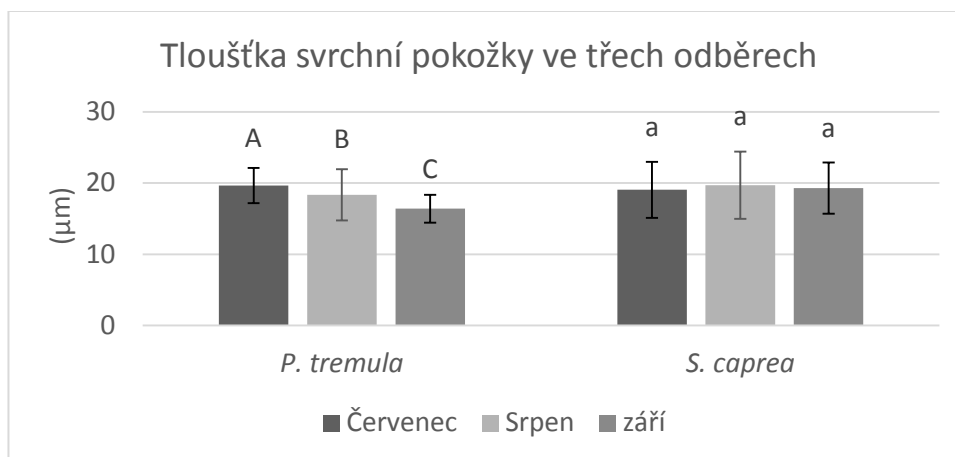
4-21 Tloušťka houbovitého parenchymu v µm u topolu osiky a vrby jívy ve třech měsících. Sloupce vyjadřují průměrnou tloušťku houbovitého parenchymu v µm v měsíci červenci, srpnu a v září. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který na hladině $p=0,05$ nebyl prokázán, one way ANOVA.

4.3.2.2. Rozdíl v tloušťce pokožky u obou druhů v průběhu sezóny

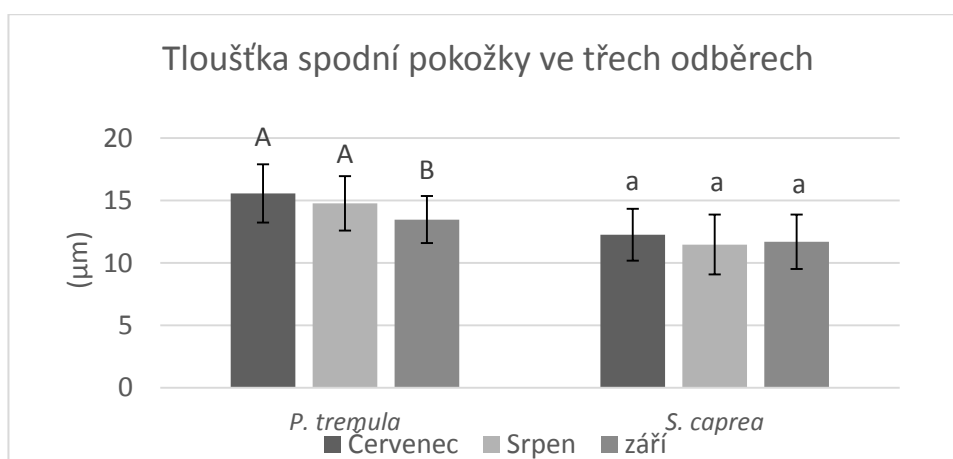
Po zhodnocení vnitřního členění listu následuje porovnání tloušťky vrchní a následně spodní pokožky ve vybraných třech měsících červenci, srpnu a září, mezi druhy topol osika a vrba jíva.

U svrchní pokožky se u jívy v průběhu třech sledovaných měsíců signifikantní rozdíl neprokázal, oproti osice, kde byl prokázán signifikantní rozdíl, s klesající tendencí u všech třech měsících, což je možné pozorovat v grafu 4-22. V červenci byla u topolu tloušťka svrchní pokožky nejvyšší, v srpnu byla signifikantně nižší, než v červenci a v září byla signifikantně

nižší, než v srpnu i v červenci. Jak je zřejmé z grafu 4-23, spodní pokožka vrby jívy, v pozorovaných třech měsících, nevykazovala v tloušťce signifikantní rozdíl. U topolu osiky nebyl nalezen signifikantní rozdíl mezi červencem a srpnem, ale v září byla tloušťka spodní pokožky signifikantně nižší, než v srpnu.



4-22 Tloušťka vrchní pokožky v μm u druhů topol osika a vrba jíva ve třech měsících. Sloupce vyjadřují průměrnou tloušťku vrchní pokožky v μm v měsíci červenci, srpnu a v září. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.



4-23 Tloušťka spodní pokožky v μm u druhů topol osika a vrba jíva ve třech měsících. Sloupce vyjadřují průměrnou tloušťku spodní pokožky v μm v měsíci červenci, srpnu a v září. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.

4.3.3. Specifická listová plocha

Kvantifikaci vnitřních pletiv listu topolu osiky a vrby jívy doložím hodnotami o specifické listové ploše, v průběhu sezóny se vyskytují rozdíly mezi topolem osikou a vrbou jívou. Specifická listová plocha poskytuje doplňující informace o vnitřní struktuře listu.

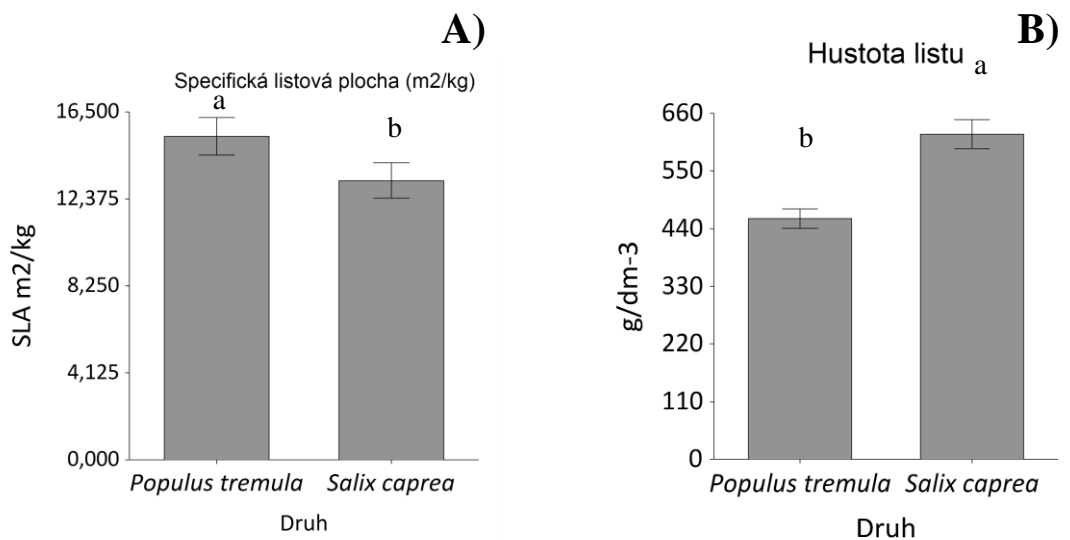
Při porovnání specifické listové plochy (SLA) graf 4-24 A), byl mezi druhy nalezen signifikantní rozdíl. Jíva má signifikantně menší specifickou listovou plochu než osika, čemuž

odpovídá i to, že má signifikantně nižší tloušťku listu. Na grafu 4-24 B), můžeme pozorovat signifikantní rozdíl v hustotě listu u osiky a jívy, kde vidíme, že jíva má signifikantně hustší list, než osika.

V průběhu sezóny (Graf 4-25), můžeme pozorovat klesající trend SLA, který je pravděpodobně dán akumulací strukturních látek a navyšováním suché hmotnosti, při konečné ploše listu, což jsem ověřila konečnou hustotou průduchů v průběhu sezóny.

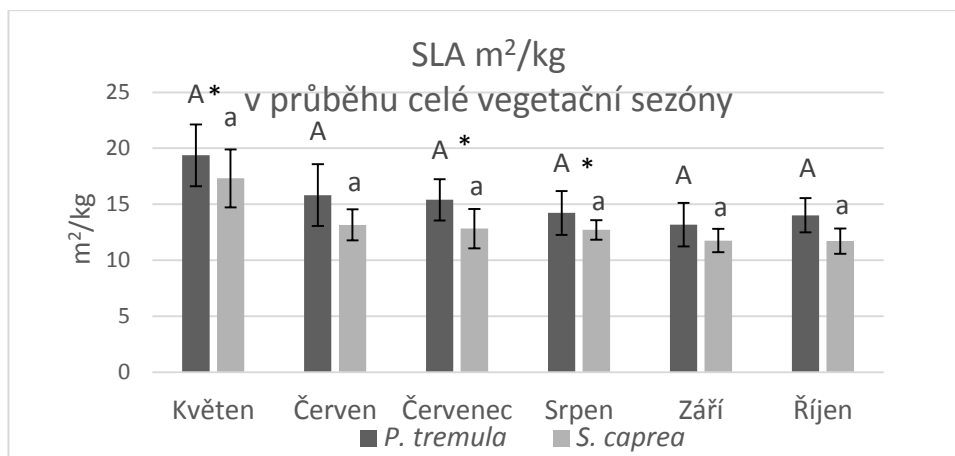
V květnu, srpnu a září měla osika signifikantně vyšší SLA než jíva a v ostatních měsících byla u osiky SLA také vyšší, bez signifikantní průkaznosti.

Na grafu 4-26 je vidět dynamika specifické listové hmotnosti v průběhu sezóny, která je opačná, než trend SLA, protože LMA je obrácená hodnota k SLA.

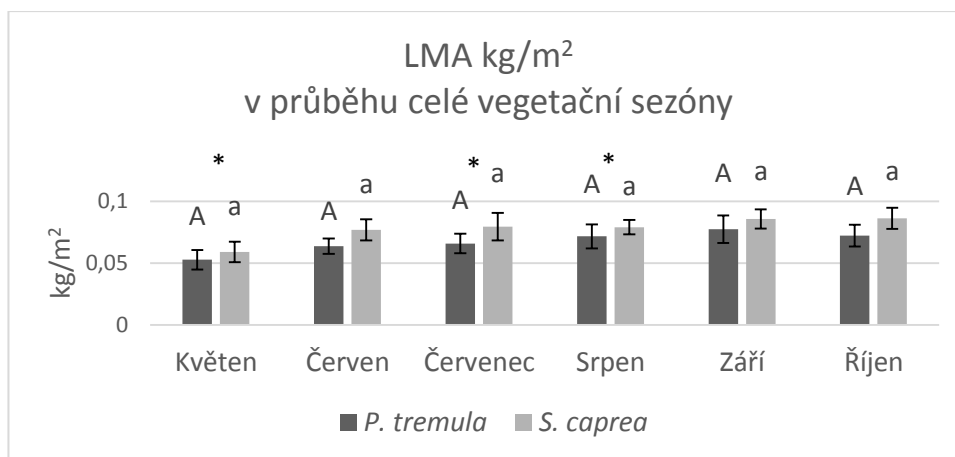


4-24 A) *Specifická listová plocha m²/kg. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině p=0,05, one way ANOVA.*

B) *Hustota listu u druhů topol osika a vrba jíva. Sloupce vyjadřují hustotu listu v g/dm³. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině p=0,05, one way ANOVA.*



4-25 Specifická listová plocha (m²/kg) u druhů topol osika a vrba jíva v průběhu sezóny. Sloupce vyjadřují průměrnou specifickou listovou plochu v m²/kg v průběhu sezóny. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Odlišná velikost písmen nad sloupci značí signifikantní rozdíl v průběhu sezóny u jednoho druhu a hvězdička značí signifikantní rozdíl mezi druhy v daném odběru. Hladina, na které byl rozdíl prokázán: $p=0,05$, one way ANOVA.



Graf 4-26 Specifická listová hmotnost (kg/m²) u druhů topol osika a vrba jíva v průběhu sezóny. Specifická listová hmotnost je obrácená hodnota k SLA. Sloupce vyjadřují průměrnou specifickou listovou hmotnost v kg/m² v průběhu sezóny. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Odlišná velikost písmen nad sloupci značí signifikantní rozdíl v průběhu sezóny u jednoho druhu a hvězdička značí signifikantní rozdíl mezi druhy v daném odběru. Hladina, na které byl rozdíl prokázán: $p=0,05$, one way ANOVA.

4.4. Biochemické a biofyzikální parametry listu

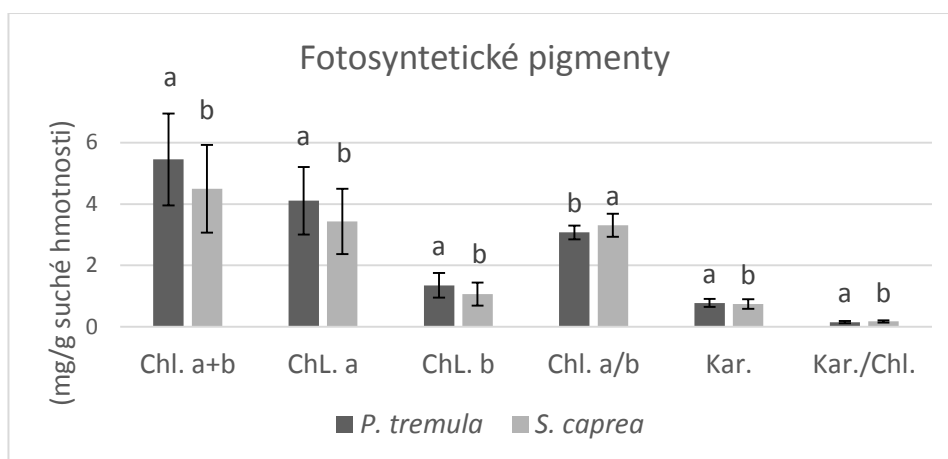
Podkapitola biochemických a biofyzikálních parametrů listu pojednává o rozdílu v obsahu fotosyntetických pigmentů, jako jsou chlorofyly a karotenoidy v listech, mezi druhy topolem osikou a vrbou jívou a dynamikou obsahu jednotlivých pigmentů v průběhu sezóny. Mezi biofyzikální parametry listu se řadí hlavně obsah vody, který je v této části vyjádřen parametrem obsahu vody, kde nechybí údaje o změnách během sezóny.

4.4.1. Fotosyntetické pigmenty

Vyhodnocovanými parametry jsou fotosyntetické pigmenty: množství chlorofylu *a* a *b*, celkové množství chlorofylu *a+b*, poměr mezi chlorofyly *a/b*, obsah karotenoidů a poměr mezi karotenoidy a chlorofyly. Všechny tyto parametry listu napovídají o fyziologickém stavu dřevin.

4.4.1.1. Rozdíl mezi druhy

Graf 4-27 zaznamenává signifikantní rozdíly mezi obsahy všech fotosyntetických pigmentů, kterými jsou chlorofyl *a*, *b* a karotenoidy u druhů topol osika a vrba jíva. U osiky bylo množství chlorofylu *a*, *b* i karotenoidů signifikantně vyšší, než u jívy, pouze poměr chlorofylu *a/b* a poměr karotenoidů/chlorofylů byl signifikantně vyšší u jívy, než u osiky.



4-27 Rozdíl v obsahu fotosynteticky aktivních pigmentů mezi druhy topol osika a vrba jíva. Sloupce vyjadřují průměrný obsah fotosyntetických pigmentů v mg/g sušiny. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.

3.3.1.2 Obsah fotosyntetických pigmentů v průběhu sezóny u vrby jívy i topolu osiky

Z grafu 4-28 je zřejmé, že topol osika měl v průběhu sezóny obsah chlorofylů vždy vyšší než vrba jíva. Tento rozdíl je dán mezidruhovými rozdíly a vzhledem ke stejným podmínkám, za jakých stromy rostou, nepředpokládám přítomnost stresu jen u jednoho druhu. V průběhu sezóny se v obsahu chlorofylů *a+b* u osiky i u jívy projevuje klesající trend. Obsah chlorofylu *a+b* byl u jívy signifikantně nejvyšší v květnu, oproti ostatním sledovaným měsícům. V říjnu kdy byl obsah chlorofylů *a+b* u jívy nejnižší, byl nalezen signifikantní rozdíl oproti červnu, v červenci i srpnu. Dále byl také u jívy nalezen signifikantní rozdíl, který prokázal, že v červenci byl obsah fotosyntetických pigmentů signifikantně vyšší, než v srpnu. Ve stejném grafu můžeme u osiky vidět, že signifikantně nejvyšší obsah chlorofylu *a+b*, byl nalezen

v květnu a v červenci. V červnu byly hodnoty u osiky signifikantně nižší, než v květnu i v červenci. Dále bylo zjištěno, že u osiky, byly hodnoty chlorofylů $a+b$ v září signifikantně nižší, než v červenci a srpnu, ale signifikantně vyšší, než v říjnu, což byl u topolu osiky měsíc se signifikantně nejnižšími hodnotami chlorofylu $a+b$.

V grafu 4-29 je vidět, že vrba jíva má v průběhu sezóny vždy vyšší poměr chlorofylů a/b , než topol osika. Pro jívu byl poměr chlorofylů a/b nejvyšší v září, což bylo signifikantně vyšší, než v květnu, červnu a červenci. V srpnu, září i říjnu byl poměr chlorofylů a/b u jívy signifikantně vyšší než hodnoty v červenci. Poměr chlorofylu a/b byl u osiky v září signifikantně vyšší než v ostatních měsících. V říjnu byl poměr chlorofylu a/b pro osiku signifikantně vyšší než v červenci a v červnu.

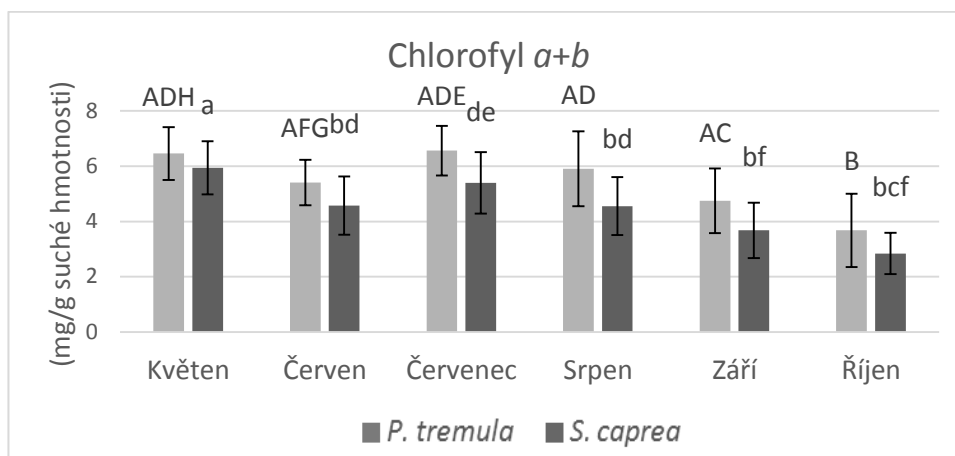
Z výše prezentovaných výsledků je zřejmé, že snižující se SLA je zapříčiněna tloušťnutím listu a akumulací strukturních látek v průběhu sezóny než zmenšením plochy listu. Plocha listu je u obou druhů, jak je zřejmé z výše prezentovaných výsledků, v tomto období sezóny konečná. Z následujících čtyř grafů (4-28– 4-31) vyplývá, že se obsah pigmentů v průběhu sezóny snižuje, což je dáno tím, že obsah pigmentů je uváděn na množství suché hmotnosti, která se zvyšuje. Ve skutečnosti se obsah pigmentů snižuje až na konci sezóny, což je důsledek přirozené senescence listů.

U vrby jívy byl obsah karotenoidů signifikantně nejvyšší v květnu, oproti ostatním měsícům, což můžeme vidět v grafu 4-30. Nejnižší obsah karotenoidů byl u jívy naměřen v říjnu, a byl signifikantně nižší než v červnu, červenci a srpnu. Bylo prokázáno, že v září byl obsah karotenoidů u jívy signifikantně nižší než v červenci a srpnu. Ve stejném grafu je možné vidět obsah karotenoidů v průběhu sezóny u topolu osiky, který byl signifikantně nejvyšší v červenci a srpnu, oproti ostatním měsícům. Signifikantně nižší než v červenci byl obsah karotenoidů osiky v květnu, září a říjnu. V srpnu byly hodnoty karotenoidů signifikantně vyšší než v září, ale signifikantně se nelišily od července.

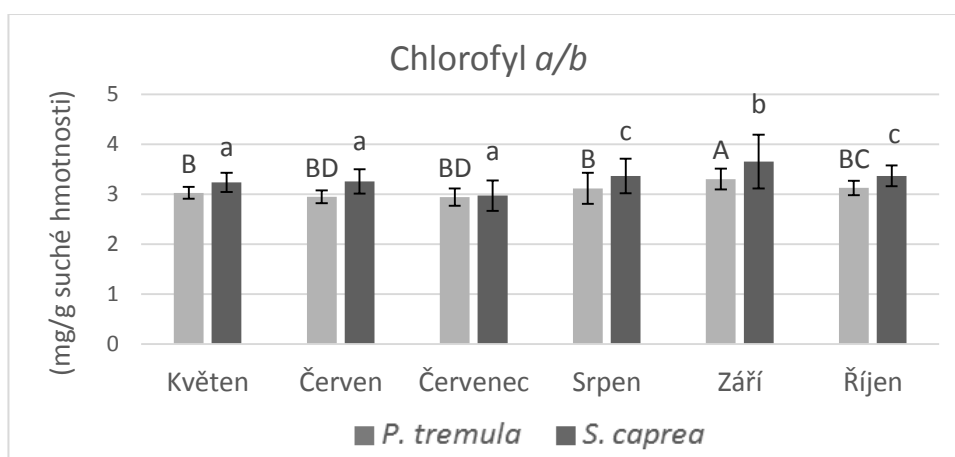
Poměr karotenoidů a chlorofylů je znázorněn v grafu 4-31, kde je zřejmé, že poměr karotenoidů a chlorofylů byl u jívy v průběhu sezóny vždy vyšší než u osiky. U jívy byl poměr signifikantně nejvyšší v říjnu, oproti ostatním měsícům. V září byly hodnoty u jívy signifikantně vyšší než v květnu a v červenci. U osiky byl poměr karotenoidů a chlorofylů v říjnu signifikantně vyšší než v ostatních měsících. A v měsíci květnu byly hodnoty karotenoidů a chlorofylů u osiky signifikantně nižší než v červnu, srpnu, září i říjnu.

U poměru karotenoidů a chlorofylů je od září patrný stoupající trend, není to dáno zvýšenou syntézou karotenoidů, ale jejich mírnějším poklesem v průběhu senescence oproti chlorofylům. U topolu osiky byl od začátku září nalezen prudký pokles obsahu chlorofylů na

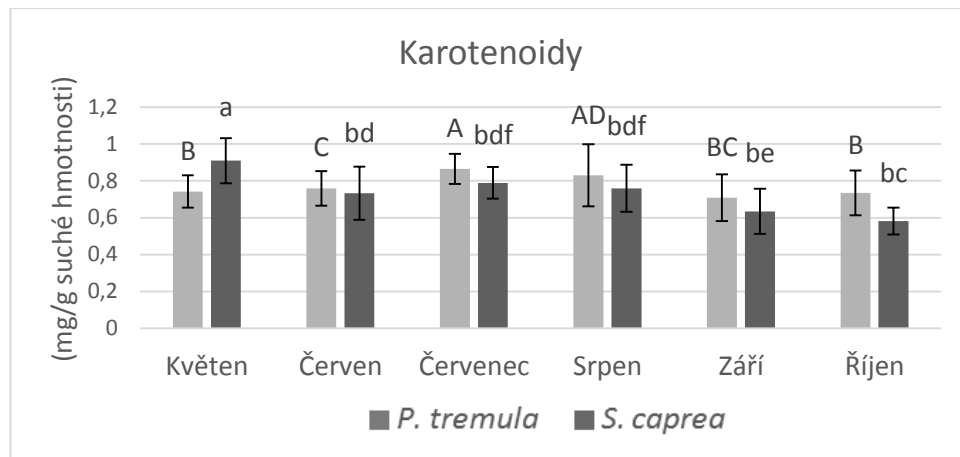
množství sušiny. Ze studie (Keskitalo et al., 2005) je zřejmé, že obsah β -karotenů a luteinu v sušině topolu osiky v průběhu září také klesal, ale pomaleji, než obsah chlorofylu *a+b*.



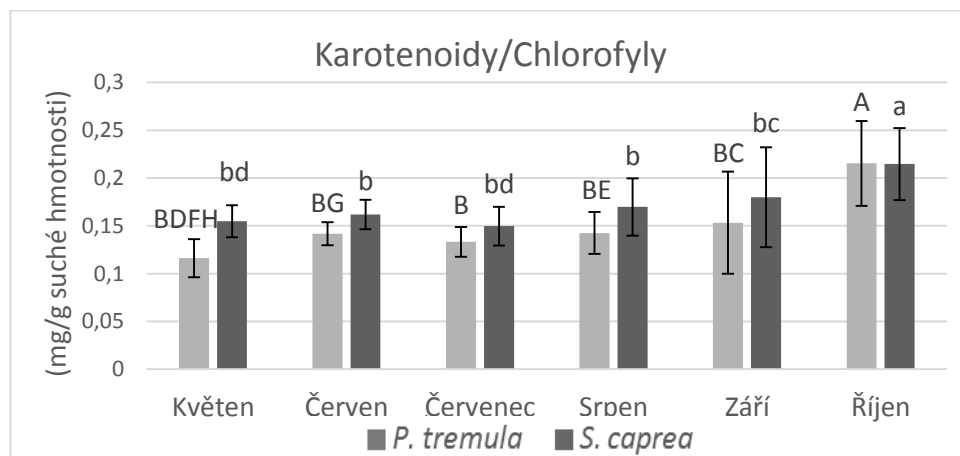
Graf 4-28 Obsah chlorofylů *a+b* v průběhu sezóny u vrby jívy a topolu osiky. Sloupce vyjadřují průměrné množství chlorofylu *a+b* v mg/g sušiny listu v závislosti na sezóně. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.



Graf 4-29 Poměr chlorofylu *a/b* v průběhu sezóny u vrby jívy topolu osiky. Sloupce vyjadřují průměrné množství chlorofylu *a/b* v mg/g sušiny listu v závislosti na sezóně. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.



Graf 4-30 Obsah karotenoidů v průběhu sezóny u vrby jívy a topolu osiky. Sloupce vyjadřují průměrné množství karotenoidů v mg/g sušiny listu v závislosti na sezóně. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.



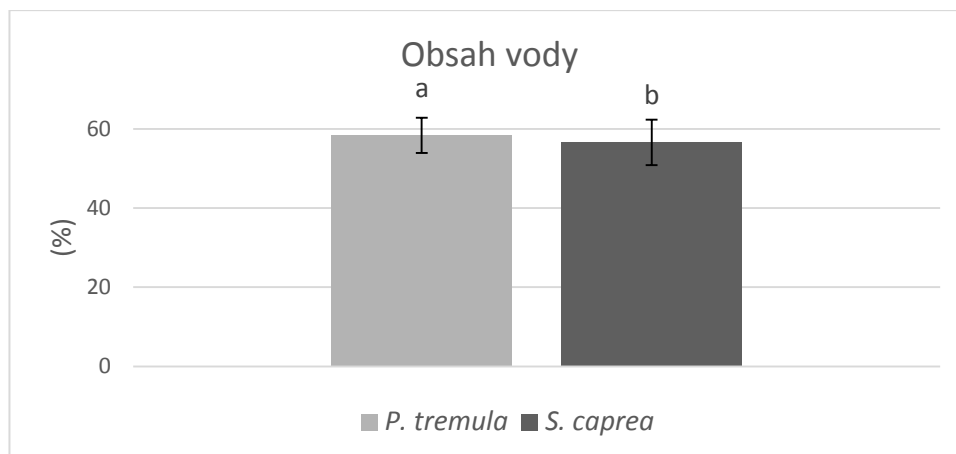
Graf 4-31 Poměr karotenoidů/chlorofylům v průběhu sezóny u vrby jívy a topolu osiky. Sloupce vyjadřují poměr karotenoidů/chlorofylům v mg/g sušiny listu v závislosti na sezóně. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA

4.4.2. Obsah vody

V závěru podkapitoly o biofyzikálních parametrech listu se dostávám k obsahu vody, rozdíl mezi topolem osikou a vrbou jívou a dynamiku obsahu vody v průběhu sezóny.

4.4.2.1. Rozdíl v obsahu vody mezi druhy

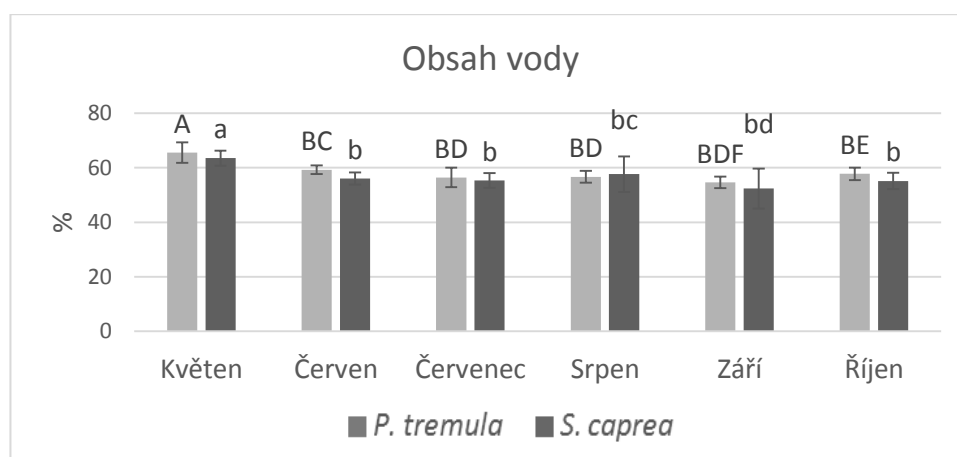
Z grafu 4-32 je zřejmé, že v obsahu vody je mezi druhy signifikantní rozdíl, osika má signifikantně vyšší obsah vody, než jíva.



4-32 Obsah vody topolu osiky a vrby jívy. Sloupce vyjadřují obsah vody v %. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.

4.4.2.2 Rozdíl v obsahu vody v průběhu sezóny

V průběhu sezóny byl u osiky převážně vyšší obsah vody než u jívy (Graf 4-33). Signifikantně největší obsah vody byl u jívy prokázán v měsíci květnu, který se lišil od zbytku sezóny. Dále v měsíci srpnu, měla jíva signifikantně vyšší obsah vody než v září. U osiky byl nalezen signifikantně nejvyšší obsah vody také v květnu. V červnu byl obsah vody u osiky signifikantně nižší než v květnu, ale signifikantně vyšší než v červenci, srpnu a září. V září byl obsah vody u osiky signifikantně nejnižší. Na pokles obsahu vody v průběhu sezóny může mít vliv stejný efekt, jako na pokles obsahu chlorofylů, což je zvyšování obsahu suché hmotnosti v listu.



Graf 4-33 Relativní obsah vody v průběhu sezóny u vrby jívy a topolu osiky. Sloupce vyjadřují relativní obsah vody v % u vrby jívy a topolu osiky, v závislosti na sezóně. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA

4.5. Odrazivost

Tato podkapitola je zaměřena na odrazivost listů druhu topolu osiky a vrby jívy. Nejprve je zde ukázka reflektančních křivek vegetace, kde je možné vidět rozdíl mezi tím, jak je záření v rozmezí vlnových délek 350-2500 nm odraženo od povrchu jednoho listu a poté od povrchu vrstvy na sobě naskládaných pěti listů u jívy i osiky. Rozdíl v odrazivosti mezi druhy i v průběhu sezóny se nadále promítá v celé této kapitole. Na základě studií, uvedených v kapitole Úvod, jsem si zvolila vegetační indexy korelující s obsahem fotosyntetických pigmentů a s obsahem vody a také vybrané rozmezí vlnových délek, které souvisí s anatomicou strukturou listu. Na vegetačních indexech je doložen rozdíl v odrazivosti mezi topolem osikou a vrbou jívou a rozdíl v odrazivosti vrchní strany jednoho listu a vrstvy pěti listů. Následně je ukázána dynamika vegetačních indexů a vybraných intervalů vlnových délek v průběhu vegetační sezóny u osiky i jívy. Rozdíly v odrazivosti jsou uváděny pouze na horní straně jednoho listu a horní vrstvě listů pro jejich přímý vztah k měření odrazivosti v rámci dálkového průzkumu, kde není přikládána taková váha odrazivosti ze spodní strany listu.

4.5.1. Reflektanční křivky

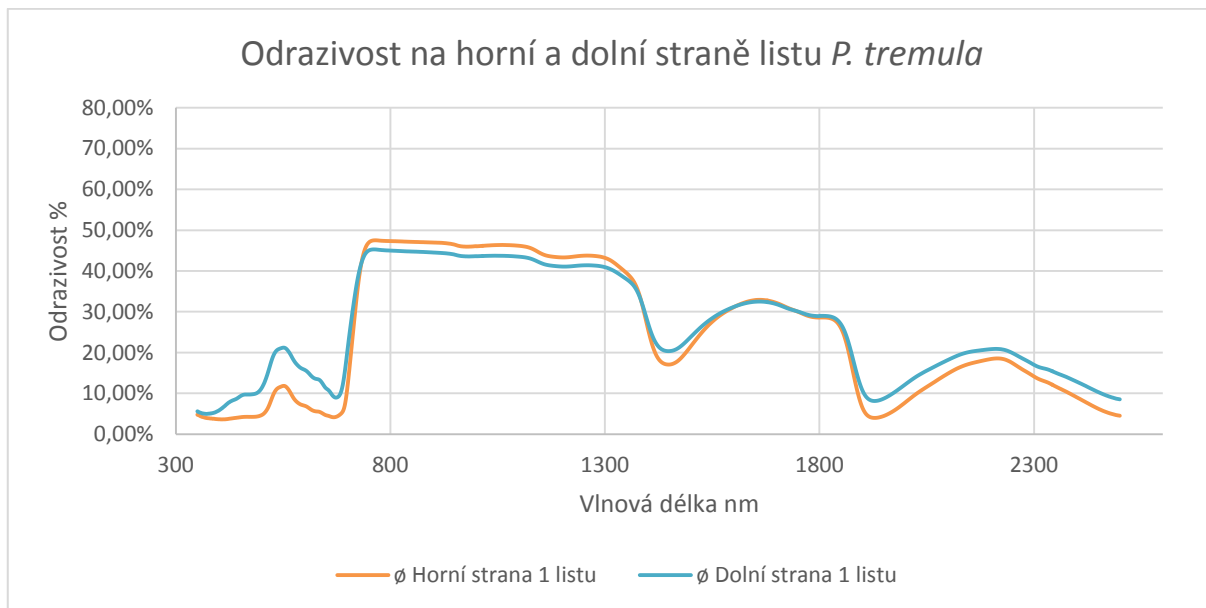
Reflektanční křivka vegetace je parametr, který je využíván pro objasnění fyziologického stavu porostu a udává se v % odrazivosti, kdy se 100 % považuje za referenční hodnotu. V následujícím grafu 4-34 pro topol osiku a 4-35 pro vrbu jívu, je vidět rozdíl v odrazivosti horní a dolní strany jednoho listu. Záření, které dopadá na horní vrstvu listu, prochází svrchní pokožkou, se setká s palisádovým parenchymem, který má vyšší obsah chlorofylu než houbovitý a záření je v oblasti 400-700 nm chlorofylem pohlcováno více než na dolní straně listu v tomto rozmezí vlnových délek. V oblasti 750-1300 nm, která zodpovídá za odrazivost od struktury listu, je záření na dolní straně listu odráženo vícenásobně v mezibuněčných prostorech a následně pohlceno, a celková odrazivost se jeví nižší než na horní straně listu, kde je struktura palisádového parenchymu více kompaktní.

Proto, že listy přijímají záření hlavně na adaxiální straně listu, je v grafu 4-36 pro osiku, a 4-37 pro jívu znázorněn rozdíl v odrazivosti na horní straně jednoho listu a horní straně vrstvy pěti listů. Odrazivost naměřená na horní straně vrstvy pěti listů simuluje odrazivost v koruně stromů, kde se záření, které jedním listem projde, může opětovně odrážet od jiných listů nebo jimi být absorbováno. Zejména v blízké infračervené oblasti spektra (750-

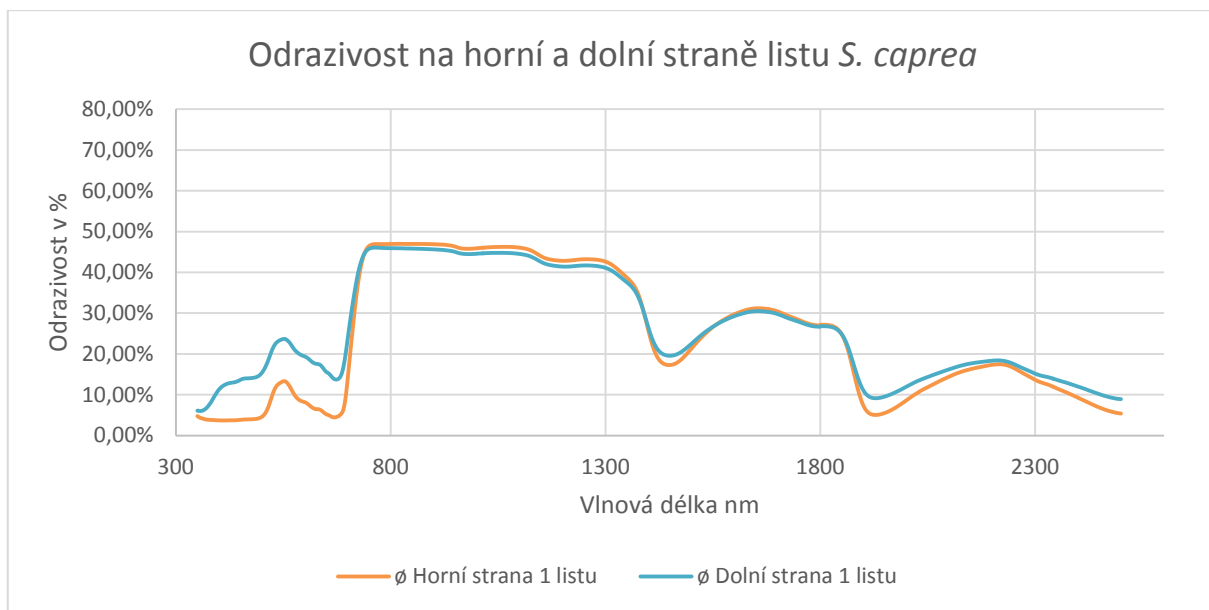
1300 nm), kde odrazivost koreluje s obsahem vody a buněčnou strukturou listu je tento rozdíl u vrstvy listu až o 20 % vyšší než u jednoho listu.

Na dalších grafech, 4-38 a 4-39 je znázorněna odrazivost od horní vrstvy pěti listů v průběhu sezóny. Můžeme vidět, že v oblasti 400-700 nm bylo záření na počátku sezóny chlorofyly pohlcováno více než na konci sezóny, což je pro topol vidět na grafu 4-38 a pro jívku na grafu 4-39. U obou druhů je ve viditelné oblasti (VIS 390-790 nm) v květnu odrazivost nižší než v dalších odběrech. Odrazivost v této oblasti souvisí s obsahem pigmentů, ale dle biochemické analýzy (Graf 4-28) můžeme usuzovat, že v květnu, kdy proběhl první odběr, byl vývoj chlorofylů dokončen.

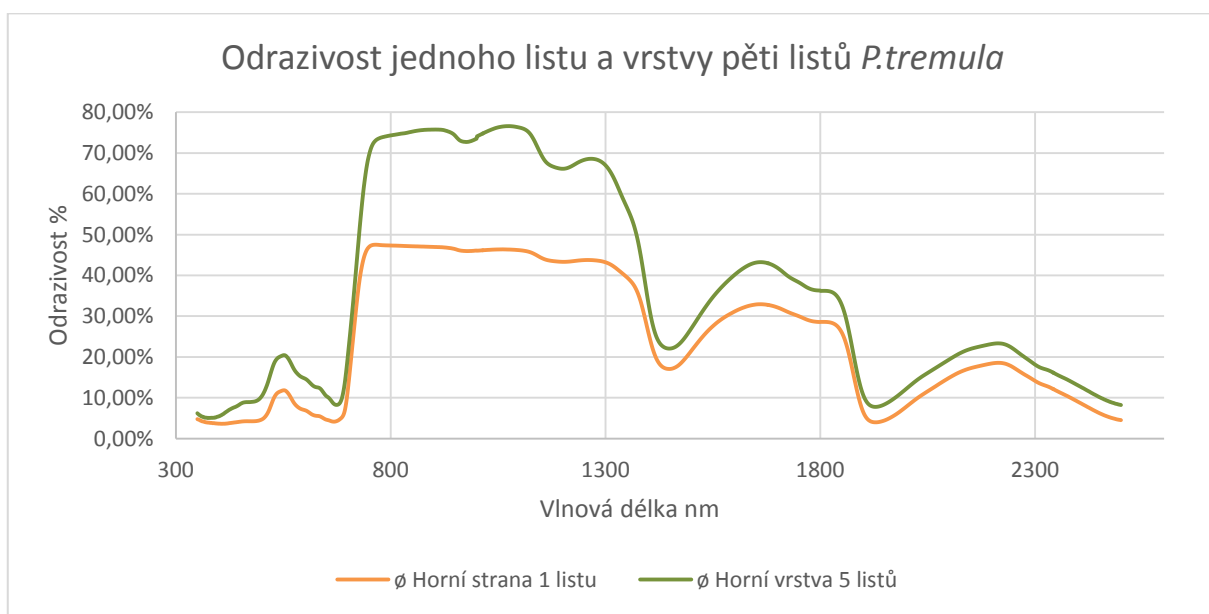
Variabilita v odrazivosti se v průběhu sezóny nejvíce projevila v IR (700-1300 nm), která je ovlivněna buněčnou strukturou. V grafech 4-38 a 4-39 je vidět, že u obou druhů nejvyšší odrazivost byla v květnu a následující měsíce kontinuálně klesala. Změny v anatomické struktuře listu jsou vidět i na základě měření celkové tloušťky listu (Graf 4-18). Ačkoli jsem provedla měření anatomické struktury jen ve třech měsících, červenci, srpnu, a září u vrby jívky je na grafu 4-22 od července do září vidět signifikantní nárůst palisádového parenchymu. U osiky i jívky je vidět, že v průběhu sezóny, je postupný rostoucí trend tloušťky palisádového parenchymu (Graf 4-20) i klesající odrazivost v IR (graf 4-38 a 4-39).



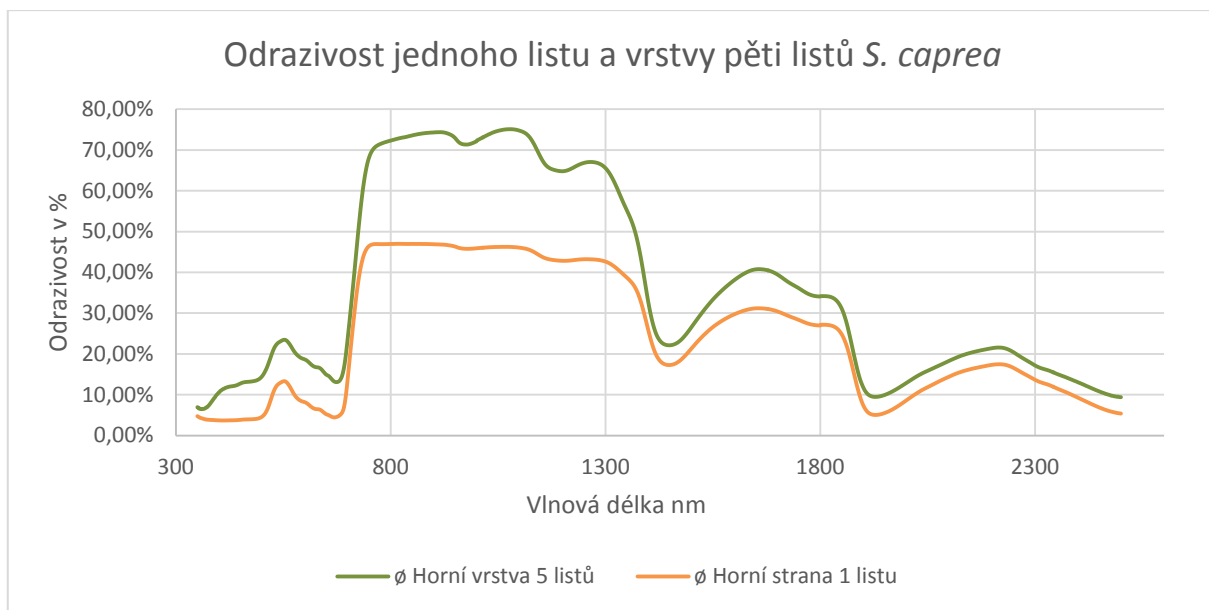
Graf 4-34 Reflektanční křivka topolu osiky znázorňující rozdíl v odrazivosti horní strany a dolní strany jednoho listu. Odrazivost je zaznamenána v % a na ose x jsou vyneseny hodnoty vlnových délek v nanometrech.



Graf 4-35 Reflektanční křivka vrby jívy znázorňující rozdíl v odrazivosti horní strany a dolní strany jednoho listu. Odrzivost je zaznamenána v % a na ose x jsou vyneseny hodnoty vlnových délek v nanometrech.



Graf 4-36 Reflektanční křivka topolu osiky znázorňující rozdíl v odrazivosti horní strany jednoho listu a horní strany vrstvy pěti listů. Odrzivost je zaznamenána v % a na ose x jsou vyneseny hodnoty vlnových délek v nanometrech.



Graf 4-37 Reflektanční křivka vrby jívy znázorňující rozdíl v odrazivosti horní strany jednoho listu a horní strany vrstvy pěti listů. Odrazivost je zaznamenána v % a na ose x jsou vyneseny hodnoty vlnových délek v nanometrech.



Graf 4-38 Reflektanční křivka topolu osiky, změny v odrazivosti vrchní strany vrstvy 5 listů v průběhu sezóny. Odrazivost je zaznamenána v % a na ose x jsou jednotlivé vlnové délky.



Graf 4-39 Reflektanční křivka vrby jívy, změny v odrazivosti vrchní strany vrstvy 5 listů v průběhu sezóny. Odraživost je zaznamenána v % a na ose x jsou jednotlivé vlnové délky.

4.5.2. Rozdíl ve vybraných indexech u jívy a osíky

Ke své práci jsem si vybrala 6 vegetačních indexů, z toho 3 korelující s obsahem fotosyntetických pigmentů NDVI, PRI a CI. Jedním z nejpoužívanějších vegetačních indexů je NDVI (Normalized difference vegetation index), tento index dává do vztahu červenou viditelnou oblast spektra a blízkou infračervenou část spektra. Odraživost v tomto indexu vypovídá o přítomnosti vegetace, druhovém složení vegetace a obsahu chlorofylů. (Chlorophyll index) CI vypovídá o obsahu chlorofylu *a* v listech a PRI o poměru chlorofylů/karotenoidů v listech (Letts et al., 2008).

Další tři vegetační indexy korelují s obsahem vody NDWI (normalized difference water index), který vypovídá o obsahu vody na základě odrazivosti v oblasti 860-1240 nm, WI (Water index) korelující s obsahem vody v oblasti 900 a 970 nm a nakonec MDWI (Maximum difference water index) vypovídající o rozdílné odrazivosti v oblasti, kde odrazivost odpovídá obsahu vody na úrovni koruny a jednoho listu.

Nakonec jsou zde tři intervaly tři vlnových délek 760-880 nm, 1010-1120 nm a 1250-1270 nm, odpovídající odrazivosti od buněčné struktury, ze které byly záměrně vyjmuty oblasti snížené odrazivosti odpovídající záření, které je pohlcováno vodou.

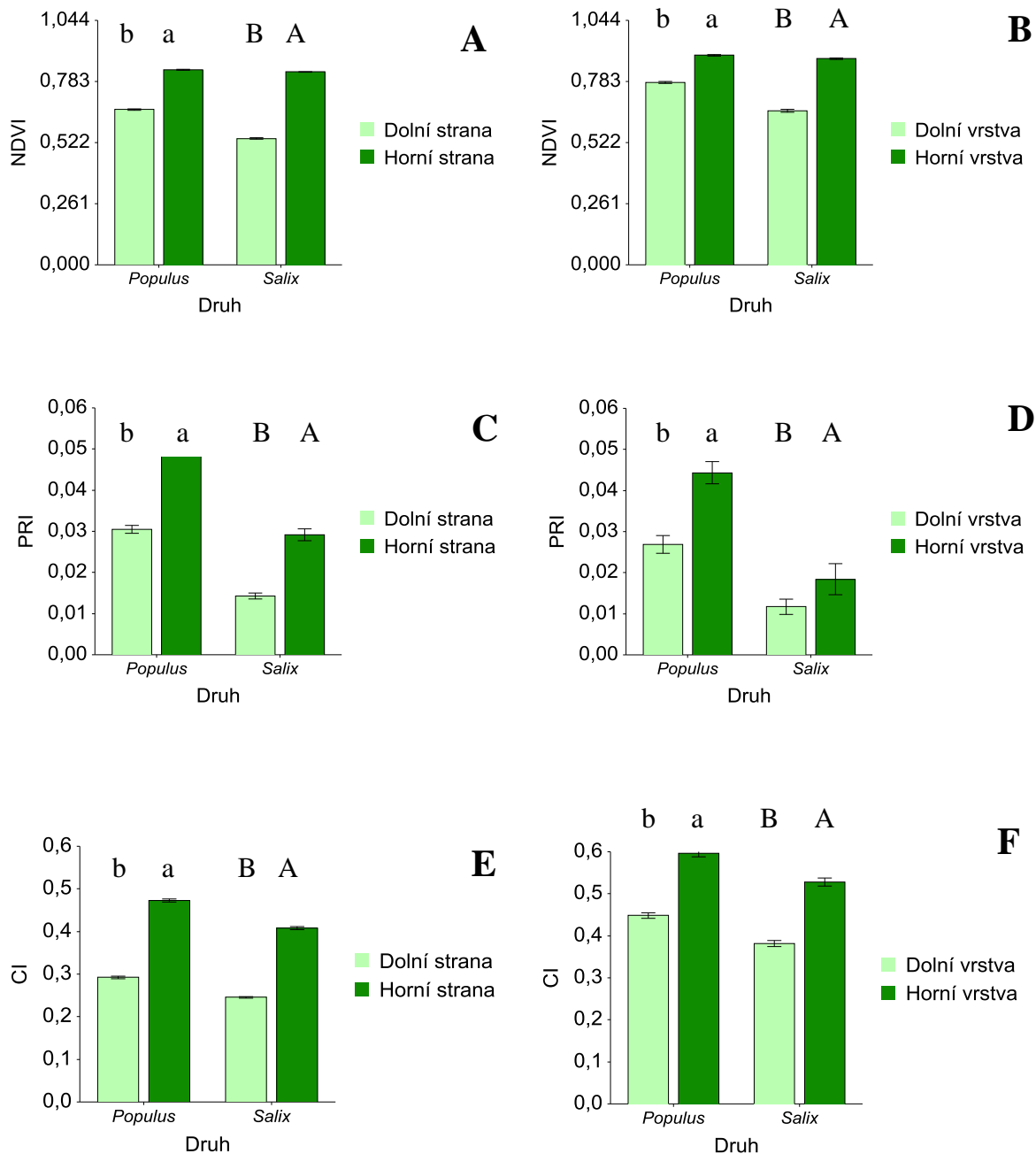
Pro každý vegetační index byly vytvořeny dva grafy, v levém sloupci jsou rozdíly mezi druhem topol osika a vrba jíva měřené na horní a dolní straně jednoho listu a v pravé části jsou rozdíly mezi oběma druhy měřeny z horní strany vrstvy pěti listů a z dolní strany vrstvy pěti listů.

Ze souboru grafů 4-40 (A-F), které jsou zaměřeny na vegetační indexy odpovídající obsahu pigmentů, je patrné, že i u topolu i u vrby se odrazivost mezi horní a spodní stranou listu významně liší, stejně tak se významně liší mezi horní a spodní stranou pěti listů.

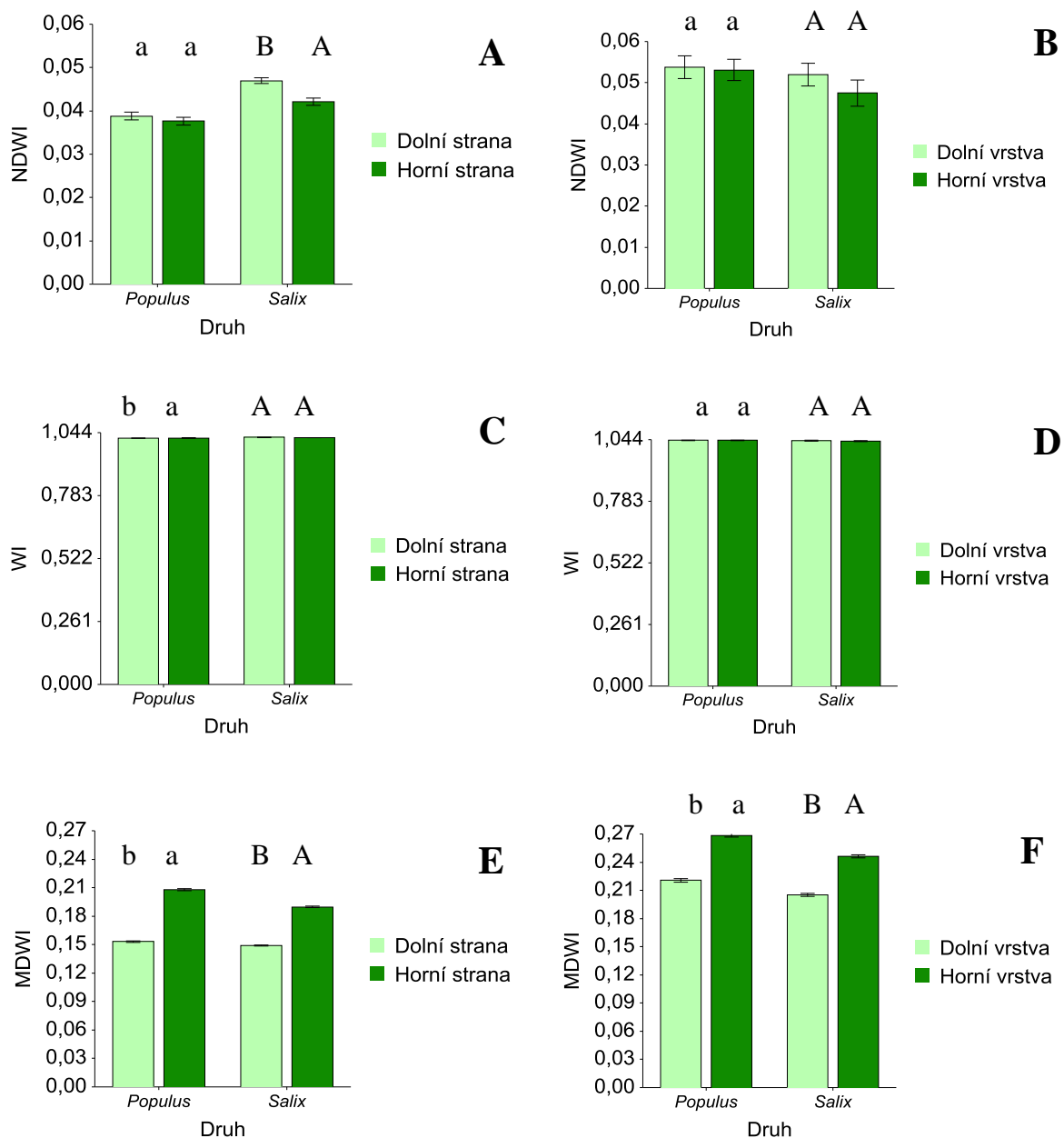
V souboru grafů 4-41 (A-F) zaměřeném na indexy vypovídající o obsahu vody bylo zjištěno, že odrazivost mezi vrchní a spodní stranou listu se u indexu NDWI významně liší u vrby jívy, u indexu WI se vrchní a spodní strana listu významně liší u topolu osiky. A u MDWI byl nalezen významný rozdíl v odrazivosti mezi spodní a svrchní stranou listu u obou pozorovaných druhů.

V případě rozdílu mezi horní a dolní vrstvou listu byl nalezen významný rozdíl pouze v indexu MDWI u vrby jívy i u topolu osiky. V ostatních indexech WI i NDWI nebyl nalezen významný rozdíl v odrazivosti horní a dolní vrstvy listů ani u jednoho druhu.

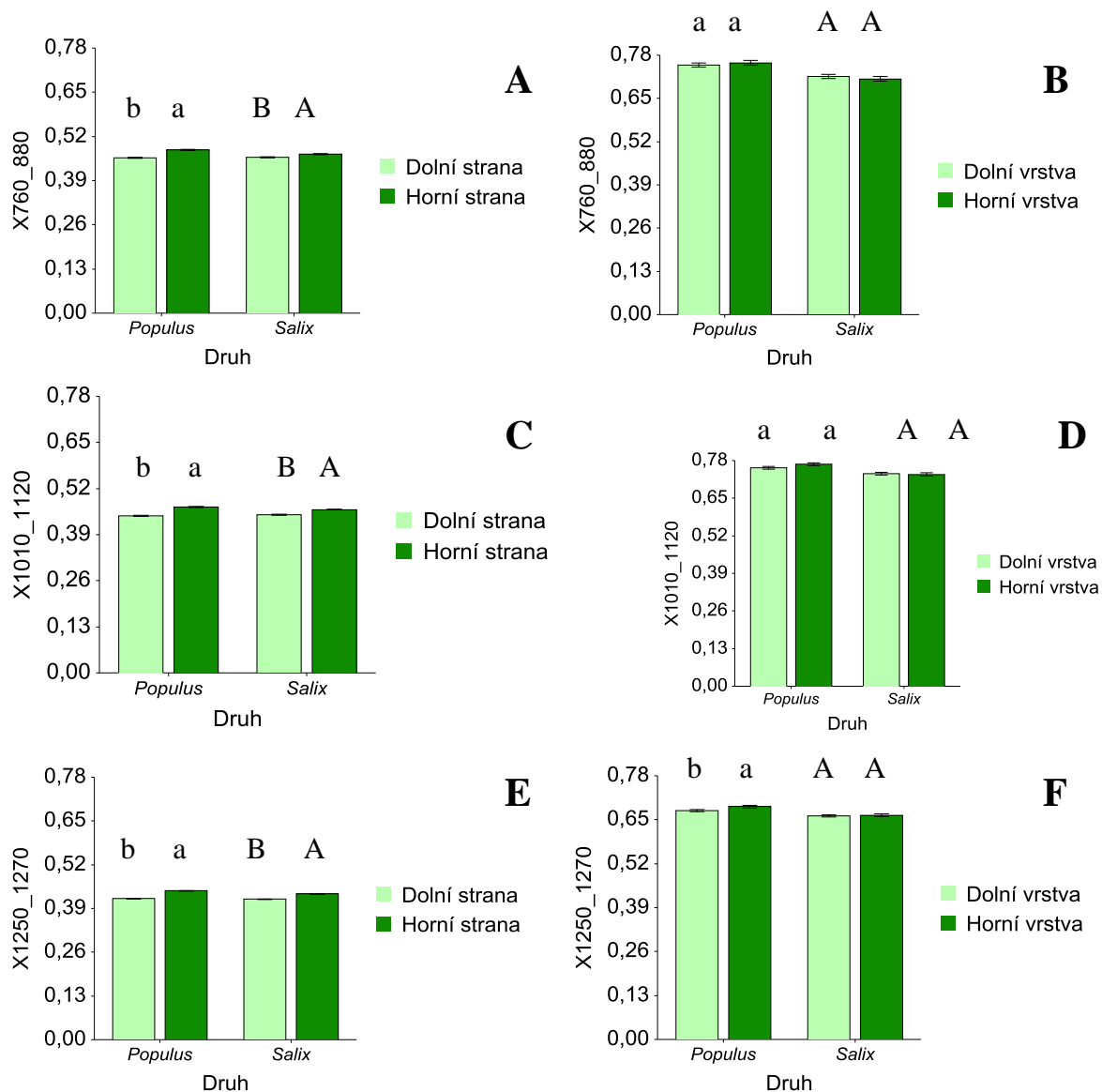
Soubor grafů 4-42 (A-F) je věnovaný rozdílům průměrných odrazivostí jednoho listu a vrstvy listů v rozmezí vybraných vlnových délek 760-880 nm, 1010-1120 nm a 1250-1270 nm u osiky a jívy. V případě intervalů odrazivosti 760-880 nm a 1010-1120 nm u osiky i u jívy nebyl nalezen významný rozdíl mezi vrstvami listů, ale byl nalezen významný rozdíl mezi horní a dolní stranou jednoho listu u osiky i jívy. V rozmezí 1250-1270 nm odrazivosti byl nalezen významný rozdíl u osiky nalezen na horní a dolní straně listu i horní a dolní vrstvě listů. U vrby jívy byl v intervalu 1250-1270 nm nalezen významný rozdíl pouze mezi stranou listu.



Soubor grafů 4-40 (graf A-F) Hodnoty indexů (AB) NDVI, (CD) PRI, (EF) CI v závislosti na straně a vrstvě listu topolu osiky a vrby jívy. V levé části jsou rozdíly v odrazivosti měřené na horní straně a dolní straně jednoho listu a napravo jsou hodnoty odrazivosti měřené na horní a dolní straně vrstvy pěti listů. Sloupce vyjadřují hodnoty odrazivosti v sledovaném indexu. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.



Graf 4-41 (graf A-F) Hodnoty indexů (AB) NDWI, (CD) WI, (EF) MDWI v závislosti na straně a vrstvě listu topolu osiky a vrby jívy. V levé části jsou rozdíly v odrazivosti měřené na horní straně a dolní straně jednoho listu a napravo jsou hodnoty odrazivosti měřené na horní a dolní straně vrstvy pěti listů. Sloupce vyjadřují hodnoty odrazivosti v sledovaném indexu. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.



Graf 4-42 (graf A-F) Hodnoty indexů (AB) interval 760-880 nm, (CD) interval 1010-1120 nm a (EF) interval 1250-1270 nm v závislosti na straně a vrstvě listu topolu osiky a vrby jívy. V levé části jsou rozdíly v odrazivosti měřené na horní straně a dolní straně jednoho listu a napravo jsou hodnoty odrazivosti měřené na horní a dolní straně vrstvy pěti listů. Sloupce vyjadřují hodnoty odrazivosti v sledovaném indexu. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Rozdílná písmena nad sloupci značí statisticky významný rozdíl, který byl prokázán na hladině $p=0,05$, one way ANOVA.

4.5.3. Rozdíl odrazivosti v průběhu sezóny ve vybraných indexech u jívy a osiky

Jako parametr pro porovnání odrazivosti byly vybrány vegetační indexy korelující s obsahem fotosyntetických pigmentů v listu a s obsahem vody a dále rozmezí vybraných vlnových délek. Grafy byly vytvořeny pouze pro odrazivost na horní straně jednoho listu a dále pro odrazivost měřenou na horní vrstvě pěti listů. Pro každý druh zvlášť byl vytvořen soubor grafů (4-43 a 4-44), kde jsou jednotlivé grafy odpovídající konkrétnímu vegetačnímu indexu označeny písmeny A-I. Pro zřehlednění zde nejsou signifikantní rozdíly značeny

písmeny nad jednotlivými grafy, ale pod každým grafem je vytvořena tabulka s výstupem z Tukey-Kramerova testu, kde je vyjádřeno, jak se hodnoty konkrétního měsíce signifikantně lišily od ostatních měsíců.

4.5.3.1. Topol osika:

V souboru grafů 4-43, v indexu NDVI z horní strany listu byly nalezeny signifikantně nejnižší hodnoty v říjnu. V případě vrstvy pěti listů, jsou hodnoty v říjnu signifikantně nejnižší, oproti ostatním měsícům. Hodnoty NDVI u osiky, jsou v září signifikantně nižší, než hodnoty v květnu, červnu a červenci. Hodnoty NDVI jsou u osiky v měsíci srpnu signifikantně nižší než hodnoty v květnu. Výsledky NDVI odpovídají u osiky trendu ke snižování obsahu chlorofylu v průběhu sezóny (viz biochemická kapitola).

V indexu PRI u osiky, na horní straně listu, můžeme sledovat, oproti zbytku sezóny, signifikantně nejnižší hodnoty v říjnu. V září jsou hodnoty PRI u osiky signifikantně nižší než v květnu, červnu a v červenci. U osiky jsou v srpnu hodnoty PRI signifikantně nižší než v květnu a v červnu. V případě vrstvy listů byly prokázány signifikantní rozdíly v PRI u osiky pouze v říjnu, kdy byly hodnoty oproti ostatním měsícům nejnižší.

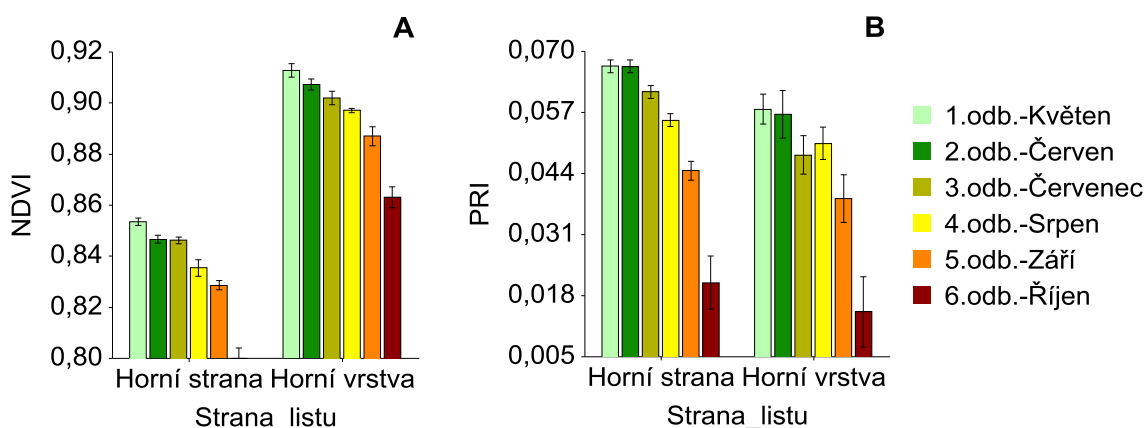
U indexu CI u horní strany listu bylo zjištěno, že signifikantně nejnižší hodnoty u osiky jsou v říjnu, v září jsou hodnoty signifikantně nižší než červen a červenec. Hodnoty CI, jsou v srpnu u osiky signifikantně vyšší než v květnu. V červnu a v červenci byly nalezeny signifikantně nejvyšší hodnoty u osiky CI. V případě horní vrstvy listů, byla nalezena signifikantně nejnižší hodnota CI u osiky v říjnu.

V případě indexu NDWI byly u osiky na horní straně i vrstvě listů nalezeny signifikantně nejnižší hodnoty v měsíci říjnu oproti ostatním měsícům.

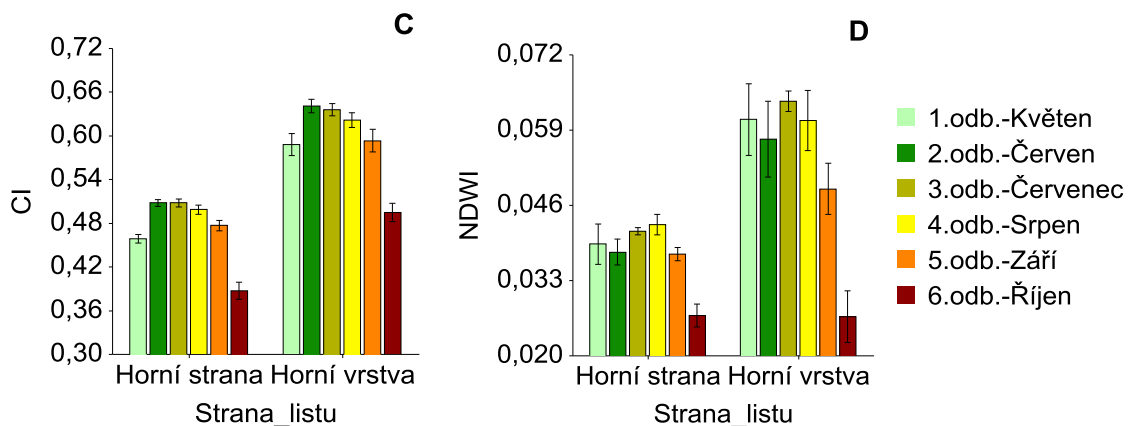
V případě horní strany listu u indexu WI byly u osiky nalezeny signifikantně nejnižší hodnoty v říjnu, v září byly hodnoty signifikantně nižší než v květnu a v červenci. V srpnu byly hodnoty WI u osiky signifikantně nižší než hodnoty v květnu. V případě horní vrstvy listů byly u osiky nalezeny signifikantně nejnižší hodnoty WI v říjnu oproti ostatním měsícům. V září byly u osiky nalezeny signifikantně nejnižší hodnoty WI oproti všem měsícům, s výjimkou října.

U osiky v indexu MDWI na horní straně listu, byly nalezeny signifikantně nejnižší hodnoty v červenci, které byly signifikantně nižší než v květnu, srpnu a říjnu. A v případě horní vrstvy listů osiky byly nejnižší hodnoty MDWI v měsíci září, které se signifikantně lišily od hodnot v květnu.

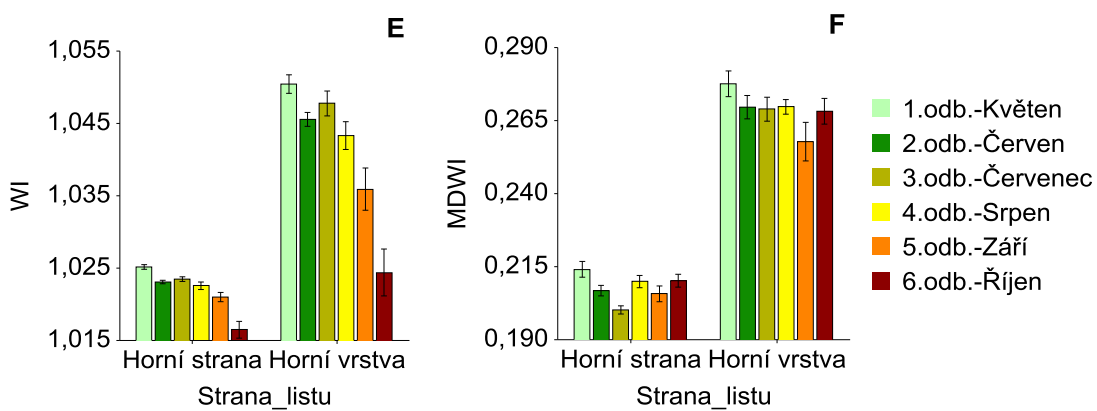
U osiky u vybraných vlnových délek 760-880 nm měřených na horní straně listu byly signifikantně nejvyšší hodnoty v červenci oproti ostatním měsícům, stejně tak, tomu bylo v případě horní vrstvy listů. V případě vlnových délek 1010-1120 nm byly na horní straně listu u osiky naměřeny signifikantně nejvyšší hodnoty v červenci, které byly signifikantně vyšší než hodnoty v srpnu. Na horní vrstvě listů byly u osiky hodnoty v intervalu 1010-1120 nm signifikantně nejvyšší v červenci, oproti ostatním měsícům. U osiky ve vlnových délkách 1250-1270 nm v případě horní strany i vrstvy listů jsou signifikantně nejvyšší hodnoty v červenci, oproti ostatním měsícům.



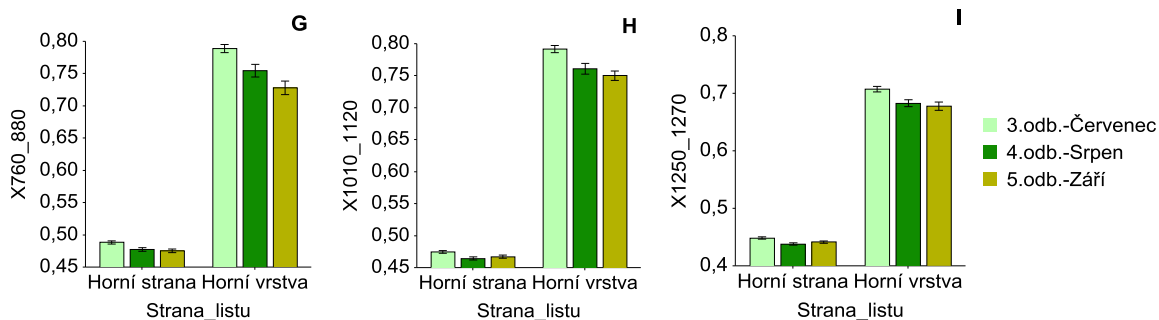
A: NDVI		B: PRI	
horní strana 1 listu	Horní vrstva 5 listů	horní strana 1 listu	Horní vrstva 5 listů
1-6	1-456	1-456	1-6
2-6	2-56	2-456	2-6
3-6	3-56	3-56	3-6
4-6	4-16	4-126	4-6
5-6	5-1236	5-1236	5-6
6-12345	6-12345	6-12345	6-12345



C: CI		D: NDWI	
horní strana 1 listu	horní vrstva 5 listů	horní strana 1 listu	horní vrstva 5 listů
1-2346	1-26	1-6	1-6
2-156	2-16	2-6	2-6
3-156	3-6	3-6	3-6
4-16	4-6	4-6	4-6
5-236	5-6	5-6	5-6
6-12345	6-12345	6-12345	6-12345



E: WI		F: MDWI	
horní strana 1 listu	horní vrstva 5 listů	horní strana 1 listu	horní vrstva 5 listů
1-456	1-56	1-3	1-5
2-6	2-56	2	2
3-56	3-56	3-146	3
4-16	4-6	4-3	4
5-136	5-1236	5	5-1
6-12345	6-12345	6-3	6



G: 760-880nm		H:1010-1120nm		I:1250-1270nm	
Horní strana	Horní vrstva	Horní strana	Horní vrstva	Horní strana	Horní vrstva
3-45	3-45	3-4	3-45	3-45	3-45
4-3	4-3	4-3	4-3	4-3	4-3
5-3	5-3	5	5-3	5-3	5-3

Soubor grafů 4-43 pro topol osiku: grafy jsou označeny písmeny A) pro NDVI; B) pro PRI; C) pro CI; D) pro NDWI; E) pro WI; F) pro MDWI; G) pro vybrané vlnové délky 760-880nm; H) pro 1010-1120nm a I) pro 1250-1270nm. Vyjadřují hodnoty v určitém indexu v závislosti na horní straně a vrstvě listů u topolu osiky. Jednotlivé sloupce odpovídají měsícům, ve kterých byl uskutečněn odběr, a vyjadřují hodnoty odrazivosti v sledovaném indexu. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Statisticky významné rozdíly mezi jednotlivými měsíci, jsou zaznamenány v tabulce pod grafy. Levý sloupec tabulky odpovídá rozdílům, které byly v jednotlivých měsících naměřeny na vrchní straně jednoho listu, pravý sloupec odpovídá hodnotám naměřeným z vrchní strany vrstvy pěti listů. Signifikantní rozdíly byly prokázány na hladině $p=0,05$, v testu Tukey-Kramer v rámci one way ANOVA.

4.5.3.2. Vrba jíva:

V souboru grafů 4-44 u jívy na horní straně listu v indexu NDVI byly nalezeny signifikantně nejnižší hodnoty v měsíci říjnu oproti ostatním měsícům. V září byly u jívy nalezeny signifikantně nejnižší hodnoty NDVI oproti všem měsícům, s výjimkou srpna a října. V případě horní vrstvy listů byly u jívy signifikantně nejnižší hodnoty NDVI v říjnu oproti všem měsícům s výjimkou září.

U indexu PRI na horní straně listu byly u jívy nalezeny signifikantně nejnižší hodnoty v říjnu a signifikantně nejvyšší v květnu. V červnu byly hodnoty PRI u jívy signifikantně nižší než v červenci, kdy byly hodnoty signifikantně vyšší než v srpnu. V srpnu byly hodnoty PRI u jívy signifikantně vyšší než v září a v září byly signifikantně vyšší než v říjnu. V případě horní vrstvy listu jsou u jívy signifikantně nejnižší hodnoty PRI v říjnu a v září jsou hodnoty signifikantně nižší než v květnu.

V případě indexu CI jsou u jívy v říjnu hodnoty na vrchní straně listu signifikantně nejnižší, oproti ostatním měsícům. V září jsou hodnoty CI u jívy signifikantně nižší než

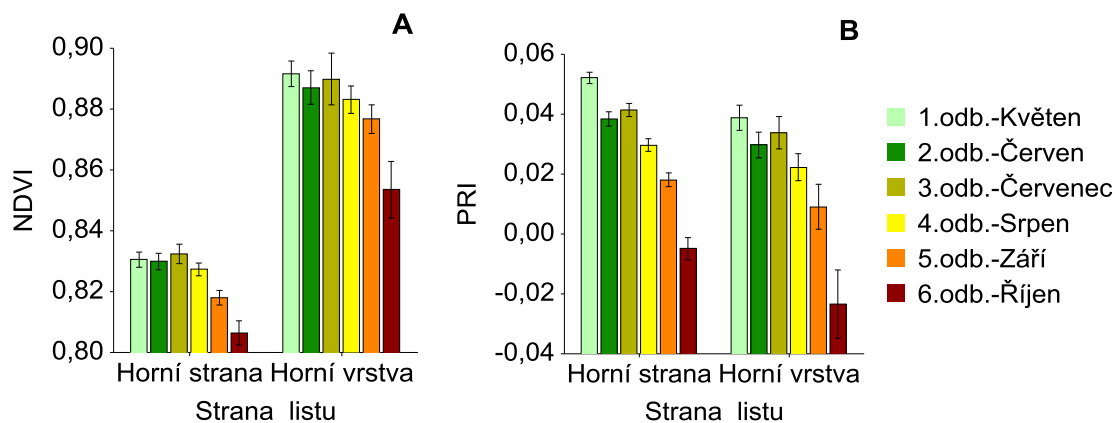
hodnoty červenci a v srpnu, ale vyšší než v říjnu. V případě horní vrstvy listů jsou hodnoty CI u jívy signifikantně nejnižší v říjnu, oproti ostatním měsícům.

Index NDVI: V květnu byly u jívy na horní straně listu naměřeny signifikantně vyšší hodnoty než ve všech měsících kromě června. V červnu byly u jívy naměřeny signifikantně vyšší hodnoty NDVI než v srpnu, září a říjnu. V případě horní vrstvy listů byly u jívy oproti ostatním měsícům signifikantně nejnižší hodnoty NDVI v říjnu. V září byly NDVI hodnoty jívy signifikantně vyšší než v květnu. V srpnu byly u jívy hodnoty NDVI signifikantně nižší, než v květnu a červnu.

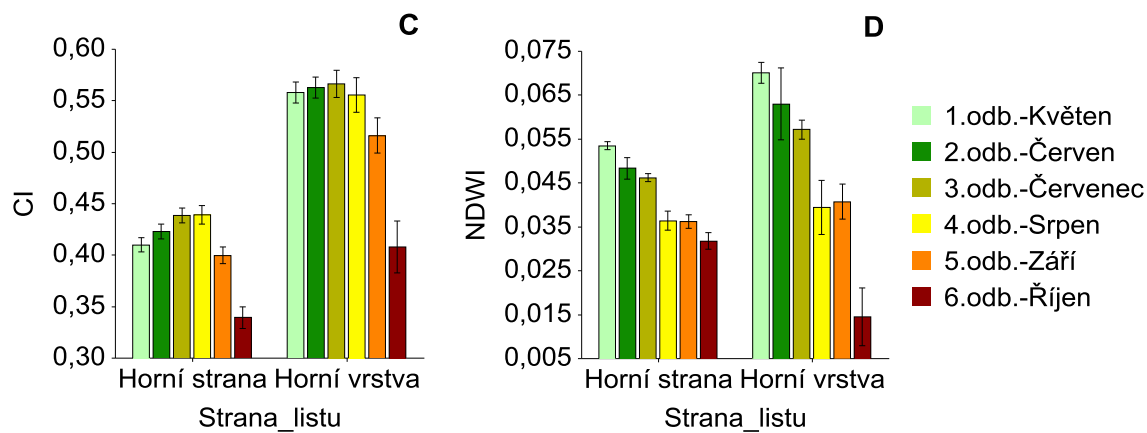
V případě indexu WI byly u jívy na horní straně listu naměřeny signifikantně nejvyšší hodnoty v květnu. V červnu a v červenci byly u jívy hodnoty WI signifikantně vyšší než v srpnu, září a říjnu. U horní vrstvy listů byly u jívy nalezeny signifikantně nejnižší hodnoty WI u v říjnu, oproti ostatním měsícům s výjimkou září. V září byly hodnoty WI u jívy signifikantně nižší než v květnu, červnu a červenci. V srpnu byly u jívy hodnoty WI signifikantně nižší než v květnu a červnu.

U MDWI indexu jívy byly na horní straně listu jívy naměřeny v červnu a v červenci nejnižší hodnoty, které byly signifikantně nižší než v říjnu a na horní vrstvě listů nebyl nalezen žádný signifikantní rozdíl v žádném měsíci.

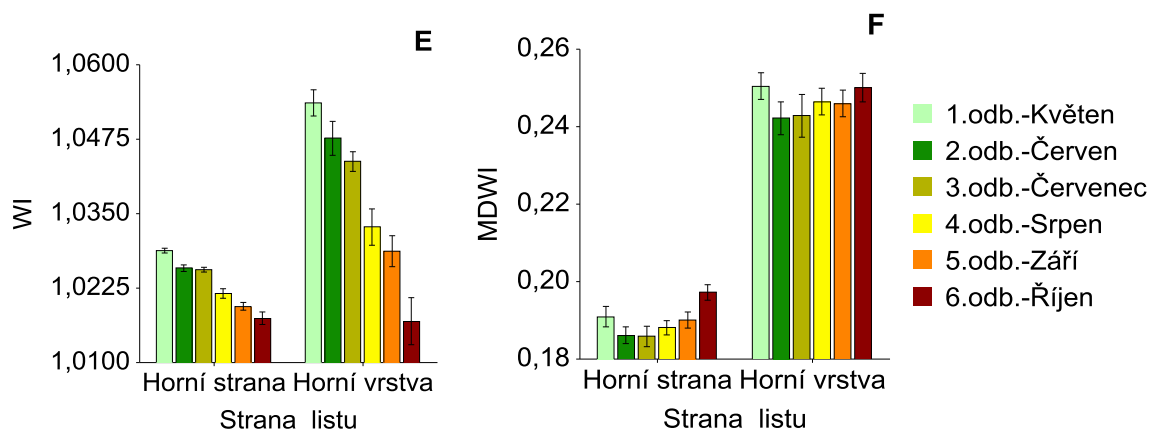
U všech vybraných vlnových délek 760-880 nm, 1010-1120 nm a 1250-1270 nm byly u jívy jak na horní straně listu, tak na horní vrstvě listů naměřeny signifikantně nejnižší hodnoty v červenci oproti ostatním měsícům.



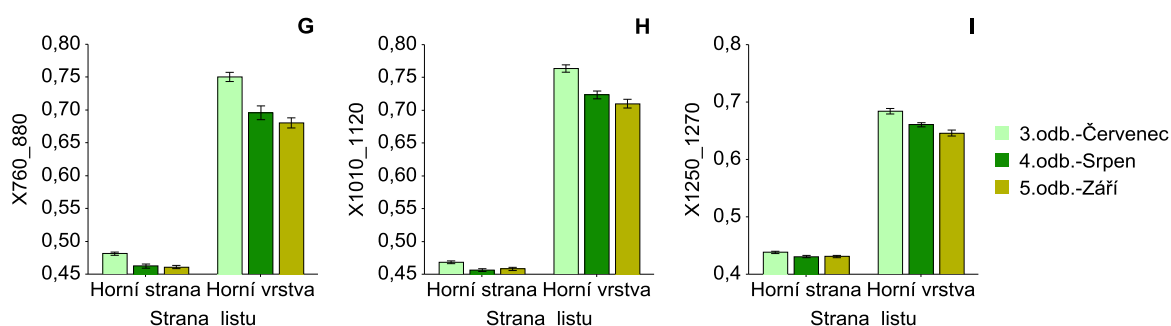
A: NDVI		B: PRI	
horní strana 1listu	Horní vrstva 5 listů	horní strana 1listu	Horní vrstva 5 listů
1-56	1-6	1-23456	1-56
2-56	2-6	2-156	2-6
3-56	3-6	3-1456	3-6
4-6	4-6	4-1356	4-6
5-1236	5-	5-12346	5-16
6-12345	6-1234	6-12345	6-12345



C: CI		D: NDWI	
horní strana 1 listu	horní vrstva 5 listů	horní strana 1 listu	horní vrstva 5 listů
1-6	1-6	1-3456	1-456
2-6	2-6	2-456	2-46
3-56	3-6	3-1456	3-6
4-56	4-6	4-123	4-126
5-346	5-6	5-123	5-16
6-12345	6-12345	6-123	6-12345



E: WI		F: MDWI	
horní strana 1 listu	horní vrstva 5 listů	horní strana 1 listu	horní vrstva 5 listů
1-23456	1-456	1	1
2-1456	2-456	2-6	2
3-1456	3-56	3-6	3
4-1236	4-126	4	4
5-123	5-123	5	5
6-1234	6-1234	6-23	6



G: 760-880nm		H:1010-1120nm		I:1250-1270nm	
Horní strana	Horní vrstva	Horní strana	Horní strana	Horní vrstva	Horní strana
3-45	3-45	3-45	3-45	3-45	3-45
4-3	4-3	4-3	4-3	4-3	4-3
5-3	5-3	5-3	5-3	5-3	5-3

Graf 4-44 pro vrbu jívu: grafy jsou označeny písmeny A) pro NDVI; B) pro PRI; C) pro CI; D) pro NDWI; E) pro WI; F) pro MDWI; G) pro vybrané vlnové délky 760-880nm; H) pro 1010-1120nm a I) pro 1250-1270nm. Vyjadřují hodnoty v určitém indexu v závislosti na horní straně a vrstvě listů u topolu osiky. Jednotlivé sloupce odpovídají měsícům, ve kterých byl uskutečněn odběr, a vyjadřují hodnoty odrazivosti v sledovaném indexu. Chybové úsečky vyjadřují směrodatnou odchylku. Statisticky významné rozdíly mezi jednotlivými měsíci, jsou zaznamenány v tabulce pod grafy. Levý sloupec tabulky odpovídá rozdílům, které byly v jednotlivých měsících naměřeny na vrchní straně jednoho listu, pravý sloupec odpovídá hodnotám naměřeným z vrchní strany vrstvy pěti listů. Signifikantní rozdíly byly prokázány na hladině $p=0,05$, v testu Tukey-Kramer v rámci one way ANOVA.

4.5.4. Vztah biochemických parametrů a odrazivosti

Pomocí lineárních regresí byly vytvořeny korelace mezi fotosyntetickými pigmenty, nebo jejich poměry a vybranými vegetačními indexy a vybranými vlnovými délkami. V tabulce 4-1 je vidět vztah korelací mezi obsahy fotosyntetických pigmentů a vegetačních indexů pro topol osiku a v tabulce 4-2 pro vrbu jívu.

Z tabulky 4-1 je patrné, že pro osiku se nejvýznamnější korelace objevují mezi obsahem chlorofylů *a* i *b* a mezi vegetačními indexy NDVI, PRI a CI. Korelace s nižší statistickou významností, byla u osiky nalezena mezi vegetačním indexem korelujícím s obsahem vody a také obsahem chlorofylů *a* i *b*. Podobné trendy můžeme vidět i u tabulky 4-2, kde jsou hodnoty pro vrbu jívu.

4.5.5. Vztah anatomických parametrů a odrazivosti

V následujících dvou tabulkách 4-3, 4-4 jsou vyjádřeny korelace vybraných vegetačních indexů s poměry parenchymů a tloušťkami pokožek, měřené z vrchní, nebo spodní strany listu a z horní a spodní strany vrstvy pěti listů. V tabulce 4-3 jsou znázorněny korelace mezi vegetačními indexy, vybranými intervaly vlnových délek a poměry parenchymů pro vrbu jívu, kde bylo nalezeno nejvíce vztahů mezi intervalem vlnových délek 760-880 nm a poměry parenchymů na vrchní i spodní straně listu. Dále byly nalezeny korelace vybraných vlnových délek (760-880 nm, 1010-1120 nm a 1250-1270 nm) a tloušťkou palisádového parenchymu na horní straně listu jívy a tloušťkou houbovitého parenchymu na spodní straně listu. A v oblasti indexu WI, který koreluje s obsahem vody, jsou signifikantní závislosti mezi celkovou tloušťkou listu jívy a tloušťkou palisádového parenchymu na horní i spodní straně listu.

V tabulce číslo 4-4, která udává korelace mezi vegetačními indexy, vybranými intervaly vlnových délek a poměry parenchymů pro topol osiku, můžeme vidět nejvíce korelací právě s indexem WI, který zde nejvíce koreluje s vrchní a spodní pokožkou, zejména na vrchní a spodní straně vrstvy pěti listů. Ve vybraných vlnových délkách 760-880 nm a 1010-1120 nm byla u osiky nalezena signifikantní závislost s houbovým parenchymem na horní i spodní straně listu a na spodní straně listu s celkovou tloušťkou listu.

Korelace vybraných indexů a biochemických parametrů			NDVI	PRI	CI	NDWI	WI	MDWI
			R (signifikance)/r ²					
<i>Populus tremula</i>	Horní strana	Obsah vody	0,1949 / 0,0380	0,3879*/0,1504	-0,0904 / 0,0082	0,0043 / 0,0000	0,2008 / 0,0403	0,1010 / 0,0102
		ChloA	0,5283*/0,2791	0,7417*/0,5501	0,6599*/0,4355	0,2122 / 0,0450	0,3470*/0,1204	-0,1851 / 0,0343
		ChloB	0,5182*/0,2685	0,7399*/0,5475	0,6317*/0,3990	0,2204 / 0,0486	0,3464*/0,1200	-0,1881 / 0,0354
		Total Chlo	0,5279*/0,2787	0,7444*/0,5542	0,6552*/0,4292	0,2153 / 0,0464	0,3484*/0,1213	-0,1867 / 0,0349
		Karot	0,1516 / 0,0230	0,3181*/0,1012	0,4916*/0,2416	0,0816 / 0,0067	-0,0548 / 0,0030	-0,3103 */0,0963
		ChloA/ChloB	-0,1715 / 0,0294	0,3134*/0,0982	-0,2076 / 0,0431	-0,1202 / 0,0144	-0,1162 / 0,0135	0,1477 / 0,0218
		Kar/Chlo	-0,6704*/0,4495	-0,8672*/0,7520	-0,7020*/0,4928	-0,2752*/0,0757	-0,5232*/0,2737	0,0763 / 0,0058
	Dolní strana	Obsah vody	0,2767*/0,0765	0,3266*/0,1066	-0,0202 / 0,0004	-0,0176 / 0,0003	0,1877 / 0,0352	0,4593*/0,2110
		ChloA	0,5847*/0,3419	0,7163*/0,5131	0,6607*/0,4365	0,1844 / 0,0340	0,3572*/0,1276	0,0766 / 0,0059
		ChloB	0,5614*/0,3152	0,6983*/0,4876	0,6299*/0,3968	0,1881 / 0,0354	0,3514*/0,1235	0,0934 / 0,0089
		Total Chlo	0,5810*/0,3376	0,7146*/0,5106	0,6553*/0,4294	0,1862 / 0,0347	0,3572*/0,1276	0,0817 / 0,0067
		Karot	0,2949*/0,0870	0,3280*/0,1076	0,4908*/0,2409	0,0970/0,0094	-0,0052/0,0000	-0,1238 / 0,0153
		ChloA/ChloB	-0,1768 / 0,0313	-0,2381 / 0,0567	-0,1953 / 0,0381	-0,0923 / 0,0085	-0,0978 / 0,0096	-0,0804 / 0,0065
		Kar/Chlo	-0,6519*/0,4249	-0,8472*/0,7177	-0,6805*/0,4630	-0,2416 / 0,0584	-0,5316*/0,2826	-0,1007 / 0,0101
	Horní vrstva	Obsah vody	0,3260*/0,1063	0,3285*/0,1079	-0,0385 / 0,0015	0,0937 / 0,0088	0,2715*/0,0737	0,3515*/0,1235
		ChloA	0,5857*/0,3430	0,6455*/0,4167	0,5936*/0,3523	0,3909*/0,1528	0,4441*/0,1972	0,1100/0,0121
		ChloB	0,5864*/0,3438	0,6361*/0,4046	0,5692*/0,3240	0,3986*/0,1589	0,4555*/0,2075	0,1692 / 0,0286
		Total Chlo	0,5884*/0,3462	0,6458*/0,4171	0,5896*/0,3476	0,3947*/0,1558	0,4491*/0,2017	0,1264 / 0,0160
		Karot	0,1810 / 0,0328	0,3031*/0,0918	0,4018*/0,1614	0,1938 / 0,0376	0,0482 / 0,0023	-0,0436 / 0,0019
		ChloA/ChloB	-0,2557*/0,0654	-0,2357 / 0,0564	-0,1934 / 0,0374	-0,2035 / 0,0414	-0,2096 / 0,0439	-0,2773*/0,0769
		Kar/Chlo	-0,7156*/0,5121	-0,7259*/0,5269	-0,6415*/0,4115	-0,4484*/0,2011	-0,5824*/0,3392	-0,1520 / 0,0231
	Dolní vrstva	Obsah vody	0,3206*/0,1028	0,2343 / 0,0549	0,1438 / 0,0207	-0,0415 / 0,0017	0,1994 / 0,0397	0,5343*/0,2855
		ChloA	0,5706*/0,3256	0,6292*/0,3959	0,6836*/0,4673	0,3263*/0,1065	0,4519*/0,2042	0,2942*/0,0866
		ChloB	0,5523*/0,3051	0,6014*/0,3617	0,6692*/0,4478	0,3333*/0,1111	0,4600*/0,2116	0,3384*/0,1145
Total Chlo		0,5682*/0,3228	0,6245*/0,3899	0,6827*/0,4661	0,3296*/0,0500	0,4561*/0,2080	0,3074*/0,0945	
Karot		0,2386 / 0,0569	0,2929*/0,0858	0,4229*/0,1789	0,1485 / 0,0221	0,0855 / 0,0073	0,0930 / 0,0087	
ChloA/ChloB		-0,1609 / 0,0259	-0,01397 / 0,0195	-0,2558*/0,0654	-0,1558 / 0,0243	-0,1924 / 0,0370	-0,3262*/0,1064	
Kar/Chlo		-0,6620*/0,4382	0,7509*/0,5639	-0,7528*/0,5667	-0,4284*/0,1836	-0,6120*/0,3745	-0,2938*/0,0863	

4-1 Korelační vztahy mezi vybranými vegetačními indexy a vybranými vlnovými délkami a obsahy fotosyntetických pigmentů u topolu osiky. Stupeň korelace vyjádřen R, přítomnost * u R vyjadřuje signifikantní závislost, výsledek lineární regrese je r² (koeficient determinace). Signifikantní rozdíly byly prokázány na hladině p=0,05

Korelace vybraných indexů a biochemických parametrů			760-880nm	1010-1120nm	1250-1270nm
			R (signifikance)/r ²		
<i>Populus tremula</i>	Horní strana	Obsah vody	-0,3776*/0,1425	-0,5274*/0,2781	-0,5032*/0,2533
		ChloA	0,0426 / 0,0018	-0,1039 / 0,0108	-0,0208 / 0,0004
		ChloB	0,0765 / 0,0059	-0,0948 / 0,0090	-0,0161/0,0003
		Total Chlo	0,0524 / 0,0027	-0,1020 / 0,0104	-0,0196 / 0,0004
		Karot	0,0160 / 0,0003	-0,1629/0,0265	-0,1128 / 0,0127
		ChloA/ChloB	-0,1633 / 0,0267	0,0288 / 0,0008	-0,0125 / 0,0002
		Kar/Chlo	-0,1006 / 0,0101	-0,0362 / 0,0013	-0,1424 / 0,0203
	Dolní strana	Obsah vody	-0,4646*/0,2158	-0,6048*/0,3658	-0,6118*/ 0,3743
		ChloA	-0,1091 /0,0119	-0,2578 /0,0664	-0,2040 /0,0416
		ChloB	-0,1042 /0,0108	-0,2796 /0,0782	-0,2339 /0,0547
		Total Chlo	-0,1083 /0,0117	-0,2654 /0,0704	-0,2136 /0,0456
		Karot	-0,1299 /0,0169	-0,2943 /0,0866	-0,2559 /0,0655
		ChloA/ChloB	0,0322 /0,0010	0,2308 /0,0533	0,2253 /0,0507
		Kar/Chlo	0,0025 /0,0000	0,0927 /0,0086	0,0343 /0,0012
	Horní vrstva	Obsah vody	-0,0497/0,0025	-0,1816/0,0330	-0,1627 /0,0265
		ChloA	0,3361/0,1129	0,2302/0,0530	0,2980 /0,0888
		ChloB	0,4144*/0,1717	0,2814 /0,0792	0,3317 /0,1100
		Total Chlo	0,3601 /0,1297	0,2460 /0,0605	0,3092 /0,0956
		Karot	0,3099/0,0961	0,1559 /0,0243	0,1694 /0,0287
		ChloA/ChloB	-0,4880*/0,2381	-0,3163 /0,1000	-0,3012 /0,0907
		Kar/Chlo	-0,2367 /0,0560	-0,2162 /0,0467	-0,3487 /0,1216
	Dolní vrstva	Obsah vody	-0,1287 /0,0166	-0,2826 /0,0799	-0,2797 /0,0782
		ChloA	0,2474 /0,0612	0,1159 /0,0134	0,1916 /0,0367
		ChloB	0,3327 /0,1107	0,1672 /0,0280	0,0481 /0,2193
Total Chlo		0,2729 /0,0745	0,1311 /0,0172	0,2005 /0,0402	
Karot		0,2223 /0,0494	0,0525 /0,0028	0,0724 /0,0052	
ChloA/ChloB		-0,4802*/0,2306	-0,2659 /0,0707	-0,2258 /0,0510	
Kar/Chlo		-0,2039 /0,0416	-0,1496 /0,0224	-0,2835 /0,0804	

4-2 Pokračování tabulky 4-1

Korelace vybraných indexů a biochemických parametrů			NDVI	PRI	CI	NDWI	WI	MDWI
			R (signifikance)/r ²					
<i>Salix caprea</i>	Horní strana	Obsah vody	0,1549 / 0,0240	0,4086* / 0,1670	0,0127 / 0,0002	0,2992* / 0,0895	0,4722* / 0,2230	-0,0679 / 0,0049
		ChloA	0,4795* / 0,2299	0,7679* / 0,5896	0,6295* / 0,3962	0,2488 / 0,0619	0,4008* / 0,1606	-0,0845 / 0,0071
		ChloB	0,4412* / 0,1947	0,7644* / 0,5843	0,6324* / 0,3999	0,2298 / 0,0528	0,3896* / 0,1518	-0,0887 / 0,0079
		Total Chlo	0,4721* / 0,2229	0,7712* / 0,5947	0,6337* / 0,4016	0,2452 / 0,0601	0,4001* / 0,1600	-0,0861 / 0,0074
		Karot	0,4941* / 0,2442	0,6825* / 0,4658	0,5944* / 0,3534	0,2589* / 0,0671	0,4047* / 0,1638	0,0713 / 0,0051
		ChloA/ChloB	-0,1673 / 0,0280	-0,3987* / 0,1590	-0,3967* / 0,1574	-0,0346 / 0,0012	-0,1562 / 0,0244	-0,0168 / 0,0003
		Kar/Chlo	-0,4500* / 0,2025	-0,6740* / 0,4543	-0,6111* / 0,3735	-0,1624 / 0,0264	-0,2785* / 0,0775	0,1952 / 0,0381
	Dolní strana	Obsah vody	0,2865* / 0,0821	0,4285* / 0,1836	0,0860 / 0,0074	0,0972 / 0,0094	0,4084* / 0,1668	0,1775 / 0,0315
		ChloA	0,6327* / 0,4004	0,7649* / 0,5851	0,6669* / 0,4448	0,1639 / 0,0269	0,4558* / 0,2078	0,1426 / 0,0203
		ChloB	0,6398* / 0,4094	0,7614* / 0,5851	0,6755* / 0,4564	0,1377 / 0,0190	0,4345* / 0,1888	0,1319 / 0,0174
		Total Chlo	0,6381* / 0,4072	0,7682* / 0,5901	0,6729* / 0,4528	0,1579 / 0,0249	0,4527* / 0,2050	0,1405 / 0,0198
		Karot	0,5172* / 0,2675	0,6866* / 0,4715	0,5935* / 0,3522	0,1727 / 0,0298	0,4680* / 0,2190	0,2145 / 0,0460
		ChloA/ChloB	-0,2819* / 0,0795	-0,4114* / 0,1693	-0,3978* / 0,1583	0,0223 / 0,0005	-0,1913 / 0,0366	-0,1130 / 0,0128
		Kar/Chlo	-0,5923* / 0,3508	-0,7093* / 0,5031	-0,6690* / 0,4476	-0,1332 / 0,0177	-0,3404* / 0,1154	-0,0183 / 0,0003
	Horní vrstva	Obsah vody	0,2312 / 0,0535	0,3393* / 0,1151	0,1812 / 0,0328	0,3420* / 0,1170	0,4506* / 0,2030	0,0250 / 0,0006
		ChloA	0,3962* / 0,1570	0,6270* / 0,3940	0,6534* / 0,4270	0,4316* / 0,1863	0,4916* / 0,2416	-0,0005 / 0,0000
		ChloB	0,3644* / 0,1328	0,6151* / 0,3783	0,6403* / 0,4100	0,4054* / 0,1643	0,4815* / 0,2319	-0,0187 / 0,0004
		Total Chlo	0,3900* / 0,1521	0,6278* / 0,3942	0,6534* / 0,4272	0,4271* / 0,1824	0,4916* / 0,2417	-0,0053 / 0,0000
		Karot	0,4001* / 0,1601	0,5736* / 0,3291	0,6383* / 0,4075	0,4093* / 0,1675	0,4769* / 0,2274	0,0799 / 0,0064
		ChloA/ChloB	-0,1544 / 0,0239	-0,2928* / 0,0857	-0,3291* / 0,1083	-0,1288 / 0,0166	-0,2131 / 0,0454	-0,0214 / 0,0005
		Kar/Chlo	-0,3438* / 0,1182	-0,5729* / 0,3282	-0,5621* / 0,3160	-0,3685* / 0,1358	-0,3837* / 0,1472	0,0394 / 0,0016
	Dolní vrstva	Obsah vody	0,3116 / 0,0971	0,3912* / 0,1531	0,2456 / 0,0603	0,3246 / 0,1054	0,4278* / 0,1830	0,2219 / 0,0493
		ChloA	0,5243* / 0,2748	0,6865* / 0,4731	0,6588* / 0,4341	0,4633* / 0,2146	0,5034* / 0,2534	0,2489 / 0,0619
		ChloB	0,5402* / 0,2919	0,6885* / 0,4741	0,6713* / 0,4507	0,4436* / 0,1968	0,4997* / 0,2497	0,2471 / 0,0611
Total Chlo		0,5314* / 0,2823	0,6908* / 0,4772	0,6658* / 0,4432	0,4606* / 0,2122	0,5052* / 0,2552	0,2498 / 0,0624	
Karot		0,4281* / 0,1833	0,6138* / 0,3767	0,5900* / 0,3481	0,4419* / 0,1953	0,4950* / 0,2450	0,1873 / 0,0351	
ChloA/ChloB		-0,3158* / 0,0997	-0,4028* / 0,1622	-0,4023* / 0,1618	-0,1617 / 0,0262	-0,2671* / 0,0713	-0,1430 / 0,0204	
Kar/Chlo		-0,5284* / 0,2792	-0,3619* / 0,3992	-0,6138* / 0,3768	-0,4003* / 0,1602	-0,3970* / 0,1576	-0,2751* / 0,0757	

4-3 Korelační vztahy mezi vybranými vegetačními indexy a vybranými vlnovými délkami a obsahy fotosyntetických pigmentů u vrby jívy. Stupeň korelace vyjádřen R, přítomnost * u R vyjadřuje signifikantní závislost, výsledek lineární regrese je r² (koeficient determinace). Signifikantní rozdíly byly prokázány na hladině p=0,05

Korelace vybraných indexů a biochemických parametrů			760-880nm	1010_1120nm	1250-1270nm
			R (signifikance)/r ²		
<i>Salix caprea</i>	Horní strana	Obsah vody	0,1886/0,0356	0,1902 / 0,0362	0,1913 / 0,0366
		ChloA	0,0450 / 0,0020	0,1615 / 0,0261	0,2194 / 0,0481
		ChloB	0,1080 / 0,0117	0,1731 / 0,0300	0,2092 / 0,0438
		Total Chlo	0,0639 / 0,0041	0,1661 / 0,0276	0,2180 / 0,0475
		Karot	0,0408 / 0,0017	0,1745 / 0,0304	0,2498 / 0,0624
		ChloA/ChloB	-0,1709 / 0,0292	-0,1665 / 0,0277	-0,1675 / 0,0281
		Kar/Chlo	-0,1034 / 0,0107	-0,2088 / 0,0436	-0,2387 / 0,0570
	Dolní strana	Obsah vody	-0,0300 / 0,0009	-0,0089 / 0,0001	-0,0082 / 0,0001
		ChloA	0,1244 / 0,0155	0,2473 / 0,0612	-0,2507 / 0,0628
		ChloB	0,0866 / 0,0075	0,1816 / 0,0330	0,1734 / 0,0301
		Total Chlo	0,1141 / 0,0130	0,2297 / 0,0528	0,2297 / 0,0528
		Karot	0,1226 / 0,0150	0,2656 / 0,0706	0,2850 / 0,0812
		ChloA/ChloB	0,0034 / 0,000	-0,0471 / 0,0022	-0,0163 / 0,0003
		Kar/Chlo	-0,1889 / 0,0357	-0,2593 / 0,0673	-0,2271 / 0,0516
	Horní vrstva	Obsah vody	0,0821 / 0,0067	0,0848 / 0,0072	0,0601 / 0,0036
		ChloA	0,1424 / 0,0203	0,2052 / 0,0421	0,2703 / 0,0731
		ChloB	0,2560 / 0,0655	0,3132 / 0,0981	0,3514 / 0,1235
		Total Chlo	0,1770 / 0,0313	0,2385 / 0,0569	0,2962 / 0,0877
		Karot	0,0762 / 0,0058	0,1238 / 0,0153	0,2052 / 0,0421
		ChloA/ChloB	-0,3491 / 0,1219	-0,3729*/0,1391	-0,3483 / 0,1213
		Kar/Chlo	-0,1938/0,0376	-0,2758 / 0,0760	-0,3099 / 0,0961
	Dolní vrstva	Obsah vody	0,1276 / 0,0163	0,1351 / 0,0183	0,1091 / 0,0119
		ChloA	0,2941 / 0,0865	0,3861*/0,1491	0,4393*/0,1930
		ChloB	0,3922*/ 0,1538	0,4953*/0,2453	0,5238*/0,2743
		Total Chlo	0,3252 / 0,1057	0,4211*/0,1773	0,4674*/0,2184
		Karot	0,2549 / 0,0650	0,3409 / 0,1162	0,4109*/0,1688
		ChloA/ChloB	-0,4392*/0,1929	0,5571*/0,3104	-0,5441*/0,2960
		Kar/Chlo	-0,2903 / 0,0843	-0,4045*/0,1636	-0,4148*/0,1721

4-4 Pokračování tabulky 4-3

Korelace vybraných indexů a poměrů parenchymů			NDVI	PRI	CI	NDWI	WI	MDWI
			R (signifikance)/r ²					
Populus tremula	Horní strana	ø Celková μm	0,0632 / 0,0040	-0,4125 / 0,1702	-0,3492 / 0,1220	0,5646 / 0,3188	0,3941 / 0,1553	0,3017 / 0,0910
		ø VP μm	0,2477 / 0,0614	0,5004 / 0,2504	-0,0230 / 0,0005	0,3363 / 0,1131	0,6058 / 0,3669	-0,2482 / 0,0616
		ø PP μm	-0,2144 / 0,0460	-0,5171 / 0,2674	-0,1175 / 0,0138	0,3906 / 0,1525	0,1511 / 0,0228	0,3411 / 0,1163
		ø HP μm	0,4155 / 0,1727	-0,2266 / 0,0513	-0,5872 / 0,3448	0,6182 / 0,3822	0,6187 / 0,3827	0,1375 / 0,0189
		ø SP μm	0,2923 / 0,0854	0,6191 / 0,3832	0,0530 / 0,0028	0,2719 / 0,0739	0,6034 / 0,3641	-0,0850 / 0,0072
	Dolní strana	ø Celková μm	-0,1515 / 0,0230	-0,2569 / 0,0660	-0,1580 / 0,0250	0,4060 / 0,1649	0,2778 / 0,0772	-0,0612 / 0,0037
		ø VP μm	0,5163 / 0,2666	0,5965 / 0,3558	0,4022 / 0,1617	0,3854 / 0,1485	0,6314 / 0,3987	0,5450 / 0,2971
		ø PP μm	-0,0557 / 0,0031	-0,2288 / 0,0523	0,1026 / 0,0105	0,0651 / 0,0042	-0,0505 / 0,0025	0,0444 / 0,0020
		ø HP μm	-0,1500 / 0,0225	-0,2039 / 0,0416	-0,4255 / 0,1810	0,6717*/0,4511	0,6056 / 0,3668	-0,2269 / 0,0515
		ø SP μm	0,2139 / 0,0458	0,5173 / 0,2676	0,1476 / 0,0218	0,5272 / 0,2779	0,7364*/0,5422	0,4818 / 0,2321
	Horní vrstva	ø Celková μm	0,0589 / 0,0035	-0,3215 / 0,1033	-0,3164 / 0,1001	0,4664 / 0,2176	0,3484 / 0,1214	0,2475 / 0,0612
		ø VP μm	0,3510 / 0,1232	0,0410 / 0,0017	0,3924 / 0,1540	0,6670*/0,4449	0,7262*/0,5274	0,3646 / 0,1329
		ø PP μm	-0,0594 / 0,0035	-0,3505 / 0,1229	-0,0905 / 0,0082	0,2654 / 0,0704	0,0402 / 0,0016	0,1200 / 0,0144
		ø HP μm	0,2626 / 0,0689	-0,2105 / 0,0443	-0,3058 / 0,0935	0,6747*/0,4552	0,7197*/0,5180	0,3059 / 0,0936
		ø SP μm	0,2683 / 0,0720	0,0857 / 0,0074	0,1325 / 0,0176	0,5868 / 0,3444	0,7483*/0,5599	0,6617 / 0,4378
	Dolní vrstva	ø Celková μm	-0,0279 / 0,0008	-0,2521 / 0,0635	-0,3128 / 0,0978	0,4770 / 0,2275	0,3318 / 0,1101	-0,3072 / 0,0944
		ø VP μm	0,4180 / 0,1747	0,3066 / 0,0940	0,4681 / 0,2191	0,6300 / 0,3969	0,8002*/0,6403	0,5959 / 0,3551
		ø PP μm	-0,0397 / 0,0016	-0,2938 / 0,0863	-0,2098 / 0,0440	0,2686 / 0,0722	0,0617 / 0,0038	-0,4892 / 0,2393
		ø HP μm	0,1312 / 0,0172	-0,0208 / 0,0004	-0,2144 / 0,0460	0,6415 / 0,4115	0,6716*/0,4511	-0,0498 / 0,0025
		ø SP μm	0,1589 / 0,0252	0,2668 / 0,0712	0,2441 / 0,0596	0,5264 / 0,2771	0,7339*/0,5387	0,7347*/0,5398

4-5 Korelační vztahy mezi vybranými vegetačními indexy a vybranými vlnovými délkami a poměry parenchymů na různých stranách listu a vrstvy pěti listů u topolu osiky. Stupeň korelace vyjádřen R, přítomnost * u R vyjadřuje signifikantní závislost, výsledek lineární regrese je r² (koeficient determinace). Signifikantní rozdíly byly prokázány na hladině p=0,05

Korelace vybraných indexů a poměrů parenchymů			ø760-880 nm	ø1010-1120 nm	ø1250-1270 nm
			R (signifikance)/r ²		
Populus tremula	Horní strana	ø Celková μm	0,2555 / 0,0653	0,2630 / 0,0692	0,0494 / 0,0024
		ø VP μm	0,6191 / 0,3832	0,3557 / 0,1266	0,4760 / 0,2265
		ø PP μm	-0,0495 / 0,0025	-0,0477 / 0,0023	-0,2206 / 0,0487
		ø HP μm	0,6513 / 0,4242	0,6711*/0,4504	0,4666 / 0,2177
		ø SP μm	0,5617 / 0,3155	0,3947 / 0,1558	0,4669 / 0,2180
	Dolní strana	ø Celková μm	0,7024*/0,4934	0,6708*/0,4499	0,5918 / 0,3502
		ø VP μm	0,1876 / 0,0352	-0,0986 / 0,0097	-0,0175 / 0,0003
		ø PP μm	0,5616 / 0,3154	0,6051 / 0,3662	0,5877 / 0,3454
		ø HP μm	0,7307*/0,5340	0,6212 / 0,3859	0,4959 / 0,2459
		ø SP μm	0,1919 / 0,0368	-0,0675 / 0,0046	-0,0585 / 0,0034
	Horní vrstva	ø Celková μm	0,1297 / 0,0168	0,1207 / 0,0146	-0,0272 / 0,0007
		ø VP μm	0,6444 / 0,4153	0,5520 / 0,3047	0,5298 / 0,2807
		ø PP μm	-0,1411 / 0,0199	-0,1796 / 0,0323	-0,2977 / 0,0886
		ø HP μm	0,4898 / 0,2399	0,5169 / 0,2672	0,3560 / 0,1267
		ø SP μm	0,6005 / 0,3606	0,5577 / 0,3110	0,5147 / 0,2650
	Dolní vrstva	ø Celková μm	0,2853 / 0,0814	0,3695 / 0,1365	0,1637 / 0,0268
		ø VP μm	0,6357 / 0,4042	0,5024 / 0,2524	0,4787 / 0,2292
		ø PP μm	0,0217 / 0,0005	0,0833 / 0,0069	-0,0878 / 0,0077
		ø HP μm	0,5810 / 0,3376	0,6551 / 0,4291	0,4646 / 0,2158
		ø SP μm	0,5430 / 0,2949	0,4804 / 0,2308	0,4386 / 0,1923

4-6 Pokračování tabulky 4-5

Korelace vybraných indexů a poměrů parenchymů			NDVI	PRI	CI	NDWI	WI	MDWI
			R (signifikance)/r ²					
<i>Salix caprea</i>	Horní strana	ø Celková μm	0,1631 / 0,0266	-0,1447 / 0,0209	0,0703 / 0,0049	-0,5933 / 0,3520	-0,7686*/0,5908	0,4119 / 0,1697
		ø VP μm	0,6882*/0,4737	0,5361 / 0,2874	0,6579 / 0,4329	-0,6808 */0,4635	-0,4186 / 0,1752	0,7181 */0,5156
		ø PP μm	0,1570 / 0,0246	-0,2494 / 0,0622	-0,0412 / 0,0017	-0,5211 / 0,2715	-0,7472 */ 0,558	0,4598 / 0,2114
		ø HP μm	0,0306 / 0,0009	0,2271 / 0,0516	0,1220 / 0,0149	-0,1064 / 0,0113	-0,0967 / 0,0094	-0,1593 / 0,0254
		ø SP μm	0,1594 / 0,0254	0,4061 / 0,1649	0,2199 / 0,0484	-0,0915 / 0,0084	-0,2010 / 0,0404	0,0385 / 0,0015
	Dolní strana	ø Celková μm	-0,0428 / 0,0018	-0,0949 / 0,0090	-0,0425 / 0,0018	-0,3765 / 0,1417	-0,8307 */ 0,690	0,2583 / 0,0667
		ø VP μm	0,3655 / 0,1336	0,5288 / 0,2797	0,4854 / 0,2356	-0,7768*/0,6034	-0,6425 / 0,4128	-0,2827 / 0,0799
		ø PP μm	-0,2137 / 0,0457	-0,2285 / 0,0522	-0,1924 / 0,0370	-0,2809 / 0,0789	-0,8096 */ 0,655	0,1775 / 0,0315
		ø HP μm	0,5519 / 0,3046	0,4006 / 0,1604	0,2231 / 0,0498	-0,2730 / 0,0745	-0,3702 / 0,1370	-0,0118 / 0,0000
		ø SP μm	0,4478 / 0,2005	0,4719 / 0,2227	0,1572 / 0,0247	-0,1859 / 0,0346	-0,3910 / 0,1529	-0,3566 / 0,1271
	Horní vrstva	ø Celková μm	-0,0212 / 0,0004	-0,1101 / 0,0121	-0,0639 / 0,0041	-0,7301*/0,5331	-0,7068*/0,4996	0,5622 / 0,3160
		ø VP μm	0,4436 / 0,1968	0,3505 / 0,1228	0,5617 / 0,3155	-0,4079 / 0,1664	-0,3211 / 0,1031	0,9019*/0,8135
		ø PP μm	0,0045 / 0,0000	-0,1903 / 0,0362	-0,1587 / 0,0252	-0,6747* / 0,455	-0,6951 */ 0,483	0,5690 / 0,3237
		ø HP μm	-0,1410 / 0,0199	0,0359 / 0,0013	0,0214 / 0,0005	-0,0164 / 0,0003	0,1401 / 0,0196	0,2100 / 0,0441
		ø SP μm	-0,2603 / 0,0677	-0,0338 / 0,0011	0,0665 / 0,0044	0,0140 / 0,0002	0,1002 / 0,0100	0,4036 / 0,1629
	Dolní vrstva	ø Celková μm	-0,3058 / 0,0935	-0,3040 / 0,0924	-0,2840 / 0,0807	-0,8267*/0,6834	-0,6191 / 0,3833	0,0906 / 0,0082
		ø VP μm	0,1476 / 0,0218	0,3054 / 0,0933	0,3104 / 0,0964	-0,3505 / 0,1228	-0,2457 / 0,0603	0,1231 / 0,0152
		ø PP μm	-0,3933 / 0,1547	-0,3661 / 0,1341	-0,3634 / 0,1320	-0,7694 * / 0,592	-0,6013 / 0,3615	0,0881 / 0,0078
		ø HP μm	0,1932 / 0,0373	-0,0471 / 0,0022	-0,1407 / 0,0198	-0,1959 / 0,0384	-0,0336 / 0,0011	-0,0576 / 0,0033
		ø SP μm	0,3364 / 0,1132	0,1843 / 0,0340	0,0801 / 0,0064	-0,1575 / 0,0248	-0,0915 / 0,0084	0,3424 / 0,1172

4-7 Korelační vztahy mezi vybranými vegetačními indexy a vybranými vlnovými délkami a poměry parenchymů na různých stranách listu a vrstvy pěti listů u vrby jívy. Stupeň korelace vyjádřen R, přítomnost * u R vyjadřuje signifikantní závislost, výsledek lineární regrese je r² (koeficient determinace). Signifikantní rozdíly byly prokázány na hladině p=0,05

Korelace vybraných indexů a poměrů parenchymů			ø760-880 nm	ø1010-1120 nm	ø1250-1270 nm
			R (signifikance)/r ²		
<i>Salix caprea</i>	Horní strana	ø Celková μm	-0,7998* / 0,639	-0,6488 / 0,4209	-0,6276 / 0,3939
		ø VP μm	-0,8437 */0,7119	-0,7767*/0,6032	-0,7348*/0,5400
		ø PP μm	-0,7089*/0,5025	-0,5336 / 0,2847	-0,5240 / 0,2746
		ø HP μm	-0,4119 / 0,1697	-0,5604 / 0,3140	-0,6555 / 0,4297
		ø SP μm	-0,4537 / 0,2058	-0,6049 / 0,3659	-0,7005*/0,4907
	Dolní strana	ø Celková μm	-0,3356 / 0,1127	-0,1178 / 0,0139	-0,0718 / 0,0052
		ø VP μm	-0,6406 / 0,4104	-0,3393 / 0,1151	-0,2280 / 0,0520
		ø PP μm	-0,1712 / 0,0293	0,0321 / 0,0010	0,0731 / 0,0053
		ø HP μm	-0,8118 */0,6590	-0,7983 */ 0,637	-0,8267*/0,6834
		ø SP μm	-0,4997 / 0,2497	-0,4747 / 0,2253	-0,4786 / 0,2290
	Horní vrstva	ø Celková μm	0,7912*/0,6260	-0,7331*/0,5375	-0,7614*/0,5798
		ø VP μm	-0,5050 / 0,2550	-0,5820 / 0,3387	-0,6026 / 0,3632
		ø PP μm	-0,7332*/0,5376	-0,6573 / 0,4320	-0,6934*/0,4808
		ø HP μm	-0,0995 / 0,0099	-0,1358 / 0,0185	-0,2194 / 0,0481
		ø SP μm	-0,0244 / 0,0006	-0,0427 / 0,0018	-0,0746 / 0,0056
	Dolní vrstva	ø Celková μm	-0,8259*/0,6816	-0,8044*/0,6470	-0,6313/0,3985
		ø VP μm	-0,3123 / 0,0975	-0,3326 / 0,1106	-0,1940 / 0,0376
		ø PP μm	-0,8027 * / 0,644	-0,7757*/0,6018	-0,6516 / 0,4245
		ø HP μm	-0,1289 / 0,0166	-0,0907 / 0,0082	0,0522 / 0,0027
		ø SP μm	-0,0195 / 0,0004	0,0065 / 0	0,1544 / 0,0239

4-8 Pokračování tabulky 4-7

5.DISKUSE

V kapitole Diskuse se nejdříve zaměřím na diskusi metodických přístupů použitých ve studii a poté vlastní získané výsledky. Závěrem bude úvaha o využití tohoto typu výzkumu a výsledků mé diplomové práce pro monitorování fyziologického stavu dřevin v rámci přirozené sukcese na výsypkách či při výsadbách v rámci fytořediačních postupů na výsypkách.

5.1. Diskuse použitých metodických přístupů

Metodické postupy byly vybrány za účelem studia fyziologického stavu dřevin se zřetelem na vodní režim rostliny. V této studii byla využita i optická vlastnost listu - odrazivost, která byla studována ve vztahu k vybraným anatomickým parametrům listu, které mají vztah k vodnímu režimu listu.

5.1.1. Metody stanovení vodního potenciálu

Stanovení hodnot vodního potenciálu může mít výpovědní hodnotu o přítomnosti vodního stresu u rostlin, je-li rostlina vystavena nedostatku vody.

Existuje několik metod, jak měřit vodní potenciál v rostlině. Spolehlivou metodou měření vodního potenciálu v rostlinných pletivech je pomocí termočláňkového psychrometru, který pracuje na principu stanovení rovnováhy relativní vlhkosti vzorku a atmosféry v uzavřené komoře. Po ustavení rovnováhy relativní vlhkosti mezi vzorkem a okolní atmosférou termočlánek uvnitř komory měří relativní vlhkost a teplotu vzduchu, ze kterého je vypočítán vodní potenciál vzorku. Stanovení vodního potenciálu rostliny psychrometrem je jediným způsobem, jak určit vodní potenciál u jakéhokoli rostlinného vzorku, nejen celého orgánu, jako je tomu u tlakové komory, nicméně tato metoda je technicky náročná a nákladná (Beckett 1995).

Další metodou, která se k měření vodního potenciálu rostlin používá je tlaková sonda, což je jediná metoda, s níž se dá měřit vodní potenciál v jedné buňce rostliny. Měření vodního potenciálu rostliny pomocí tlakové sondy funguje na principu změny tlaku oleje v mikrokapiláře, která je používána k penetraci buňky. Po penetrování buňky dojde k vyrovnání tlaků ve spojeném systému, což se projeví na mikrokapilárním snímači tlaku zaznamenávajícím změnu tlaku v mikrokapiláře, jež se rovná turgorovému tlaku penetrované

buňky. Měření vodního potenciálu pomocí tlakové sondy je ovšem technicky velmi náročné a do terénu nevhodné (Kramer and Boyer 1995).

Při měření hodnot vodního potenciálu v listu jsem použila metodu měření pomocí tlakové bomby, která pracuje na principu vyrovnání podtlaku v xylému rostliny tvořeného transpiračním sáním. Pro účely mé práce, kdy sběr materiálu probíhal v terénních podmínkách, bylo nutné zvolit metodu, která umožňuje měřit vodní potenciál v terénu, k čemuž je Scholanderova tlaková bomba ideálně přizpůsobena. Pomocí tlakové bomby je možné stanovit elasticitu buněk.

Výhodou měření vodního potenciálu pomocí tlakové bomby je rychlost, snadná proveditelnost a možnost použití této metody mimo laboratoř. Při měření vodního potenciálu tlakovou bombou se ovšem může během vyrovnávání tlaku stát, že řapík listu, který je uvnitř komory, praskne a měření je neplatné. Další nevýhodou měření vodního potenciálu pomocí tlakové bomby je nutnost delšího řapíku listu. Řapík listu musí být alespoň 2cm dlouhý, aby bylo možné jej vložit do těsnícího šroubu a pozorovat meniskus xylémové šťávy, což bylo u vrby jívy občas těžce proveditelné. Obecně je známo, že u některých rostlin, jako jsou například netýkavka, nebo některé druhy trav, je pro jejich křehkost nevhodné měřit vodní potenciál tlakovou bombou, protože jim při vyrovnávání tlaku mezi komorou a xylémem velice snadno praská stonek, či řapík, nebo je stonek rozdrčen těsnícím šroubem. Tedy tato metoda má svá omezení z hlediska struktury a morfologie studovaných rostlin.

Měření vodního potenciálu pomocí tlakové bomby se používá hlavně při terénním měření, během kterého se vodní potenciál na odděleném orgánu musí změřit nejdéle do 15 minut po oddělení orgánu od rostliny, poté již mohou být hodnoty zkesleny transpirací (Pallardy and Kozlowski 1981).

Metody kvantitativního popisu anatomických struktur

Pro kvantitativní stanovení počtu objektů se u biologického materiálu používají různé kvantitativní metody. K nim patří tradiční metody morfologické či analýza obrazu. V posledních dekádách se rozvíjí použití stereologických metod, které jsou založeny na stochastické geometrii a využívají při výběru vzorků pro pozorování systematický rovnoměrně náhodný výběr, kterým optimalizují způsob počítání sledovaných objektů s ohledem na co nejpřesnější a nevychýlený odhad.

Při získávání kvantitativních údajů o strukturách je třeba dosáhnout nevychýleného odhadu, který je zajištěn systematicky rovnoměrně náhodným výběrem v rámci sledované struktury.

5.1.2.1. Systematicky rovnoměrné vzorkování

Předpokladem pro získání nevychýleného odhadu strukturních parametrů studovaných objektů je správný výběr segmentů ze studovaného objektu, pozorovacích polí v rámci řezů objektem a vzorkovacího systému. Na všech úrovních je třeba využít principu systematického rovnoměrně náhodného (SRN) výběru, který zaručuje reprezentativnost výběru a je založen na principu, že každá částice v objektu bude mít stejnou pravděpodobnost, že bude vybrána. (Kubínová and Albrechtová, 1999).

Při počítání částic v rovině, tj. ve 2D, je pro zajištění nevychýleného výběru částic třeba použít princip výběru zajištěného použitím nevychýleného vzorkovacího okénka (Gundersen et al., 1999) viz obr. 3-6. Metoda výběru pomocí nevychýleného vzorkovacího okénka s extenzemi vylučovacích čar pro výběr i mimo okénko zajistí, aby každá částice měla stejnou pravděpodobnost, že bude vybrána, jak bylo odvozeno v práci (Gundersen et al., 1999)

V případě měření struktur ve 3D objektu je princip výběru pomocí nevychýleného testovacího okénka aplikován ve formě jakési prostorové testovací sondy, o tvaru krychle, nebo kvádra, tzv. disektoru (Gundersen et al., 1999). Právě použití nevychýlených stereologických metod v kombinaci s prostorovou sondou disektorem při dodržení principu vzorkování pomocí SRN výběru je zaručený způsob získání nevychýlených hodnot odhadovaných parametrů v 3D. Například při počítání chloroplastů pomocí prostorové sondy disektoru, byly nalezeny řádově vyšší počty chloroplastů, než při jejich odhadu na 2D řezech pomocí dvourozměrného Gundersenova vzorkovacího okénka (Kubínová et al., 2014).

5.1.2.2. Zjišťování hustoty průduchů

Nejčastějším a nejdéle měřeným kvantitativním parametrem v anatomii rostlin je hustota a velikost průduchů (Pazourek 1988). Tento parametr byl již zjišťován v předchozích stoletích na začátku kvantitativních metod pro studium anatomických struktur po rozvoji metod mikroskopických. Před zásadní publikací (Gundersen et al., 1988) byl používán princip výběru, kdy k vylučovacím dvěma stranám okénka se jeden hraniční bod s čarou nevylučovací započítával, zasahoval-li objekt a protistojný hraniční bod se nezapočítával. Tímto však dochází k nadhodnocování, v případě počítání průduchů s použitím výběrového okénka se tento rozdíl může pohybovat okolo 3 % (Albrechtová 1988).

Hlavním metodickým problémem, se kterým jsem se ve své práci musela potýkat při zjišťování kvantitativně anatomických parametrů pokožky, bylo získání co největšího vzorku stažené pokožky listů osiky i jívy, což mělo vliv na SRN výběr polí pro pozorování, kvalitu

pořízených snímků a následnou kvantifikaci počtu průduchů. Zvláště u vrby jívy bylo stahování spodní pokožky listu velmi znesnadněno jednak jejím hustým trichomálním oděním (na obrázku 3-5 je možné vidět četné báze trichomů u vrby jívy) a jednak slabší spodní pokožkou, než má topol osika (Graf 4-23).

V mém případě kvantifikaci hustoty průduchů ztěžoval fakt, že bylo velmi náročné získat jednotně velký vzorek stažené pokožky listu topolu osiky i vrby jívy. Otiskové preparáty spodní pokožky osiky nebyly vyhovující a u jívy pro velké množství trichomů nemožné. Pro metodu stahování pokožky listu jsem se rozhodla pro její finanční nenáročnost a minimální nároky na pomůcky, avšak i přes několik modifikací metodiky, tento způsob získání vzorků pokožky zůstal velmi časově náročný (průměrně okolo 30-45 minut pro získání preparátu a 15-20 min snímání obrazu mikroskopem) a u vrby jívy celou situaci komplikovalo husté odění listu. V některých případech bylo možné získat jen nevelké segmenty pokožky listu vrby jívy. U obou druhů byl při kvantifikaci průduchů použit systém SRN výběru systému vzorkovacích okének (Kubínová 1994) a vzorkovací okénko bylo přikládáno též rovnoměrně náhodným způsobem na snímek pokožky-pomocí programu NIS elements.

5.2. Diskuse experimentálních výsledků

5.2.1. Vodní provoz rostlin a vodní potenciál

Bylo obtížné interpretovat hodnoty vodního potenciálu u vrby jívy a topolu osiky, protože tato veličina je velmi proměnlivá druhově, časově a závisí na všech okolních podmínkách. Ve známé literatuře byl vodní potenciál stanovován na semenáčcích topolu osiky v umělých pěstovacích systémech (Awad et al., 2010). Studie, která by udávala konkrétní hodnoty vodního potenciálu vrby jívy a topolu osiky u dospělých stromů v přirozených podmínkách, není známá. Například (Anderegg et al., 2014) neuvádí hodnoty vodního potenciálu ramet topolu osiky, ale tato veličina byla použita při vyhodnocování fyziologického stavu listoví u různého stupně poškození koruny osiky. Nicméně ve studii (Savage and Cavender-Bares 2011), můžeme najít hodnoty vodního potenciálu „pre-dawn“ (měřených před úsvitem) u šesti druhů vrb v rozmezí -0,59 až -0,71 Mpa. Tyto hodnoty vodního potenciálu jsou v souladu s mým měřením pre-dawn, kdy byly nejvyšší průměrné hodnoty vodního potenciálu naměřeny v 7:00 ráno -0,56 Mpa pro osiku i jívu. Naopak ve studii věnované třem druhům vrb (*S. matsudana* Koidz., *S. microstachya* Nakai a *S. gordejevii*

Chang) nejvyšších hodnoty pre-down v 6:00, kterých bylo dosaženo, bylo 1,2 Mpa, což může být dáno tím, že tyto druhy jsou aridní až semiaridní a jsou přizpůsobeny odolávat nižšímu množství vody (Liu et al., 2003).

5.2.2. Anatomická struktura listu topolu osiky a vrby jívy

Xeromorfní listy mají vyšší poměr palisádového/houbovitého parenchymu, málo mezibuněčných prostor což způsobuje zkompaktnění celého listu, snížení vnitřního povrchu listu a snížení odparu vody (Esau 1997). Mezi xeromorfní adaptace listů dřevin patří dorziventrální mezofyl se silně vyvinutým palisádovým parenchymem, jak bylo pozorováno u dřevin rostoucích v Brazílii, kde palisádový parenchym tvořil více než 50% mezofylu (Bieras and Sajo 2009). Z mého měření vyplývá, že topol osika má větší poměr mocnosti vrstev houbovitého/palisádovému parenchymu (Graf 4-19), oproti nižšímu poměru houbovitého/palisádovému parenchymu u vrby jívy. Z těchto výsledků usuzuji, že vrba jíva má v poměru více palisádového parenchymu a méně houbovitého parenchymu i objemově než topol osika a poměr mocnosti pletiv parenchymů listu má xeromorfnější charakter než topol osika.

Mezi xeromorfní adaptace listů patří také silná vrstva trichomů, kterou můžeme na abaxiální straně listu pozorovat u vrby jívy (Obr 4-1), u topolu osiky nebyly pozorovány žádné trichomy, i to naznačuje xeromorfnější charakter listů vrby jívy. Dalšími charakteristickými vlastnostmi xeromorfních listů může být sklerifikace buněk obklopujících cévy listové žilnatiny pro snášení nižšího vodního potenciálu, idioblasty s fenolickými sloučeninami, nebo krystaly a silná kutikula chránící před vysokou transpirací, ozářeností a okusem herbivory. Tyto parametry nebyly v mé práci kvantifikovány.

Mezi xeromorfní adaptace sice patří zanoření a omezení velikosti průduchů (Bieras and Sajo 2009), nicméně u xeromorfních listů je zmiňována vyšší hustota průduchů, což by odpovídalo tomu, že trend je snížit plochu jednoho průduchu, a naopak zvýšit hustotu průduchů (Esau 1977). V mém případě se toto projevilo u vrby jívy, která má téměř čtyřikrát více průduchů, než topol osika (Graf 4-11 A)), a téměř čtyřikrát nižší rozměry jednoho průduchu, než topol osika (Graf 4-11 B)). Při zjišťování celkové plochy průduchů u jívy i osiky, odvozené z hustoty a odhadu plochy průduchů, jsem zjistila, že u obou druhů to je okolo 2 % z celkové plochy listu (Graf 4-11 C)).

Další xeromorfní adaptací může být redukce plochy průduchů, nebo jejich zanoření, jako je možné najít u erikoidních listů, jejichž charakteristikou jsou svinuté okraje listů, větší

tloušťka listu i kutikuly s lignifikovanou buněčnou stěnou, která snižuje odpar a zvyšuje odrazivost (Dickison 2000). V mé práci nebyla kvantifikována tloušťka kutikuly, ale tloušťka pokožky a celková tloušťka listu a u osiky i jívy a bylo zjištěno, že tloušťky pokožek se mezi druhy nelišily, ale celková tloušťka listu byla větší u topolu osiky, oproti vrbě jívě (Graf 4-15). Vyšší tloušťka listu u topolu osiky by v tomto případě naznačovala xeromorfnější charakter listoví - oproti jívě.

Xeromorfní listy také mohou mít vysoký poměr objem/povrchu, snižují svojí plochu, protože na větší ploše listu dochází k většímu odparu vody a absorpci záření, které list ohřívá a podporuje odpar (Esau 1977). S tím souvisí i SLA (specifická listová plocha), která vyjadřuje plochu listu na suchou hmotnost, která je u osiky vyšší než u jívy, což by naznačovalo, že jíva s nižší SLA listu bude mít i nižší povrch a tím pádem lepší xeromorfnější přizpůsobení (graf 4-24 A)). Ze studie (Castro-Díez et al., 2000) je patrné, že LMA (specifická listová hmotnost), obrácená hodnota SLA, u temperátních listnatých dřevin koreluje s hustotou listu, ve výše zmíněné studii jsou uvedeny hodnoty pro *Salix caprea* LMA 17,51 g·m⁻² s hustotou listu 169 g·dm⁻³, ve svých výsledcích udávám průměrné hodnoty pro jívu LMA 81 g/m² (graf 4-26) s hustotou listu 620g/dm³ (Graf 4-24 B)). Oproti studii (Castro-Díez et al., 2000) mi vychází několikanásobně vyšší hodnoty LMA i hustoty listu, což může být dáno tím, že mnou odebraný materiál byl z přirozeného prostředí, kde byly stromy vystaveny nedostatku vody a vyšší ozáření, oproti studii, kdy byly stromy pěstovány za optimálních podmínek ve skleníku.

Při porovnání listové hustoty topolu osiky a vrby jívy, má jíva signifikantně větší hustotu listu, oproti topolu, což také naznačuje pro xeromorfnější charakter jívového listoví (Graf 4-24 B)).

U xeromorfních listů se také vyskytuje hustá síť úzkých cév s nízkou frekvencí širokých cév. U některých xeromorfních listů můžeme najít významnou vrstvu hypodermis a silnou buněčnou vrstvu v epidermis, jejich kutikula může být tlustá a variabilní a u některých sukulentních rostlin můžeme nalézt i speciální vodní pletivo, jako například u listu rodu *Ficus* ssp. Xeromorfní adaptace struktury listu mohou vzniknout také jako odpověď na zasolení, nebo vysokou ozáření (Esau 1977)

Závěrem je tedy možno uzavřít, že v naprosté většině pozorovaných strukturálních parametrů (s výjimkou celkové tloušťky listu) vykazovaly listy jívy xeromorfnější charakter oproti listům topolu.

5.2.3. Změny anatomických parametrů listu vrby jívy a topolu osiky v průběhu sezóny

Z grafu (4-25) je zřejmé, že v průběhu sezóny se u obou druhů snižovala specifická listová plocha, což by naznačovalo buď růst plochy listů, nebo nárůst vnitřní biomasy listu nicméně z grafu (4-11 A)) je patrné, že hustota průduchů se v průběhu sezóny nesnižovala, jak by se dalo očekávat za předpokladu rostoucí plochy, a proto vysvětlením snižující se SLA je nárůst strukturních látek. Nárůst strukturních látek v listu je patrný i z grafu (4-20), nárůst palisádového parenchymu a z grafu 4-18, nárůst celkové tloušťky listu u obou druhů dřevin - vrby jívy, i topolu osiky. Nebyl pozorován rozdíl v průběhu sezóny ve změnách SLA u obou druhů.

5.2.4. Sezónní dynamika biochemických vlastností listu

5.2.4.1. Dynamika fotosyntetických pigmentů

Nárůst strukturních látek v listoví v průběhu sezóny můžeme dokázat nejen na změně anatomické struktury v listu, ale i na klesajícím obsahu fotosyntetických pigmentů, který je udáván na množství sušiny a projevuje se jak u vrby jívy, tak u topolu osiky (graf 4-27).

Ze studie (Castro and Sanchez-Azofeifa 2008) je patrné, že celkový obsah chlorofylu $a+b$, který je udáván v mg/plochu listu, začíná u topolu osiky klesat zhruba v polovině září, což odpovídá přirozené senescenci listoví. V mé práci se klesající trend obsahu fotosyntetických pigmentů u jívy i osiky projevil již v srpnu, což nebylo dáno senescencí listoví, ale větším množstvím sušiny, na které je obsah pigmentů přepočítáván. Nárůst sušiny je dobře doložen na grafu (4-25), jako pokles specifické listové plochy, což naznačuje nárůst sušiny.

Obsahy ostatních pigmentů, jako jsou karotenoidy u topolu osiky, také klesají v průběhu září (Keskitalo et al., 2005), ale pomaleji než obsah fotosyntetických pigmentů, což se v grafu 4-30 projevilo nárůstem poměrů karotenoidů/chlorofylům v měsíci srpnu u jívy i osiky.

5.2.5. Odrazivost listů

Metody dálkového průzkumu Země (DPZ) nabízejí rychlý způsob zjištění fyziologického stavu vegetace a mohou zajistit komplexní informaci o velké ploše

s potenciálem nahradit časově náročné terénní a laboratorní výzkumy a výrazně tak zjednodušit získání fyziologických parametrů rostlin. Z vhodných DPZ metod se za použití kalibračních biochemických a anatomických parametrů dá odvodit velkoplošně obsah dusíku, fosforu, nebo rychlost fotosyntézy (Homolová et al., 2013).

Na základě charakteristicky odlišné struktury dorziventrálního listu můžeme očekávat i odlišnou odrazivost na adaxiální a abaxiální straně listu, typicky vyšší odrazivost v NIR na adaxiální straně a nižší odrazivost na straně abaxiální a ve viditelné oblasti elektromagnetického spektra naopak vyšší odrazivost na abaxiální straně listu a nižší odrazivost na straně adaxiální (Buschmann et al., 2012). Odrazivost od horní strany listu je u jívky i osiky v oblasti viditelného záření nižší než odrazivost od spodní strany listu (Graf 4-34 a 4-35), čemuž odpovídá i graf 4-40 E, kde je jasně vidět, že vegetační index CI, postihující obsah chlorofylů *a* a *b*, je u obou druhů vyšší na horní straně listu, kde je palisádový parenchym s vyšším množstvím pigmentů, oproti spodní straně listu.

Naopak odrazivost v oblasti NIR (Graf 4-34, 4-35), je na spodní straně listu u obou druhů nižší než na vrchní straně listu, což je dáno tím, že záření odražené od kompaktní vrstvy palisádového parenchymu se na vrchní straně listu bude odrážet více než od spodní vrstvy, kde je houbovitý parenchym s mezibuněčnými prostory, ve kterém dochází k vícenásobnému odrazu a rozptylu záření od povrchu buněk, což se projeví sníženou odrazivostí.

Podobný efekt, jako vidíme v rozdílné odrazivosti spodní a svrchní strany listu, můžeme na reflektanční křivce vidět při porovnávání odrazivosti horní strany jednoho listu a horní vrstvy pěti listů (graf 4-36 a 4-37). V mé práci jsem vynechala porovnávání reflektančních křivek spodní strany jednoho listu a spodní vrstvy pěti listů, protože v rámci „upscaling“ metod DPZ z úrovně listu na úroveň porostu je zohledněna odrazivost měřená nad korunou stromů, nebo porostem. Nicméně pro dohledání vztahu mezi strukturálními parametry listu a jeho odrazivostí jsem přistoupila k měření obojím způsobem.

Při porovnání vegetačních indexů vypočítaných z horní a spodní vrstvy pěti listů, jsem došla ke stejnému závěru, jako při porovnání horní a spodní strany jednoho listu. Vegetační index CI je na horní vrstvě vyšší, pro vyšší obsah pigmentů v palisádovém parenchymu, oproti spodní vrstvě listu (Graf 4-40 F).

U pozorovaných vegetačních indexů NDVI, PRI a CI u jívky i osiky můžeme vidět vyšší hodnoty na horní straně jednoho listu, oproti spodní straně a také vyšší hodnoty na horní vrstvě pěti listů, oproti hodnotám měřeným na spodní straně pěti listů (Graf 4-40). Tento rozdíl v hodnotách vegetačních indexů je dán tím, že vypovídají o biochemických

parametrech, jako jsou pigmenty, které se vyskytují v palisádovém parenchymu spíše než v houbovitém, kde je velké množství mezibuněčných prostor oproti parenchymu palisádovému.

Při sledování vegetačních indexů vypovídajících o obsahu vody, nebylo ani u jívky, ani u osiky nalezeno příliš mnoho rozdílů mezi horní a spodní stranou jednoho listu, ani mezi horní a spodní stranou vrstvy pěti listů, protože vodu obsaženou v listu nelze rozdělit na vodu příslušící spodní, nebo horní straně listu (Graf 4-41). U vegetačního indexu MDWI (Graf 4-41 E) byly pozorovány vyšší hodnoty u horní strany listu než u spodní strany listu a vyšší hodnoty u horní vrstvy pěti listů než u spodní vrstvy pěti listů, u obou druhů. U MDWI můžeme také pozorovat veškeré hodnoty měřené na vrstvě pěti listů vyšší (Graf 4-41 F) než hodnoty měřené na jednom listu, což je účelem toho indexu, který byl navržen pro porovnání rozdílů v obsahu vody v jednom listu a v celé koruně (Eitel et al., 2006).

Z několika studií, (Gates 1965; Klančnik et al., 2012) je patrné, že odrazivost od buněčné struktury je v oblasti NIR, konkrétně v rozmezí vlnových délek 760-1270 nm, přičemž oblasti 880-1010 nm, 1120-1250 nm odpovídají absorpčnímu maximu vody. (Eitel et al., 2006) Z toho důvodu jsem pro korelace mezi anatomickými analýzami mocností pletiv listu a odrazivostí od buněčné struktury zvolila tři intervaly 760-880 nm, 1010-1120 nm a 1250-1270 nm vlnových délek, u kterých jsem předpokládala, že by měly souviset s anatomickou strukturou listu.

Ze souboru grafů 4-43 a 4-44 dokumentujících dynamiku vegetačních indexů vyjadřující biochemické, biofyzikální a anatomické parametry listu u osiky i jívky, můžeme pozorovat převážně klesající tendenci všech indexů v průběhu sezóny, což odpovídá přirozené senescenci listů, že v průběhu sezóny můžeme pozorovat snižující se obsah pigmentů, vody i změny v anatomické struktuře, která není tolik kompaktní a odráží méně záření.

V oblasti NIR 700-1300 nm je odrazivost ovlivněna anatomickou strukturou listu (Homolová et al., 2013). Proto jsem se ve své práci zaměřila na anatomickou strukturu listu a její vliv na odrazivost.

Odrzivost listu od anatomické struktury je ovlivněna například stářím listu. Ze studie (Rappaport et al., 2014) vyplývá, že čím starší listy vinné révy, tím u nich v oblasti NIR elektromagnetického spektra záření v průběhu sezóny klesá odrazivost, oproti mladším listům, které mají větší mezibuněčné prostory a tlustší palisádový parenchym a jejich odrazivost je v NIR větší. To je dle mého názoru způsobeno tím, že silnější vrstva palisádového parenchymu nepropouští do nitra listu tolik záření a většina je od kompaktní struktury parenchymu odražena zpět. V mé práci se toto neprokázalo přímo, protože v grafu

4-20 je vidět nárůst palisádového parenchymu v průběhu třech měsíců, během kterých jsem mocnost pletiv analyzovala, jak u osiky, tak u jívy. Z grafů 4-38 a 4-39 je ale patrné, že odrazivost v průběhu sezóny u osiky i jívy klesá. Dle mého názoru to je způsobeno tím, že ve studii (Rapaport et al., 2014), je odrazivost měřena na starších i mladších listech vinné révy, kdy se mladší listy vyvíjejí se silnějším palisádovým parenchymem, pro lepší fotosyntetickou funkci, a jejich struktura je lépe přizpůsobena odrazu přebytečného záření ve vlnových délkách, které jsou pro fotosyntézu nevyužitelné. V případě starších listů vinné révy se projevil stejný pokles v odrazivosti NIR v průběhu sezóny, stejně jako u listů jívy a osiky, kde jsou listy stejného stáří.

U osiky i jívy můžeme v průběhu třech měsíců sledovat nárůst palisádového parenchymu (Graf 4-20), což by naznačovalo, že odrazivost listu by se měla v průběhu sezóny zvyšovat, což se ale nestalo a jak u osiky, tak u jívy se odrazivost v průběhu sezóny snižovala. Domnívám se, že to může být dáno změnou vlastností buněčné stěny, v průběhu sezóny, která ovšem nebyla nijak zjišťována a není možné tuto hypotézu potvrdit, ani vyvrátit.

V průběhu sezóny nebyl u osiky a jívy potvrzen nárůst houbovitého parenchymu (Graf 4-21), který mívá všeobecně větší mezibuněčné prostory. Ze studie (Castro and Sanchez-Azofeifa 2008) je patrné, že čím více mezibuněčných prostor a houbovitého parenchymu, tím vyšší odrazivost v 800 nm (NIR). Z mé práce je patrné, že tloušťka houbovitého parenchymu se v průběhu třech měsíců u osiky a jívy signifikantně neliší (Graf 4-21), což vysvětluje to, že ani odrazivost se v průběhu sezóny v NIR u osiky a jívy nezvyšuje (Graf 4-38 a 4-39).

Další vliv na snižující se odrazivosti může mít to, že anatomická analýza byla provedena pouze na vzorcích ze třech měsíců, oproti spektrální analýze, která se prováděla ve všech šesti měsících sezónního pozorování.

Odrazivost listu může být zvýšena přítomností odění listu, silnou vrstvou kutikuly a kutikulárních vosků (Buschmann et al., 2012). V mé studii jsem pozorovala snížení tloušťky pokožky listu topolu osiky v průběhu třech měsíců (graf 4-22 a 4-23), což může být jeden z aspektů snižující se odrazivosti ke konci sezóny vlivem vyšší propustnosti záření do nitra listu a nižší odrazivosti.

Mým předpokladem bylo, že vrba jíva, bude mít na spodní straně listu vyšší odrazivost, než topol osika právě díky hustému odění listu. Zjistila jsem, že odrazivost na spodní straně listu (Graf 4-42 A, C, E) je v oblasti NIR u osiky i jívy stejná, domnívám se, že husté odění na spodní straně listu jívy nemá primární funkci ochraňovat list před nadměrnou ozářeností, i vzhledem k tomu, že je ze spodu listů, ale hlavně zabraňovat ztrátám vody a zvyšovat hraniční vrstvu mezi atmosférou a povrchem listu. Vrba jíva nemá na spodní straně

listu vyšší odrazivost než topol osika, právě pro husté odění listu, které zabraňuje zpětnému odrazu záření od menší vrstvy houbovitého parenchymu jívky než má topol osika, jehož odrazivost od spodní strany listu není ničím regulována.

Vegetační index PRI je vypočítán za pomoci vlnových délek odpovídající chlorofylům a karotenoidům a vyjadřuje jejich poměr v listu. Z indexu PRI můžeme usuzovat o fyziologickém stavu listu, rostliny, nebo celého porostu. Za pomoci vegetačního indexu PRI je možné odhadnout RUE, což je poměr mezi asimilací uhlíku a množstvím absorbovaného světla vegetací (Garbulsky et al., 2011). Studie (Suárez et al., 2008) poukazuje na hodnoty PRI u druhu *Olea europaea* L., pěstovaném v aridní oblasti, hodnoty PRI u nestresovaných rostlin byly v rozmezí zhruba 0,03-0,04, oproti rostlinám stresovaným suchem, kdy byly hodnoty s větším rozmezím 0,03-0,05 PRI. Hodnoty PRI se řádově schodují s mými naměřenými hodnotami, které byly ovšem v průběhu sezóny v rozmezí 0,018 -0,07 u topolu a -0,01-0,05 u jívky, tento větší rozptyl, může být dán odlišnými druhy, na kterých byly studie prováděny a také rozdílným klimatickým pásmem, ve kterém rostliny rostly. V mém případě nebyla studie zaměřena na porovnání stresovaných a nestresovaných rostlin a bez porovnání s kontrolní variantou nelze data jednoznačně interpretovat.

Indexy pro zjištění reflektance v oblasti, která odpovídá struktuře listu, nejsou definovány, protože většina studií zabývající se DPZ, sleduje fyziologický stav celkového porostu a ne jedné rostliny. Dalším důvodem, proč odrazivost v oblasti, která by odpovídala struktuře listu, není dosud jasně definována, je významná druhová a ekotypová variabilita struktury listu a značná časová náročnost anatomických analýz.

Důležitou částí mé práce je kapitola zaměřená na vliv anatomické struktury, kterou jsem charakterizovala rozdíly v tloušťce listu a poměrném zastoupení pletiv parenchymů mezi jívou a osikou na optické vlastnosti listu, které jsou jednak vyjádřeny vegetačními indexy a jednak vybranými intervaly vlnových délek, které by měly odpovídat anatomické struktuře listu.

U topolu osiky byla prokázána největší korelace mezi odrazivostí vyjádřenou vegetačním indexem WI měřeným na horní i dolní straně vrstvy pěti listů, zejména pak s tloušťkou vrchní pokožky listu a WI měřeným na spodní straně vrstvy pěti listů.

Tato práce přispěla ke studiu vztahu anatomické struktury listu a odrazivosti listu.

5.2.6. Vztah vybraných anatomických a biochemických parametrů s vegetačními indexy a vybranými intervaly vlnových délek s ohledem na stranu a vrstvu listů.

Svou práci jsem zaměřila na vztah biochemických a anatomických vlastností listu k optickým vlastnostem listu, zejména odrazivost. V poslední části čtvrté kapitoly Výsledky se zaměřuji na hledání korelací mezi odrazivostí listu, vyjádřenou vegetačními indexy, měřenou na různých stranách listu a biochemickými a anatomickými parametry listu.

Jak jsem očekávala, z dostupné literatury (Letts et al., 2008; Shibayama and Akiyama 1986) signifikantní korelace byly nalezeny s vegetačními indexy vypovídajícími o obsahu pigmentů (CI, NDVI a PRI), bez ohledu na stranu listu, na které probíhalo měření reflektance (tabulka 4-1, 4-3). Vzhledem k tomu, že tyto vegetační indexy jsou vypočítávány z oblastí vlnových délek, jejichž odrazivost nesouvisí s anatomickou strukturou listu, výskyt korelací vegetačních indexů vypovídajících o obsahu pigmentů, ve vybraných intervalech NIR byl minimální, spíše náhodný.

Unikátní částí mé práce bylo nalézt souvislosti mezi anatomickou strukturou listu a odrazivostí ve vlnových délkách, které odpovídají odrazivosti, od anatomické struktury listu.

U vrby jívy byl při měření odrazivosti na horní straně listu sice nalezen vztah mezi vybranými intervaly vlnových délek a tloušťkou vrchní pokožky, ale tato korelace byla negativní (Tabulka 4-6). Negativní korelace mezi anatomickými parametry a odrazivostí v NIR měřené na spodní straně listu vrby jívy, je dle mého mínění způsobena tím, že navzdory neměnné tloušťce houbovitého parenchymu i vrchní pokožky, odrazivost klesá v důsledku zvyšující se tloušťky palisádového parenchymu, který v průběhu sezóny roste a díky své měnící struktuře odráží méně záření od svého povrchu uvnitř listu a také přirozenou senescencí listu, která se může projevit změnou buněčné struktury.

Soudím, že snižující se odrazivost v NIR měřená na vrchní straně listu, je dána rostoucí tloušťkou palisádového parenchymu, kde se snižuje pravděpodobnost návratu odraženého záření od houbovitého parenchymu a následného průchodu zpět skrz palisádový parenchym k povrchu listu, protože buňky palisádového parenchymu tvoří jakýsi optický kanál, který se svým prodlužováním stává zpětně nepropustným pro záření o určitých vlnových délkách. Domnívám se, že do jisté míry má vliv i změna buněčné struktury v průběhu sezóny, která propouští více záření do nitra listu a méně ho odráží.

U topolu osiky bylo nalezeno několik pozitivních korelací odrazivosti vlnových délek v NIR s tloušťkou listu a tloušťkou houbovitého parenchymu, měřených a spodní straně listu (Tabulka 4-8). Předpokládám, že při měření odrazivosti na spodní straně listu, pozitivní korelace odrazivosti a neměnné tloušťkou houbovitého parenchymu, byla způsobena klesající tloušťkou pokožky listu. Pro další interpretace by bylo třeba měření anatomických parametrů na větším počtu vzorků.

Z časových důvodů byly v mé práci zjištěny a vytvořeny korelace k anatomickým parametrům listu pouze ve třech měsících v průběhu sezóny, je zde tedy prostor pro další zkoumání, například zjištění dynamiky korelací vybraných intervalů vlnových délek a anatomické struktury listu v průběhu sezóny.

5.4. Ekofyziologická interpretace studie: přizpůsobení k nedostatku vody/časnější nástup na stanoviště

Je zřejmé, že vrba jíva nastupuje na sukcesní stanoviště na velké Podkrušnohorské výsypce dříve, než topol osika (Baldrián 2008), což může být dáno tím, že vrba jíva vyhledává vysoce osluněná stanoviště, která bývají bez porostu právě pro svůj nízký obsah vody. Díky tomu je vrba jíva konkurenceschopná, ve chvíli, kdy se po několika letech vlivem opadu listoví změní substrát a může si mírně zvýšit dostupnost vody, mohou nastupovat jiné stín netolerující rostliny, které dosahují vyššího vzrůstu, než vrba jíva. Vrba jíva se vyskytuje na nehostinných místech a přesto, že toleruje nedostatek živin v půdě, můžeme u ní vidět přizpůsobení k nedostatku vody, jako je například husté odění na abaxiální straně listů, které zvyšuje hraniční vrstvu mezi mezibuněčnými prostory a atmosférou a snižuje transpiraci. Dále je to omezený počet listoví, jíva má listy jen na letorostech, což může mít pozitivní vliv na regulaci výdeje vody.

Anatomická struktura listu jíva ji umožňuje časnější nástup na stanoviště s vysokou ozářeností, oproti pozdějšímu nástupu topolu osiky. Z článku Castro Díez et al., 2000, který se věnuje přizpůsobení rostlin k vnějším faktorům je patrné, že vrba jíva má slunnější charakter listoví, než ostatní sledované druhy, jako je například *Betula pendula*, *Quercus robur*, nebo *Corylus avellana*, což ji lépe předurčuje k výskytu na slunných stanovištích. Ne jen, že má listový pouze na letorostech, po obvodu koruny, tím pádem si listy vzájemně jen minimálně stíní, ale zároveň má oproti topolu osice širší vrstvu palisádového parenchymu, což je charakteristické pro slunný charakter listů.

Dále je ze studie (Castro-Díez et al., 2000) patrné, že čím slunnější charakter listoví, tím se zvyšuje specifická listová hmotnost listu. Z mého měření, graf 4-15 je patrné, že tlustší list, tím pádem lépe přizpůsobený k oslunění, má sice topol osika, ale vyšší poměr palisádového ku houbovitému parenchymu můžeme najít u vrby jívy. Z grafu 4-23 je patrné, že vyšší SLA má topol osika, což je v rozporu se slunnějším charakterem listoví u vrby jívy. Tento rozpor by mohl být způsoben tím, že anatomická struktura listu vrby jívy je dlouhodobě přizpůsobena slunným podmínkám, ale situace na stanovišti se v průběhu let změnila a vrba jíva roste v polostínu.

5.4.1. Využití monitorování fyziologických vlastností dřevin při sukcesích

V současné době, vzhledem k nárůstu celosvětové populace, se zvyšuje negativní dopad antropogenních aktivit na prostředí, mezi které patří rozsáhlá důlní činnost a její důsledky. Monitorování fyziologického a zdravotního stavu vegetace a lesa na výsypkách je velice důležité, nejen pro zefektivnění procesu rekultivace devastovaných ploch, ale i pro zjištění úspěšnosti konkurenčních druhů v přirozeném stádiu sukcese. Zjištění konkurenceschopnosti pionýrských druhů a monitorování fyziologického stavu dřevin může napovědět o míře úspěšnosti druhů, které osidlují stanoviště s nepříznivými podmínkami, což může mít hospodářský význam v rekultivačním procesu devastované krajiny po antropogenní činnosti.

Monitorování fyziologických vlastností dřevin může být využitelné i pro lepší pochopení přizpůsobení rostlin negativním podmínkám a ekonomické využití ve fytoimediačních technikách.

Je velice podstatné při výsadbách vysazovat vhodné, odolné druhy rostlin a dřevin s ohledem na jejich schopnost přizpůsobit se dostupným, ne vždy ideálním podmínkám pro růst, které bývají v krajině po antropogenní činnosti časté.

5.5. Zhodnocení přínosu předkládané práce

Metody dálkového průzkumu Země jsou velmi efektivní, moderní a významně rozvíjejí způsob velkoplošného zjišťování fyziologického stavu vegetace. Zjišťování fyziologického stavu vegetace má velký globální význam pro svou úzkou souvislost a návaznost na globální biogeochemické cykly vody a látek na Zemi. V době rychlých klimatických změn je třeba vyvíjet moderní a snadno použitelné metody velkoplošného monitorování fyziologického

stavu vegetace pro lepší porozumění fyziologických pochodů v rostlinném těle, oproti časově náročným analýzám látek v laboratořích, a důsledků těchto fyziologických procesů v rámci funkcí rostlin v ekosystému.

Velkoplošné monitorování využívá optických vlastností listů, především jejich odrazivosti, která se využívá při DPZ jako hlavní metoda při monitorování stavu vegetace. Odrazivost může být vyhodnocena též pomocí laboratorních přístrojů, které sledují jednotlivé listy, a při srovnání s biochemickými analýzami pak umožňují detekci obsahu vody v listech a dalších biochemických látek s použitím optických dat. Předkládaná práce přispívá ke znalostem o fyziologickém stavu monitorovaných dřevin na sukcesních plochách na výsypce.

Má práce je navíc originálním příspěvkem k řešení metodického vztahu odrazivosti listoví a strukturálních parametrů pokožky, které mají vliv na vodní režim rostlin. Z časových důvodů se v mé práci nepodařilo zopakovat pokusy týkající se denní dynamiky vodního potenciálu a měření vodního potenciálu následující po vysokých srážkách, nebo několikadenním suchu.

Většina prací studujících vztah odrazivosti a anatomické struktury listu (Slaton et al., 2001; Castro and Sanchez-Azofeifa 2008), si všímá vlivu velikosti mezibuněčných prostor, případně hustoty listu na odrazivost v NIR, především v 800 nm, nicméně jen minimum prací se zabývá vlivem povrchové struktury listu na odrazivost v NIR (Buschmann et al., 2012). Má práce je originální v tom, že sleduji vliv anatomické struktury listu, jako je přítomnost trichomů a hustota a velikosti průduchů, které souvisí s regulací vodního režimu, na odrazivost listu v intervalech vlnových délek, které se odráží od anatomické struktury listu.

6. Závěry:

Cíl 1 a hypotéza 1:

Rozdíl v denní dynamice vodního potenciálu mezi druhy topol osika a vrba jíva se nepotvrdil a u obou druhů byly nalezeny víceméně shodné hodnoty vodního potenciálu.

Cíl 2 a hypotéza 2:

V souvislosti s vodním režimem rostlin byla snaha porovnat anatomickou strukturu listu, která souvisí s regulací obsahu vody u obou druhů. V rámci porovnání anatomické struktury související s regulací vodního režimu u obou druhů, se navzdory rozdílným velikostem a hustotě průduchů zjistilo, že oba druhy mají shodnou plochu průduchů. Parametr vodního

potenciálu, i hustoty a plochy průduchů vypovídá o stejném ekologickém přizpůsobení obou příbuzných druhů.

Při porovnání anatomického přizpůsobení listů jívky a osiky k nedostatku vody jsem u jívky pozorovala xeromorfnější charakter listoví, který se projevil hustým oděním listu, menší velikostí průduchů a nižším zastoupením houbovitého parenchymu oproti osice.

Cíl 3 hypotéza 3:

Sezónní dynamika odrazivosti byla u vrby jívky i topolu osiky prokázána v oblasti PAR, kde odrazivost korelovala s obsahem biochemických látek v listu a v oblasti NIR v průběhu sezóny klesala, což naznačuje vliv přirozené senescence listoví, přesnější souvislosti s tloušťkou listu a palisádovým parenchym bude třeba dále ověřit. Mezi druhy nebyl nalezen významný rozdíl v sezónní dynamice odrazivosti

Cíl 4 hypotéza 4:

Hlavním cílem bylo nalézt souvislosti s anatomickou strukturou listu související s xeromorfním přizpůsobením listoví, jako je povrch listu, poměrné zastoupení pletiv, tloušťka listu a odrazivost v oblasti vlnových délek v NIR. Což bylo částečně potvrzeno, že vybrané intervaly vlnových délek v NIR korelují s poměrným zastoupením pletiv v listu a tloušťkou listu v závislosti na straně listu, na které je odrazivost měřena.

7. Seznam literatury

- Aasamaa, K., and Sober, A. (2011). Responses of stomatal conductance to simultaneous changes in two environmental factors. *Tree Physiology* 31, 855–864.
- Anderegg, W.R.L., Anderegg, L.D.L., Berry, J.A., and Field, C.B. (2014). Loss of whole-tree hydraulic conductance during severe drought and multi-year forest die-off. *Oecologia* 175, 11–23.
- Albrechtová, J. (1988). Hodnocení ploch epidermálních buněk trojčetných listů *Medicago sativa* L. vzhledem k symetrii. Diplomová práce, Deponováno na Katedře experimentální biologie rostlin, Viničná 5, ss133
- Augspurger, C.K. (1984). Light requirements of neotropical tree seedlings: A comparative study of growth and survival. *The Journal of Ecology* 72, 777.
- Awad, H., Barigah, T., Badel, E., Cochard, H., and Herbette, S. (2010). *Poplar* vulnerability to xylem cavitation acclimates to drier soil conditions. *Physiologia Plantarum* 139, 280–288.
- Baldrian, P., Trögl, J., Frouz, J., Šnajdr, J., Valášková, V., Merhautová, V., Cajthaml, T., and Herinková, J. (2008). Enzyme activities and microbial biomass in topsoil layer during spontaneous succession in spoil heaps after brown coal mining. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 2107–2115.
- Bartuska, M., and Frouz, J. (2015). Carbon accumulation and changes in soil chemistry in reclaimed open-cast coal mining heaps near Sokolov using repeated measurement of chronosequence sites: C accumulation in reclaimed mine waste. *European Journal of Soil Science* 66, 104–111.
- Beckett, R. P. (1995). Some aspects of the water relations of lichen from habitats of contrasting water status studied using thermocouple psychrometry. *Annals of Botany* 76 211–217
- Bieras, A.C., and Sajo, M. das G. (2009). Leaf structure of the cerrado (Brazilian savanna) woody plants. *Trees* 23, 451–471.
- Brodribb, T.J., and McAdam, S.A.M. (2011). Stomatal (mis)behaviour. *Tree Physiology* 31, 1039–1040.
- Buschmann, C., Lenk, S., and Lichtenthaler, H.K. (2012). Reflectance spectra and images of green leaves with different tissue structure and chlorophyll content. *Israel Journal of Plant Sciences* 60, 49–64.
- Cao, X., Jia, J.B., Li, H., Li, M.C., Luo, J., Liang, Z.S., Liu, T.X., Liu, W.G., Peng, C.H., and Luo, Z.B. (2012). Photosynthesis, water use efficiency and stable carbon isotope composition are associated with anatomical properties of leaf and xylem in six *poplar* species: *Poplar* photosynthesis and $\delta^{13}\text{C}$ associated with anatomy. *Plant Biology* 14, 612–620.
- Castro, K.L., and Sanchez-Azofeifa, G.A. (2008). Changes in spectral properties, chlorophyll content and internal mesophyll structure of senescing *Populus balsamifera* and *Populus tremuloides* leaves. *Sensors* 8, 51–69.
- Castro-Díez, P., Puyravaud, J.P., and Cornelissen, J.H.C. (2000). Leaf structure and anatomy as related to leaf mass per area variation in seedlings of a wide range of woody plant species and types. *Oecologia* 124, 476–486.
- Chen, J.-H., Sun, H., and Yang, Y.-P. (2008). Comparative morphology of leaf epidermis of *Salix* (*Salicaceae*) with special emphasis on sections *Lindleyanae* and *Retusae*. *Botanical Journal of the Linnean Society* 157, 311–322.
- Dickison, W.C. (2000). Integrative plant anatomy. Academic press, London.
- Eitel, J.U.H., Gessler, P.E., Smith, A.M.S., and Robberecht, R. (2006). Suitability of existing and novel spectral indices to remotely detect water stress in *Populus* spp. *Forest Ecology and Management* 229, 170–182.
- Esau, K. (1997). Anatomy of seed plants. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.

- Frouz, J. (2007). Tvorba nové krajiny na Sokolovsku: Sokolovská uhelná a.s.
- Frouz, J., Livečková, M., Albrechtová, J., Chroňáková, A., Cajthaml, T., Pižl, V., Háněl, L., Starý, J., Baldrian, P., Lhotáková, Z., et al. (2013). Is the effect of trees on soil properties mediated by soil fauna? A case study from post-mining sites. *Forest Ecology and Management* 309, 87–95.
- Frouz, J., Vobořilová, V., Janoušová, I., Kadochová, Š., and Matějček, L. (2015). Spontaneous establishment of late successional tree species English oak (*Quercus robur*) and European beech (*Fagus sylvatica*) at reclaimed alder plantation and unreclaimed post mining sites. *Ecological Engineering* 77, 1–8.
- Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Griffin, K.L., Hartley, A.E., Joel, G., Penuelas, J., and Valentini, R. (1995). Relationships Between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types. *Ecological Applications* 5, 28.
- Gao, B.-C., and Goetz, A. F. H. (1995). Retrieval of equivalent water thickness and informatik related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. *Remote Sensing Environment* 52, 155-162
- Garbulsky, M.F., Peñuelas, J., Gamon, J., Inoue, Y., and Filella, I. (2011). The photochemical reflectance index (PRI) and the remote sensing of leaf, canopy and ecosystem radiation use efficiencies. A review and meta-analysis. *Remote Sensing of Environment* 115, 281–297.
- Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C., and Weidner, V.R. (1965). Spectral properties of plants. *Applied Optics* 4, 11–20.
- Ghahremaninejad, F., Khalili, Z., Maassoumi, A.A., Mirzaie-Nodoushan, H., and Riahi, M. (2012). Leaf epidermal features of *Salix* species (*Salicaceae*) and their systematic significance. *American Journal of Botany* 99, 769–777.
- Gitelson, A., and Merzlyak, M. N. (1994). Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. *Journal of Plant Physiology* 143, 286–292.
- Gitelson. A., Gritz, Y., Merzlyak, M.N. (2003). Relationship between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Jurnal of Plant Physiology* 160, 271-282
- Gundersen, H.J.G., Jensen, E.B.V., Kieu, K., and Nielsen, J. (1999). The efficiency of systematic sampling in stereology—reconsidered. *Journal of Microscopy* 193, 199–211.
- Hallik, L., Kull, O., Niinemets, Ü., and Aan, A. (2009). Contrasting correlation networks between leaf structure, nitrogen and chlorophyll in herbaceous and woody canopies. *Basic and Applied Ecology* 10, 309–318.
- Hanba, Y.T., Kogami, H., and Terashima, I. (2002). The effect of growth irradiance on leaf anatomy and photosynthesis in *Acer* species differing in light demand. *Plant, Cell & Environment* 25, 1021–1030.
- Homolová, L., Malenovský, Z., Clevers, J.G.P.W., García-Santos, G., and Schaepman, M.E. (2013). Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping. *Ecological Complexity* 15, 1–16.
- Jarvis P.G., (1976). The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society London B* 273, 593–610.
- Keskitalo, J., Bergquist, G., Garderström, P., Jansson S. (2005). A Cellular Timetable of Autumn Senescence. *Plant Physiology* 139, 1635–1648.
- Kitao, M., Lei, T. T., Koike, T., Tobita, H., Maruyama, Y. (2000). Susceptibility to photoinhibition of three deciduous broadleaf tree species with different successional trains raised under various light regimes. *Plant, Cell and Environment* 23, 81-89
- Klančnik, K., Mlinar, M., and Gaberščik, A. (2012). Heterophylly results in a variety of “spectral signatures” in aquatic plant species. *Aquatic Botany* 98, 20–26.

- Klančnik, K., Pančič, M., and Gaberščik, A. (2014). Leaf optical properties in amphibious plant species are affected by multiple leaf traits. *Hydrobiologia* 737, 121–130.
- Kokaly, R.F., Asner, G.P., Ollinger, S.V., Martin, M.E., and Wessman, C.A. (2009). Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies. *Remote Sensing of Environment* 113, S78–S91.
- Kröber, W., Heklau, H., and Bruelheide, H. (2014). Leaf morphology of 40 evergreen and deciduous broadleaved subtropical tree species and relationships to functional ecophysiological traits. *Plant Biology* 17, 373–383.
- Kramer, P. J. and Boyer, J. S. (1995). *Water relations of plants and soil*. Academic press, London.
- Kubínová, L. (1994). Recent stereological methods for measuring leaf anatomical characteristics: estimation of the number and sizes of stomata and mesophyll cells. *Journal of Experimental Botany* 45, 119–127.
- Kubínová, L., Albrechtová, J., (1999). *Stereology in Plant Anatomy*. Charles Univesity, Praha
- Kubínová, Z., Janacek, J., Lhotakova, Z., Kubinova, L., and Albrechtova, J. (2014). Unbiased estimation of chloroplast number in mesophyll cells: advantage of a genuine three-dimensional approach. *Journal of Experimental Botany* 65, 609–620.
- Lawson, S.S., Pijut, P.M., and Michler, C.H. (2014). The cloning and characterization of a poplar stomatal density gene. *Genes & Genomics* 36, 427–441.
- Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology*. 4th ed. Springer, Verlag Berlin Heidelberg.
- Letts, M.G., Phelan, C.A., Johnson, D.R., and Rood, S.B. (2008). Seasonal photosynthetic gas exchange and leaf reflectance characteristics of male and female cottonwoods in a riparian woodland. *Tree Physiology* 28, 1037.
- Lhotaková, Z., Urban, O., Dubankova, M., Cvikrova, M., Tomaskova, I., Kubinova, L., Zvara, K., Marek, M.V., Albrechtova, J. (2012). The impact of long-term CO₂ enrichment on sun and shade needles of Norway spruce (*Picea abies*): photosynthetic performance, needle anatomy and phenolics accumulation. *Plant Science* 188-189: 60-70.
- Liu, M.Z., Jiang, G.M., Li, Y.G., Gao, L.M., Niu, S.L., Cui, H.X., and Ding, L. (2003). Gas exchange, photochemical efficiency, and leaf water potential in three *Salix* species. *Photosynthetica* 41, 393–398.
- Malenovský, Z., Mishra, K. B., Zemek, F., Rascher, U. and Nedbal, L. (2009) Scientific and technical challenges in remote sensing of plant canopy reflectance and fluorescence. *Jurnal of Experimental Botany* 11, 2987-3004
- Merzlyak, M.N., Gitelson, A.A., Chivkunova, O.B., Solovchenko, A.E., and Pogosyan, S.I. (2003a). Application of reflectance spectroscopy for analysis of higher plant pigments. *Russian Journal of Plant Physiology* 50, 704–710.
- Merzlyak, M.N., Solovchenko, A.E., and Gitelson, A.A. (2003b). Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit. *Postharvest Biology and Technology* 27, 197–211.
- Mobasheri, M.R., and Fatemi, S.B. (2013). Leaf Equivalent Water Thickness assessment using reflectance at optimum wavelengths. *Theoretical and Experimental Plant Physiology* 25, 196–202.
- Niinemets, Ü., (2004). Within-canopy variation in the rate of development of photosynthetic capacity is proportionam to integrated quantum flux density in temperate deciduou trees. *Plant, Cell and Environment* 27, 293-313
- Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of woody plants*. 3rd ed. Elsevier, Boston.
- Pallardy, S.G., and Kozlowski, T.T. (1981). Water relations of *Populus* clones. *Ecology* 62, 159.

- Pavlová, L. (2005). Fyziologie rostlin. Karolinum, Praha.
- Pazourek, J. (1988). The evolution of quantitative plant anatomy. *Acta Universitatis Carolinae – Biologica* 31, 15–25.
- Porra RJ, Thompson WA, Kriedemann PE. (1989). Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous-equations for assaying chlorophyll-*a* and chlorophyll-*b* extracted with 4 different solvents - verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic-absorption spectroscopy. *Biochimica Et Biophysica Acta* 975(3): 384-394.
- Procházka, S., Macháčková, I., Krekule, J., and Šebánek, J., (1998). Fyziologie rostlin. Academia, Praha.
- Rapaport, T., Hochberg, U., Rachmilevitch, S., and Karnieli, A. (2014). The effect of differential growth rates across plants on spectral predictions of physiological parameters. *PLoS ONE* 9, e88930.
- Roussel, M., Thiec, D., Montpied, P., Ningre, N., Guehl, J.-M., and Brendel, O. (2009). Diversity of water use efficiency among *Quercus robur* genotypes: contribution of related leaf traits. *Annals of Forest Science* 66, 408–408.
- Savage, J.A., and Cavender-Bares, J.M. (2011). Contrasting drought survival strategies of sympatric willows (genus: *Salix*): consequences for coexistence and habitat specialization. *Tree Physiology* 31, 604–614.
- Shibayama, M., and Akiyama, T. (1986). Spectroradiometer for field use. *Japanese Journal of Crop Science* 55(4): 433-438.
- Siemens, J.A., and Zwiazek, J.J. (2003). Effects of water deficit stress and recovery on the root water relations of trembling aspen (*Populus tremuloides*) seedlings. *Plant Science* 165, 113–120.
- Sims, D.A., and Gamon, J.A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment* 81, 337–354.
- Slaton, M.R., Hunt, E.R., and Smith, W.K. (2001). Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. *American Journal of Botany* 88, 278–284.
- Slatyer, R.O. and Taylor, S.A. (1960). Terminology in plant soil water relations. *Nature*, 187, 922-924.
- Šourková, M., Frouz, J., and Šantrůčková, H. (2005). Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic). *Geoderma* 124, 203–214.
- Stimson, H.C., Breshears, D.D., Ustin, S.L., and Kefauver, S.C. (2005). Spectral sensing of foliar water conditions in two co-occurring conifer species: *Pinus edulis* and *Juniperus monosperma*. *Remote Sensing of Environment* 96, 108–118.
- Suárez, L., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G., Pérez-Priego, O., Miller, J.R., Jiménez-Muñoz, J.C., and Sobrino, J. (2008). Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. *Remote Sensing of Environment* 112, 560–575.
- Thomsen, J., Bohrer, G., Matheny, A., Ivanov, V., He, L., Renninger, H., and Schäfer, K. (2013). Contrasting hydraulic strategies during dry soil conditions in *Quercus rubra* and *Acer rubrum* in a sandy site in Michigan. *Forests* 4, 1106–1120.
- Tosens, T., Niinemets, Ü, Vislap, V., Eichelmann, H., and Castro Díez, P. (2012). Developmental changes in mesophyll diffusion conductance and photosynthetic capacity under different light and water availabilities in *Populus tremula*: how structure constrains function: Structural limitations to photosynthesis. *Plant, Cell & Environment* 35, 839–856.
- Uemura, A., Ishida, A., Nakano, T., Terashima, I., Tanabe, H., and Matsumoto, Y. (2000). Acclimation of leaf characteristics of *Fagus* species to previous-year and current-year solar irradiances. *Tree Physiology* 20, 945–

951.

Úřadníček, L., Maděra P., Tichá S., Koblížek J., (2009). *Dřeviny české republiky*. Lesnická práce, Brno.

Ustin, S.L., Gitelson, A.A., Jacquemoud, S., Schaepman, M., Asner, G.P., Gamon, J.A., and Zarco-Tejada, P. (2009). Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. *Remote Sensing of Environment* 113, S67–S77.

Vohland, M., Mader, S., Dorigo, W. (2010). Applying different inversion techniques to retrieve stand variables of summer barley with PROSPECT+SAIL. *International Journal Applied Earth Observation and Geoinformation* 12, 71-80

Wagner, F., Below, R., Klerk, P.D., Dilcher, D.L., Joosten, H., Kürschner, W.M., and Visscher, H. (1996). A natural experiment on plant acclimation: lifetime stomatal frequency response of an individual tree to annual atmospheric CO₂ increase. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 93, 11705–11708.

Wellburn AR. (1994). The spectral determination of chlorophyll-*a* and chlorophyll-*b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of Plant Physiology* 144(3), 307-313.

Yu, Q. (2001). Can physiological and anatomical characters be used for selecting high yielding hybrid aspen clones? *Silva Fennica* 35, 137–146.

Ždímal, V., Pospíšil, J., and Šafář, V. (2011) Remote sensing and yield maps (DPZ a výnosové mapy). Ústav zemědělské, potravinářské techniky, Brno.