

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA BIOLOGIJO

Mojca MLINAR

**ODBOJNI SPEKTRI LISTOV VODNE DRESNI  
(*Polygonum amphibium*) IN RUMENEGA BLATNIKA  
(*Nuphar luteum*)**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2011

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA BIOLOGIJO

Mojca MLINAR

**ODBOJNI SPEKTRI LISTOV VODNE DRESNI (*Polygonum amphibium*) IN RUMENEGA BLATNIKA (*Nuphar luteum*)**

DIPLOMSKO DELO  
Univerzitetni študij

**REFLECTANCE SPECTRA OF THE SPECIES *Polygonum amphibium*  
AND *Nuphar luteum***

GRADUATION THESIS  
University studies

Ljubljana, 2011

Diplomsko delo je zaključek univerzitetnega študija biologije na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani. Delo je potekalo na terenu na območju Cerkniškega jezera in v laboratoriju Katedre za ekologijo in varstvo okolja na Oddelku za biologijo Biotehniške fakultete v Ljubljani.

Študijska komisija Oddelka za biologijo je 3. junija 2011 odobrila predlagano temo diplomske naloge z naslovom Odbojni spektri listov vodne dresni (*Polygonum amphibium*) in rumenega blatnika (*Nuphar luteum*). Za mentorico je imenovala prof. dr. Alenko Gaberščik.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednica: doc. dr. Katarina VOGEL MIKUŠ  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Mentorica: prof. dr. Alenka GABERŠČIK  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Recenzentka: doc. dr. Mateja GERM  
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Podpisana se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddala v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Datum zagovora: 12. 12. 2011

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Mojca Mlinar

## KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Dd
- DK 581.1:581.5:582(043.2)=163.6
- KG odbojnost/vodna dresen (*Polygonum amphibium*)/rumeni blatnik (*Nuphar luteum*/lastnosti listov
- AV MLINAR, Mojca
- SA GABERŠČIK, Alenka (mentor)
- KZ SI-1000 Ljubljana, Večna pot 111
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo
- LI 2011
- IN ODBOJNI SPEKTRI LISTOV VODNE DRESNI (*Polygonum amphibium*) IN RUMENEGA BLATNIKA (*Nuphar luteum*)
- TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)
- OP X, 55 str., 5 pregl., 32 sl., 33 vir.
- IJ sl
- JI sl/en
- AI Proučevali smo odbojnost listov pri 2 rastlinskih vrstah. Meritve smo opravljali na plavajočih, prehodnih in kopenskih listih vodne dresni (*Polygonum amphibium*) ter plavajočih in potopljenih listih rumenega blatnika (*Nuphar luteum*). Izmerili smo odbojnost listov v območju od 280 do 887 nm. Določili smo tudi specifično listno površino, število in velikost listnih rež in trihomov, vsebnost barvil in UV absorbirajočih snovi, analizirali zgradbo in fiziološko stanje lista. Želeli smo raziskati variabilnost odbojnih spektrov in ugotoviti, v kakšni meri lahko izbrane anatomske in morfološke ter biokemijske lastnosti lista razložijo odbojnost. Rezultati so pokazali, da so si listi vodne dresni biokemijsko zelo podobni, medtem ko so se anatomsko in morfološko večinoma statistično razlikovali. Skladna s temi ugotovitvami je bila odbojnost, saj so bili spektri najbolj podobni v vidnem območju, kjer določajo odbojnost v glavnem barvila. Precej so se razlikovali v UV in NIR (700 – 887 nm) območju, kar je najbrž posledica različnih anatomskih in morfoloških lastnosti. Najbolj sta se razlikovala plavajoči in kopenski list vodne dresni. Odbojnost potopljenega in plavajočega lista rumenega blatnika je bila precej različna v vseh spektralnih območjih, prav tako sta se lista statistično razlikovala v drugih lastnostih. Plavajoča lista obeh vrst sta imela podobno odbojnost, predvsem v vidnem območju spektra.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dd  
 DC 581.1:581.5:582(043.2)=163.6  
 CX reflectance/*Polygonum amphibium*/*Nuphar luteum*/leaf properties  
 AU MLINAR, Mojca  
 AA GABERŠČIK, Alenka (supervisor)  
 PP SI-1000 Ljubljana, Večna pot 111  
 PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Biology  
 PY 2011  
 TI REFLECTANCE SPECTRA OF THE SPECIES *Polygonum amphibium* AND  
*Nuphar luteum*  
 DT Graduation Thesis (University studies)  
 NO X, 55 p., 5 tab., 32 fig., 33 ref.  
 LA sl  
 AL sl/en  
 AB The measurements of reflectance were performed on natant, emersed and terrestrial leaves of species *Polygonum amphibium* and natant and submersed leaves of *Nuphar luteum*. Reflectance was measured within the range of 280 - 887 nm. Specific leaf area, trichome and stomata length and density, pigments and UV-absorbing compounds, leaf structure and physiological condition of plant were also determined. The goal was to examine variability of reflectance spectra and to investigate the impact of leaf morphological, anatomical and biochemical parameters on reflectance. *Polygonum amphibium* leaves were biochemically similar but we observed statistically significant difference in anatomical and morphological parameters. That resulted in reflectance spectra, namely the most similar were spectra in visible region, where reflectance is primarily controlled by leaf pigments. Leaf reflectance spectra differed more in UV and NIR (700 – 887 nm) regions, which was probably the result of anatomical and morphological variability. The biggest difference was observed between natant and terrestrial leaves. Submersed and natant leaves of *Nuphar luteum* differed through entire spectrum as well as in other parameters. Reflectance of natant leaves of both species showed high similarity particularly in the visible range of spectrum.

## KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION.....	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO PREGLEDNIC.....	VI
KAZALO SLIK.....	VII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	X
1 UVOD.....	1
1.1 Hipoteze.....	2
2 PREGLED OBJAV.....	3
2.1 Značilnosti odbojnih spektrov.....	3
2.2 Vplivi na odbojni spekter.....	4
2.2.1 Biokemijske značilnosti.....	4
2.2.1.1 Barvila.....	4
2.2.1.2 Celuloza in lignin.....	6
2.2.2 Anatomske in morfološke značilnosti.....	7
2.2.3 Vsebnost vode.....	9
3 MATERIALI IN METODE.....	10
3.1 Območje raziskav.....	10
3.2 Predmet raziskav.....	11
3.3 METODE DELA.....	13
3.3.1 Merjenje odbojnih spektrov.....	14
3.3.2 Fiziološke meritve.....	14
3.3.3 Anatomske in morfološke analize.....	15
3.3.3.1 Specifična listna površina.....	15
3.3.3.2 Zgradba lista.....	15
3.3.3.3 Število in velikost listnih rež in trihomov.....	16
3.3.4 Biokemijske analize.....	16
3.3.5 Statistična obdelava podatkov.....	17
4 REZULTATI.....	18
4.1 Vodna dresen.....	18
4.2 Rumeni blatnik.....	29
4.3 Primerjava plavajočih listov vodne dresni in rumenega blatnika.....	36
5 RAZPRAVA.....	43
6 SKLEPI.....	50
7 POVZETEK.....	51
8 VIRI.....	53
ZAHVALA.....	

## KAZALO PREGLEDNIC

Pregl. 1: Morfološki, anatomski in biokemijski parametri listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ).....	24
Pregl. 2: Značilnosti razlik med različnimi tipi listov pri vodni dresni ( <i>P. amphibium</i> ).....	25
Pregl. 3: Vrednosti Spearman-ovega korelacijskega koeficienta ( $r$ ), ki prikazujejo stopnjo povezanosti odbojnosti in posameznih lastnosti listov pri vodni dresni ( <i>P. amphibium</i> )....	29
Pregl. 4: Morfološki, anatomski in biokemijski parametri listov rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ) ter značilne razlike med plavajočim in potopljenim tipom listov rumenega blatnika.....	32
Pregl. 5: Morfološki, anatomski in biokemijski parametri plavajočih listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ) in rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ) ter značilne razlike med vrstama.....	41

## KAZALO SLIK

Sl. 1: Vodna dresen (vodni poganjki), 6.8.2010.....	12
Sl. 2: Rumeni blatnik, 6.8.2010.....	13
Sl. 3: Specifična listna površina [ $\text{cm}^2\text{mg}^{-1}$ ] različnih tipov listov pri vodni dresni ( <i>P. amphibium</i> ).....	18
Sl. 4: Gostota listnih rež [ $\text{mm}^{-2}$ ] na zgornji in spodnji povrhnjici pri različnih tipih listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ).....	19
Sl. 5: Zgornja in spodnja povrhnjica listov emerznega tipa 1 pri vodni dresni.....	19
Sl. 6: Zgornja in spodnja povrhnjica listov emerznega tipa 2 pri vodni dresni.....	20
Sl. 7: Dolžina listnih rež [ $\mu\text{m}$ ] na zgornji in spodnji povrhnjici pri različnih tipih listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ).....	20
Sl. 8: Gostota trihomov [ $\text{mm}^{-2}$ ] na zgornji in spodnji povrhnjici pri različnih tipih listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ).....	21
Sl. 9: Zgornja in spodnja povrhnjica kopenskih listov vodne dresni.....	21
Sl. 10: Dolžina trihomov [ $\mu\text{m}$ ] na zgornji in spodnji povrhnjici pri različnih tipih listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ).....	22
Sl. 11: Vsebnost UV-A in UV-B absorbirajočih snovi pri različnih tipih listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ) je podana na površino vzorca ( $\text{cm}^2$ ) v relativnih enotah.....	23
Sl. 12: Odbojni spektri plavajočega, emerznega1, emerznega2 in kopenskega tipa listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ).....	26
Sl. 13: Dendrogram podobnosti odbojnih spektrov pri različnih tipih listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ); klastrska analiza z Bray-Curtis-ovim indeksom podobnosti.....	27
Sl. 14: Dendrogram podobnosti različnih tipov listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ); vključeni so vsi merjeni parametri, tudi odbojnost; klastrska analiza z Bray-Curtis-ovim indeksom podobnosti.....	28



Sl. 15: Specifična listna površina [ $\text{cm}^2\text{mg}^{-1}$ ] plavajočega in potopljenega tipa listov rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ) .....	29
Sl. 16: Debelina [ $\mu\text{m}$ ] plavajočega in potopljenega tipa listov rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ).....	30
Sl. 17: Plavajoči in potopljeni list rumenega blatnika v prerezu.....	30
Sl. 18: Vsebnost klorofila <i>a</i> in klorofila <i>b</i> [ $\text{mg g}^{-1}$ ss] ter skupna vsebnost klorofilov <i>a</i> in <i>b</i> (Kl <i>a+b</i> ) v listih rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ) .....	31
Sl. 19: Vsebnost UV-A in UV-B absorbirajočih snovi pri plavajočem in potopljenem tipu listov rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ) je podana na površino ( $\text{cm}^2$ ) vzorca v relativnih enotah .....	32
Sl. 20: Odbojna spektra plavajočega in potopljenega tipa listov rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ).....	33
Sl. 21: Dendrogram podobnosti odbojnih spektrov pri plavajočem in potopljenem tipu listov rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ); klastrska analiza z Bray-Curtis-ovim indeksom podobnosti .....	34
Sl. 22: Dendrogram podobnosti plavajočega in potopljenega tipa listov rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ); vključeni so vsi merjeni parametri, tudi odbojnost; klastrska analiza z Bray-Curtis-ovim indeksom podobnosti .....	35
Sl. 23: Specifična listna površina [ $\text{cm}^2\text{mg}^{-1}$ ] plavajočih listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ) in rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ) .....	36
Sl. 24: Gostota listnih rež [ $\text{mm}^{-2}$ ] na zgornji povrhnjici plavajočih listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ) in rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ).....	36
Sl. 25: Listne reže na zgornji povrhnjici plavajočega lista vodne dresni in plavajočega lista rumenega blatnika .....	37
Sl. 26: Dolžina listnih rež [ $\mu\text{m}$ ] pri plavajočih listih vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ) in rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ) .....	37
Sl. 27: Debelina lista in palisadnega tkiva [ $\mu\text{m}$ ] pri plavajočih listih vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ) in rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ).....	38

Sl. 28: Plavajoči list rumenega blatnika in vodne dresni v prerezu.....	38
Sl. 29: Vsebnost klorofila <i>a</i> in klorofila <i>b</i> [ $\text{mg g}^{-1}$ ss] ter skupna vsebnost klorofilov <i>a</i> in <i>b</i> (Kl <i>a+b</i> ) v plavajočih listih vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ) in rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ) .....	39
Sl. 30: Vsebnost antocianov pri plavajočih listih vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ) in rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ) je podana na suho maso (ss) vzorca v relativnih enotah.....	40
Sl. 31: Vsebnost UV-A in UV-B absorbirajočih snovi pri plavajočih listih vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ) in rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ) je podana na površino ( $\text{cm}^2$ ) vzorca v relativnih enotah .....	40
Sl. 32: Odbojna spektra plavajočih listov vodne dresni ( <i>P. amphibium</i> ) in rumenega blatnika ( <i>N. luteum</i> ) .....	42

## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ANOVA	analiza variance
Ant	antociani
e1	listi emerznega tipa 1
e2	listi emerznega tipa 2
E <sub>470</sub> , E <sub>530</sub> , E <sub>645</sub> , E <sub>662</sub>	ekstinkcije pri danih valovnih dolžinah
f. <i>natans</i>	vodna oblika
f. <i>terrestris</i>	kopna oblika
F <sub>m</sub>	maksimalna fluorescenca klorofila <i>a</i> PS II temotno adaptiranega vzorca
F <sub>ms</sub>	maksimalna fluorescenca klorofila <i>a</i> PS II osvetljenega vzorca
F <sub>o</sub>	minimalna fluorescenca klorofila <i>a</i> PS II temotno adaptiranega vzorca
F <sub>s</sub>	minimalna fluorescenca klorofila <i>a</i> PS II osvetljenega vzorca
F <sub>v</sub>	variabilna fluorescenca temotno adaptiranega vzorca
F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	potencialna fotokemična učinkovitost PSII
IR	infrardeče sevanje
Kar	karotenoidi
Kl <i>a</i> , Kl <i>b</i>	klorofil <i>a</i> , klorofil <i>b</i>
n	plavajoči listi
NIR	bližnje infrardeče sevanje (700-1400 nm)
PAR	fotosintezno aktivno sevanje (400-700 nm)
PPFD	gostota fotonskega fluksa fotosintezno aktivnega dela sevanja ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
PSII	fotosistem II
s	potopljeni listi
SD	standardna deviacija
SLA	specifična listna površina
ss	suha masa
t	kopenski listi
t-test	dvosmerni Studentov T - test
UV	ultravijolično sevanje (100 – 400 nm)
UV abs	UV absorbirajoče snovi
UV-A	ultravijolični del svetlobnega spektra z valovno dolžino 320-400 nm
UV-B	ultravijolični del svetlobnega spektra z valovno dolžino 280-320 nm
UV-C	ultravijolični del svetlobnega spektra z valovno dolžino 100-280 nm
Y	YIELD – dejanska fotokemična učinkovitost PSII

## 1 UVOD

Listi imajo poleg morfoloških, biokemijskih in drugih lastnosti tudi svojevrstne optične lastnosti. Pri interakciji lista s svetlobo se je del absorbira, del prehaja skozi list, del pa se odbije od lista. Odbojnost je odvisna od anatomskih, morfoloških, biokemijskih in fizioloških lastnosti pa tudi od fenoloških značilnosti lista (Underwood in sod., 2007; Liew in sod., 2008). Veliko znanega je predvsem o vplivu biokemijskih značilnosti lista na odbojnost, vpliv anatomskih značilnosti (površinska struktura in notranja zgradba lista) pa raziskujejo šele v zadnjem času (Chandrasekharan, 2005).

Odbojna spektroskopija je postala v ekofizioloških študijih precej razširjena, ker je preproste, hitre in nedestruktivne narave, spektrometri pa so natančni in zanesljivi ter prenosni (Levizou in sod., 2005). Odbojnost so veliko raziskovali v povezavi z rastlinskimi stresi (Liew in sod., 2008; Male in sod., 2010). Stres vpliva na optične lastnosti lista preko biokemijskih in fizioloških sprememb v listu. Mnoge študije kažejo, da se rastline odzovejo na akutni stres s povečano odbojnostjo, predvsem v zelenem (okoli 550 nm) in rdečem območju (okoli 700 nm) (Baltzer in Thomas, 2005). Ob poznavanju spektralnih zapisov, ki bi se nanašali na specifičen rastlinski stres, bi lahko nedestruktivno identificirali stres, še preden se pojavijo vidni znaki. Pri tem pa je potrebno najprej razumeti, kako biokemijske in anatomske lastnosti vplivajo na odbojnost, prepustnost in absorptivnost (Liew in sod., 2008).

Poznavanje spektralnih lastnosti listov v območju UV spektra je zelo pomembno tudi zaradi škodljivega UV sevanja. Ker listi relativno močno absorbirajo UV sevanje, je pomen uporabe rastlin pri oblikovanju krajine v mestih precejšen (Yoshimura in sod., 2010).

Pri daljinskem zaznavanju je temeljnega pomena poznavanje odbojnosti vegetacijske odeje. Tu so poleg lastnosti posameznega lista važne tudi lastnosti sestoja oziroma rastlinske združbe (Underwood in sod., 2007). Na ta način so poizkusili kartirati vegetacijo (Belluco in sod., 2006; Underwood in sod., 2007) ali so ocenjevali lastnosti vegetacije (Jusoff, 2008; Pereira in sod., 2004). Proučevali so tudi, če so razlike v spektralnih lastnostih uporabne za določitev vrst (Underwood in sod., 2007; Daughtry in Walthal, 1998).

V diplomski nalogi smo proučevali odbojnost listov vodne dresni (*Polygonum amphibium*) in rumenega blatnika (*Nuphar luteum*). Vodna dresen je amfibijska vrsta, ki razvije v spreminjajočem se vodnem okolju na vodno in kopno okolje prilagojene liste ter prehodne

oblike listov. Rumeni blatnik je vodna vrsta s potopljenimi in plavajočimi listi. Prav zaradi variabilnosti listov v okviru vrste sta rastlini zelo primerni za proučevanje variabilnosti odbojnih spektrov. Odbojnost smo želeli razložiti z izbranimi morfološki, anatomskimi in biokemijskimi lastnostmi listov. Zato smo merili parametre, kot so specifična listna površina, število in velikost listnih rež in trihomov, zgradba lista ter biokemijski parametri. Izmerili smo vsebnost klorofilov in karotenoidov, antocianov in UV absorbirajočih snovi. Preverili pa smo tudi fiziološke parametre lista, izmerili smo fotokemično učinkovitost in transpiracijo.

Namen raziskovalnega dela je bil proučiti podobnosti/razlike med odbojnimi spektri različnih listov, ter ugotoviti, kako različne lastnosti listov vplivajo na spektralne lastnosti in katere oblike listov so si med seboj najbolj podobne. Zanimalo nas je, v kolikšni meri preiskane lastnosti lista razložijo lastnosti odbojnega spektra in ali lahko ločimo različne oblike listov na podlagi spektralne analize.

## 1.1 HIPOTEZE

Predvidevali smo, da se odbojni spektri različnih oblik listov in različnih vrst razlikujejo. Razlike pa so posledica različnih anatomskih, morfoloških in biokemijskih lastnosti ter vitalnosti listov. Pričakovali smo, da je fizične in biokemijske lastnosti lista moč zaznati iz spektralnega zapisa. Pričakovali smo tudi, da si bosta plavajoča lista obeh preučevanih vrst v spektralnih lastnostih najbolj podobna.

## 2 PREGLED OBJAV

Zemeljska površina je v interakciji z elektromagnetnim valovanjem, ki prihaja s Sonca (Underwood in sod., 2007). Sončni spekter sestoji iz UV sevanja (okoli 10 % vse Sončeve radiacije), vidne svetlobe (okoli 50 %) in IR sevanja do okoli 5000 nm (okoli 40 %) (Tome, 2006).

Ultravijolična svetloba (UV) je del sevanja z valovnimi dolžinami od 100 do 400 nm. Spekter UV sevanja delimo na (1) dolgovalovno UV-A območje (320 - 400 nm), (2) UV-B območje (280 - 320 nm) in (3) kratkovalovno UV-C območje (100 - 280 nm). UV-C sevanje se v celoti zadrži v ozonski plasti na robu stratosfere. Ozon zadrži tudi precejšen delež UV-B sevanja, medtem ko UV-A sevanje v celoti prodre do zemeljskega površja (Yoshimura in sod., 2010). UV-A sevanje je večinoma neškodljivo za organizme, medtem ko močno UV-B sevanje poškoduje rastline (Schulze in sod., 2005). Kljub nevarnosti, ki jih prinašajo UV žarki, pa so v zmerni količini, ki prodre skozi ozonski filter do tal, celo potrebni (Yoshimura in sod., 2010). Moč UV sevanja se v naravi ne kaže na tako drastične načine, ker imajo organizmi učinkovite popravljalne sisteme (Schulze in sod., 2005).

Vidna svetloba je del spektra elektromagnetnega valovanja z valovnimi dolžinami od 400 do 700 nm. V grobem je sestavljena iz modre (400 – 500 nm), zelene (500 – 600) in rdeče svetlobe (600 – 700 nm) (Yoshimura in sod., 2010). Vidni del spektra je ekološko posebej pomemben in je določen na podlagi zaznavanja organizmov. Živali ga večinoma zaznajo s fotoreceptorji, rastline pa ga uporabljajo za fotosintezo. Ta del svetlobe, v povezavi z rastlinami, imenujemo zato tudi fotosintezno aktivni del sevanja (PAR).

Infrardeča svetloba (IR) je dolgovalovno sevanje, ki obsega valovne dolžine od 700 do nekaj 1000 nm oziroma nekaj manj kot 1 mm. Z ekološkega vidika je pomembno zato, ker je vir toplote na Zemlji. Del IR spektra, ki zaobjema valovne dolžine od 700 do 1400 nm, imenujemo bližnje infrardeče območje (NIR) (Male in sod., 2010).

Posamezen list je temeljna enota v interakciji s sevanjem (Yoshimura in sod., 2010). Ko se svetloba dotakne listov, se bodisi absorbira, odbije ali prehaja skozi list (Liew in sod., 2008; Male in sod., 2010).

### 2.1 ZNAČILNOSTI ODBOJNIH SPEKTROV

Zeleni listi višjih rastlin imajo nekatere skupne spektralne lastnosti (Underwood in sod., 2007). Zdravi, polno razviti listi imajo relativno nizko odbojnost v vidnem območju (400 - 700 nm) z vrhom v zelenem delu vidnega spektra (550 nm) (Daughtry in Walthal, 1998;

Male in sod., 2010) in relativno visoko odbojnost v bližnjem infrardečem območju (NIR: 700 – 1400 nm) (Yoshimura in sod., 2010). V srednjem infrardečem območju (1400 – 2000) so značilni absorpcijski vrhovi (Chandrasekharan, 2005). Za rastline je značilno, da je odbojnost listov nizka tudi v UV valovnih dolžinah. Pri večini rastlin, ki so jih proučevali, je odbojnost v UV območju manj kot 10%, čeprav je znano, da nekatere vrste odbijejo tudi do 70 % UV sevanja (Filella in Peñuelas, 1999). Yoshimura in sod. (2010) so v študiji pokazali, da imajo višje rastline nizko listno odbojnost (okoli 5 %) skozi celoten UV spekter ne glede na rastlinsko vrsto in sezonske spremembe. V raziskavi avtorjev Filella in Peñuelas (1999) se je odbojnost gibala med 5% (v območju 300 – 400 nm) in 12% (v območju 280 – 300 nm). Caldwell in sod. (1983) domnevajo, da je odbojnost UV-B sevanja listov večine vrst manj kot 5%. To velja za liste brez ali z malo trihomi. Voskasti ali gosto dlakavi listi pa imajo lahko precej večjo UV odbojnost (Holmes in Keiller, 2002).

Odboj od listne površine je prva obramba pred UV žarki, čeprav je epidermalno zmanjšanje UV sevanja z absorpcijo dominantna zaščita pred UV (Filella in Peñuelas, 1999). Tako se UV sevanje bodisi absorbira ali odbije, preden doseže občutljive komponente (Holmes in Keiller, 2002).

Študije kažejo, da je v vidnem območju (400 – 700 nm) odbojnost listov v glavnem odvisna od listnih barvil (klorofili, karotenoidi in antociani), v NIR (700 – 1400 nm) območju od strukture mezofila (Imanishi in sod., 2004), v območju valovnih dolžin od 1400 do 2000 nm pa od vsebnosti vode v tkivu (Liew in sod., 2008). Odbojnost določajo tudi strukturne lastnosti površinskih elementov (Underwood in sod., 2007).

## 2.2 VPLIVI NA ODBOJNI SPEKTER

Na optične značilnosti lista vplivajo anatomske, morfološke, biokemijske in fiziološke lastnosti pa tudi fenološke značilnosti lista (Underwood in sod., 2007; Liew in sod., 2008).

### 2.2.1 Biokemijske značilnosti

#### 2.2.1.1 Barvila

Optične lastnosti lista v vidnem območju so predvsem posledica interakcije svetlobe z barvili (Liew in sod., 2008). Najpomembnejša so fotosintezna barvila, kot so klorofili in karotenoidi (Yoshimura in sod., 2010).

Klorofil je sestavljen iz tetrapirolovega obroča s centralno vključenim magnezijevim ( $Mg^{2+}$ ) ionom, ki je preko ostanka propanojske kisline zaestren s hidrofobnim fitolom (Liew in sod., 2008). Na pirolove obročje so pripete različne stranske skupine. V zgradbi klorofila je obsežen sistem konjugiranih vezi, kar klorofilom omogoča učinkovito absorpcijo vidne svetlobe, zato so idealne molekule za zbiranje svetlobne energije. Poznamo klorofil *a* in *b*, ki ju najdemo v večini zelenih rastlin (Boyer, 2005). Pojavljata se v razmerju (*a/b*) približno 3 proti 1 na fotosinteznih membranah (Yoshimura in sod., 2010).

Absorpcijski spekter klorofilne molekule kaže dva absorpcijska maksimuma v rdeči (Q band) in modri (Soret band) regiji ter absorpcijski minimum pri 550 nm, zaradi česar so listi videti zeleni. Prisotnost metilne skupine v klorofilu *a* na mestu aldehidne skupine v klorofilu *b* vpliva na razliko v absorpciji v rdeči in modri regiji (Liew in sod., 2008). Absorpcijski maksimum klorofila *a* je pri 670 nm v rdečem in 430 nm v modrem delu spektra, medtem ko je absorpcijski maksimum klorofila *b* pri 650 nm v rdečem in pri 460 nm v modrem delu spektra (Underwood in sod., 2007).

Velikost in oblika odbojne krivulje je v tesni korelaciji z vsebnostjo klorofila. Nižja koncentracija klorofila, ki je pogosto rezultat pomanjkanja nutrientov, zmanjša absorpcijo v območju absorpcije klorofilov (Male in sod., 2010), kar vpliva na povečanje odbojnosti (Baltzer in Thomas, 2005). To je opazno predvsem v vidni regiji. Daughtry in Walthal (1998) pa dodajata, da so največje razlike pri valovnih dolžinah okoli 550 nm in 700 nm, kar kaže, da vsebnost klorofila najbolj vpliva na odbojnost v vidnem delu spektra. Pomanjkanje klorofila poveča odbojnost tudi v NIR regiji (Liew in sod., 2008). Nasprotno, večja vsebnost klorofila znižuje odbojnost. S povečevanjem vsebnosti klorofila se odbojnost najprej hitro zmanjšuje, potem pa zmeraj počasneje proti asimptoti (Baltzer in Thomas, 2005). Ker ima klorofil v fotosintezi ključno vlogo, je vsebnost klorofila (in s tem odbojnost) dober pokazatelj fiziološkega stanja rastline (Liew in sod., 2008). Razlika med maksimalno klorofilno absorpcijo (675 - 700 nm) v rdeči regiji in minimalno klorofilno absorpcijo (525 - 575 nm) v zeleni regiji je lahko pomemben znak. Če je ta razlika relativno velika, je vegetacija vitalna, in obratno (Male in sod., 2010).

Prispevek fotosinteznih barvil k listni odbojnosti v vidni regiji je dobro poznan. Absorpcijski spekter fotosinteznih barvil pa se razteza tudi v UV-A in UV-B spektralno območje. UV sevanje, ki ga absorbirata klorofila *a* in *b*, se sprosti v obliki fluorescence. Fotosintezna barvila torej prispevajo k listni odbojnosti tudi v UV regiji, z absorpcijo UV sevanja prispevajo k zaščiti rastline (Yoshimura in sod., 2010).



Degradacijo klorofila v feofitin najdemo v listih, ki so pod stresom zaradi dejavnikov, kot so onesnaženje zraka in kisel dež, pa tudi v obarvanih listih jeseni. Feofitin (= klorofil *a* brez osrednjega magnezijevega iona) ima maksimalno absorpcijo pri valovni dolžini 409 nm (Imanishi in sod., 2004).

Poleg klorofilov, ki imajo glavno vlogo pri absorpciji svetlobe, vsebujejo fotosintezne celice tudi pomožna barvila, katerih naloga je absorpcija svetlobe tistih valovnih dolžin, ki jih klorofili ne absorbirajo (Boyer, 2005). Najpomembnejši so karotenoidi. Med karotenoide uvrščamo karotene (npr.  $\beta$ -karoten) in ksantofile (npr. lutein, violaksantin, neoksantin) (Yoshimura in sod., 2010). Za vse karotenoide je značilno, da imajo 40 ogljikovih atomov in konjugirane dvojne vezi. So rumene, rdeče ali oranžne barve (Boyer, 2005). Tudi karotenoidi prispevajo k optičnim lastnostim lista. Večina jih absorbira svetlobo valovnih dolžin med 400 in 500 nm, torej v modrem delu vidnega spektra. V modrem območju torej absorbirajo klorofili in karotenoidi, v rdečem pa le klorofili (Yoshimura in sod., 2010).

Zelen list absorbira do 95 % UV sevanja predvsem zaradi prisotnih UV absorbirajočih snovi, kot so flavonoidi in antociani. Akumulirajo se v kutikuli, prvi plasti epidermalnih celic in tudi v subepidermalnem tkivu. Učinkovito zmanjšajo UV sevanje. Tako zaščitijo notranja tkiva pred škodljivim učinkom (Yoshimura in sod., 2010). Pri tem ne ovirajo fotosinteze (Filella in Peñuelas, 1999), saj minimalno absorbirajo fotosintezne valovne dolžine (Holmes in Keiller, 2002). Nizka odbojnost lista v UV območju je v manjši meri tudi posledica absorpcije barvil, kot so klorofili in karotenoidi (Yoshimura in sod., 2010). Karotenoidi so vključeni v neposredno zaščito fotosistemov pred UV-B. UV-B je potencialni oksidativni dejavnik, za karotenoide kot tudi flavonoide pa se je pokazalo, da učinkovito uničujejo aktivne kisikove vrste (Filella in Peñuelas, 1999).

Rdeči antociani absorbirajo v zeleni regiji, zato je pri rdečih listih odbojnost tam manjša kot pri zelenih listih (Yoshimura in sod., 2010). Antociani absorbirajo tudi UV svetlobo, zato so zaščitna barvila (Schulze in sod., 2005).

#### 2.2.1.2 Celuloza in lignin

Trije absorpcijski pasovi, ki so povezani z absorpcijo celuloze in lignina, so: 1652 – 1778 nm, sredina pasu pri 1700 nm; 2030 – 2218 nm, sredina pasu pri 2100 nm (povezan s celulozo); 2238 – 2366 nm, sredina pasu pri 2300 nm (povezan z ligninom). Absorpcijo, ki jo povzročata celuloza in lignin, je moč zaznati v senescentnem materialu, suhem listju in steblih (Underwood in sod., 2007).

### 2.2.2 Anatomske in morfološke značilnosti

Poleg biokemijskega značaja lista vplivajo na odbojnost tudi lastnosti listne površine in notranja struktura lista. Tako palisadne celice kot tudi konveksne epidermalne celice in kutikularni vosek na povrhnjici sodelujejo pri interakciji svetlobe z listom. List z dorziventralno strukturo je navzven omejen z zgornjo in spodnjo povrhnjico. Epidermalne celice v povrhnjici so sklenjene, med njimi ni prostora, razen pri stomatalnih porah. Pore so na obeh povrhnjicah, predvsem pa na spodnji – abaksialni strani. Epidermalne celice ne vsebujejo kloroplastov, izjemi sta celici zapiralki ob listni reži (Liew in sod., 2008). Od oblike in lastnosti povrhnjice je odvisna odbojnost. Gladka (ali bolj konkavna) epidermalna plast vodi v difuzno odbojnost («isotropic or Lambertian reflectance» – enaka odbojnost v vseh smereh). Konveksnost/konkavnost epidermalnih celic določa tudi sposobnost lista za usmerjanje svetlobe v notranjost lista. Gladka povrhnjica ima slabo sposobnost fokusiranja svetlobe, medtem ko konveksne celice bolje usmerjajo svetlobo in tako povečajo možnost, da jo klorofili, ki se nahajajo v globljih celičnih plasteh, izkoristijo (Chandrasekharan, 2005).

Epidermalne celice pogosto obdaja voskasta plast, imenovana kutikula, predvsem na zgornji – adaksialni strani lista. Kutikula ima lahko gladko ali hrapavo površino. Debelina kutikule je odvisna od vrste in okoljskih razmer ter ima zelo pomembno vlogo pri odbojnosti listov (Liew in sod., 2008). Debelejša je kutikula, večji je odboj (Baltzer in Thomas, 2005). Študije so pokazale, da je kutikula, ki je debelejša od 1  $\mu\text{m}$ , eden izmed ključnih dejavnikov odboja v NIR regiji (Liew in sod., 2008). V raziskavi Baltzer-ja in Thomas-a (2005) je imela debelina kutikule izmed anatomskih lastnosti največji vpliv na optične lastnosti v vidni regiji. Odboj je tudi rezultat odsotnosti sestavin v kutikularni plasti, ki absorbirajo (Chandrasekharan, 2005).

Voski in trihomi imajo pomembno vlogo pri interakciji rastlin z okoljem. Značilni so za rastline, ki rastejo v svojevrstnih okoljskih razmerah s pomanjkanjem vode in močnim sončnim sevanjem. Pomembni so zato, ker blažijo obremenitve, ki jih rastline trpijo zaradi močnega sevanja in zmanjšujejo izgubo vode preko evapotranspiracije. Pomen voskov in trihomov je tudi v obrambi proti predaciji in boleznim. Poleg tega kaže, da so voski in trihomi zmožni absorpcije UV-B sevanja (Holmes in Keiller, 2002).

Voski so strukturno zelo različni, njihov nastanek pa je odvisen od okoljskih razmer. Holmes in Keiller (2002) ugotavljata, da imajo listi z voskasto površino v primerjavi z listi z drugačno površino znatno večjo odbojnost tako v UV kot vidnem spektru. Ko so odstranili vosek, se je odbojnost v UV in vidnem spektru zmanjšala, in sicer na podobno

raven kot pri nevostkastih listih, zmanjšanje odbojnosti pri voskastih listih je bilo večje v UV kot pa v vidni regiji. Postopek odstranjevanja površinskega sloja, ki so ga opravili na vseh listih, je imel neznatne vplive na odbojnost nevostkastih listov. Neselektivnost odboja, torej učinkovito odbijanje tako UV kot vidne svetlobe, namiguje na manjši prispevek voskov pri zaščiti rastlin pred UV-B sevanjem kot pa epidermalne absorpcije. Kljub temu so številne raziskave pokazale, da imajo voski zaščitno vlogo proti UV-B. Zanimivo je, da se odbojnost voskastih listov preučevanih rastlin precej razlikuje, ko pa so odstranili vosek, so pri vseh izmerili podobno odbojnost. To nakazuje na kemijske oziroma morfološke razlike voskov (Holmes in Keiller, 2002).

Tudi trihomi so med rastlinami pogosti, prav tako so strukturno precej različni. Lahko so eno- ali večcelični, različnih dolžin in širin, lahko so iz živega ali mrtvega tkiva, kalcificirani ali vsebujejo silikate. Njihov nastanek je ravno tako odvisen od okolja in vrste (Holmes in Keiller, 2002). Trihomi so lahko prisotni na obeh straneh lista (Liew in sod., 2008). Lahko znatno spremenijo odbojnost (Levizou in sod., 2005). Na optične lastnosti lahko vplivajo bodisi z odbojem ali z absorpcijo, če vsebujejo absorbirajoče snovi. Filella in Peñuelas (1999) sta pri večji gostoti trihomov izmerila nižjo odbojnost v območju od 320 do 400 nm. Trihomi so tako absorbirali UV-B sevanje. Listi s trihomi so imeli precej variabilen odbojni spekter. Visoki odbojnosti v območju vidnih valovnih dolžin ni nujno sledila visoka odbojnost v UV delu spektra. Tako so imele tri rastline z dlakavimi (puhastimi) listi več kot 13 % odbojnost v vidni regiji, a najnižjo odbojnost v UV regiji (manjšo kot 2,5 %). Listi brez dlačic so imeli nizko odbojnost v obeh območjih spektra (UV: 5,3–9,2%; vidna svetloba: 4,7–8,4%). Listi z dlačicami so imeli v UV območju (3,9–5,4%) izrazito nižjo odbojnost kot gladki, toda podobno odbojnost v vidni svetlobi (3,8–7,1%). Ko so odstranili trihome z listne povrhnjice, se je odbojnost v vidni regiji zmanjšala. Dlakasti listi so bolj učinkoviti pri odbijanju svetlobe daljših valovnih dolžin kot pa UV sevanja (Holmes in Keiller, 2002). Liew in sod. (2008) ugotavljajo, da trihomi močno povečajo površinski odboj v vidni regiji, njihov vpliv na NIR območje pa je različen. Po odstranitvi laskov se je odbojnost v vidnem območju precej zmanjšala (za 16% - 73%), medtem ko se je v IR območju le za malo zmanjšala (za 8% - 13%) ali celo povečala (za 4%) (Levizou in sod., 2005).

Rastline imajo različne strukture listov, zato se razlikujejo tudi v odboju vidne in bližnje IR svetlobe. Zgradba lista vpliva na optične lastnosti, ker določa porazdelitev svetlobe v listu (Baltzer in Thomas, 2005). Mezofil dorziventralnega (bifacialnega) tipa listov je sestavljen iz stebričastega (palisadnega) in gobastega tkiva. Mezofil ima lahko tudi enotno tkivo (Yoshimura in sod., 2010). Specializirane parenhimatske celice palisadnega tkiva so postavljene pravokotno na listno povrhnjico in vsebujejo številne kloroplaste. Svetloba, ki jo zberejo in usmerijo epidermalne celice, prehaja do palisadnih celic. Te delujejo kot cevi,

ki razširjajo svetlobo naprej v spodnje tkivo. Pod palisadnim tkivom je gobasto tkivo s prosto razporejenimi celicami od sferičnih do nepravilnih oblik, med katerimi so zračni prostori. Te celice vsebujejo manj kloroplastov. Na prodiranje svetlobe skozi list in stopnjo sipanja svetlobe v listu vplivajo tako oblika palisadnih in gobastih celic kot tudi debelina gobastega tkiva in površina mezofilnih celic, ki je izpostavljena zračnim prostorom (Liew in sod., 2008).

Struktura mezofila vpliva predvsem na optične lastnosti v NIR območju (700 -1400 nm) (Imanishi in sod., 2004). Znano je, da imajo zeleni listi v NIR območju zelo visoko odbojnost (Yoshimura in sod., 2010), kar pripisujemo zračnim prostorom v gobastem tkivu. Razlog je v različnih lomnih količnikih (zrak (zračni prostori) – voda (celice)), posledica je sipanje svetlobe in šibka absorpcija v NIR območju (Liew in sod., 2008). Mladi listi imajo običajno tanjšo strukturo in manj z zrakom napoljenih prostorov v listu, zato je manj sprememb v lomnih količnikih in zato imajo mladi listi nižjo odbojnost v IR območju (Chandrasekharan, 2005). Optične lastnosti listov v bližnjem IR delu spektra so tudi posledica pomanjkanja absorpcijske sestavine, saj fotosintezna barvila višjih rastlin v NIR območju ne absorbirajo (Yoshimura in sod., 2010). Zgradba lista pa vpliva tudi na druga območja sevalnega spektra. Yoshimura in sod. (2010) ugotavljajo, da imajo tanjši listi običajno večjo odbojnost v vidni regiji, medtem ko so izmerili univerzalno nizko (okoli 5 %) odbojnost UV svetlobe ne glede na listno strukturo.

Z listno strukturo so povezane tudi raziskave na eno- in dvokaličnicah. Porozna, dorziventralna mezofilna struktura večine zelnatih dvokaličnic prispeva k visoki odbojnosti v NIR območju; koruza in večina enokaličnic imajo kompaktno mezofilno strukturo, kar prispeva k nizki odbojnosti v NIR območju (Daughtry in Walthal, 1998).

### 2.2.3 Vsebnost vode

Vsebnost vode v listu močno vpliva na obliko odbojne krivulje izven vidnega območja (Male in sod., 2010). Značilnost vode je, da absorbira v srednjem infrardečem območju (1400 do 2000 nm) (Liew in sod., 2008; Chandrasekharan, 2005). Absorpcijska vrhova sta okoli 1400 in 1900 nm (Liew in sod., 2008). Pomanjkanje vode v listu zmanjša absorpcijo v srednjem infrardečem območju (Chandrasekharan, 2005), zaradi česar se poveča odbojnost. Vpliv vode na spekter v srednjem IR območju prevladuje takrat, ko je list svež. Nasprotno pa v suhem listu prevladujejo vplivi biokemijskih lastnosti, ker vpliva vode ni več (Underwood in sod., 2007). Pomanjkanje vode najverjetneje vpliva tudi na odbojnost v NIR območju, posredno prek strukturnih sprememb (Imanishi in sod., 2004). Underwood in sod. (2007) pišejo, da voda absorbira tudi pri 900 in 1200 nm. Odboj suhega lista je večji kot odboj svežega lista tudi v vidnem spektru (Liew in sod., 2008).

### 3 MATERIALI IN METODE

#### 3.1 OBMOČJE RAZISKAV

Terensko delo je potekalo na območju Cerknškega jezera (Rešeto).

V južnem delu Slovenije je območje dinarskega sveta, ki ga sestavljajo kraške planote in podolja. Eno izmed njih je Notranjsko podolje, ki ga tvorijo številna kraška polja. Cerknško jezero se nahaja na dnu Cerknškega polja (Kranjc, 2003). Jezerska kotanja je obkrožena s hribovji; na jugozahodu se vzpenjajo Javorniki, ki so del visokega krasa, na vzhodu pa pobočja Slivnice (Gaberščik, 1991).

Jezero je posebno po svojem presihanju. Polnjenje in praznjenje omogočajo klimatske, hidrološke in geomorfološke značilnosti območja. Najpomembnejše so kraški značaj, velika količina padavin, obsežno povodje in topnost kamninske podlage. Matična kamnina je karbonat – večinoma apnenec, ki na nekaterih predelih prehaja v dolomit (Gaberščik in Urbanc-Berčič, 2003). Dno Cerknškega jezera pokrivajo kvartarne in recentne naplavine (Kranjc, 2003). Po skupni letni količini padavin spada širše območje Cerknškega jezera v bolj namočen del Slovenije. Glavni vzrok je neposredna lega za razmeroma visokim grebenom Javornikov. Izstopata dva padavinska maksimuma, primarni v novembru in sekundarni v juniju ter zimski minimum februarja in januarja (Zupančič, 2003). S klimatskimi zakonitostmi sovpadajo hidrološke značilnosti. Jezero v običajnem obsegu (gladina na koti 550 m) se pojavi navadno dvakrat letno, spomladi in pozno jeseni – pozimi; dva meseca na leto (med avgustom in oktobrom) pa je v povprečju suho. Jezerska gladina pa zaradi vremenskih razmer precej niha, jezero lahko izostane ali zamudi, se lahko napolni večkrat letno ali voda sploh ne odteče popolnoma. Glede na količino vode ima Cerknško jezero 80% kraških in 15% površinskih dotokov. Edini površinski in vsaj v svojem zgornjem delu nekraški dotok na Cerknško polje je Cerknščica. Del vode iz pritokov se ob nizkem vodostaju zbira v Strženu – glavnem toku, ki se vije preko jezera. Odtok Cerknškega jezera je v celoti kraški. To so ponori, ponikve, požiralniki, grezi, estavele, vrtače, rupe. Največje ponikve najdemo v osrednjem delu polja, to so Rešeto, Sitarica, Bečki, Vodonos, Retje, Velika, Srednja in Mala Ponikva (Kranjc, 2003).

Nihanje vodne gladine in izmenjava sušnih in mokrih obdobj sta vplivala na razvoj posebnega ekosistema. Izoblikovala se je svojevrstna življenjska združba, ki je prilagojena na periodičnost vode. Primarni producenti so se na ritmično pojavljanje jezera prilagodili na različne načine, z veliko morfološko in fiziološko plastičnostjo ter s prožnostjo reproduktivnih procesov. Uspešnost in pojavljanje vrst omogočajo bodisi kratki življenjski cikli, kozmopolitski značaj ali pa prilagoditve, s katerimi premostijo spremembe v okolju

(Gaberščik in Urbanc-Berčič, 2003). Cerkniško jezero z obilico hranilnih snovi, z ustreznimi temperaturami vode in ugodnim svetlobnim režimom zaradi majhne globine ustvarja ugodne razmere za uspevanje vodnih vrst (Martinčič in Leskovar, 2003). Število pravih vodnih vrst pa je zaradi presihanja majhno (Martinčič, 2003). Prisotne so predvsem tiste vrste, ki imajo hiter razvoj. Presihajoča narava Cerkniškega jezera namreč časovno močno skrajšuje njihovo vegetacijsko obdobje. To traja praviloma le tri do štiri mesece (Martinčič in Leskovar, 2003). Podvodne in plavajoče rastlinske vrste so tako omejene na predele, kjer se občasno pojavlja globlja voda. Najpogostejši predstavniki so *Potamogeton lucens*, *Nuphar luteum*, *Myriophyllum spicatum*, *Utricularia intermedia* in *Chara aspera*. Močvirska vegetacija in vegetacija mokrotnih travnikov prekriva večji del jezerske površine (Gaberščik in Urbanc-Berčič, 2003). Prevladujoči predstavnik je navadni trst (*Phragmites australis*), ki zaradi visoke pokrovnosti pusti le malo prostora drugim vrstam.

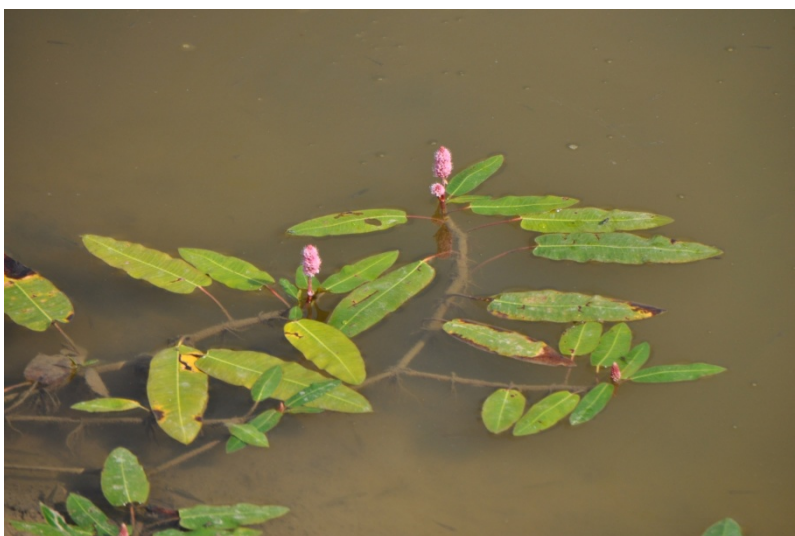
V spremenljivem okolju se odlično znajdejo amfibijske rastline. Kot že ime pove, lahko rastejo tako v vodi kot na kopnem. Razvile so različne načine, ki jim omogočajo uspešno preživetje v okolju, kjer je nihanje vode pogosto in nepredvidljivo (Germ, 2003). Velika fenotipska plastičnost jim omogoča prilagoditve na biokemijskem, fiziološkem in morfološkem nivoju (Gaberščik in Urbanc-Berčič, 2003). Amfibijske rastline začnejo svoj razvoj v vodi. Ko jezero presahne in se konča akvatična faza, makrofiti (vodne vrste) propadejo, amfibijske vrste pa nadaljujejo svoj razvoj na kopnem (Martinčič in Leskovar, 2003). Tla vsebujejo tudi v terestričnem obdobju dovolj vode za njihovo uspevanje (Martinčič, 2003).

### 3.2 PREDMET RAZISKAV

Proučevali smo rastlinski vrsti vodna dresen (*Polygonum amphibium*) in rumeni blatnik (*Nuphar luteum*).

Vodna dresen (*Polygonum amphibium* L.) je amfibijska vrsta. Spada v družino dresnovk (*Polygonaceae*). Je zelnata trajnica z močno koreniko in enostavnimi, spiralasto nameščenimi listi. Razlikujemo vodno (f. *natans*) in kopno (f. *terrestris*) obliko rastline. Poganjki vodnih primerkov zrastejo do 3 m v dolžino, največkrat od 1 do 2 m, odvisno od globine vode. Na koncu poganjkov se razvijejo gladki in bleščeči plavajoči listi, ponavadi jih je 4 – 5. So temnozeleno barve, spodaj svetlejši, listno dno je prisekano do plitvo srčasto. Kopni primerki zrastejo od 40 do 64 cm v višino in imajo podolgovato-suličaste liste, ki so na bazi topi. Zaradi poraščenosti z dlačicami so sivo-zelene barve (Bordjan, 2008; Gaberščik, 1991; Martinčič, 2007). Pojav, ko se pri eni rastlinski vrsti razvije več tipov listov, kjer je vsak prilagojen drugemu okolju, imenujemo heterofilija (Maberly in Spence, 1989). Pokončna stebela se razvijejo iz poleglih poganjkov vodnih primerkov, ko

nastopi terestrična faza. Vodna dresen v gradientu voda-kopno oziroma v počasnem nižanju vodne gladine razvije tudi številne »prehodne« oblike rastlin. Cvetovi so drobni, rdečkasti, združeni v gosta, klasasta socvetja na vrhu poganjkov. Socvetja so dvignjena nad vodno gladino. Vodna dresen cveti od junija do septembra (Martinčič in Leskovar, 2003; Gaberščik, 1991; Martinčič, 2007). Rastišča vodne dresni so vlažna in mokra mesta. Najdemo jo v mirnih zalivih jezer, v počasi tekočih vodah in jarkih, včasih tudi na peščenih brežinah in na vlažnih travnikih. Pojavlja se raztreseno v nižinah in v spodnjem montanskem pasu. Razširjena je v severni, zmerni in južni Evraziji in v severni Ameriki. Najdemo jo tudi širom po Sloveniji (Gaberščik, 1991).



Slika 1: Vodna dresen (vodni poganjki), 6.8.2010

Vrsto rumeni blatnik (*Nuphar luteum* (L.) Sibth. & Sm.) prištevamo med vodne rastline (makrofite), ki potrebujejo globljo vodo za rast in razvoj (Martinčič, 2003). Makrofiti so makroskopske rastline, ki rastejo popolnoma ali delno potopljene v vodi (Mechora, 2009). Tudi v precej plitvi vodi se še obdržijo, če pa voda povsem odteče, makrofiti propadejo, njihov razvoj pa se običajno nadaljuje v vegetacijski sezoni naslednjega leta (Martinčič, 2003). Rumeni blatnik (*Nuphar luteum*) spada v družino lokvanjev (Nymphaeaceae) (Martinčič, 2007). Je zelnata trajnica z valjasto koreniko, ki je lahko dolga tudi do deset metrov. Listi so veliki in celorobi, na bazi globoko srčasti, lahko so potopljene ali plavajoči. Prvi so mehki, na robovih valoviti, lahko so globoko pod vodno gladino. Drugi so trdi, rahlo svetleči se. Rumeni blatnik cveti od junija do septembra. Cvetovi se odpirajo nad vodno gladino in so rumeni, veliki do 4 cm v premeru. Tako listi kot tudi cvetovi so dolgopecljati, izraščajo iz korenike. Plavajoči listi se pojavijo kasneje v sezoni, s koreniko so povezani z do več metrov dolgimi stebelci. Listne reže so na zgornji strani plavajočih listov. Blatnik igra pomembno vlogo v močvirjih. Služi kot skrivališče ribam in ostalim vodnim živalim. Vpliva na kakovost vode, saj veže hranila. Raste v stoječih in počasi

tekočih vodah, do globine 3 m. V Sloveniji razpršeno naseljuje močvirja, plitve ribnike in počasi tekoče reke. Na območju Cerkniškega jezera ga najdemo predvsem v strugah Stržena, Lipsenjščice in Žerovniščice ter v nekaterih globljih depresijah oziroma jamah, kjer ostane voda dalj časa. Ogrožen je zaradi zasipavanja in osuševanja močvirij ter zaradi urejanja bregov (Bordjan, 2008).



Slika 2: Rumeni blatnik, 6.8.2010

### 3.3 METODE DELA

Delo je potekalo v naravnem okolju in v laboratoriju od avgusta do oktobra 2010. Na terenu smo izmerili transpiracijo in fotokemično učinkovitost vzorčnih rastlin. Nato smo nabrali rastline za nadaljnje raziskave, jih zaprli v vrečke, da bi ostale čimbolj sveže, in jih pripeljali v laboratorij. Tam smo opravili meritve odbojnih spektrov, biokemijske analize ter anatomske in morfološke analize. Vsako meritev smo izvedli v petih paralelkah.

Ker se med vodno in kopno obliko vodne dresni v obdobju spreminjanja vodne gladine pojavljajo tudi prehodne oblike rastline, smo v raziskavo vključili poleg obeh skrajnih tudi dve prehodni (emerzni) obliki. Tako smo v okviru ene rastlinske vrste proučevali štiri tipe listov na gradientu voda-kopno.

Prehodni obliki je bilo težje opredeliti, saj so prehodi med oblikami bolj ali manj zvezni. Po daljšem opazovanju smo izbrali obliki, za kateri je bilo možno reči, da je imela prva več značilnosti vodne, druga pa več značilnosti kopne oblike. Pri rumenem blatniku smo primerjali plavajoče in potopljene liste. Vzorčni listi so bili zeleni, polno razviti. Pazili smo, da so bili listi v okviru enega tipa med seboj čimbolj podobni, razviti, enake velikosti in barve ter vitalni zaradi primerljivosti podatkov.



### 3.3.1 Merjenje odbojnih spektrov

Odbojne spektre smo merili s spektrofotometrom Jaz Modular Optical Sensing Suite (Ocean Optics, Inc., Dunedin, Florida, USA). Svetlobni vir UV-VIS-NIR (DH-2000, Ocean Optics, Inc., FL, USA) smo preko optičnega kabla QP600-1-SR-BX (Ocean Optics, Inc., Dunedin, Florida, USA) povezali s sfero ISP-30-6-R (Ocean Optics, Inc., FL, USA), ki smo jo pri merjenju postavili pravokotno na zgornjo listno površino. Sfero smo preko drugega optičnega kabla povezali s spektrofotometrom. Spektrofotometer pa smo priključili na računalnik. Najprej smo izmerili referenčni spekter, tako da smo svetlobni žarek usmerili na bel standard (Ocean Optics, Inc., FL, USA). S tem smo inštrument kalibrirali na 100% odbojnost. Izmerili smo še temni spekter, tako da smo izklopili svetlobni vir. Sledile so meritve odbojnih spektrov na listih. Le-ti so bili izračunani kot razmerje med posameznim spektrom in referenčnim spektrom. S svetlobnim žarkom smo osvetlili zgornjo stran vzorčnega lista, v osrednjem delu lista in hkrati ne na listni žili. S spektralnimi zapisi smo operirali v računalniškem programu SpectraSuite (Ocean Optics, Inc., FL, USA). Odbojni spekter je zaobjemal valovne dolžine od 280 do 887 nm. Interval vzorčenja je bil različen: od 30 do 40 stotink nm – torej 3x na en nm. Pri predstavitvi rezultatov smo natančnost zmanjšali na cca. 5 nm, da so bili spektri bolj pregledni. Za vsakega od štirih tipov pri vodni dresni smo izmerili odbojni spekter na petih listih, prav tako smo opravili meritve v petih paralelkah pri obeh tipih listov rumenega blatnika. Pri statističnih analizah smo za lažjo obdelavo in primerjavo spektre razdelili na različna območja: UV-B, UV-A, vijolično, modro, zeleno, rumeno, rdeče in NIR.

### 3.3.2 Fiziološke meritve

Fiziološke meritve smo opravili v naravnih razmerah ob sončnem vremenu v opoldanskem času. Jakost fotosintezno aktivnega spektra sevanja (PPFD) je bila večja ali enaka 1700  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , temperatura zraka 25-30 °C ter relativna zračna vlaga 30-45 %. Spremljali smo fluorescenco klorofila *a* fotosistema II (PSII), ki je merilo stresa pri rastlini (modulacijski fluorometer OS-500, OPTI-SCIENCES, Tyngsboro, MA, USA). Potencialno fotokemično učinkovitost PSII ( $F_v/F_m$ ) smo merili na listih, ki smo jih zatemnili za 15 min in nato osvetlili s saturacijskim pulzom bele svetlobe (PPFD  $\approx 8000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ; trajanje 0,8 s). Dejansko fotokemično učinkovitost PSII (Y) smo merili na osvetljenih listih, ki smo jih osvetlili s pulzom bele svetlobe saturacijske jakosti (PPFD  $\approx 9000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ; trajanje 0,8 s). Potencialno ( $F_v/F_m$ ) in dejansko (Y) fotokemično učinkovitost smo izrazili v relativnih enotah (Formula 1) (Schrieber in sod., 1995).

*Formula*

... (1)

$$F_v/F_m \text{ (relativna enota)} = (F_m - F_o) / F_m$$

$$Y \text{ (relativna enota)} = (F_{ms} - F_s) / F_{ms}$$

$F_o$  in  $F_m$  – minimalna in maksimalna fluorescenca temotno adaptiranega vzorca

$F_s$  in  $F_{ms}$  – minimalna in maksimalna fluorescenco svetlobno adaptiranega vzorca

Transpiracijo smo merili s porometrom DECAGON (Model SC-1, USA). Transpiracijo ocenjujemo neposredno preko spremembe vsebnosti vode v določeni časovni enoti ali posredno z izračunavanjem iz razlike v parcialnih vodnih tlakih in skupne difuzijske upornosti.

### 3.3.3 Anatomske in morfološke analize

#### 3.3.3.1 Specifična listna površina

Iz sveže nabranih listov smo naluknjali krožce z znano površino, ki so služili kot vzorci za določitev suhe mase ter nadaljnje laboratorijske biokemijske analize. Za vsak tip lista smo naredili 5 vzorcev, vsak vzorec pa je vseboval 5 krožcev s premerom 8 mm. Sveže vzorce smo stehali. Suho maso vzorcev (mg ss) smo določili po 24 urah sušenja pri temperaturi 105 °C (sušilnik Sterimatic ST-11, Instrumentaria, Zagreb). Tehtali smo z miligramsko tehtnico Sartorius. Specifično listno površino smo izračunali kot količnik med površino vzorca in njegovo suho maso [ $\text{cm}^2 \text{mg}^{-1}$ ].

#### 3.3.3.2 Zgradba lista

Zgradbo lista smo proučevali s pomočjo prerezov sveže nabranih listov, iz katerih smo naredili mikroskopske preparate. Na objektno stekelce smo kanili kapljico vode ali laktoglicerola in vanjo položili nekaj prerezov. Nato smo jih pokrili s krovnim stekelcem ter pogledali pod svetlobnim mikroskopom (Olympus CX41, 100×). S pomočjo računalniškega programa Cell (CellSens, Olympus, Japan) smo izmerili debelino lista, debelino palisadnega in gobastega tkiva ter debelino povrhnjice. Postopek smo ponovili na petih listih pri vsakem tipu listov.

### 3.3.3.3 Število in velikost listnih rež in trihomov

Število ter velikost listnih rež in trihomov smo določali tako na spodnji kot na zgornji površini lista, zopet na petih listih pri vsakem tipu listov. Na sveže nabranih listih smo naredili t.i. replike: na delček površine lista smo nanесли lak in počakali, da se je posušil. Nato smo ga odstranili skupaj s povrhnjico in položili v kapljico vode ali laktoglicerola, ki smo jo že prej kanili na objektno stekelce. Preparat smo pokrili s krovnim stekelcem in ga pogledali pod svetlobnim mikroskopom (Olympus CX41, 400×). Z računalniškim programom Cell (CellSens, Olympus, Japan) smo prešteli število rež oziroma trihomov na enoto površine (mm<sup>2</sup>) in izmerili dolžino listne reže oziroma trihoma.

### 3.3.4 Biokemijske analize

Vsebnosti klorofilov *a* in *b* ter karotenoidov smo določali po metodi, ki sta jo opisala Lichtenthaler in Buschmann (2001a, 2001b). Vzorce, ki smo jih shranili v zamrzovalniku (5× po 3 krožce s premerom 8 mm), smo strli v terilnici, ekstrahirali v 7 ml acetona (100 % (v/v)), centrifugirali (3 min, 4000 obratov) (Sigma 2-16 PK, Germany) ter odčitali volumen ekstraktov. Ekstinkcije smo izmerili z UV/VIS spektrometrom (Lambda 25, Perkin-Elmer, Norwalk, CT, USA) pri valovnih dolžinah 470, 645 in 662 nm. Vsebnosti klorofilov (Kl *a+b*) ter karotenoidov (Kar) smo izrazili na suho maso in površino vzorca (Formula 2).

Vsebnost antocianov smo določali po Khare-ju in Guruprasad-u (1993). Vzorce, ki smo jih shranili v zamrzovalniku (5× po 3 krožce s premerom 8mm), smo strli v terilnici, ekstrahirali v 7 ml ekstrakcijskega medija (metanol : HCl (37 %) = 99:1 (v/v)), centrifugirali (3min, 4000 obratov) (Sigma 2-16 PK, Germany) ter odčitali volumen ekstraktov. Vzorce smo shranili v temi (24 ur, 3-5 °C). Ekstinkcije pri 530 nm smo izmerili z UV/VIS spektrometrom (Lambda 25, Perkin-Elmer, Norwalk, CT, USA). Vsebnost antocianov (Ant) smo izrazili v relativnih enotah (Formula 3).

Formula ... (2)

$$\begin{aligned} \text{Kl } a \text{ [mg g}^{-1} \text{ ss; mg cm}^{-2}] &= c_a * V * 10^{-3} * \text{ss}^{-1}; & c_a * V * 10^{-3} * \text{P}^{-1} & c_a = 11,24 E_{662} - 2,04 E_{645} \\ \text{Kl } b \text{ [mg g}^{-1} \text{ ss; mg cm}^{-2}] &= c_b * V * 10^{-3} * \text{ss}^{-1}; & c_a * V * 10^{-3} * \text{P}^{-1} & c_b = 20,13 E_{645} - 4,19 E_{662} \\ \text{Kar [mg g}^{-1} \text{ ss; mg cm}^{-2}] &= c_{(x+c)} * V * 10^{-3} * \text{ss}^{-1}; & c_{(x+c)} * V * 10^{-3} * \text{P}^{-1} & \\ & & c_{(x+c)} &= (1000 E_{470} - 1,9 c_a - 63,14 c_b) / 214 \end{aligned}$$

Formula ... (3)

$$\text{Ant (relativna enota)} = E_{530} * V * \text{ss}^{-1}; \quad E_{530} * V * \text{P}^{-1}$$

E – ekstinkcija pri dani valovni dolžini; V – prostornina ekstrakta [ml]; ss – suha masa [g] oz. P – površina vzorca [cm<sup>2</sup>]

Vsebnost UV-B in UV-A absorbirajočih snovi smo določali po Caldwell-u (1968). Sveže vzorce smo strli v terilnici, ekstrahirali v 7 ml ekstrakcijskega medija (metanol : destilirana voda : HCl (37 %) = 79:20:1 (v/v/v)), centrifugirali (10min, 10 000 obratov) (Sigma 2-16 PK, Germany) ter odčitali volumen ekstraktov. Ekstinkcije pri valovnih dolžinah od 280 do 400 nm smo določili spektrofotometrično (UV/VIS spektrofotometer, Lambda 12, Perkin-Elmer, Norwalk, CT, USA). Vsebnosti UV absorbirajočih snovi smo izračunali kot integral ekstinkcijskih vrednosti in jih izrazili v relativnih enotah na maso oziroma površino lista (Formula 4).

*Formula*

... (4)

UV abs (relativna enota) =  $I * V^{-1} * ss^{-1}$ ;  $I * V^{-1} * P^{-1}$

I – integral ekstinkcijskih vrednosti v intervalu 280 - 320 nm (UV-B abs) ter 320 - 400 nm (UV-A abs);  
 V – prostornina ekstrakta [ml]; ss – suha masa [g] oz. P – površina vzorca [cm<sup>2</sup>]

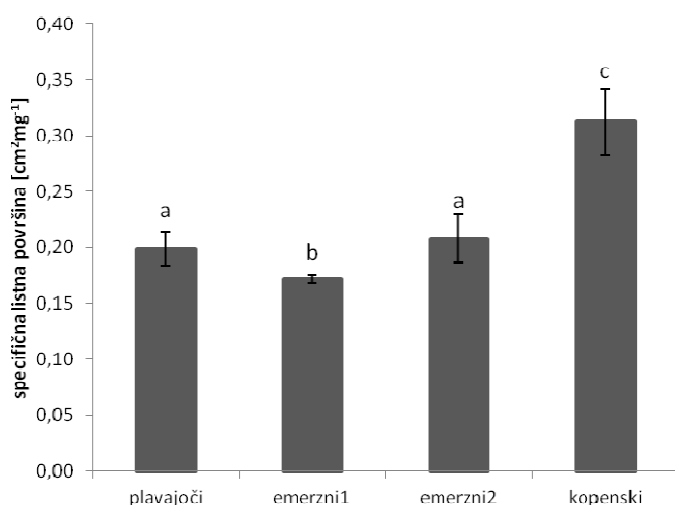
### 3.3.5 Statistična obdelava podatkov

Iz pridobljenih podatkov smo izračunali povprečja in standardne deviacije ter rezultate predstavili v grafih. Na podatkih smo opravili analizo variance (ANOVA). Liste vodne dresni (*Polygonum amphibium*) smo primerjali z enosmerno analizo variance (one-way ANOVA), kadar so bili podatki normalno porazdeljeni oziroma s Kruskal-Wallis testom, kadar porazdelitev ni bila normalna. Značilnost razlik med potopljenimi in plavajočimi listi rumenega blatniku (*Nuphar luteum*) ter medvrstnimi plavajočimi listi smo določili s Studentovim t-testom (normalno porazdeljeni podatki) oziroma z Mann-Whitney-evim testom (porazdelitev ni normalna). Normalnost podatkov smo testirali s Shapiro-Wilk testom. Stopnjo povezanosti med posameznimi lastnostmi in odbojnostjo listov smo izrazili s Spearman-ovim korelacijskim koeficientom (r). Testi so bili narejeni v statističnem programu SPSS Statistics 19.0. Klustersko analizo smo naredili v Excelu z Bray-Curtis-ovim indeksom podobnosti. Statistično različni rezultati so pri grafičnih predstavitev označeni z različnimi črkami. V preglednicah statistične razlike prikazujejo zvezdice. Verjetnost značilnih razlik smo označili s  $p \leq 0,05$  in  $p \leq 0,01$ .

## 4 REZULTATI

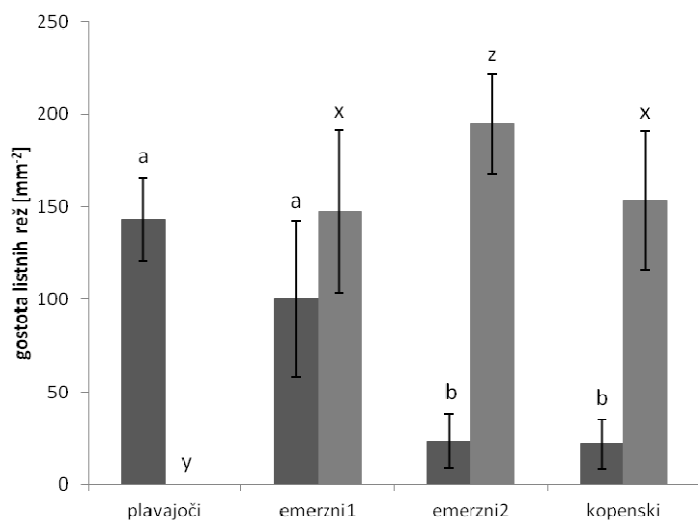
### 4.1 VODNA DRESEN

Največjo specifično listno površino imajo kopenski listi vodne dresni. Z opazno razliko jim sledijo emerzni listi 2, tesno zatem pa plavajoči listi. Najmanjšo specifično listno površino smo izmerili pri emerznem tipu 1. Posamezni tipi listov se v specifični listni površini značilno razlikujejo ( $p \leq 0,05$ ), le plavajoči in emerzni tip listov 2 sta statistično podobna.

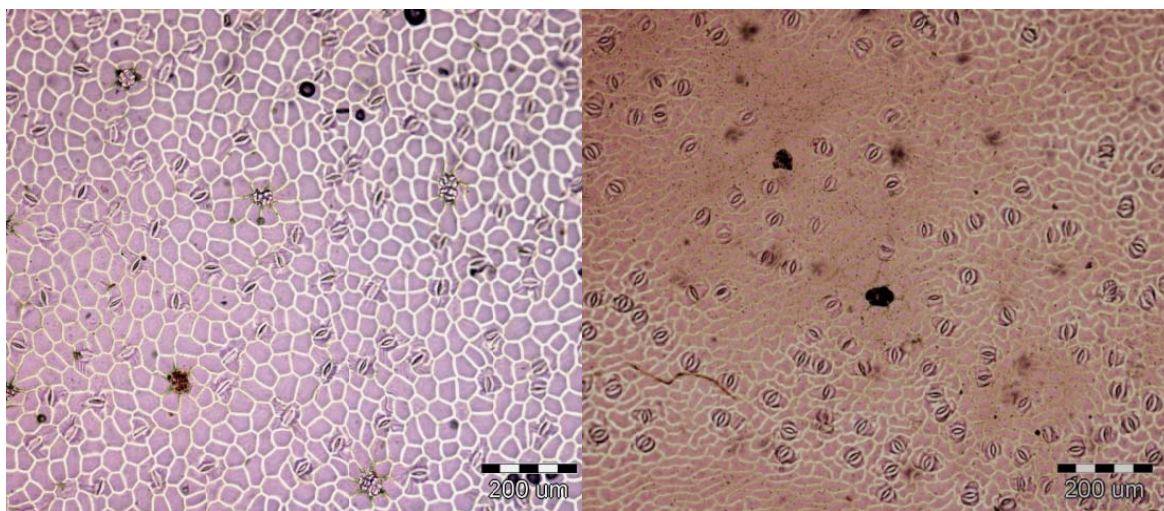


Slika 3: Specifična listna površina [cm<sup>2</sup>mg<sup>-1</sup>] različnih tipov listov pri vodni dresni (*P. amphibium*); prikazane so povprečne vrednosti ± SD; n = 5; različne črke nad stolpci označujejo statistično značilne razlike med posameznimi tipi listov (rezultati testa ANOVA)

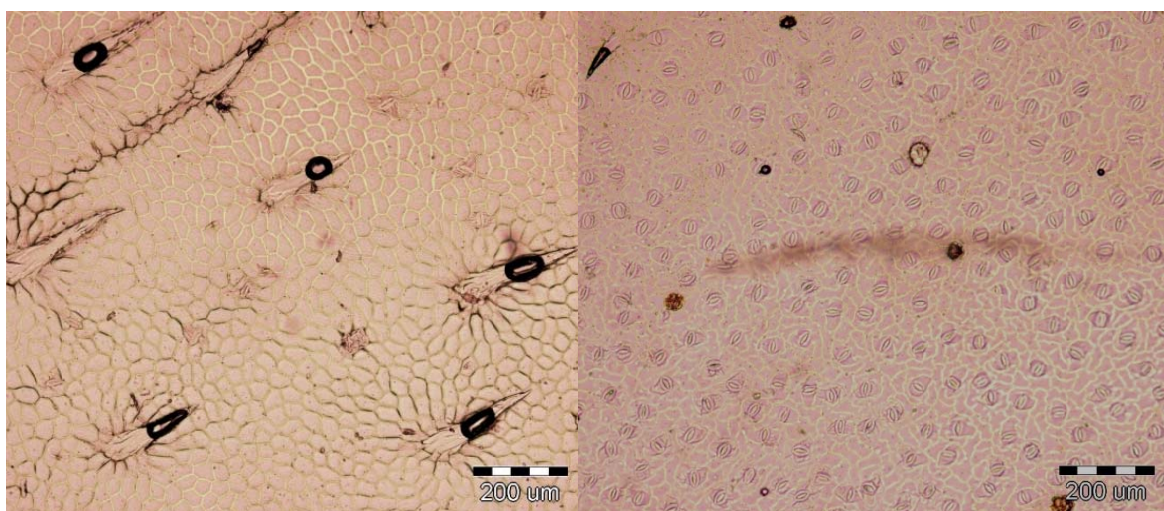
Listne reže se pri plavajočih listih pojavljajo le na zgornji povrhnjici, medtem ko so pri vseh ostalih tipih na obeh povrhnjicah. Gostota listnih rež na zgornji povrhnjici je največja pri plavajočih listih in se zmanjšuje preko obeh emerznih tipov do kopenskih listov. Največjo gostoto listnih rež na spodnji povrhnjici imajo v povprečju listi emerznega tipa 2, sledijo jim kopenski listi in listi emerznega tipa 1. V skupnem številu rež (spodnja + zgornja povrhnjica) prednjačita oba emerzna tipa, predvsem emerzni tip 1. Plavajoči listi imajo skupno najmanj rež. Najmanjša razlika med gostoto listnih rež na zgornji in spodnji povrhnjici je pri emerznem tipu lista 1. Posamezni tipi listov imajo značilno različno gostoto listnih rež na zgornji povrhnjici, razen parov plavajoči – emerzni tip 1 ter kopenski – emerzni tip 2. Prav tako se listi večinoma statistično razlikujejo v gostoti listnih rež na spodnji povrhnjici.



Slika 4: Gostota listnih rež [mm<sup>-2</sup>] na zgornji (■) in spodnji (■) povrhnjici pri različnih tipih listov vodne dresni (*P. amphibium*); prikazane so povprečne vrednosti ± SD; n = 5; črki a, b označujeta statistično značilne razlike v gostoti listnih rež na zgornji povrhnjici, črke x, y, z označujejo statistično značilne razlike v gostoti listnih rež na spodnji povrhnjici, različne črke nad stolpci označujejo statistično značilne razlike med posameznimi tipi listov (rezultati testa ANOVA)

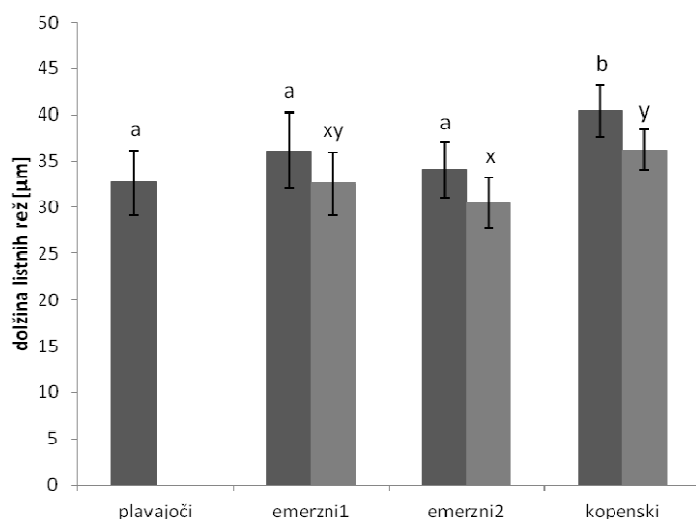


Slika 5: Zgornja in spodnja povrhnjica listov emerznega tipa 1 pri vodni dresni



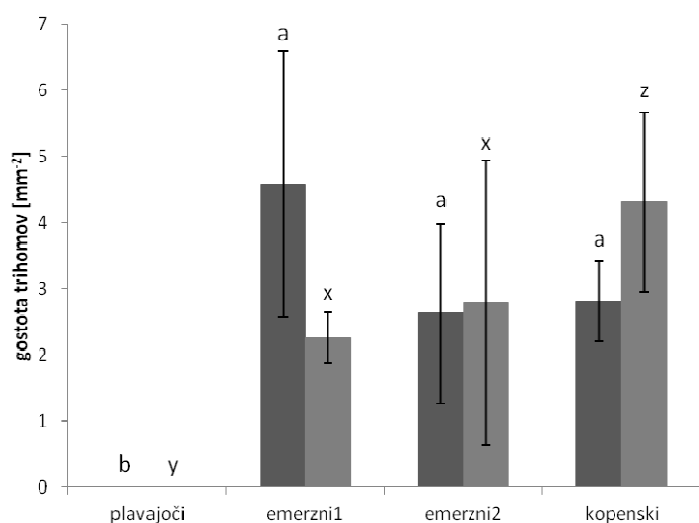
Slika 6: Zgornja in spodnja povrhnjica listov emerznega tipa 2 pri vodni dresni

Vsi tipi listov imajo v povprečju daljše listne reže na zgornji kot na spodnji povrhnjici. Dolžina listnih rež na zgornji povrhnjici se povečuje od plavajočih listov preko emerznih tipov 2 in 1 do kopenskih listov. Tudi dolžina listnih rež na spodnji povrhnjici se povečuje preko emerznih tipov 2 in 1 do kopenskih listov. V dolžini listnih rež na zgornji povrhnjici se kopenski tip značilno razlikuje od ostalih tipov listov ( $p \leq 0,01$ ), ki so statistično podobni. Dolžina listnih rež na spodnji povrhnjici je statistično različna le pri paru kopenski – emerzni tip 2.

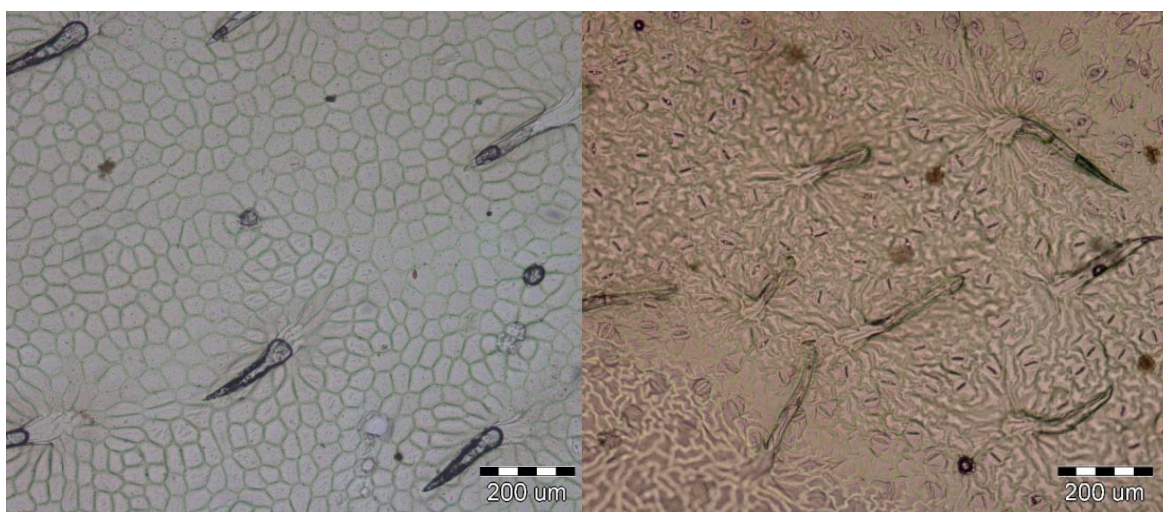


Slika 7: Dolžina listnih rež [µm] na zgornji (■) in spodnji (■) povrhnjici pri različnih tipih listov vodne dresni (*P. amphibium*); prikazane so povprečne vrednosti ± SD; n = 5; črki a, b označujeta statistično značilne razlike v dolžini listnih rež na zgornji povrhnjici, črki x, y označujeta statistično značilne razlike v dolžini listnih rež na spodnji povrhnjici, različne črke nad stolpci označujejo statistično značilne razlike med posameznimi tipi listov (rezultati testa ANOVA)

Gostota trihomov se na obeh povrhnjicah povečuje od emerznega tipa 1 preko emerznega tipa 2 do kopenskih listov. Kopenski listi imajo največjo gostoto trihomov, in sicer na spodnji povrhnjici. Plavajoči listi trihomov nimajo. Vrednosti za emerzni tip 1 so verjetno prevelike, saj je bilo na voljo premalo paralelek, ki bi imele trihome. Oba emerzna tipa in kopenski tip listov imajo statistično podobno gostoto trihomov na zgornji povrhnjici. V gostoti trihomov na spodnji povrhnjici se kopenski tip značilno razlikuje od ostalih dveh tipov ( $p \leq 0,01$ ), ki imata trihome.



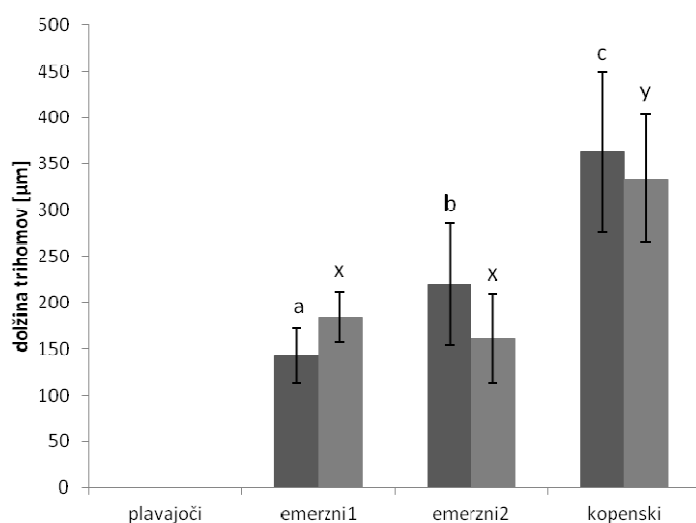
Slika 8: Gostota trihomov [mm<sup>-2</sup>] na zgornji (■) in spodnji (▨) povrhnjici pri različnih tipih listov vodne dresni (*P. amphibium*); prikazane so povprečne vrednosti ± SD; n = 5; črki a, b označujeta statistično značilne razlike v gostoti trihomov na zgornji povrhnjici, črke x, y, z označujejo statistično značilne razlike v gostoti trihomov na spodnji povrhnjici, različne črke nad stolpci označujejo statistično značilne razlike med posameznimi tipi listov (rezultati testa ANOVA)



Slika 9: Zgornja in spodnja povrhnjica kopenskih listov vodne dresni



Trihomi zgornje povrhnjice so najdaljši pri kopenskih listih, sledijo jim listi emerznega tipa 2, najkrajši pa so pri listih emerznega tipa 1. Trihomi spodnje povrhnjice so prav tako najdaljši pri kopenskih listih, sledijo pa jim listi emerznega tipa 1 in 2. Vrednosti za liste emerznega tipa 1 verjetno niso prave, saj je bilo na voljo premalo paralelek, ki bi imele trihome. Posamezni tipi listov imajo značilno različno dolžino trihomov na zgornji povrhnjici. Statistično podobnost v dolžini trihomov na spodnji povrhnjici opazimo le med emerznima tipoma.



Slika 10: Dolžina trihomov [µm] na zgornji (■) in spodnji (▒) povrhnjici pri različnih tipih listov vodne dresni (*P. amphibium*); prikazane so povprečne vrednosti ± SD; n = 5; črke a, b, c označujejo statistično značilne razlike v dolžini trihomov na zgornji povrhnjici, črki x, y označujeta statistično značilne razlike v dolžini trihomov na spodnji povrhnjici, različne črke nad stolpci označujejo statistično značilne razlike med posameznimi tipi listov (rezultati testa ANOVA)

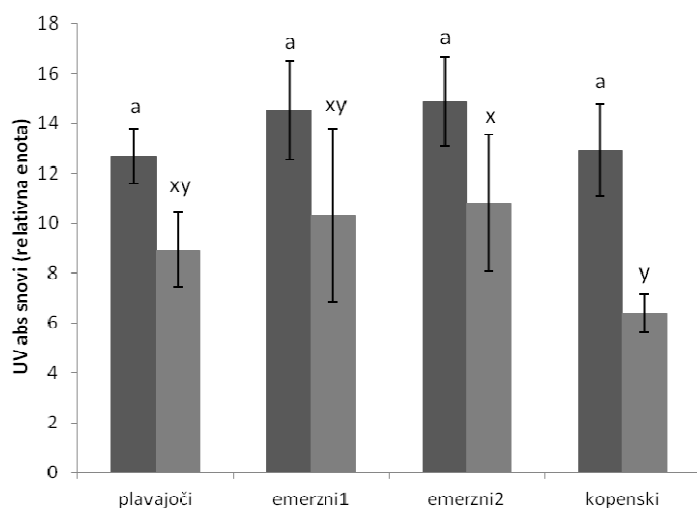
Debelina lista se med različnimi tipi listov le malenkostno razlikuje, opazno izstopajo listi emerznega tipa 1, ki se tudi statistično razlikujejo od ostalih tipov. Najtanjši so v povprečju kopenski listi. Največjo debelino palisadnega tkiva imajo listi emerznega tipa 1, sledijo jim plavajoči listi, zatem listi emerznega tipa 2 in kopenski listi. Pri plavajočih listih obsega palisadno tkivo slabo polovico debeline lista, le malenkost več pri listih emerznega tipa 1, medtem ko se delež palisadnega tkiva v listu preko emerznega tipa 2 zmanjša na dobrih 40 % pri kopenskih listih.

Vsebnost klorofila je največja pri kopenskih listih, kjer doseže vrednost dobrih 11 mg g<sup>-1</sup> ss. Sledijo jim listi emerznega tipa 1 in 2, plavajoči listi pa imajo v povprečju najmanjšo vsebnost klorofila (≈ 9 mg g<sup>-1</sup> ss). Klorofil *a*, za katerega velja enak vrstni red, dosega pri vseh tipih listov vsaj 2-kratne vrednosti, pri kopenskih listih pa skoraj 3-kratne vrednosti klorofila *b*. Vrednosti klorofila *b* se gibajo okoli 3 mg g<sup>-1</sup> ss, največje so pri listih

emerznega tipa 2, nato 1, sledijo jim kopenski in plavajoči listi. Posamezni tipi listov imajo večinoma statistične podobne vsebnosti klorofilov.

Pri vsebnosti karotenoidov značilno izstopajo kopenski listi ( $\approx 2,5 \text{ mg g}^{-1} \text{ ss}$ ), ostali tipi listov imajo statistične podobne vrednosti karotenoidov ( $\approx 1,7 \text{ mg g}^{-1} \text{ ss}$ ). Vsebnost antocianov, ki smo jo izrazili na suho maso (ss) v relativnih enotah, narašča od plavajočih listov preko emerznih tipov do kopenskih listov.

Vsi tipi listov imajo več UV-A kot UV-B absorbirajočih snovi, kopenski listi 1-krat več, ostali pa približno 0,5-krat več. Največ UV-A kot tudi UV-B absorbirajočih snovi imajo listi obeh emerznih tipov. Najmanjšo vsebnost UV-B absorbirajočih snovi imajo kopenski listi, medtem ko imajo UV-A absorbirajočih snovi le za malenkost več kot plavajoči listi. Posamezni tipi listov imajo statistično podobno vsebnost UV-A absorbirajočih snovi. Tudi v vsebnosti UV-B absorbirajočih snovi se večinoma statistično ne razlikujejo.



Slika 11: Vsebnost UV-A (■) in UV-B (■) absorbirajočih snovi pri različnih tipih listov vodne dresni (*P. amphibium*) je podana na površino vzorca ( $\text{cm}^2$ ) v relativnih enotah; prikazane so povprečne vrednosti  $\pm$  SD;  $n = 5$ ; črka a označuje razlike v vsebnosti UV-A abs snovi, črki x, y označujeta statistično značilne razlike v vsebnosti UV-B abs snovi, različne črke nad stolpci označujejo statistično značilne razlike med posameznimi tipi listov (rezultati testa ANOVA)

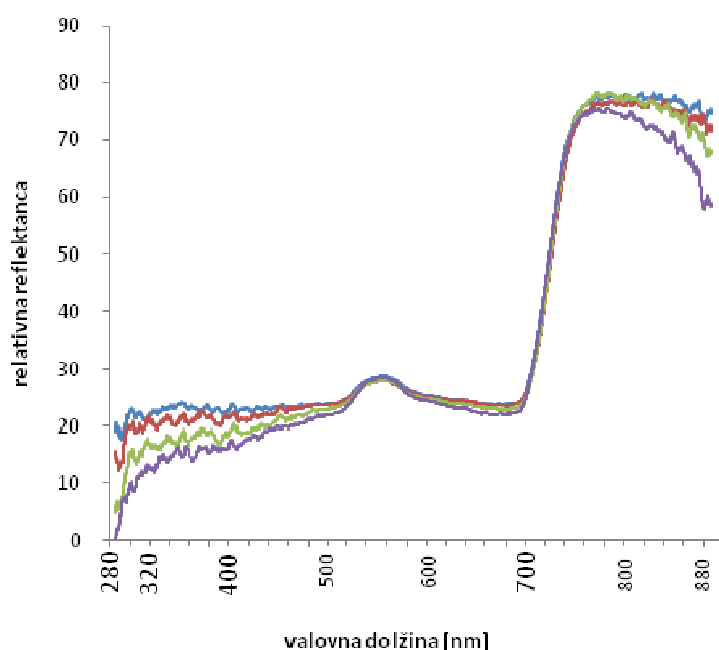
Preglednica 1: Morfološki, anatomski in biokemijski parametri listov vodne dresni (*P. amphibium*); prikazane so povprečne vrednosti  $\pm$  SD; n = 5

<b>parameter</b>	<b>plavajoči</b>	<b>emerzni1</b>	<b>emerzni2</b>	<b>kopenski</b>
Specifična listna površina [cm <sup>2</sup> mg <sup>-1</sup> ]	0,2 $\pm$ 0,02	0,172 $\pm$ 0,003	0,21 $\pm$ 0,02	0,313 $\pm$ 0,03
Debelina lista [ $\mu$ m]	243 $\pm$ 31	274 $\pm$ 26	241 $\pm$ 29	235 $\pm$ 22
Debelina palisadnega tkiva [ $\mu$ m]	116,6 $\pm$ 14,6	133,7 $\pm$ 15,5	105,1 $\pm$ 17,1	96,1 $\pm$ 16,9
<b>Zgornja povrhnjica</b>				
Gostota trihomov [mm <sup>-2</sup> ]	0	4,6 $\pm$ 2	2,6 $\pm$ 1,3	2,8 $\pm$ 0,6
Dolžina trihomov [ $\mu$ m]	0	142 $\pm$ 31	228 $\pm$ 63	367 $\pm$ 77
Gostota listnih rež [mm <sup>-2</sup> ]	146 $\pm$ 13	118 $\pm$ 31	20 $\pm$ 11	29 $\pm$ 13
Dolžina listnih rež [ $\mu$ m]	34,6 $\pm$ 2,4	35 $\pm$ 4	33,8 $\pm$ 2,8	41,3 $\pm$ 2,8
<b>Spodnja povrhnjica</b>				
Gostota trihomov [mm <sup>-2</sup> ]	0	2,3 $\pm$ 0,4	2,3 $\pm$ 1,3	4 $\pm$ 1,3
Dolžina trihomov [ $\mu$ m]	0	184 $\pm$ 27	161 $\pm$ 48	323 $\pm$ 67
Gostota listnih rež [mm <sup>-2</sup> ]	0	135 $\pm$ 30	192 $\pm$ 19	136 $\pm$ 26
Dolžina listnih rež [ $\mu$ m]	0	32,7 $\pm$ 3,6	30,8 $\pm$ 2,5	36,1 $\pm$ 2,1
<b>Biokemijski parametri</b>				
Klorofil a [mg/g ss]	6,19 $\pm$ 1,62	6,79 $\pm$ 1,02	6,41 $\pm$ 0,67	8,2 $\pm$ 0,72
Klorofil b [mg/g ss]	2,83 $\pm$ 0,44	3,05 $\pm$ 0,45	3,15 $\pm$ 0,48	2,85 $\pm$ 0,3
Karotenoidi [mg/g ss]	1,76 $\pm$ 0,51	1,746 $\pm$ 0,29	1,73 $\pm$ 0,06	2,48 $\pm$ 0,12
Antociani [relativna enota]	120 $\pm$ 15	131 $\pm$ 8	148 $\pm$ 7	160 $\pm$ 17
UV-B absorbirajoče snovi [relativna enota]	8,94 $\pm$ 1,5	10,29 $\pm$ 3,47	10,8 $\pm$ 2,75	6,39 $\pm$ 0,77
UV-A absorbirajoče snovi [relativna enota]	12,7 $\pm$ 1,1	14,5 $\pm$ 2	14,9 $\pm$ 1,8	12,9 $\pm$ 1,9

Preglednica 2: Značilnosti razlik med različnimi tipi listov pri vodni dresni (*P. amphibium*), podane s pomočjo enosmerne analize variance (one-way ANOVA) oziroma neparametričnega Kruskall-Wallis testa; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ ; ns – ni značilno

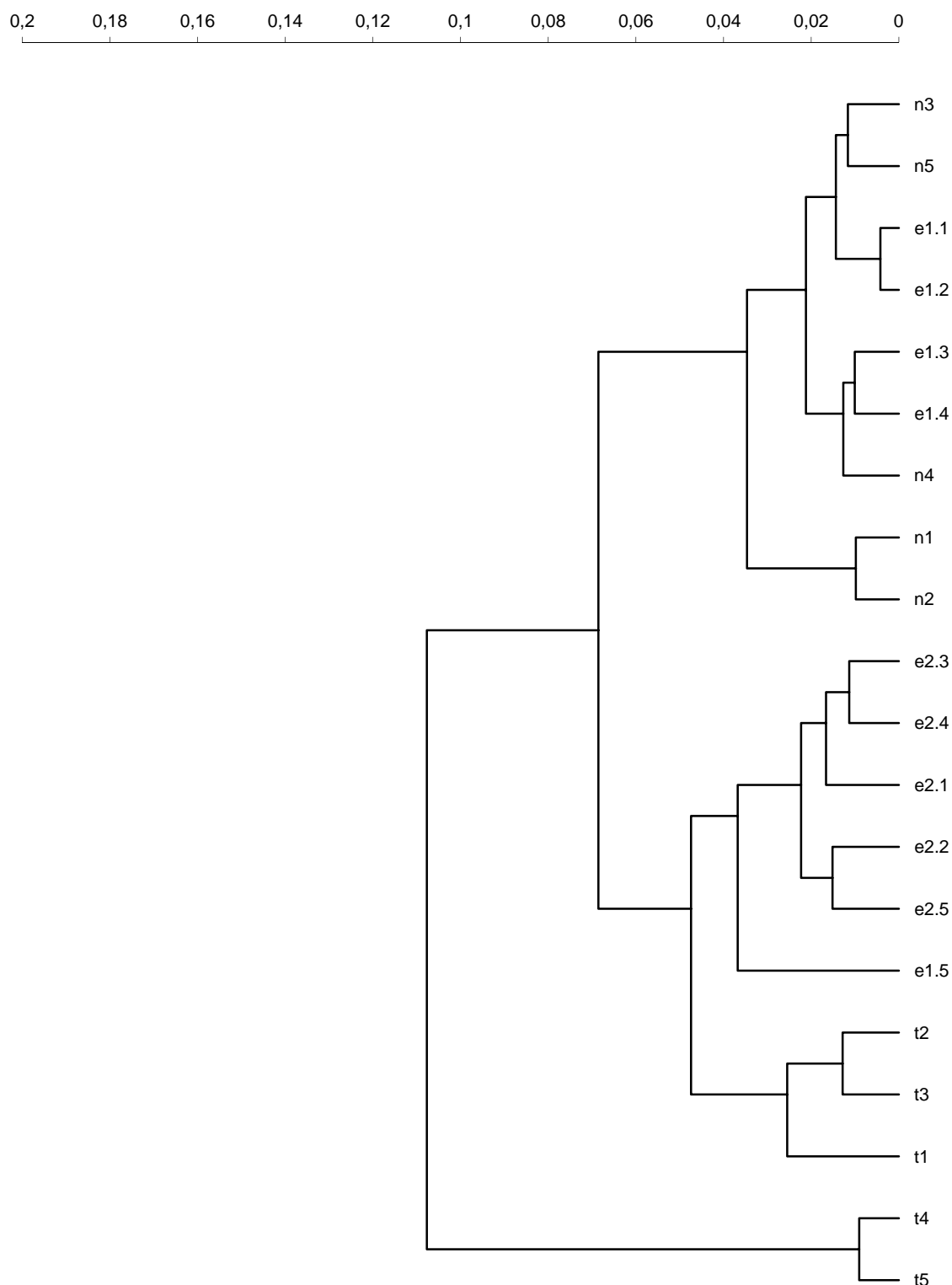
parameter	plavajoči - emerzni1	plavajoči - emerzni2	plavajoči - kopenski	emerzni1 - emerzn2	emerzni1 - kopenski	emerzni2 - kopenski
Specifična listna površina	*	ns	*	*	*	*
Debelina lista	*	ns	ns	*	*	ns
Debelina palisadnega tkiva	**	ns	**	**	**	ns
<b>Zgornja povrhnjica</b>						
Gostota trihomov	**	**	**	ns	ns	ns
Dolžina trihomov	**	**	**	**	**	**
Gostota listnih rež	ns	*	**	*	**	ns
Dolžina listnih rež	ns	ns	**	ns	**	**
<b>Spodnja povrhnjica</b>						
Gostota trihomov	**	**	**	ns	**	**
Dolžina trihomov	**	**	**	ns	**	**
Gostota listnih rež	*	*	*	*	ns	*
Dolžina listnih rež	*	*	*	ns	ns	*
<b>Biokemijski parametri</b>						
Klorofil <i>a</i>	ns	ns	*	ns	ns	ns
Klorofil <i>b</i>	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Karotenoidi	ns	ns	**	ns	**	**
Antociani	ns	*	**	ns	*	ns
UV-B absorbirajoče snovi	ns	ns	ns	ns	ns	*
UV-A absorbirajoče snovi	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Odbojnost listov je relativno nizka v vidnem območju (400 - 700 nm) in relativno visoka v bližnjem infrardečem območju (700 – 887 nm). Nizko odbojnost opazimo tudi v UV valovnih dolžinah (280 – 400 nm). Odbojni spektri so najbolj podobni v območju zelene svetlobe in v območju prehoda med nizko odbojnostjo v rdeči svetlobi in visoko odbojnostjo v NIR območju. V območju zelene svetlobe opazimo le za malenkost večjo odbojnost tako pri kopenskih kot tudi pri plavajočih listih. Precej različna je odbojnost v UV in NIR območju, pa tudi v modrem in rdečem delu vidnega spektra. V UV območju imajo kopenski listi v povprečju najnižjo odbojnost, sledijo jim listi emerznega tipa 2 in 1, nato plavajoči listi. Podobno velja za modri del vidnega spektra, le da se tu grafa plavajočih listov in listov emerznega tipa 1 deloma prekrivata. Tudi v rdečem delu vidnega spektra se grafa plavajočih listov in listov emerznega tipa 1 v večji meri prekrivata, njuna odbojnost pa je večja kot pri listih emerznega tipa 2 in kopenskih listih. V NIR območju imajo kopenski listi zopet najnižjo odbojnost, sledijo jim ostali listi, katerih spektri se deloma prekrivajo.



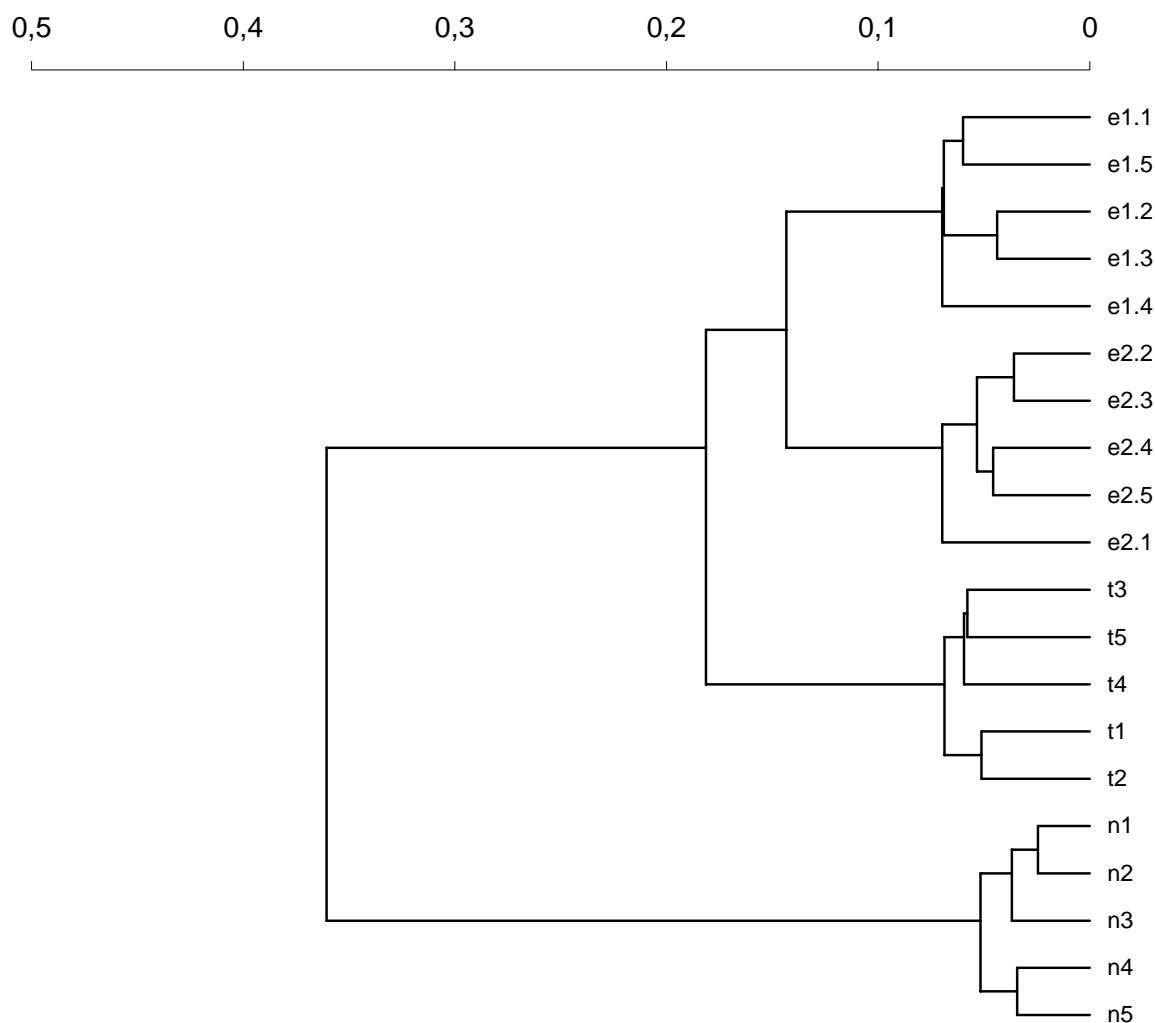
Slika 12: Odbojni spektri plavajočega (—), emerznega1 (—), emerznega2 (—) in kopenskega (—) tipa listov vodne dresni (*P. amphibium*); prikazane so povprečne vrednosti; n = 5

Dendrogram podobnosti odbojnih spektrov pri različnih tipih listov vodne dresni prikazuje združevanje plavajočih listov in listov emerznega tipa 1. V drugi skupini se združujejo listi emerznega tipa 2, katerim so najbolj podobni kopenski listi.



Slika 13: Dendrogram podobnosti odbojnih spektrov pri različnih tipih listov vodne dresni (*P. amphibium*) (n1-5 plavajoči listi, e1.1-5 emerzni1, e2.1-5 emerzni2, t1-5 kopenski listi); podan s pomočjo klastrske analize z Bray-Curtis-ovim indeksom podobnosti

Dendrogram podobnosti, ki vključuje vse merjene parametre, prikazuje združevanje listov, ki pripadajo istemu tipu na gradientu voda-kopno. Listi so si torej v okviru istega tipa podobni v vseh merjenih parametrih skupaj. Poleg tega sta si najbolj podobna oba emerzna tipa listov, katerima se pridružujejo kopenski listi, plavajoči tip lista pa se najbolj razlikuje od ostalih tipov.



Slika 14: Dendrogram podobnosti različnih tipov listov vodne dresni (*P. amphibium*) (n1-5 plavajoči listi, e1.1-5 emerzni1, e2.1-5 emerzni2, t1-5 kopenski listi); vključeni so vsi merjeni parametri, tudi odbojnost; graf je podan s pomočjo klastrske analize z Bray-Curtis-ovim indeksom podobnosti

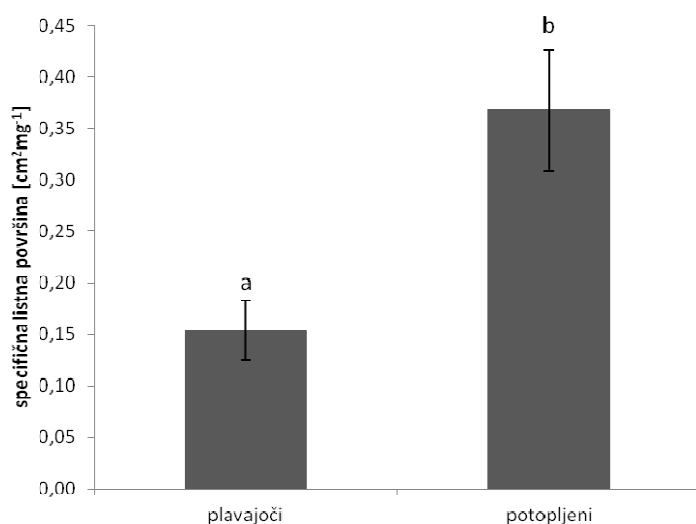
Rezultati korelacijske analize kažejo, da so vsa spektralna območja močno povezana s povprečno in skupno dolžino trihomov. SLA in debelina lista ter palisadnega tkiva so v povezavi z določenimi območji odbojnega spektra. SLA in debelina palisadnega tkiva sta značilno povezana z UV območjem ter vijoličnim in rdečim delom vidnega območja. Debelina lista je povezana zgolj z UV-B in rdečim območjem. Edini biokemijski parameter, ki je povezan z odbojnostjo, je vsebnost antocianov.

Preglednica 3: Vrednosti Spearman-ovega korelacijskega koeficienta ( $r$ ), ki prikazujejo stopnjo povezanosti odbojnosti in posameznih lastnosti listov pri vodni dresni (*P. amphibium*); prikazani so le parametri s statistično značilno stopnjo povezanosti z odbojnostjo;  $n = 20$ ; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$

parameter	UV-B	UV-A	vijolična	modra	zelena	rumena	rdeča	NIR
SLA	-0,64**	-0,60**	-0,61**	-0,34	-0,14	-0,42	-0,58**	-0,39
Povprečna dolžina trihomov	-0,91**	-0,93**	-0,93**	-0,80**	-0,47*	-0,67**	-0,81**	-0,75**
Skupna dolžina trihomov	-0,76**	-0,81**	-0,80**	-0,73**	-0,36	-0,52*	-0,60**	-0,59**
Debelina palisadnega tkiva	0,76**	0,70**	0,70**	0,33	0,13	0,35	0,64**	0,39
Debelina lista	0,45*	0,43	0,40	0,05	0,22	0,36	0,55*	0,10
Antociani	-0,71**	-0,75**	-0,76**	-0,58**	-0,32	-0,57**	-0,64**	-0,59**

## 4.2 RUMENI BLATNIK

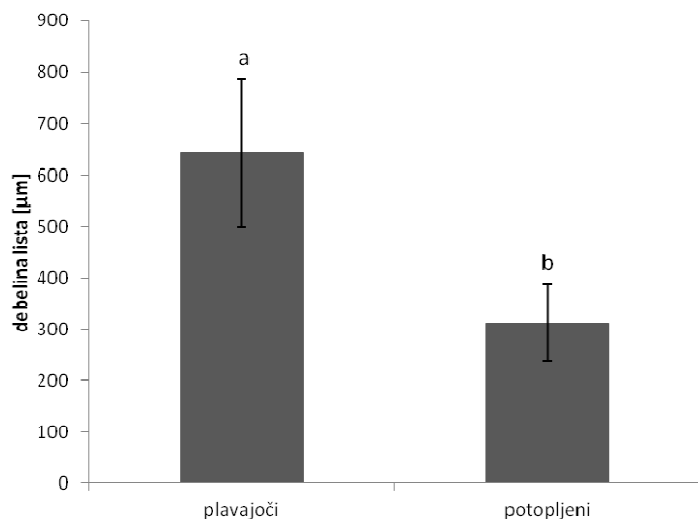
Potopljeni listi imajo več kot 2-krat tolikšno specifično listno površino kot plavajoči listi. Razlika je statistično značilna.



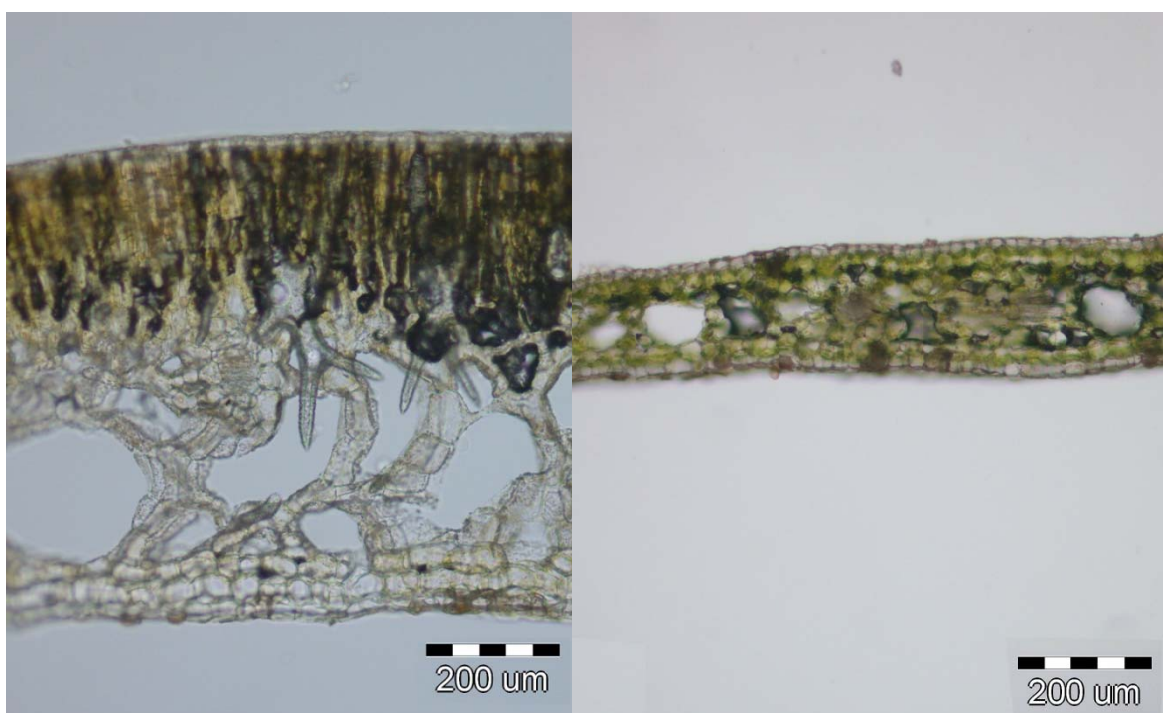
Slika 15: Specifična listna površina [ $\text{cm}^2 \text{mg}^{-1}$ ] plavajočega in potopljenega tipa listov rumenega blatnika (*N. luteum*); prikazane so povprečne vrednosti  $\pm$  SD;  $n = 5$ ; različni črki nad stolpcema označujeta statistično značilno razliko med tipoma listov (rezultati testa ANOVA)



Povprečna debelina plavajočega lista je več kot 2-krat tolikšna kot debelina potopljenega lista. Razlika je značilna z verjetnostjo  $p \leq 0,01$ .

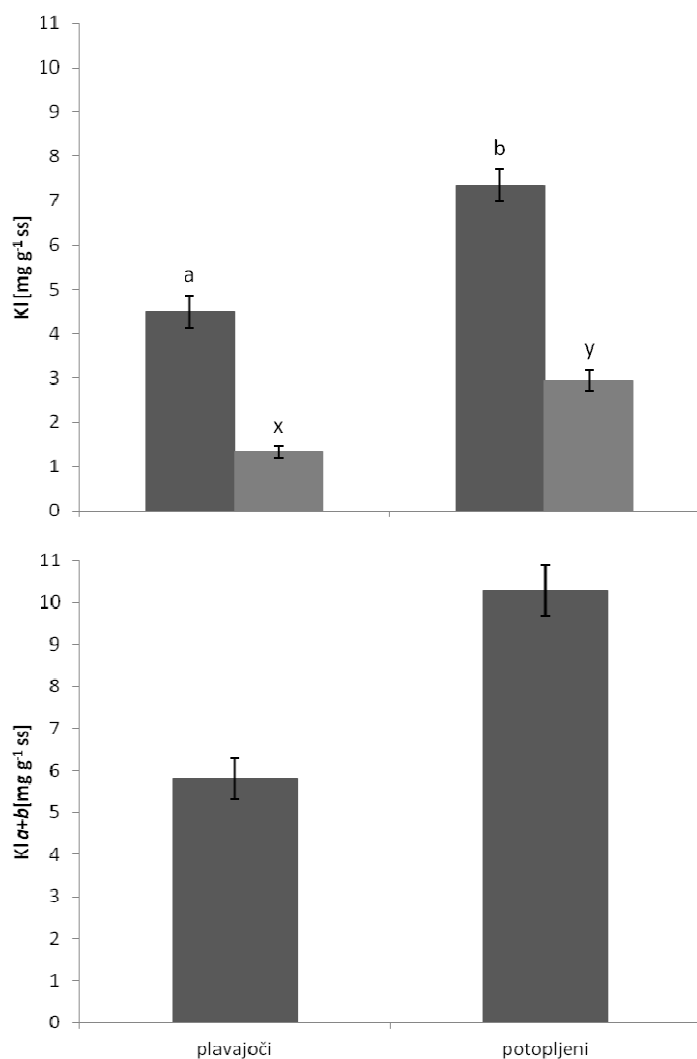


Slika 16: Debelina [ $\mu\text{m}$ ] plavajočega in potopljenega tipa listov rumenega blatnika (*N. luteum*); prikazane so povprečne vrednosti  $\pm$  SD;  $n = 5$ ; različni črki nad stolpcema označujeta statistično značilno razliko med tipoma listov (rezultati testa ANOVA)



Slika 17: Plavajoči in potopljeni list rumenega blatnika v prerezu

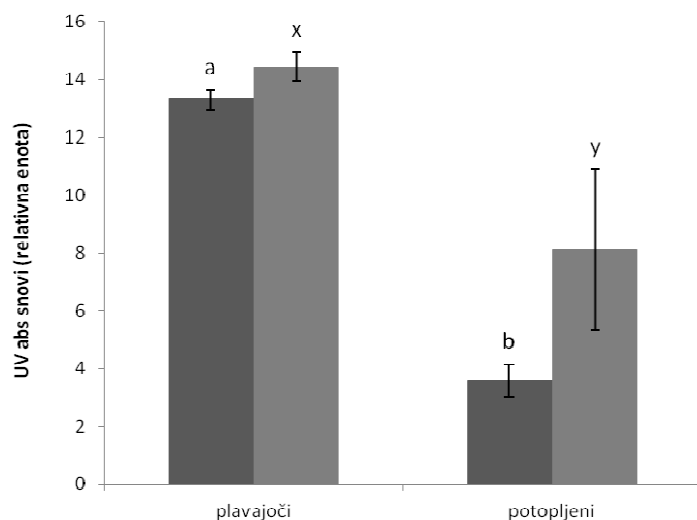
Vsebnost klorofila pri potopljenih listih je dobrih 10 mg g<sup>-1</sup> ss, pri plavajočih pa skoraj 6 mg g<sup>-1</sup> ss. Oba tipa listov imata več klorofila *a* v primerjavi s klorofilom *b*, pri plavajočih listih je prvega skoraj 3,5-krat toliko kot drugega, pri potopljenih listih pa 2,5-krat toliko. V vsebnosti obeh klorofilov prednjači potopljeni tip lista, razlika je značilna (klorofil *a*:  $p \leq 0,05$ ; klorofil *b*:  $p \leq 0,01$ ).



Slika 18: Vsebnost klorofila *a* (■) in klorofila *b* (■) [mg g<sup>-1</sup> ss] ter skupna vsebnost klorofilov *a* in *b* (Kl *a*+*b*) v listih rumenega blatnika (*N. luteum*); prikazane so povprečne vrednosti ± SD; n = 5; črki a, b označujeta statistično značilno razliko v klorofilu *a*, črki x, y označujeta statistično značilno razliko v klorofilu *b*, različne črke nad stolpci označujejo statistično značilni razliki med tipoma listov (rezultati testa ANOVA)

Vsebnost karotenoidov je večja pri potopljenem tipu lista ( $\approx 2,1$  mg g<sup>-1</sup> ss) kot pri plavajočih listih ( $\approx 1,6$  mg g<sup>-1</sup> ss). Vsebnost antocianov, ki smo jo izrazili na suho maso (ss) v relativnih enotah, je večja pri potopljenih listih. Lista se značilno razlikujeta tako v vsebnosti karotenoidov ( $p \leq 0,01$ ) kot tudi v vsebnosti antocianov ( $p \leq 0,05$ ).

Oba tipa listov imata več UV-B kot UV-A absorbirajočih snovi, potopljene listi približno 1-krat več. Plavajoči listi imajo tako več UV-B kot tudi UV-A absorbirajočih snovi v primerjavi s potopljenimi listi. Z verjetnostjo  $p \leq 0,01$  se lista značilno razlikujeta v vsebnosti UV-A in UV-B absorbirajočih snovi.



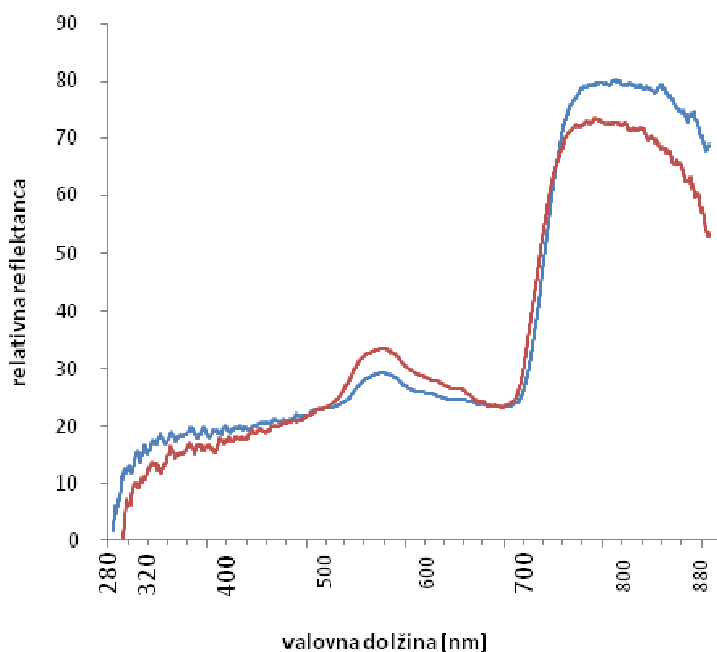
Slika 19: Vsebnost UV-A (■) in UV-B (■) absorbirajočih snovi pri plavajočem in potopljenem tipu listov rumenega blatnika (*N. luteum*) je podana na površino ( $\text{cm}^2$ ) vzorca v relativnih enotah; prikazane so povprečne vrednosti  $\pm$  SD;  $n = 5$ ; črki a, b označujeta statistično značilno razliko v vsebnosti UV-A abs snovi, črki x, y označujeta statistično značilno razliko v vsebnosti UV-B abs snovi, različne črke nad stolpci označujejo statistično značilni razliki med tipoma listov (rezultati testa ANOVA)

Preglednica 4: Morfološki, anatomski in biokemijski parametri listov rumenega blatnika (*N. luteum*); prikazane so povprečne vrednosti  $\pm$  SD;  $n = 5$ ; zvezdice označujejo značilne razlike med plavajočim in potopljenim tipom listov rumenega blatnika (Studentov t-test oziroma Mann-Whitney-ev test; \*  $p \leq 0,05$ ; \*\*  $p \leq 0,01$ )

parameter	plavajoči	potopljene	plavajoči - potopljene
Specifična listna površina [ $\text{cm}^2 \text{mg}^{-1}$ ]	0,138 $\pm$ 0,03	0,368 $\pm$ 0,06	*
Debelina lista [ $\mu\text{m}$ ]	643 $\pm$ 274	345 $\pm$ 27	**
Debelina palisadnega tkiva [ $\mu\text{m}$ ]	203,4 $\pm$ 36	-	
<b>Zgornja povrhnjica</b>			
Gostota trihomov [ $\text{mm}^{-2}$ ]	0	0	
Dolžina trihomov [ $\mu\text{m}$ ]	0	0	
Gostota listnih rež [ $\text{mm}^{-2}$ ]	595 $\pm$ 80	0	
Dolžina listnih rež [ $\mu\text{m}$ ]	21,4 $\pm$ 1,8	0	
<b>Spodnja povrhnjica</b>			
Gostota trihomov [ $\text{mm}^{-2}$ ]	0	0	
Dolžina trihomov [ $\mu\text{m}$ ]	0	0	
Gostota listnih rež [ $\text{mm}^{-2}$ ]	0	0	

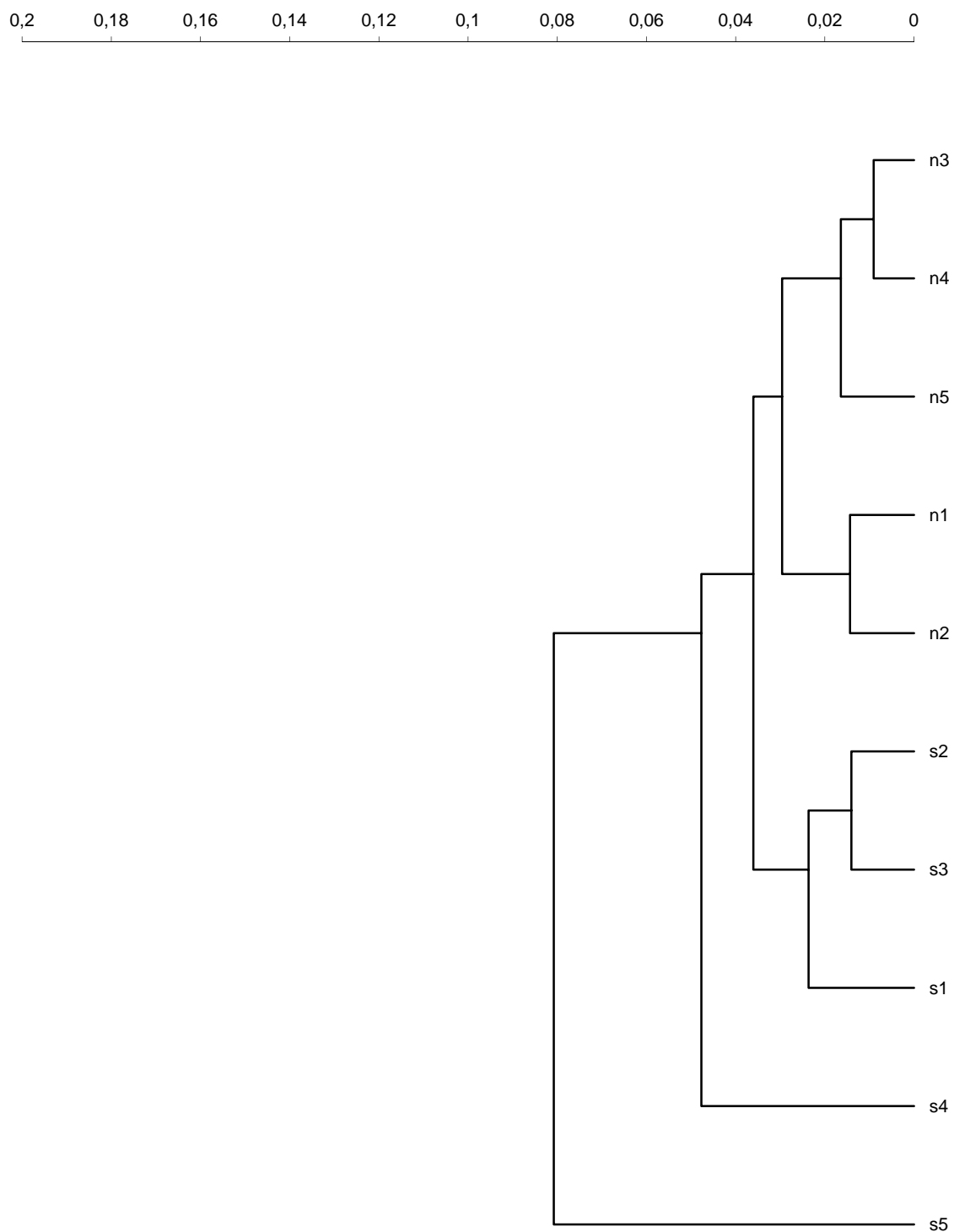
Dolžina listnih rež [ $\mu\text{m}$ ]	0	0	
<b>Biokemijski parametri</b>			
Klorofil <i>a</i> [mg/g ss]	4,49 $\pm$ 0,36	7,34 $\pm$ 0,37	*
Klorofil <i>b</i> [mg/g ss]	1,33 $\pm$ 0,12	2,94 $\pm$ 0,23	**
Karotenoidi [mg/g ss]	1,62 $\pm$ 0,13	2,06 $\pm$ 0,23	**
Antociani [relativna enota]	81 $\pm$ 4	120 $\pm$ 40	*
UV-B absorbirajoče snovi [relativna enota]	14,45 $\pm$ 0,5	8,12 $\pm$ 2,79	**
UV-A absorbirajoče snovi [relativna enota]	13,3 $\pm$ 0,3	3,6 $\pm$ 0,6	**

Lista imata nizko odbojnost v vidnem območju (400 – 700 nm), z vrhom v zelenem delu vidnega spektra (550 nm) in visoko odbojnost v NIR območju (700 – 887 nm). Odbojnost je nizka tudi v UV valovnih dolžinah (280 – 400 nm). Plavajoči listi imajo v UV območju višjo odbojnost kot potopljeni listi, prav tako v modrem delu vidnega spektra. V zelenem delu vidnega spektra je odbojnost večja pri potopljenih listih, prav tako v pretežnem delu rdečega območja, nakar se pri približno 680 nm odbojnosti izenačita. V NIR območju je odbojnost večja pri plavajočih listih.



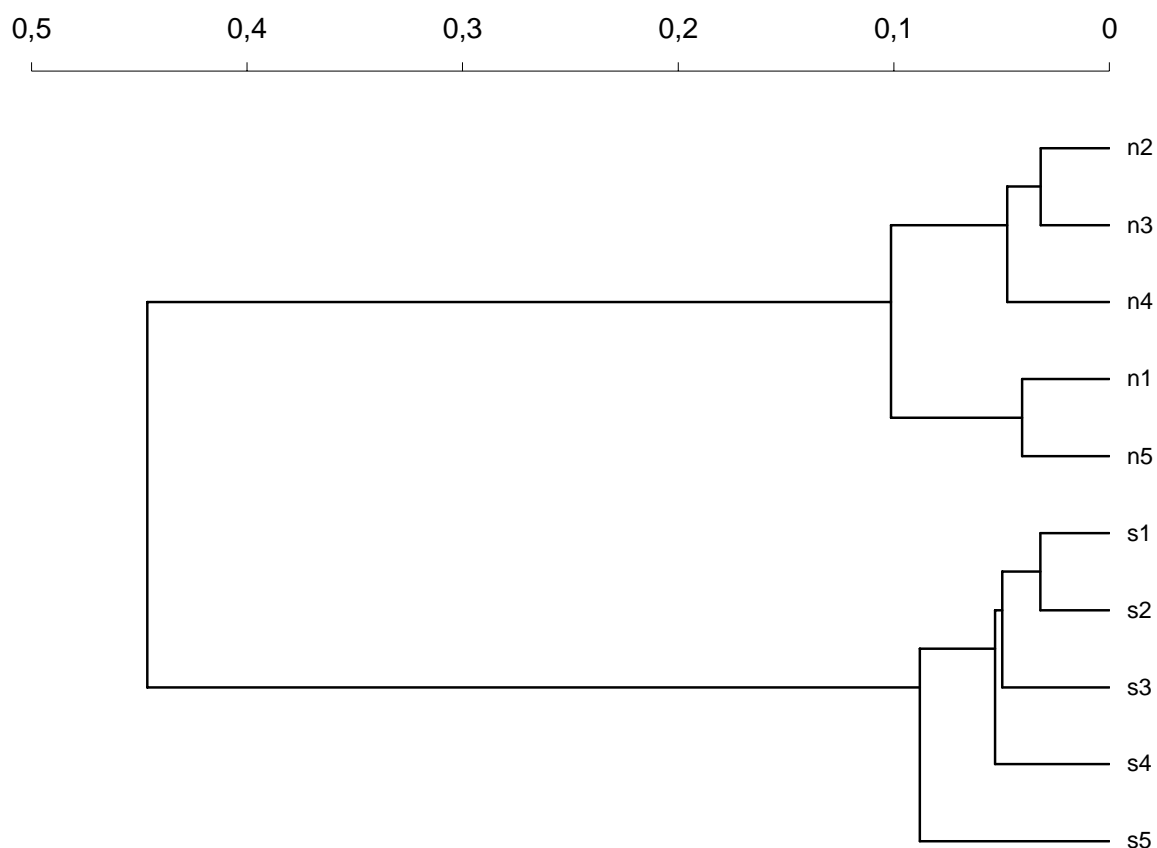
Slika 20: Odbojna spektra plavajočega (—) in potopljenega (—) tipa listov rumenega blatnika (*N. luteum*); prikazane so povprečne vrednosti;  $n = 5$

Dendrogram podobnosti odbojnih spektrov pri različnih tipih listov rumenega blatnika prikazuje združevanje listov plavajočega tipa in združevanje listov potopljenega tipa. Opazimo, da se potopljeni listi v grafu pojavljajo bolj razpršeno.



Slika 21: Dendrogram podobnosti odbojnih spektrov pri plavajočem (n1-5) in potopljenem (s1-5) tipu listov rumenega blatnika (*N. luteum*); podan s pomočjo klasterne analize z Bray-Curtis-ovim indeksom podobnosti

Dendrogram podobnosti, ki vključuje vse merjene parametre, prikazuje združevanje listov, ki pripadajo istemu tipu lista. Listi so si torej v okviru istega tipa podobni v vseh merjenih parametrih skupaj. Listi so si najbolj podobni v okviru istega tipa, medtem ko je podobnost med plavajočimi in potopljenimi listi zelo majhna.

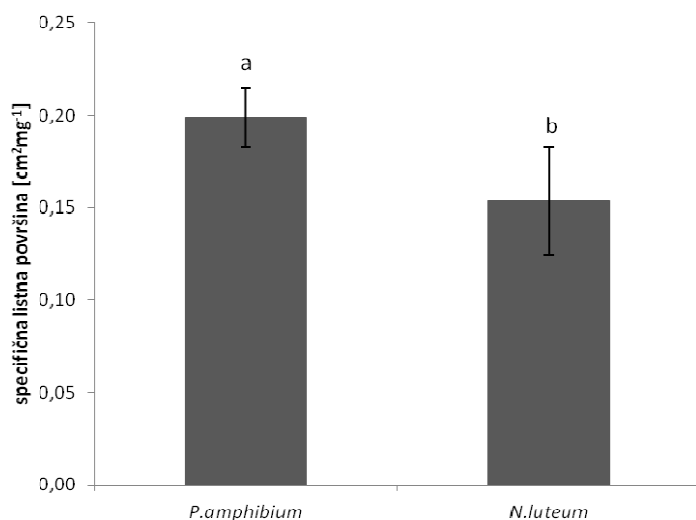


Slika 22: Dendrogram podobnosti plavajočega (n1-5) in potopljenega (s1-5) tipa listov rumenega blatnika (*N. luteum*); vključeni so vsi merjeni parametri, tudi odbojnost; graf je podan s pomočjo klastrske analize z Bray-Curtis-ovim indeksom podobnosti

Korelacijske analize so pokazale, da so razlike v rdeči regiji značilno povezane z vsebnostjo klorofila *a* ( $r = 0,71$ ;  $p < 0,05$ ) in karotenoidov ( $r = 0,67$ ;  $p < 0,05$ ). NIR območje je značilno povezano z debelino lista ( $r = 0,82$ ;  $p < 0,01$ ) ter vsebnostjo UV-B absorbirajočih snovi ( $r = 0,77$ ;  $p < 0,01$ ) in antocianov ( $r = -0,66$ ;  $p < 0,05$ ).

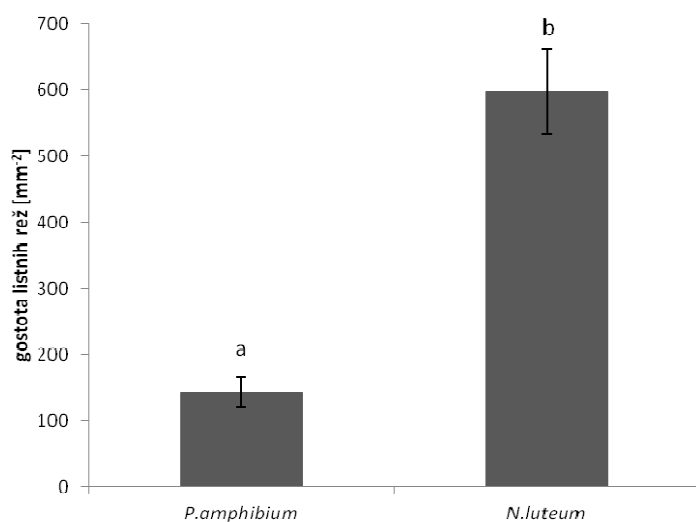
#### 4.3 PRIMERJAVA PLAVAJOČIH LISTOV VODNE DRESNI IN RUMENEGA BLATNIKA

Plavajoči listi vodne dresni imajo večjo specifično listno površino kot plavajoči listi rumenega blatnika. Razlika je statistično značilna.

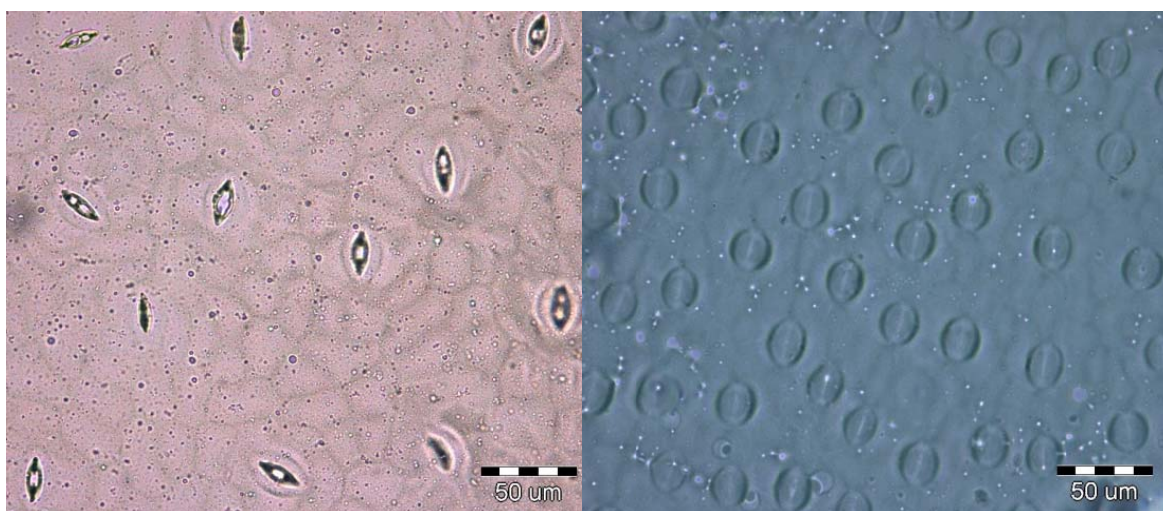


Slika 23: Specifična listna površina [cm<sup>2</sup>·mg<sup>-1</sup>] plavajočih listov vodne dresni (*P. amphibium*) in rumenega blatnika (*N. luteum*); prikazane so povprečne vrednosti ± SD; n = 5; različni črki nad stolpcema označujeta statistično značilno razliko med vrstama (rezultati testa ANOVA)

Plavajoči listi rumenega blatnika z značilno razliko močno prednjačijo v gostoti listnih rež, ki je kar 4-krat tolikšna kot pri plavajočih listih vodne dresni.

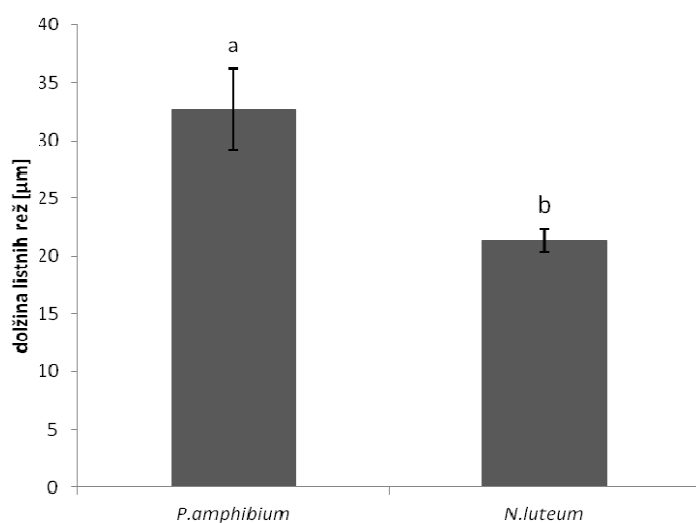


Slika 24: Gostota listnih rež [mm<sup>-2</sup>] na zgornji povrhnjici plavajočih listov vodne dresni (*P. amphibium*) in rumenega blatnika (*N. luteum*); prikazane so povprečne vrednosti ± SD; n = 5; različni črki nad stolpcema označujeta statistično značilno razliko med vrstama (rezultati testa ANOVA)



Slika 25: Listne reže na zgornji povrhnjici plavajočega lista vodne dresni in plavajočega lista rumenega blatnika

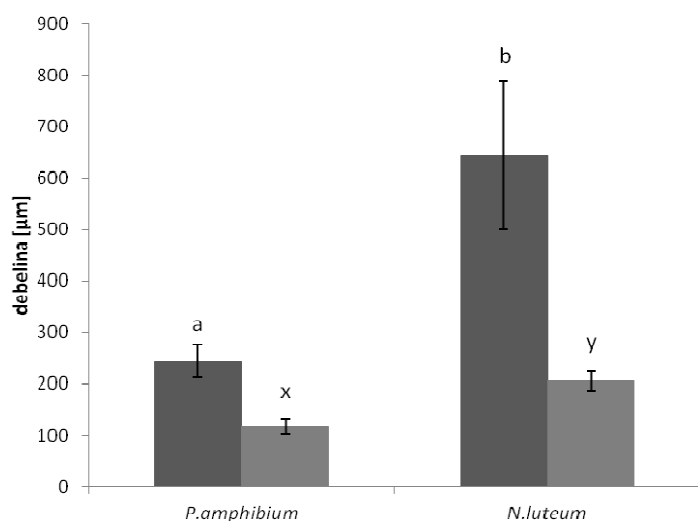
Dolžina listnih rež se značilno razlikuje med vrstama, pri plavajočih listih vodne dresni je večja kot pri rumenem blatniku.



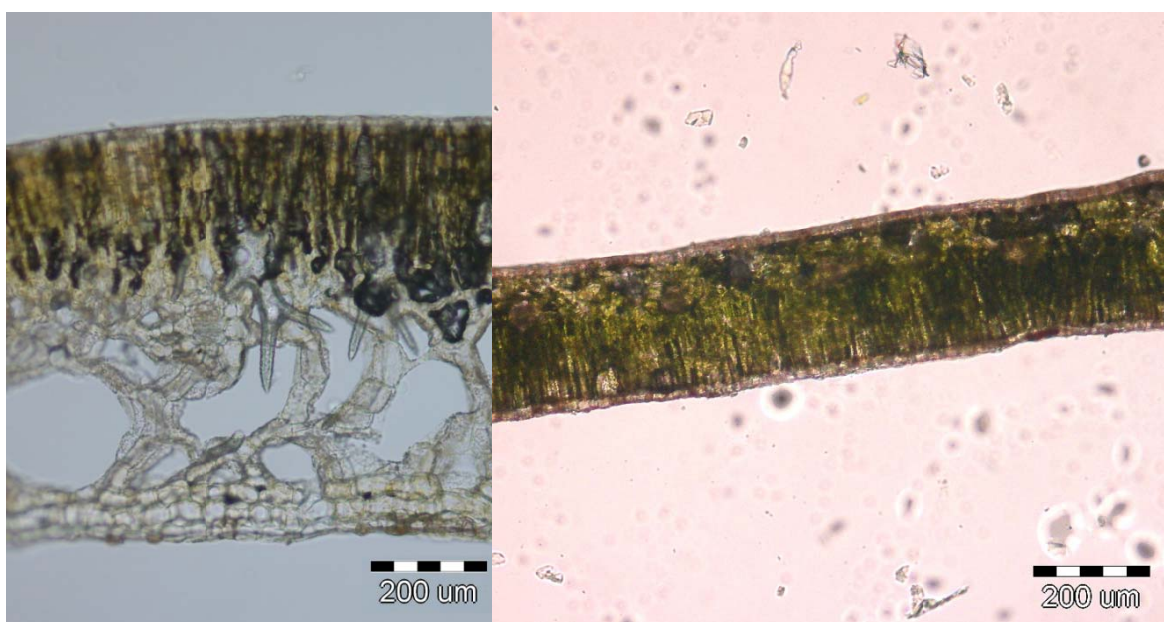
Slika 26: Dolžina listnih rež [µm] pri plavajočih listih vodne dresni (*P. amphibium*) in rumenega blatnika (*N. luteum*); prikazane so povprečne vrednosti ± SD; n = 5; različni črki nad stolpcema označujeta statistično značilno razliko med vrstama (rezultati testa ANOVA)

Rumeni blatnik ima kar 2,5-krat debelejši plavajoči list kot vodna dresen. Tudi debelina palisadnega tkiva je večja pri rumenem blatniku. Razmerje med debelino lista in debelino palisadnega tkiva je različno pri plavajočih listih. Pri vodni dresni obsega palisadno tkivo slabo polovico debeline lista, pri rumenem blatniku pa le dobro tretjino. Vrsti se značilno razlikujeta tako v debelini lista kot tudi v debelini palisadnega tkiva ( $p \leq 0,01$ ).



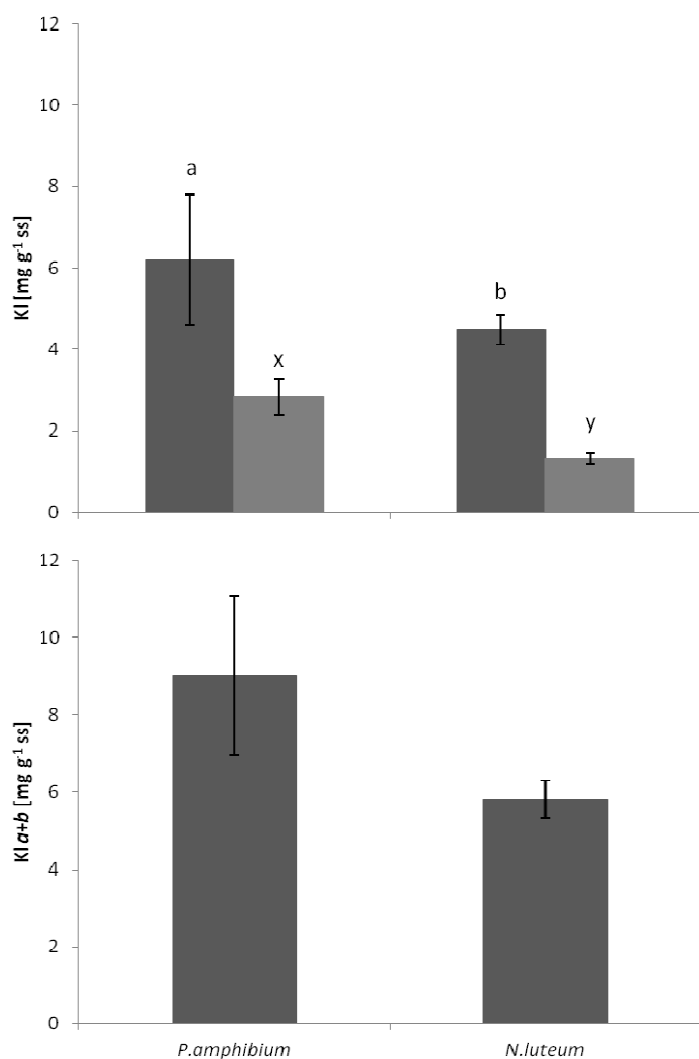


Slika 27: Debelina lista (■) in palisadnega tkiva (▨) [µm] pri plavajočih listih vodne dresni (*P. amphibium*) in rumenega blatnika (*N. luteum*); prikazane so povprečne vrednosti ± SD; n = 5; črki a, b označujeta statistično značilno razliko v debelini lista, črki x, y označujeta statistično značilno razliko v debelini palisadnega tkiva, različne črke nad stolpci označujejo statistično značilni razliki med vrstama (rezultati testa ANOVA)



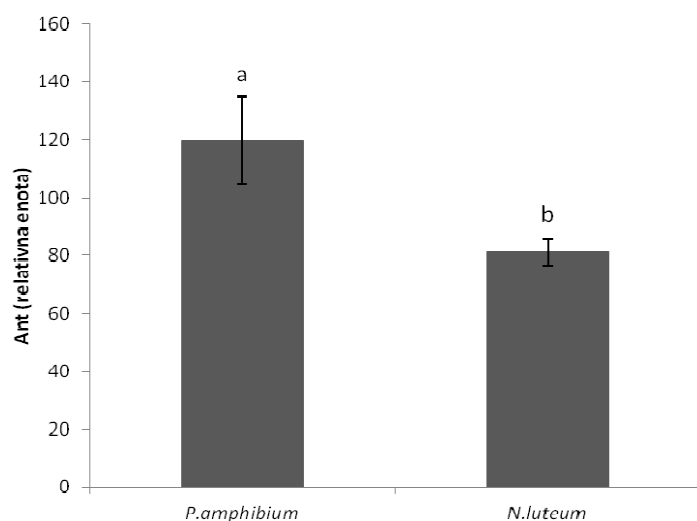
Slika 28: Plavajoči list rumenega blatnika in vodne dresni v prerezu

Plavajoči listi vodne dresni imajo večjo vsebnost klorofilov ( $\approx 9 \text{ mg g}^{-1} \text{ ss}$ ) kot listi rumenega blatnika ( $\approx 6 \text{ mg g}^{-1} \text{ ss}$ ) in z značilno razliko prednjačijo v vsebnosti obeh klorofilov. Obe vrsti imata več klorofila *a* v primerjavi s klorofilom *b*, razmerje med obema klorofiloma je večje pri rumenem blatniku kot pri vodni dresni.



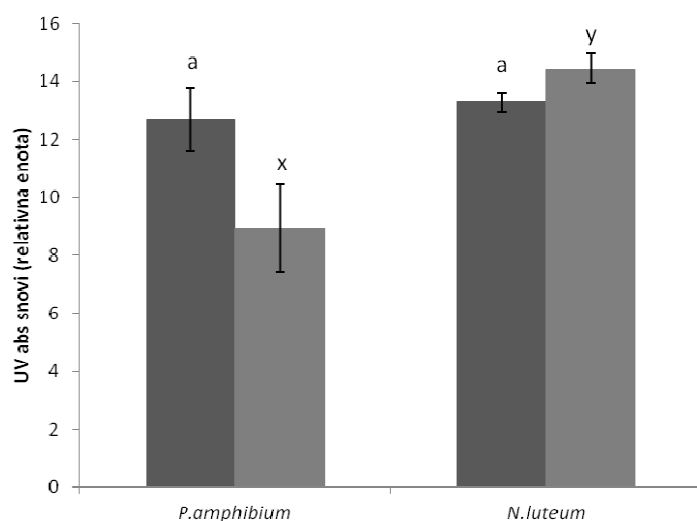
Slika 29: Vsebnost klorofila *a* (■) in klorofila *b* (■) [ $\text{mg g}^{-1} \text{ss}$ ] ter skupna vsebnost klorofilov *a* in *b* (Kl *a+b*) v plavajočih listih vodne dresni (*P. amphibium*) in rumenega blatnika (*N. luteum*); prikazane so povprečne vrednosti  $\pm$  SD;  $n = 5$ ; črki a, b označujeta statistično značilno razliko v klorofilu *a*, črki x, y označujeta statistično značilno razliko v klorofilu *b*, različne črke nad stolpci označujejo statistično značilni razliki med vrstama (rezultati testa ANOVA)

Plavajoči listi vodne dresni imajo le za malenkost večjo vsebnost karotenoidov v primerjavi z rumenim blatnikom, statistično se ne razlikujeta. Vsebnost antocianov je značilno večja pri vodni dresni.



Slika 30: Vsebnost antocianov pri plavajočih listih vodne dresni (*P. amphibium*) in rumenega blatnika (*N. luteum*) je podana na suho maso (ss) vzorca v relativnih enotah; prikazane so povprečne vrednosti  $\pm$  SD;  $n=5$ ; različni črki nad stolpcema označujeta statistično značilno razliko med vrstama (rezultati testa ANOVA)

Plavajoči listi rumenega blatnika imajo več UV absorbirajočih snovi kot vodna dresen. Grafi kažejo, da ima rumeni blatnik rahlo več UV-B kot UV-A absorbirajočih snovi, medtem ko ima vodna dresen več UV-A absorbirajočih snovi. Iz tega sledi, da imata vrsti statistično podobno vsebnost UV-A absorbirajočih snovi, medtem ko se značilno razlikujeta v vsebnosti UV-B absorbirajočih snovi.

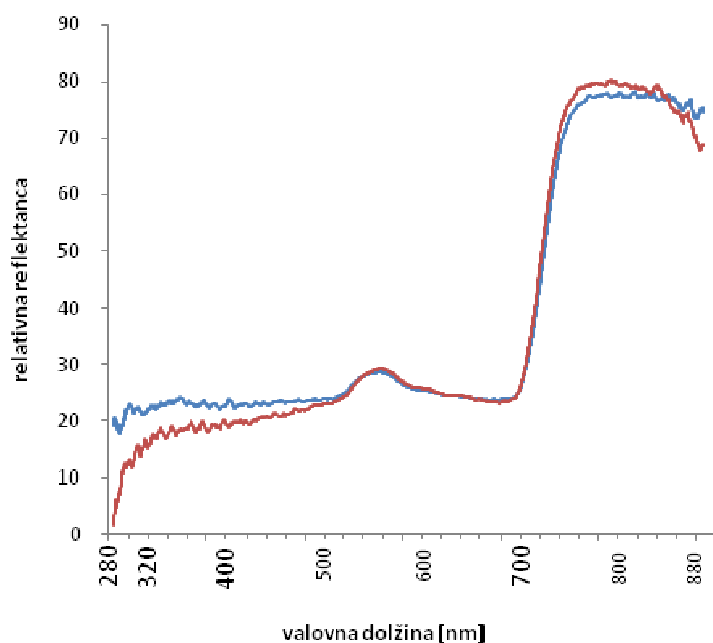


Slika 31: Vsebnost UV-A (■) in UV-B (■) absorbirajočih snovi pri plavajočih listih vodne dresni (*P. amphibium*) in rumenega blatnika (*N. luteum*) je podana na površino ( $\text{cm}^2$ ) vzorca v relativnih enotah; prikazane so povprečne vrednosti  $\pm$  SD;  $n = 5$ ; črka a označuje razliko v vsebnosti UV-A abs snovi, črki x, y označujeta statistično značilno razliko v vsebnosti UV-B abs snovi, različne črke nad stolpci označujejo statistično značilni razliki med vrstama (rezultati testa ANOVA)

Preglednica 5: Morfološki, anatomski in biokemijski parametri plavajočih listov vodne dresni (*P. amphibium*) in rumenega blatnika (*N. luteum*); prikazane so povprečne vrednosti  $\pm$  SD; n = 5; zvezdice označujejo značilne razlike med plavajočim listom vodne dresni in plavajočim listom rumenega blatnika (Studentov t-test oziroma Mann-Whitney-ev test; \* p  $\leq$  0,05; \*\* p  $\leq$  0,01; ns – ni značilno)

parameter	<i>P. amphibium</i> –		
	<i>P. amphibium</i>	<i>N. luteum</i>	<i>N. luteum</i>
Specifična listna površina [cm <sup>2</sup> mg <sup>-1</sup> ]	0,2 $\pm$ 0,02	0,138 $\pm$ 0,03	*
Debelina lista [ $\mu$ m]	243 $\pm$ 31	643 $\pm$ 274	**
Debelina palisadnega tkiva [ $\mu$ m]	116,6 $\pm$ 14,6	203,4 $\pm$ 36	**
<b>Zgornja povrhnjica</b>			
Gostota trihomov [mm <sup>-2</sup> ]	0	0	
Dolžina trihomov [ $\mu$ m]	0	0	
Gostota listnih rež [mm <sup>-2</sup> ]	146 $\pm$ 13	595 $\pm$ 80	*
Dolžina listnih rež [ $\mu$ m]	34,6 $\pm$ 2,4	21,4 $\pm$ 1,8	*
<b>Spodnja povrhnjica</b>			
Gostota trihomov [mm <sup>-2</sup> ]	0	0	
Dolžina trihomov [ $\mu$ m]	0	0	
Gostota listnih rež [mm <sup>-2</sup> ]	0	0	
Dolžina listnih rež [ $\mu$ m]	0	0	
<b>Biokemijski parametri</b>			
Klorofil a [mg/g ss]	6,19 $\pm$ 1,62	4,49 $\pm$ 0,36	*
Klorofil b [mg/g ss]	2,83 $\pm$ 0,44	1,33 $\pm$ 0,12	**
Karotenoidi [mg/g ss]	1,76 $\pm$ 0,51	1,62 $\pm$ 0,13	ns
Antociani [relativna enota]	120 $\pm$ 15	81 $\pm$ 4	**
UV-B absorbirajoče snovi [relativna enota]	8,94 $\pm$ 1,5	14,45 $\pm$ 0,5	**
UV-A absorbirajoče snovi [relativna enota]	12,7 $\pm$ 1,1	13,3 $\pm$ 0,3	ns

Oba spektra imata relativno nizko odbojnost v vidnem (400 - 700 nm) in UV območju (280 – 400 nm) ter relativno visoko odbojnost v bližnjem infrardečem območju (700 – 887 nm). Oba plavajoča lista imata precej podobno odbojnost, sploh v zelenem in rdečem delu vidnega spektra. V modrem delu in UV svetlobi ima vodna dresen večjo odbojnost kot rumeni blatnik, obratno velja za pretežni del NIR območja.



Slika 32: Odbojna spektra plavajočih listov vodne dresni (*P. amphibium*) (—) in rumenega blatnika (*N. luteum*) (—); prikazane so povprečne vrednosti; n = 5

## 5 RAZPRAVA

Listi imajo poleg morfoloških, biokemijskih in drugih lastnosti tudi svojevrstne optične lastnosti. Pri interakciji lista s svetlobo se je del absorbira, del prehaja skozi list, del pa se odbije od lista. V diplomskem delu smo proučevali odbojnost listov vodne dresni (*Polygonum amphibium*) in rumenega blatnika (*Nuphar luteum*). Zanimala nas je povezanost odbojnosti z anatomskimi, morfološkimi in biokemijskimi lastnostmi ter variabilnost odbojnih spektrov v okviru vrste in med vrstama.

Ker smo pri vodni dresni primerjali poleg plavajočega in kopenskega tudi dva prehodna (emerzna) tipa listov, so se podatki razporejali precej bolj zvezno kot pri rumenem blatniku, pri katerem smo primerjali potopljene in plavajoče liste, ki so si zelo različni.

Odbojni spektri kažejo nekatere skupne značilnosti (Underwood in sod., 2007), kot so relativno nizka odbojnost v vidnem območju (400 - 700 nm) z vrhom v zelenem delu vidnega spektra (550 nm) (Daughtry in Walthal, 1998; Male in sod., 2010) in relativno visoka odbojnost v bližnjem infrardečem območju (700 – 887 nm). V vidnem območju so optične lastnosti zelene lista podrejene procesu fotosinteze. Pri vseh listih je v povprečju opaziti manjšo odbojnost v modrem območju v primerjavi z rdečim, najbrž zato, ker v rdeči regiji absorbirata klorofil *a* in *b*, v modri pa poleg obeh klorofilov tudi karotenoidi. Visoko odbojnost v NIR območju pojasnjujemo s pomanjkanjem absorpcijskega dejavnika. Fotosintezna barvila višjih rastlin v tem delu ne absorbirajo. Odbojnost v NIR območju variira glede na listno strukturo (Yoshimura in sod., 2010). Pri vseh tipih listov opazimo tudi nizko odbojnost v UV valovnih dolžinah (280 – 400 nm). Odbojnost UV sevanja je tako majhna predvsem zaradi absorpcije s flavonoidi (Yoshimura in sod., 2010). Odbojnost v naši raziskavi je bila nižja v UV-B kot UV-A območju, medtem ko so Yoshimura in sod. (2010) izmerili enako odbojnost skozi celoten UV spekter.

Pri vodni dresni (*P. amphibium*) se značilne razlike pojavljajo predvsem med anatomskimi in morfološkimi parametri, sploh med parametri obeh povrhnjic. Razlike se pojavijo v nekaj manj kot  $\frac{3}{4}$  anatomskih in morfoloških parametrov. Najbolj variabilen parameter je dolžina trihomov zgornje povrhnjice, v katerem se z verjetnostjo  $p \leq 0,01$  med seboj razlikujejo vsi listi. Tesno mu sledijo parametri, kot so dolžina in gostota trihomov spodnje povrhnjice, gostota listnih rež in specifična listna površina. Gaberščik (1991) ugotavlja, da so razlike v debelini različnih tipov listov vodne dresni in razmerju med gobastim in stebričastim tkivom statistično neznačilne. Naši rezultati kažejo večinoma statistično značilne, a neizrazite razlike v prerezu. Korelacijske analize so kljub temu pokazale, da je debelina palisadnega tkiva parameter s statistično značilno stopnjo povezanosti z odbojnostjo v UV območju ter vijoličnem in rdečem delu vidnega območja. Nasprotno pa

debelina lista ni značilno povezana z razlikami v odbojnosti. Hkrati so si različni tipi listov biokemijsko precej podobni, saj se statistično razlikujejo le v slabi četrtini biokemijskih parametrov. Vzorednice s temi ugotovitvami se kažejo v odbojnosti, saj so si spektri v vidnem območju, kjer imajo barvila glavno vlogo (Liew in sod., 2008), najbolj podobni, medtem ko se spektri najbolj razlikujejo izven vidne regije. Kaže, da je vsebnost antocianov edini biokemijski parameter, ki je značilno povezan z razlikami v odbojnosti. Ugotavljamo, da so razlike v anatomsko morfoloških parametrih tiste, ki najbolj vplivajo na razlike odbojnih spektrov, sploh površinske lastnosti. Tako je dolžina trihomov močno povezana z odbojnostjo v vseh spektralnih območjih. V vsebnosti UV absorbirajočih snovi praktično ni značilnih razlik, pa vendar je odbojnost listov v UV območju zelo različna. Korelacijske analize so pokazale, da so razlike v odbojnosti v UV območju značilno povezane s SLA, dolžino trihomov, debelino palisadnega tkiva ter antociani. V literaturi zasledimo različne podatke. Yoshimura in sod. (2010) ugotavljajo, da imajo višje rastline univerzalno nizko listno odbojnost (okoli 5 %) skozi celoten UV spekter ne glede na rastlinsko vrsto in sezonsko dinamiko. Podobno trdijo tudi Caldwell in sod. (1983). V raziskavi avtorjev Filella in Peñuelas (1999) je odbojnost bolj variabilna (5% (300 – 400 nm) - 12% (280 – 300 nm)). Ob spremenljivki listne površine pa je razpon odbojnosti v UV območju še večji (Holmes in Keiller, 2002), kar lahko opazimo tudi v naši raziskavi.

V gradientu voda-kopno se gostota listnih rež na zgornji povrhnjici listov vodne dresni zmanjšuje, medtem ko se gostota listnih rež na spodnji povrhnjici povečuje (Gaberščik, 1991). Rezultati v naši raziskavi od tega deloma odstopajo, saj so imeli največjo gostoto listnih rež na spodnji povrhnjici listi emerznega tipa 2. Amfistomatalnost vodne dresni (Gaberščik, 1991), to je prisotnost listnih rež na zgornji in spodnji povrhnjici, smo potrdili tudi v naših raziskavah. Amfistomatalnost je značilna za oba prehodna (emerzna) tipa listov, najbolj izrazita pa je pri emerznem tipu 1. Zelo redke listne reže so se na zgornji povrhnjici pojavljale tudi pri kopenskih listih. Amfistomatalni listi imajo skupno največ rež.

Med vsemi primerjanimi pari vodne dresni se v izmerjenih parametrih najbolj razlikujeta plavajoči in kopenski list. Statistično sta si različna v vseh parametrih obeh povrhnjic (trihomi in listne reže), predvsem zgornje povrhnjice, pa tudi v specifični listni površini in debelini palisadnega tkiva. Prav tako se oba skrajna tipa, torej plavajoči in kopenski list, najbolj razlikujeta v odbojnosti. Razlike so največje v UV in NIR območju, posebno na skrajnih delih spektra. V vidnem območju so razlike med spektroma manjše. Odbojnost plavajočega in kopenskega lista vodne dresni je najbolj podobna pri okoli 550 nm, torej v zeleni regiji, prav tako pa tudi pri okoli 725 nm. Zanimivo je, da so bile v raziskavi Daughtry-ja in Walthal-a (1998) pri danih valovnih dolžinah (550 in 720 nm) razlike v odbojnosti največje, tako v okviru proučevane vrste kot tudi medvrstno. Ker so statistično

različne predvsem anatomske lastnosti, domnevamo, da le-te v večji meri vplivajo na razlike v odbojnosti, očitno predvsem izven vidne regije. Za razliko od ostalih parov se kopenski in plavajoči list deloma razlikujeta tudi biokemijsko, statistične razlike so pri klorofilu *a*, karotenoidih in antocianinih. Zato ni čudno, da je glede na ostale pare v pretežnem delu vidnega spektra moč zaznati nekoliko večje razlike v odbojnosti.

Odbojnost plavajočega lista in lista emerznega tipa 1 je bolj podobna v primerjavi s parom plavajoči – kopenski list. Med 500 in 700 nm so razlike zelo majhne, bolj ali manj enake, rahlo se povečajo pri okoli 550 nm. Največje so razlike na skrajnem delu UV in NIR območja, poleg tega pa tudi pri okoli 750 nm v NIR območju. Razlike v biokemijskih lastnostih so statistično neznačilne, kar vpliva na podobnost spektrov v vidnem območju. Ostale razlike v odbojnosti so najbrž povezane z anatomske parametromi.

Razlike med odbojnostjo plavajočega lista in lista emerznega tipa 2 so največje v UV območju, poleg tega pa tudi v modrem in NIR (ok. 720 nm in v skrajnem delu) območju. V zelenem in rdečem območju sta spektra zelo podobna. Na razlike v spektrih verjetno vplivajo anatomske značilnosti. Domnevamo, da so v ospredju površinske lastnosti, ker so si ostale anatomske lastnosti statistično podobne. Razen antocianinov, biokemijski parametri nimajo značilnih razlik.

Odbojnost obeh emerznih tipov je najbolj podobna nekje med 550 in 700 nm, torej v zeleni in rdeči regiji vidnega spektra. V NIR območju sta spektra v primerjavi z ostalimi pari razmeroma podobna, najbolj različna sta v UV regiji. Emerzna tipa se v anatomske morfoloških in biokemijskih parametrih večinoma statistično ne razlikujeta, primerjava obeh emerznih tipov nam pokaže najmanj razlik v merjenih parametrih med vsemi pari. Tudi parametri povrhnjic so relativno podobni. Verjetno je zato odbojnost precej podobna, sploh v NIR območju.

Odbojnost emerznega tipa 1 in kopenskega tipa se najbolj razlikuje v UV in NIR območju. Razlike med emerznim tipom 1 in kopenskim tipom so zelo podobne kot pri paru plavajoči – kopenski list, razen pri valovnih dolžinah od 700 do 750 nm, kjer sta si plavajoči in kopenski list precej bolj podobna kot emerzni tip 1 in kopenski list. Poleg tega sta si emerzni tip 1 in kopenski tip v pretežnem delu spektra nekoliko bolj podobna kot plavajoči in kopenski tip. Statistične razlike v merjenih parametrih se med emerznim tipom 1 in kopenskim tipom pojavljajo podobno kot pri paru plavajoči – kopenski list, zato ni čudno, da so si podobne tudi razlike v odbojnosti. Razlike med odbojnostjo kopenskega lista in lista emerznega tipa 2 so največje v NIR in v UV območju.



Pri primerjanju odbojnosti različnih tipov listov vodne dresni opazimo nekatere skupne lastnosti. Odbojnost se najbolj razlikuje v UV in NIR območju, sploh na skrajnih delih spektra. Najbolj pa je podobna v vidnem območju, vendar samo med 550 in 700 nm, v modrem območju pa so razlike v odbojnosti relativno velike. Daughtry in Walthal (1998) v svoji raziskavi navajata, da so bile razlike v odbojnosti v okviru proučevane zelne vrste relativno majhne (< 5%), predvsem v NIR območju (< 3%). Najbrž so razlike v odbojnosti pri vodni dresni posledica velike morfološke variabilnosti in prilagoditev, ki ji omogočajo uspevanje v spremenljivem vodnem okolju (Gaberščik, 1991). Največje razlike v odbojnosti v okviru vrste so se pojavljale pri 550 in 720 nm (Daughtry in Walthal, 1998). Nasprotno, v naši raziskavi so bili pri valovni dolžini okoli 550 nm listi v povprečju najbolj podobni. Pri valovni dolžini ok. 720 nm pa so bili rezultati različni.

Kopenski listi imajo največjo vsebnost klorofila *a*, plavajoči najmanjšo, razlika je statistično značilna. Ostali listi imajo statistično podobno vsebnost klorofilov. Hkrati imajo kopenski listi v povprečju najmanjšo odbojnost v vidnem območju, plavajoči največjo. To lahko pojasnimo z največjo vsebnostjo klorofilov in posledično večji absorpciji pri kopenskih listih ter najmanjšo vsebnostjo klorofilov pri plavajočih listih. V rdeči regiji je odbojnost emerznega tipa 1 zelo podobna odbojnosti plavajočega lista.

Gostota trihomov je večja, bolj ko je list terestričen. Terestrični listi imajo najmanjšo odbojnost skoraj skozi celoten spekter. Korelacijske analize so pokazale, da ima dolžina trihomov močno povezavo z odbojnostjo v vseh spektralnih območjih. O različnih dimenzijah trihomov in njihovi vlogi pišeta Holmes in Keiller (2002). Liew in sod. (2008) pa ugotavljajo da velika gostota trihomov deformira odbojnost v vidni regiji. Trihomi močno povečajo odboj od površine v vidni regiji, medtem ko imajo različen vpliv na NIR območje (Liew in sod., 2008).

Pri rumenem blatniku smo lahko primerjali le specifično listno površino in debelino lista, ostale anatomske in morfološke lastnosti so bile zdiferencirane zgolj pri enem ali nobenem tipu lista. Za razliko od vodne dresni sta potopljeni in plavajoči tip lista biokemijsko povsem različna, prav tako odbojnost v vidnem območju. Odbojna spektra sta različna tudi v ostalih spektralnih območjih, kar ni presenetljivo, saj se potopljeni in plavajoči tip lista statistično razlikujeta v vseh merjenih parametrih.

Odbojnost potopljenega in plavajočega blatnika je najbolj podobna pri valovnih dolžinah 500 nm ter med 650 in 700 nm, najbolj pa se razlikuje na obeh skrajnih koncih spektra. Razlike so relativno velike tudi v NIR pri ok. 720 nm in vidnem območju med 500 in 650 nm. V primerjavi z vodno dresnijo so razlike znatno večje v vidnem območju med 500 in 650 nm, poleg tega pa tudi v NIR območju. V UV območju in modri svetlobi so razlike v

povprečju manjše kot pri vodni dresni. Največje razlike v vidnem območju so pri 550 nm, medtem ko so pri tej valovni dolžini razlike pri vodni dresni najmanjše. Vidimo, da se odbojnost plavajočega in potopljenega lista razlikuje bolj kot med različnimi tipi vodne dresni, kar je verjetno posledica različne zgradbe listov v prerezu in različne vsebnosti biokemijskih komponent.

Potopljeni listi rumenega blatnika imajo večjo vsebnost klorofila na ss kot plavajoči listi, pa vendar imajo v pretežnem delu vidne regije, sploh v zelenem območju, precej večjo odbojnost kot plavajoči listi. Podatka sta si na videz v nasprotju, vendar moramo upoštevati, da imajo potopljeni listi več kot 2-krat manjšo vrednost suhe mase na enoto površine kot plavajoči listi. Rezultati kažejo, da imajo plavajoči listi rumenega blatnika večjo vsebnost tako UV-B kot tudi UV-A absorbirajočih snovi v primerjavi s potopljenimi listi. To lahko pojasnimo z manj pomembno vlogo UV absorbirajočih snovi pri potopljenih rastlinah, saj so pred sevanjem zaščitene z vodnim stolpcem (Germ, 2003).

V zgradbi se lista močno razlikujeta. Plavajoči list ima gobasto in palisadno tkivo, medtem ko ima potopljeni list enotno mezofilno tkivo. Poleg tega je plavajoči list debelejši in vsebuje več aerenhima. Odbojnost v NIR območju je odvisna v glavnem od strukture mezofila (Imanishi in sod., 2004). Plavajoči listi imajo v NIR območju večjo odbojnost kot potopljeni listi, kar pripisujemo večji debelini lista in aerenhimu v gobastem tkivu. S korelacijskimi analizami smo pokazali značilno povezanost NIR območja z debelino lista, hkrati pa tudi z vsebnostjo nekaterih biokemijskih komponent, kot so UV-B absorbirajoče snovi in antociani. Zaradi različnih lomnih količnikov vode (celice) in zraka je večje sipanje svetlobe in posledično šibka absorpcija. Sipanje svetlobe v listu je odvisno od oblike mezofilnih celic in debeline gobastega tkiva (Liew in sod. 2008). Za liste s tanjšo in manj porozno strukturo je značilno, da imajo nižjo odbojnost v IR območju (Chandrasekharan, 2005). Struktura vpliva tudi na odbojnost v vidni regiji, saj imajo tanki listi tam običajno večjo odbojnost (Yoshimura in sod., 2010). Palisadno tkivo usmerja svetlobo v spodnje plasti in je bogato s klorofilom, ki absorbira svetlobo (Liew in sod., 2008), zato bi na večjo odbojnost v vidni regiji lahko vplivala tudi odsotnost palisadnega tkiva pri potopljenih listih. Yoshimura in sod. (2010) ugotavljajo, da struktura lista ne vpliva na UV območje.

Plavajoča lista se statistično razlikujeta v vseh parametrih, tudi biokemijskih. Najbolj izrazito se ločita po gostoti listnih rež in debelini lista (na račun aerenhima v rumenem blatniku). Kljub temu je njuna odbojnost zelo podobna, predvsem v vidnem območju. Podobnost je največja v zelenem in rdečem območju vidne regije. V modri regiji in UV območju se razlike med spektroma povečajo, kar je značilno tudi za druge primerjane tipe listov. V primerjavi z drugimi pari so v NIR območju relativno majhne razlike v

odbojnosti. Yoshimura in sod. (2010) pišejo, da se je odbojnost v vidni regiji razlikovala med proučevanimi rastlinskimi vrstami za nekaj odstotkov. V NIR regiji je bila odbojnost prav tako različna glede na rastlinsko vrsto, a v UV območju ni bilo razlik med vrstami. V raziskavi Daughtry-ja in Walthal-a (1998) je bila odbojnost med različnimi zelnatimi vrstami bolj variabilna kot v okviru iste vrste. Najbolj je izstopala koruza, ki je kot enokaličnica imela nižjo odbojnost v NIR območju. Največje razlike v odbojnosti so bile pri 550 in 720 nm, poleg tega pa tudi v daljših valovnih dolžinah NIR območja. Tudi v naši raziskavi se spektra plavajočih listov najbolj razlikujeta pri valovni dolžini 720 nm, medtem ko sta pri 550 nm spektra zelo podobna.

Palisadno tkivo plavajočega lista vodne dresni obsega približno polovico debeline lista, pri plavajočem blatniku pa zgolj tretjino debeline lista. Kljub temu, da je plavajoči list rumenega blatnika debelejši in ima večjo vsebnost aerenhima kot plavajoči list vodne dresni, imata v NIR območju precej podobno odbojnost, čeprav v literaturi preberemo, da struktura mezofila najbolj vpliva na NIR območje (Imanishi in sod., 2004). Kljub temu, da je vodna dresen tanjša v prerezu, je v vidnem območju zelo podobna odbojnost.

Plavajoči listi vodne dresni imajo večjo vsebnost klorofila na ss, vendar imajo v modri regiji večjo odbojnost kot plavajoči listi rumenega blatnika, medtem ko sta v zeleni in rdeči regiji odbojnosti listov praktično enaki. Pri primerjavi plavajočih listov ne opazimo ujemanja med vsebnostjo barvil in odbojnostjo v vidnem območju; spektra sta si namreč v vidnem območju (vsaj v zelenem in rdečem delu) zelo podobna, čeprav se vrsti po vsebnosti klorofilov statistično razlikujeta. V UV območju ima vodna dresen večjo odbojnost kot rumeni blatnik. S tem podatkom sovпада vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na površino, ki je značilno večja pri rumenem blatniku.

Prisotnost epikutikularnega voska v veliki meri prispeva k listni odbojnosti (Yoshimura in sod., 2010). V literaturi preberemo, da imajo voskasti listi lahko zelo visoko UV odbojnost (Holmes in Keiller, 2002). Podobno opažamo v naši raziskavi. Pri vodni dresni imajo namreč največjo odbojnost svetleči se plavajoči listi z gladko površino. Večja odbojnost plavajočih listov je značilna skoraj za celoten spekter. Najmanjše razlike v odbojnosti so v vidnem območju, sploh v zelenem delu; kaže da so vidne valovne dolžine fiziološko tako pomembne, da jih barvila absorbirajo v bolj ali manj enaki količini, ne glede na značilnosti povrhnjice. Iz virov (Holmes in Keiller, 2002) je znano, da voski odbijajo tako UV kot vidno svetlobo, čeprav imajo večji vpliv na odbojnost v UV območju. Večjo odbojnost v primerjavi s potopljenimi listi imajo tudi svetleči se plavajoči listi rumenega blatnika. Večjo odbojnost imajo v UV in NIR območju, ne pa v vidni regiji. Zlasti v zeleni regiji je odbojnost potopljenih listov večja, morda zaradi slabšega stanja vzorčnih listov. Večja odbojnost v vidni regiji lahko pomeni, da je koncentracija klorofila v listu nižja (Baltzer in

Thomas, 2005). V literaturi (Daughtry in Walthal, 1998) preberemo, da so v zvezi z nižjo vsebnostjo klorofila največje razlike v odbojnosti pri valovnih dolžinah okoli 550 nm in 700 nm; prav takšne rezultate smo dobili v naši raziskavi, saj so bile največje razlike pri 550 nm kot tudi okoli 700 ( $\approx 720$ ) nm. Večja odbojnost v vidni regiji lahko torej nakazuje na nižjo koncentracijo klorofila, to pa je lahko odraz slabšega fiziološkega stanja rastline (Liew in sod., 2008). Zanimivo je, da ima plavajoči list vodne dresni precej večjo UV odbojnost kot plavajoči blatnik, čeprav imata lista podobno površino. Mogoče je razlika vrstno specifična ali je vpliv UV absorbirajočih snovi pri podobnih tipih listov bolj očitno. Holmes in Keiller (2002) ugotavljata, da je odbojnost voskastih listov preučevanih rastlin precej različna, in domnevata, da je to posledica kemijske oziroma morfološke raznolikosti voskov.

## 6 SKLEPI

- Listi so imeli nekatere skupne spektralne lastnosti, to so relativno nizka odbojnost v vidnem območju (400 – 700 nm) z vrhom v zelenem delu vidnega spektra (550 nm), relativno visoka odbojnost v NIR območju (700 – 887 nm) in nizka odbojnost v UV valovnih dolžinah (280 – 400 nm).
- Na odbojnost listov v vidnem območju vplivajo predvsem biokemijske lastnosti lista (absorpcijske lastnosti barvil), kar dokazujemo s statistično podobnostjo biokemijskih parametrov pri vodni dresni in podobnostjo odbojnosti v vidnem območju. V UV in NIR območju se odbojnost različnih tipov listov vodne dresni razlikuje. Ker so statistično različne predvsem anatomske in morfološke lastnosti listov, domnevamo, da le-te vplivajo na različno odbojnost izven vidnega območja. Rezultati kažejo, da so razlike v odbojnosti najmočnejše povezane s trihomi. Med različnimi tipi vodne dresni se najbolj razlikujeta plavajoči in kopenski list, tako v odbojnosti kot ostalih lastnostih.
- Odbojnost plavajočega in potopljenega tipa rumenega blatnika se najbolj razlikuje v NIR in vidnem območju spektra, medtem ko je v UV območju razmeroma podobna. Potopljeni in plavajoči tip lista rumenega blatnika sta anatomsko, morfološko in biokemijsko zelo različna. Posledično se razlikujeta tudi v odbojnosti. Odbojnost plavajočega in potopljenega lista se je razlikovala bolj kot med različnimi tipi listov vodne dresni. V NIR območju je bila odbojnost večja pri plavajočih listih, kar pripisujemo njihovi drugačni zgradbi.
- Plavajoča lista vodne dresni in rumenega blatnika imata bolj podobno odbojnost kot različni tipi listov v okviru obeh vrst, predvsem v vidnem območju. To pripisujemo ekološki podobnosti listov, ki vpliva na razvoj podobnih morfoloških lastnosti (površina).
- Anatomske, morfološke in biokemijske lastnosti listov sovpadajo z odbojnostjo listov.

## 7 POVZETEK

V diplomski nalogi smo proučevali odbojnost vodne dresni (*Polygonum amphibium*) in rumenega blatnika (*Nuphar luteum*). Meritve smo opravljali na plavajočih, prehodnih (emerznih) in kopenskih listih vodne dresni ter plavajočih in potopljenih listih rumenega blatnika. Vzorčni listi so bili zeleni, polno razviti. Zanimala nas je variabilnost odbojnih spektrov. Odbojnost smo želeli razložiti z izbranimi morfološki, anatomskimi in biokemijskimi lastnostmi listov.

Delo je potekalo na območju Cerknškega jezera in v laboratoriju od avgusta do oktobra 2010. Na terenu smo izmerili transpiracijo in fotokemično učinkovitost vzorčnih rastlin. V laboratoriju smo opravili meritve odbojnosti in določili specifično listno površino, število in velikost listnih rež in trihomov, vsebnost klorofilov in karotenoidov, antocianov in UV absorbirajočih snovi ter analizirali zgradbo lista. Odbojnost smo merili na zgornji površini listov, v območju od 280 do 887 nm.

Listi so imeli nekatere skupne spektralne lastnosti, to so relativno nizka odbojnost v vidnem območju (400 – 700 nm) z vrhom v zelenem delu vidnega spektra (550 nm), relativno visoka odbojnost v NIR območju (700 – 887 nm) in nizka odbojnost v UV valovnih dolžinah (280 – 400 nm). V vidnem območju so optične lastnosti zelenega lista podrejene procesu fotosinteze, medtem ko visoko odbojnost v NIR območju pojasnjujemo s pomanjkanjem absorpcijskega faktorja. Odbojnost v NIR območju variira glede na listno strukturo.

Rezultati so pokazali, da so listi vodne dresni biokemijsko zelo podobni, medtem ko so se anatomsko in morfološko večinoma statistično razlikovali. Gostota listnih rež je bila zelo variabilna. Plavajoči listi so imeli listne reže le na zgornji povrhnjici. S sušnostjo rastišča se je gostota listnih rež na zgornji povrhnjici zmanjševala, medtem ko se je na spodnji povrhnjici povečevala. Prehodni (emerzni) obliki sta bili amfistomatalni in sta imeli skupno (sp. + zg. povrhnjica) največ rež. Gostota trihomov se je s sušnostjo rastišča povečevala. Razlike v debelini lista med različnimi tipi vodne dresni niso bile bistvene. Odbojnost je sovpadala z lastnostmi lista, saj so bili spektri najbolj podobni v vidnem območju, kjer določajo odbojnost v glavnem barvila. V UV in NIR območju se je odbojnost razlikovala, kar pripisujemo različnim anatomskim in morfološkim lastnostim. Rezultati so pokazali, da so razlike v odbojnosti najmočnejše povezane s trihomi, poleg tega pa tudi s specifično listno površino in debelino palisadnega tkiva. Najbolj sta se razlikovala plavajoči in kopenski list vodne dresni. Kopenski list je imel v poprečju najmanjšo odbojnost, plavajoči največjo.

Plavajoči in potopljeni tip listov rumenega blatnika sta imela različno odbojnost v vseh spektralnih območjih, kar ni presenetljivo, saj sta se statistično razlikovala v vseh lastnostih. V prerezu so bili plavajoči listi debelejši, z bogato vsebnostjo aerenhima v gobastem tkivu. Palisadno tkivo je bilo razvito le pri plavajočih listih, medtem ko so imeli potopljeni listi enoten mezofil. Plavajoči listi so imeli v UV območju višjo odbojnost kot potopljeni listi, prav tako v modrem delu vidnega spektra. V zelenem delu vidnega spektra je bila odbojnost večja pri potopljenih listih, prav tako v pretežnem delu rdečega območja. V NIR območju je bila odbojnost večja pri plavajočih listih, kar pripisujemo večji debelini lista in aerenhimu. Odbojnost plavajočega in potopljenega lista se je razlikovala bolj kot med različnimi tipi vodne dresni, kar je verjetno posledica različne zgradbe listov v prerezu in različne vsebnosti biokemijskih komponent. V primerjavi z vodno dresnijo so bile razlike znatno večje v vidnem območju.

Plavajoča lista vodne dresni in rumenega blatnika sta se razlikovala, najbolj izrazito v gostoti listnih rež (blatnik je imel kar 4x tolikšno gostoto rež kot vodna dresen) in debelini lista. Njuna odbojnost je bila bolj podobna kot pri različnih tipih listov v okviru obeh vrst, predvsem v vidnem območju. To pripisujemo ekološki podobnosti listov, ki je vplivala na razvoj podobnih morfoloških lastnosti (površina).

## 8 VIRI

- Baltzer J.L., Thomas S.C. 2005. Leaf optical responses to light and soil nutrient availability in temperate deciduous trees. *American journal of botany*, 92, 2: 214–223
- Belluco E., Camuffo M., Ferrari S., Modenese L., Silvestri S., Marani A., Marani M. 2006. Mapping salt-marsh vegetation by multispectral and hyperspectral remote sensing. *Remote sensing of environment*, 105, 1: 54–67
- Bordjan D. 2008. Rastline Cerkniškega jezera. Novice Notranjskega regijskega parka, 2,1: 2–9. [http://life.notranjski-park.si/cmsfiles/cf\\_125.pdf](http://life.notranjski-park.si/cmsfiles/cf_125.pdf) (12. sept. 2011)
- Boyer R.F. 2005. Temelji biokemije. Ljubljana, Študentska založba: 634 str.
- Chandrasekharan R. 2005. Optical properties of leaves. 13. dec 2005
- Daughtry C.S.T., Walthall C.L. 1998. Spectral discrimination of *Cannabis sativa* L. leaves and canopies. *Remote sensing of environment*, 64, 2: 192–201
- Eler K. Primarna produkcija v ekosistemu. 2009. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo.  
[http://www.bf.uni-lj.si/fileadmin/groups/2711/Gradiva\\_Eler\\_Predavanja\\_Bolonja/Eler\\_P\\_Ekologija-08\\_Primarna\\_produkcija.pdf](http://www.bf.uni-lj.si/fileadmin/groups/2711/Gradiva_Eler_Predavanja_Bolonja/Eler_P_Ekologija-08_Primarna_produkcija.pdf) (17. okt. 2011)
- Filella I., Peñuelas J. 1999. Altitudinal differences in UV absorbance, UV reflectance and related morphological traits of *Quercus ilex* and *Rhododendron ferrugineum* in the Mediterranean region. *Plant Ecology*, 145, 1: 157–165
- Gaberščik A. 1991. Strategija prilagajanja vodne dresni (*Polygonum amphibium* L.) na okolje. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo: 105 str.
- Gaberščik A., Martinčič A. 1992. Spreminjanje lastnosti listov vodne dresni (*Polygonum amphibium* L.) v gradientu kopno/voda. *Biološki vestnik*, 40, 1: 1–11
- Gaberščik A., Urbanc-Berčič O. 2003. Kakovost vode v jezeru in njegovih pritokih. V: Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru. Gaberščik A. (ur.). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije: 44 – 49



- Germ M. 2003. Močvirska spominčica in lasastolistna vodna zlatica v spremenljivem okolju. V: Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniskem jezeru. Gaberščik A. (ur.). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije: 106 – 115
- Holmes M.G., Keiller D.R., 2002, Effects of pubescence and waxes on the reflectance of leaves in the ultraviolet and photosynthetic wavebands: a comparison of a range of species. *Plant, Cell and Environment*, 25, 1: 85–93
- Imanishi J., Sugimoto K., Morimoto Y. 2004. Detecting drought status and LAI of two *Quercus* species canopies using derivative spectra. *Computers and Electronics in Agriculture*, 43, 2: 109–129
- Jusoff K. 2008. Estimating *Acacia mangium* plantation's standing timber volume using an airborne hyperspectral imaging system. *The open forest science journal*, 1: 61–67
- Kranjc A. 2003. Geologija in geomorfologija. V: Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniskem jezeru. Gaberščik A. (ur.). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije: 18 - 25
- Kranjc A. 2003. Hidrološke značilnosti. V: Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniskem jezeru. Gaberščik A. (ur.). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije: 26 – 37
- Levizou E., Drilias P., Psaras G.K., Maneta Y. 2005. Nondestructive assessment of leaf chemistry and physiology through spectral reflectance measurements may be misleading when changes in trichome density co-occur. *New Phytologist*, 165, 2: 463–472
- Liew O.W., Chong P.C.J., Li B., Asundi A.K. 2008. Signature optical cues: Emerging technologies for monitoring plant health. *Sensors*, 8: 3205–3239
- Male E.J., Pickles W.L., Silver E.A., Hoffmann G.D., Lewicki J., Apple M., Repasky K., Burton E.A. 2010. Using hyperspectral plant signatures for CO<sub>2</sub> leak detection during the 2008 ZERT CO<sub>2</sub> sequestration field experiment in Bozeman, Montana. *Environmental Earth Sciences*, 60: 251–261
- Martinčič A. 2003. Praprotnice in semenke. V: Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniskem jezeru. Gaberščik A. (ur.). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije: 72 – 79

- Martinčič A., Leskovar I. 2003. Vegetacija. V: Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniskem jezeru. Gaberščik A. (ur.). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije: 80 – 95
- Martinčič A., Wraber T., Ravnik V., Jogan N., Podobnik A., Turk B., Vreš B., Frajman B., Strgulc-Krajšek S., Trčak B., Bačič T., Fischer M.A., Eler K., Surina B. 2007. Mala flora Slovenije. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 967 str.
- Mechora Š. 2009. Okoljska ocena in makrofiti vodotokov Bloščice in Cerknishčice. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo: 67 str.
- Nedoh M. 2008. Okoljska ocena in makrofiti reke Pesnice. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo: 77 str.
- Pereira J.M.C., Mota B., Privette J.L., Caylor K.K., Silva J.M.N., Sá A.C.L., Ni-Meister W. 2004. A simulation analysis of the detectability of understory burns in miombo woodlands. *Remote sensing of environment*, 93, 3: 296–310
- Schulze E.-D., Beck E., Müller-Hohenstein K. 2005. *Plant Ecology*. Berlin, Heidelberg, Springer: 702 str.
- Seliškar A. Prilagoditve vodnih rastlin. Prirodoslovno društvo Slovenije.  
<http://www.proteus.si/?q=node/58> (12. sept. 2011)
- Tome D. 2006. Ekologija: organizmi v prostoru in času. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 344 str.
- Trošt Sedej T. 2005. Ekologija rastlin: priročnik za vaje. Ljubljana, Študentska založba: 81 str.
- Underwood E.C., Ustin S.L., Ramirez C.M. 2007. A comparison of spatial and spectral image resolution for mapping invasive plants in coastal California. *Environmental management*, 39, 1: 63–83
- Yoshimura H., Zhu H., Wu Y., Ma R. 2010. Spectral properties of plant leaves pertaining to urban landscape design of broad-spectrum solar ultraviolet radiation reduction. *International journal of biometeorology*, 54, 2: 179–191
- Zupančič B. 2003. Klima. V: Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniskem jezeru. Gaberščik A. (ur.). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije: 4 – 17

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se prof. dr. Alenki Gaberščik za mentorstvo in strokovno pomoč ter vzpodbudo in prijazen odnos. Hvala Draganu Abramcu za tehnično pomoč in Katji Klančnik za vse nasvete in pomoč, predvsem pri statistični obdelavi podatkov.

Hvala recenzentki doc. dr. Mateji Germ in predsednici komisije doc. dr. Katarini Vogel Mikuš za hiter pregled naloge in prijazno komunikacijo.

Hvala mami in vsem ostalim, ki so kakorkoli pripomogli pri nastanku te diplomske naloge.