

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA BIOLOGIJO

Blažka FELE

**OPTIČNE LASTNOSTI LISTOV TREH VRST
DRISTAVCEV**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2013

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA BIOLOGIJO

Blažka FELE

OPTIČNE LASTNOSTI LISTOV TREH VRST DRISTAVCEV

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**LEAF OPTICAL PROPERTIES OF THREE SPECIES OF
PONDWEEDS**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2013

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija biologije. Opravljeno je bilo na Katedri za ekologijo in varstvo okolja Oddelka za biologijo Biotehniške fakultete v Ljubljani.

Študijska komisija Oddelka za biologijo je za mentorico diplomske naloge imenovala prof. Dr. Alenko Gaberščik in za recenzentko doc. dr. Matejo Germ.

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

Datum zagovora: 7.10.2013

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

Diplomsko delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Blažka FELE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Dn
DK 582.536.31(043.2)=163.6
KG odbojni spektri/prepustnost/kodravi dristavec/*Potamogeton crispus*/bleščeči dristavec/*Potamogeton lucens*/preraslolistni dristavec/*Potamogeton perfoliatus*/lastnosti listov
AV FELE, Blažka
SA GABERŠČIK, Alenka (mentor)
KZ SI- 1000 Ljubljana, Večna pot 111
ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo
LI 2013
IN OPTIČNE LASTNOSTI LISTOV TREH VRST DRISTAVCEV
TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)
OP XII, 43 str., 2 pregl., 16 sl., 31 vir.
IJ sl
JI sl/en
AI Preučevali smo morfološke, biokemijske in optične značilnosti kodravega (*Potamogeton crispus*), bleščečega (*Potamogeton lucens*) in preraslolistnega dristavca (*Potamogeton perfoliatus*). Morfološka analiza je vključevala debelino listov, kutikule, povrhnjice in mezofila ter specifično listno površino. Preiskovanim vrstam smo določili tudi vsebnost barvil in UV- absorbirajočih snovi. Odbojne in presevne spektre listov smo izmerili v območju med 280 in 880 nm. Ugotoviti smo želeli, kakšne so razlike v prehajanju in odboju sevanja pri listih izbranih vrst ter katere morfološke in biokemijske lastnosti v največji meri vplivajo na odbojne in presevne spektre listov teh vrst. Rezultati so pokazali, da so si kljub nekaterim razlikam v odbojnem in presevnem spektru optične lastnosti rastlin med seboj precej podobne. Razlike so bile opazne predvsem v vidnem in bližnjem infrardečem delu spektra in so bile posledica razlik v vsebnostih barvil ter različne morfologije vrst. Ugotovili smo, da različne lastnosti vplivajo na različne valovne dolžine. Tako so na odbojnost in prepustnost vidne svetlobe vplivala predvsem fotosintezna barvila, nekoliko vpliva pa so imele tudi morfološke značilnosti. Slednje so vplivale tudi na odbojnost in prepustnost NIR sevanja.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn
DC 582.536.31(043.2)=163.6
CX Reflectance spectra/transmittance/*Potamogeton crispus*/*Potamogeton lucens*/*Potamogeton perfoliatus*/leaf properties
AU FELE, Blažka
AA GABERŠČIK, Alenka (supervisor)
PP SI- 1000 Ljubljana, Večna pot 111
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Biology
PY 2013
TI LEAF OPTICAL PROPERTIES OF THREE SPECIES OF PONDWEEDS
DT Graduation thesis (University studies)
NO XII, 43 p., 2 tab., 16 sl., 31 ref.
LA sl
AL sl/en
AB Optical properties of three species *Potamogeton crispus*, *Potamogeton lucens* and *Potamogeton perfoliatus* were studied. We measured morphological traits namely specific leaf area, leaf thickness, thickness of cuticle, epidermal and mesophyll layer. We also determined pigment contents and the presence of UV-absorbing compounds. Reflectance and transmittance spectra were measured in the range between 280 and 880 nm. Our objective was to examine the differences in reflectance and transmittance spectra patterns of leaves of studied species and to determine which morphological and biochemical traits have the greatest impact on leaf optical properties. The results have revealed, that despite some differences, plants show high similarity in reflectance and transmittance spectra. The differences between species were observed in visible and near infrared part of the spectrum and were the consequence of differences in pigment content and morphology. We came to the conclusion that different leaf traits affect different wavelengths of leaf spectrum. In the visible range, morphology exerted some impact on reflectance and transmittance curves of examined species, but the main traits that affected the amount of light being reflected and transmitted in this waveband were leaf pigments. In contrary morphological traits were the main factor that determined reflection and transmission of light in near infrared part of the spectrum.

KAZALO VSEBINE

	KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA (KDI)	III
	KEY WORDS DOCUMENTATION (KWD)	IV
	KAZALO VSEBINE	V
	KAZALO PREGLEDNIC	VIII
	KAZALO SLIK	IX
	OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	X
1	UVOD	1
2	PREGLED OBJAV	2
2.1	OSNOVNE ZNAČILNOSTI ELEKTROMAGNETNEGA VALOVANJA	2
2.2	LASTNOSTI LISTOV	4
2.2.1	Morfološke lastnosti listov	4
2.2.2	Biokemijske lastnosti listov	5
2.2.2.1	Klorofili	5
2.2.2.2	Karotenoidi	5
2.2.2.3	Antociani	6
2.2.2.4	UV absorbirajoče snovi	6
2.2.3	Optične lastnosti listov	6
2.2.3.1	Valovne dolžine, ki jih list absorbira	7
2.2.3.2	Valovne dolžine, ki jih list prepušča	7
2.2.3.3	Valovne dolžine, ki jih list odbija	8
2.2.3.4	Vpliv zgradbe lista na optične lastnosti	8
2.2.3.5	Biokemijske lastnosti lista in njihov vpliv na optične lastnosti	9
3	MATERIAL IN METODE	10
3.1	PREDMET RAZISKAV	10
3.1.1	Mesto vzorčenja	10
3.1.2	Predstavitev vrst	11
3.2	MERITVE ODBOJNOSTI IN PRESEVNOSTI	13
3.3	MORFOLOŠKE IN ANATOMSKE ANALIZE	14
3.3.1	Specifična listna površina	14

3.3.2	Zgradba lista	14
3.4	BIOKEMIJSKE ANALIZE	14
3.4.1	Klorofili in karotenoidi	15
3.4.2	Antociani	15
3.4.3	UV absorbirajoče snovi	16
3.5	STATISTIČNA ANALIZA	17
4	REZULTATI	17
4.1	MORFOLOŠKE ZNAČILNOSTI	17
4.2	BIOKEMIJSKE ZNAČILNOSTI	20
4.3	ODBOJNOST	24
4.4	PREPUSTNOST	25
4.5	POVEZAVA MED OPTIČNIMI TER MORFOLOŠKIMI IN BIOKEMIJSKIMI ZNAČILNOSTMI	26
4.5.1	Odbojnost lista	26
4.5.2	Prepustnost lista	29
4.5.3	Odbojnost in prepustnost	32
5	RAZPRAVA IN SKLEPI	33
5.1	RAZPRAVA	33
5.1.1	Razlike v odboju sevanja pri listih izbranih vrst	33
5.1.1.1	Razlike v odbojnosti ultravijoličnega dela spektra	34
5.1.1.2	Razlika v odbojnosti vidnega dela spektra	34
5.1.1.3	Razlike v odbojnosti bližnjega infrardečega dela spektra	35
5.1.2	Razlike v prepustnosti sevanja pri listih izbranih vrst	36
5.1.2.1	Razlike v prepustnosti ultravijoličnega dela spektra	36
5.1.2.2	Razlike v prepustnosti vidnega dela spektra	36
5.1.2.3	Razlike v prepustnosti bližnjega infrardečega dela spektra	37
5.1.3	Morfološke in biokemijske lastnosti, ki v največji meri vplivajo na odbojne spektre listov izbranih vrst	38
5.1.4	Morfološke in biokemijske lastnosti, ki v največji meri vplivajo na prepustne spektre listov izbranih vrst	39
5.2	SKLEPI	41
6	POVZETEK	42

7

VIRI

43

ZAHVALA

KAZALO PREGLEDNIC

- Pregl. 1: Spearmanov koeficient odvisnosti med posameznimi območji odbojnega spektra in morfološki ter biokemijski lastnostmi listov preučevanih vrst.
* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$. 27
- Pregl. 2: Spearmanov koeficient odvisnosti med posameznimi območji prepustnega spektra in morfološki ter biokemijski lastnostmi listov preučevanih vrst.
* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$. 29

KAZALO SLIK

Sl. 1: Kodravi dristavec ali <i>Potamogeton crispus</i>	11
Sl. 2: Bleščeči dristavec ali <i>Potamogeton lucens</i>	12
Sl. 3: Preraslolistni dristavec ali <i>Potamogeton perfoliatus</i>	13
Sl. 4: Prečni prerez lista vrste <i>Potamogeton crispus</i> . Desetkratna povečava (levo) in štiridesetkratna povečava (desno)	17
Sl. 5: Prečni prerez lista vrste <i>Potamogeton lucens</i> . Desetkratna povečava (levo) in štiridesetkratna povečava (desno)	18
Sl. 6: Prečni prerez lista vrste <i>Potamogeton perfoliatus</i> . Desetkratna povečava (levo) in štiridesetkratna povečava (desno)	18
Sl. 7: Debeline plasti listov vseh treh vrst	19
Sl. 8: Specifična listna površina (SLA)	20
Sl. 9: Vsebnost klorofila <i>a</i> , klorofila <i>b</i> in karotenoidov. Vsebnost izražena na površino lista (A) in maso suhe snovi lista (B)	21
Sl. 10: Vsebnost antocianov. Vsebnost izražena na površino lista (A) in maso suhe snovi lista (B)	22
Sl. 11: Vsebnost UV-absorbirajočih snovi. Vsebnost je izražena na površino lista (A) in maso suhe snovi lista (B)	23
Sl. 12: Odbojni spektri listov vrst <i>P. crispus</i> , <i>P. lucens</i> , <i>P. perfoliatus</i>	24
Sl. 13: Prepustni spektri listov vrst <i>P. crispus</i> , <i>P. lucens</i> , <i>P. perfoliatus</i>	25
Sl. 14: Dendrogram podobnosti, ki vključuje odbojne spektre ter morfološke in biokemijske lastnosti listov vrst <i>P. crispus</i> , <i>P. lucens</i> in <i>P. perfoliatus</i>	28
Sl. 15: Dendrogram podobnosti, ki vključuje prepustne spektre ter morfološke in biokemijske lastnosti listov vrst <i>P. crispus</i> , <i>P. lucens</i> in <i>P. perfoliatus</i>	31
Sl. 16: Dendrogram podobnosti, ki vključuje odbojne in prepustne spektre ter morfološke in biokemijske lastnosti listov vrst <i>P. crispus</i> , <i>P. lucens</i> in <i>P. perfoliatus</i>	32

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

NIR	bližnje infrardeče sevanje (700-1400 nm)
SLA	specifična listna površina
ANOVA	analiza variance
UV	ultraviolečno sevanje (100-400 nm)
UV-A	ultraviolečno sevanje A
UV-B	ultraviolečno sevanje B

1 UVOD

Najpomembnejše naloge listov so zbiranje sončne energije, privzem ogljikovega dioksida in preprečevanje izgube vode. Uravnavanje teh funkcij zagotavlja optimalno fotosintezno aktivnost. Rastlina jo doseže s prilagajanjem privzemnih površin na trenutne okoljske razmere na morfološkem, anatomskem, biokemijskem in funkcijskem nivoju. Listi kažejo veliko heterogenost pri optičnih značilnostih, ki se ne razlikujejo zgolj med vrstami, temveč so odvisne tudi od okoljskih razmer (Klančnik in sod., 2012).

Spektralni odtis vrste se lahko spreminja zaradi variabilnosti znotraj vrste, zaradi pomanjkanja hranil in zaradi različnih drugih okoljskih dejavnikov. Spreminja pa se tudi zaradi dinamične narave optičnih lastnosti lista kot funkcije naravnih ciklov rastlin. Zato je pomemben celovit opis naravnih sprememb v optičnih lastnostih lista znotraj vrst pod normalnimi ravnimi razmerami. Za uspešno razlikovanje stresnih odgovorov od normalnih sprememb je potrebno uporabiti spektralne podatke pri čemer je potreben razvoj orodij za prepoznavo, poznavanje biokemije, anatomije ter fenologije (Liew in sod., 2008).

Raziskove smo opravili na treh vrstah dristavcev, ki smo jih vzorčili v reki Rak: bleščeči dristavec (*Potamogeton lucens*), kodravi dristavec (*Potamogeton crispus*) in preraslolistni dristavec (*Potamogeton perfoliatus*).

Ugotoviti smo želeli kakšne so razlike v prehajanju in odboju sevanja pri listih izbranih vrst ter katere morfološke in biokemijske lastnosti v največji meri vplivajo na odbojne in presevalne spektre listov teh vrst. V ta namen smo merili presevalnost in odbojnost listov, nato pa še morfološke (debelina lista in njegovih plasti) ter biokemijske značilnosti (vsebnosti klorofila *a*, *b*, karotenoidov, antocianov in UV absorbirajočih snovi).

Postavili smo naslednje hipoteze: (1) optične lastnosti listov vseh treh vrst so si podobne, saj vrste rastejo v podobnih svetlobnih razmerah in (2) na presevalnost in odbojnost bo imela največji vpliv količina fotosinteznih in drugih barvil.

2 PREGLED OBJAV

2.1 OSNOVNE ZNAČILNOSTI ELEKTROMAGNETNEGA VALOVANJA

Jedrske reakcije znotraj Sonca ustvarijo elektromagnetno valovanje, ki brez večjih sprememb potuje skozi vesolje. Preden doseže zemeljsko površino, mora prepotovati pot skozi atmosfero, kjer trdi delci, molekule plinov in tekočin povzročijo sipanje, lom in absorpcijo valovanja. Posledično je več kot polovica sončne svetlobe odbite nazaj v vesolje (Larcher, 2003).

Elektromagnetno valovanje, ki se ne absorbira ali sipa v atmosferi, pride do zemeljskega površja (Oštir, 2006). Biosfera prejme valovne dolžine od 290 nm do 4000 nm. Sevanje krajših valovnih dolžin absorbira stratosferski ozon in kisik v zraku, mejo daljših valovnih dolžin pa določajo vodni hlapi in ogljikov dioksid v atmosferi. 45 % vpadnega sevanja je sestavljenega iz vidnih oz. fotosintezno aktivnih valovnih dolžin (380-710 nm). Sestavlja ga še ultravijolično sevanje (UV-A 315-380 nm in UV-B 290-315 nm) ter infrardeče sevanje (750-4000 nm). Zemljino površje, vključno z rastlinami, pa prejema in oddaja tudi toplotno ali dolgovalovno rdeče sevanje (4000-10⁵ nm) (Larcher, 2003).

Glavni načini interakcij valovanja s površjem so absorpcija, prepustnost in odboj. Razmerje med njimi je odvisno od valovne dolžine svetlobe ter lastnosti in stanja površine. Odvisnost odboja od valovne dolžine tako omogoča prepoznavanje predmetov in nam daje njihov spektralni podpis (Oštir, 2006).

Kadar valovanje pade na gladko površino, pride do zrcalnega odboja. Pri tem se skoraj vsa vpadna energija odbije od površine pod kotom, enakim vpadnemu. Razpršeni ali difuzni odboj pa se pojavi, kadar je ploskev groba in se valovanje odbije v vse smeri približno enako. Ali neko telo deluje kot zrcalni ali razpršeni odbojnik ali nekje vmes, je odvisno od razgibanosti njegove površine v primerjavi z valovno dolžino vpadnega valovanja. Če so valovne dolžine manjše od značilnih dolžin razgibanega površja ali od velikosti predmetov, ki površine sestavljajo, pride do razpršenega odboja. V primeru, ko pa je valovna dolžina večja od značilnih razdalj na površju, se zgodi zrcalni odboj. Pri prehodu valovanja med

snovmi z različno optično gostoto pride do loma valovanja. Ko potuje svetloba iz optično redkejšega medija v gostejšega, se lomi proti normali (premici, pravokotni na površino). Valovanje se v gosti snovi tako upočasni in spremeni smer. Pri prehodu iz optično gostejšega v redkejšo sredstvo pa se valovanje lomi proč od normale (Oštir, 2006).

Svetloba, ki pride do površine vodnega telesa, je sestavljena iz direktne in difuzne svetlobe (Gimond, 2003). Ko svetloba zadene vodno površino, se od nje zrcalno odbije ali pa jo mejna površina zrak-voda prepušča (Zimmermann, 2006). Z globino se intenziteta svetlobe eksponentno znižuje zaradi absorpcije in razpršenja, ki ga povzroči voda ter raztopljeni in neraztopljeni delci v njej. Z globino se spreminja sestava svetlobnega spektra. Dolgovalovno toplotno sevanje se absorbira v nekaj zgornjih milimetrih, infrardeče sevanje v zgornjih centimetrih, UV pa prodira do nekaj metrov globoko. Vidno sevanje doseže večje globine, kjer prevladujejo modre in zelene valovne dolžine. Količina sevanja v vodnih telesih je odvisna od površinskega osvetljevanja ter od količine odboja in razpršenja svetlobe na ali blizu površja. V tekočih vodah se lahko intenziteta svetlobe močno spreminja od nekaj centimetrov do nekaj decimetrov (Larcher, 2003).

Z merjenjem energije, ki se odbije od predmetov zemeljskega površja, lahko ustvarimo spektralni podpis opazovanih predmetov. S primerjavo odziva pri različnih valovnih dolžinah lahko predmete med sabo ločimo. Spektralni odziv je lahko precej različen, celo za enake predmete, poleg tega pa se spreminja časovno in prostorsko. Za interpretacijo podatkov je pomembno poznavanje spektralno zanimivih območij, razumevanje dejavnikov, ki vplivajo na spektralni podpis ter razumevanje načina interakcije valovanja s površjem (Oštir, 2006).

2.2 LASTNOSTI LISTOV

2.2.1 Morfološke lastnosti listov

Dorzentralen list je na zunaj omejen z zgornjo in spodnjo povrhnjico, ki sta impregnirani z voskasto kutikulo (Slaton in sod., 2001; Liew in sod., 2008), znotraj lista pa je žilni sistem obdan z parenhimatskim tkivom. Listna povrhnjica je kompaktno tkivo in je, če izključimo listne reže, brez medceličnih prostorov. Lahko je iz ene ali več plasti celic. Navadno celice povrhnjice pri listih ne vsebujejo kloroplastov, najdemo pa jih v povrhnjicah močno reduciranih vodnih rastlin in nekaterih praproti, ki rastejo v okolju z malo svetlobe. Povrhnjica deluje kot zaščita pred patogeni, škodljivim sevanjem, in daje rastlini podporo, prepuščati pa mora kisik in ogljikov dioksid. Pokrita je s kutikulo različnih debelin, od 1 μ m do 15 μ m in več. Sestavlja jo kutin in voski in je v veliki meri nepropustna za vodo ter za druge majhne molekule. Rastline, ki rastejo v vlažnem okolju, imajo tanko kutikulo. Njena vloga je zadrževanje vode v rastlini, pomembna pa je tudi pri odbijanju svetlobe, saj tako zmanjša možnost pregretja rastline. Listni mezofil je v mnogih listih razdeljen na palisadno tkivo s cilindrastimi celicami ob zgornji povrhnjici ter gobasto tkivo pod njim z nepravilno oblikovanimi celicami, med katerimi je velik delež zračnega prostora (aerenhima). Število plasti palisadnega tkiva je pogosto povezano z količino svetlobe. Manj kot je svetlobe, manj bo plasti teh celic. Delež zračnega prostora v gobastem mezofilu je pri plavajočih rastlinah večji (Beck, 2005).

Zaradi posebnosti vodnega okolja, pa so se pri višjih vodnih rastlinah razvile specifične morfološke in anatomske prilagoditve, imenovane hidromorfoze. Potopljeni listi imajo tako povečano razmerje med površino in prostornino, ki omogoča učinkovitejše sprejemanje plinov, hranil in vode. Listi so zato pogosto tanki, lasasti ali drobno razcepljeni. Listna povrhnjica je pogosto enoplastna, kutikula pa slabo razvita, da lahko dobro prepušča vodo. Listne reže največkrat niso razvite. Večina vodnih rastlin je sposobna absorbirati hranila iz vode skozi celotno svojo površino, zato je prevajalno tkivo pri teh listih slabo razvito. V povrhnjici so hidropote, žlezne diferenciacije, ki absorbirajo ione iz vode. Mezofil potopljenega lista ima zaradi lažjega prehajanja svetlobe in snovi manj plasti kot kopenski listi. Asimilacijsko tkivo ni diferencirano v stebričasto in gobasto

tkivo, ampak je grajeno kot enoten asimilacijski parenhim. Njegove celice so izodiametrične in tako bolj prepuščajo svetlobo kot stebričasto tkivo, kjer bi se velik delež sevanja absorbiral na poti skozi celične stene. Za dodaten izkoristek svetlobe pa so lahko kloroplasti prisotni tudi v povrhnjici. Za vodne rastline je značilno zračno tkivo ali aerenhim. Sistem zračnih prostorov poteka od listov skozi peclje in stebela vse do korenin, kar omogoča prehajanje plinov od listov do korenin (kisik) in obratno (ogljikov dioksid in metan). Zaradi velike gostote vodnega medija je obseg opornega tkiva zmanjšan. Aerenhim prevzema tudi to nalogo s povečevanjem vzgona rastline (Trošt Sedej, 2005).

2.2.2 Biokemijske lastnosti listov

2.2.2.1 Klorofili

Klorofili so barvila, ki se nahajajo v žetvenem antenskem kompleksu in reakcijskem centru fotosistema I in II (Larcher, 2003). Sestavljeni so iz tetrapirolnih obročev s centralno vezanimi kovinami. Klorofili absorbirajo v rdečem in modrem delu spektra. Klorofil *a*, ki je modrozelen pri 433 in 669 nm, klorofil *b*, ki je rumenzelen pa pri 455 in 644 nm. Absorpcijski minimum klorofila je okoli 550 nm, kar nam omogoča zaznavo zelene barve (Liew in sod., 2008).

2.2.2.2 Karotenoidi

Karotenoidi močno absorbirajo svetlobo v modrem delu spektra, še posebej pri valovnih dolžinah od 500-520 nm. Njihove koncentracije so takoj za klorofilnimi (Baltzer in Thomas, 2005). Ta rumena do rdeča barvila so topna v lipidih in so podrazred terpenoidov. Izgrajujejo se v kloroplastih in so pomemben del fotosinteznega aparata (Tanaka in sod., 2008). Njihova najpomembnejša naloga je prestrezanje svetlobe in zaščita pred svetlobnim stresom (Zur, 2000). Karotenoidi učinkovito absorbirajo visokoenergetsko kratkovalovno sevanje. Preko ksantofilnega cikla odvajajo odvečno energijo v obliki toplote. S tem ščitijo klorofile, saj preusmerijo energijo stran od reakcijskih centrov (Middleton in Teramura, 1993).

2.2.2.3 Antociani

Antociani so v vodi topna barvila, derivati flavonoidov, ki omogočajo rastlini odpornost na številne okoljske strese, del katerih so tudi UV-B sevanje in sevanje vidnih valovnih dolžin. Absorbirajo UV-B sevanje in modro svetlobo, oddajajo pa rdeče valovne dolžine. Kopičijo se v vakuolah, večinoma pa jih najdemo v ali takoj pod zgornjo povrhnjico lista. Njihovo izgradnjo sproži UV-B, vidna in daljna rdeča svetloba (Tanaka in sod., 2008; Chalker-Scott, 1999). Delujejo tudi kot antioksidanti in lovijo proste radikale katerih količina naraste, ko je zmanjšana možnost razpršitve odvečne energije (Close in Beadle, 2003).

2.2.2.4 UV absorbirajoče snovi

UV absorbirajoče snovi spadajo med flavonoide in služijo kot notranja zaščita fotosinteznega tkiva pred sevanjem, imajo pa tudi druge fiziološke in ekološke vloge. Tako UV-A (315-400 nm) kot UV-B (280-315 nm) sevanje sprožita nastanek teh kompleksnih fenolnih spojin. UV-B sevanje namreč lahko ovira in škoduje fotosintezi, saj poškoduje DNA, proteine in rastlinske membrane. Poškodbe in inhibicije lahko povzročata tudi UV-A sevanje. Ti flavonoidi se pri kopenskih rastlinah ponavadi nahajajo v zgornji listni povrhnjici, njihova maksimalna absorpcija pa je okrog 300 nm. Vodne rastline so zadržale nekatere tovrstne biokemijske značilnosti kopenskih prednikov (Middleton in Teramura, 1993; Rozema in sod., 2002).

2.2.3 Optične lastnosti listov

Na odbojnost in presevnost ultraviolečnega sevanja (280-400 nm) vplivajo klorofili in UV absorbirajoče snovi. Odbojnost in presevnost vidnih valovnih dolžin (400-700 nm) sta odvisni predvsem od fotosinteznih barvil, bližnje infrardeče sevanje (750-1350 nm) pa list prepušča in odbija glede na listno zgradbo (Slaton in sod., 2001). Prispevek posameznih gradbenih in biokemijskih značilnosti k optičnim lastnostim pa še ni povsem jasen (Liew in sod., 2008).

2.2.3.1 Valovne dolžine, ki jih list absorbira

Absorpcija vidnih in bližnjih infrardečih valovnih dolžin (NIR) se zgodi zaradi nihanja kovalentnih vezi med kisikom, ogljikom, vodikom in dušikom, ki so prisotni v sladkorjih, ligninu, celulozi in proteinih, ki gradijo rastlino, pomembno vlogo pa igrajo tudi fotosintezna barvila (Liew in sod., 2008).

V vidni regiji zelen list zaradi vsebnosti klorofilov in karotenoidov dobro absorbira modro in rdečo vidno valovno dolžino, zeleno pa manj (Yoshimura in sod., 2012). Zaradi središčne vloge teh barvil pri fotosintezi je vsebnost klorofila ponavadi dober pokazatelj fiziološkega zdravja rastlin (Liew in sod., 2008). Vendar pa imajo karotenoidi in klorofili prekrivajoče se absorpcijske pasove v modrem delu spektra, zato nam je zgolj z merjenjem odbojnega spektra razlikovanje med njimi oteženo (Zur, 2000).

Absorpcija v bližnjem infrardečem delu spektra vpliva na biokemijske vezi, na primer med vodikovimi in ogljikovimi ter dušikovimi in kisikovimi atomi (Dawson in sod., 1996). Vendar bližnje infrardeče valovanje list le šibko absorbira (Slaton in sod., 2001).

V ultravioletnem delu spektra kaže list 95 % absorpcijo (Yoshimura in sod., 2012). Ker mora pri kopenskih rastlinah povrhnjica prepuščati fotosintezno aktivno sevanje, ima ta plast tkiva sposobnost selektivne absorpcije UV-B sevanja, kjer igrajo glavno vlogo UV absorbirajoči flavonoidi (Robberecht in Caldwell, 1978). Poleg flavonoidov ščitijo celice pred ultravioletnim sevanjem tudi epikutikularni voski in karotenoidi. Le 5-10 % vpadnega UV sevanja doseže zgornjo plast celic mezofila kopenskih rastlin (Larcher, 2003).

2.2.3.2 Valovne dolžine, ki jih list prepušča

Prepustnost je najvišja pri valovnih dolžinah, pri katerih je velika tudi odbojnost, na primer v zelenem in še posebno v bližnjem infrardečem delu spektra. Zato so valovne dolžine, ki jih list prepušča, predvsem okrog 500 nm in nad 800 nm. Prepustnost lista je odvisna od zgradbe in debeline lista. Mehki in upogljivi listi prepuščajo 10-20 % sevanja, zelo tanki

do 40 % in debelejši ter bolj grobi skoraj nič (manj kot 3 %) (Larcher, 2003). List UV svetlobe ne prepušča (Yoshimura in sod., 2012).

2.2.3.3 Valovne dolžine, ki jih list odbija

Na odbojni spekter vplivajo zgradba listne povrhnjice, notranja zgradba in biokemijska sestava lista (Liew in sod., 2008).

List ima visoko odbojnost v bližnjem infrardečem delu spektra (700-1300 nm) (Yoshimura in sod., 2012). Mnogo značilnosti listne zgradbe lahko prispeva k odbojnosti bližnjega infrardečega sevanja od listov. Kutikula s svojo debelino povečuje odbojnost bližnjih infrardečih valovnih dolžin, pri tem pa sodelujejo tudi stične površine med celico in zrakom. Te zaradi razlik v lomnih količnikih med hidratirano celico in medceličnim zračnim prostorom odbijajo svetlobo, hkrati pa je prisotna tudi šibka absorpcija NIR dela spektra (Slaton in sod., 2001). Odbojnost bližnjih infrardečih valovnih dolžin narašča z debelino celotnega lista, saj z njo naraščajo tudi stične površine med celico in medceličnim zračnim prostorom (Knapp in Carter, 1998).

Listi odbijajo v povprečju 6-10 % vpadnih vidnih valovnih dolžin. Močno se odbija zelena svetloba (10-20 %), najmanj pa oranžna in rdeča (3-10 %). Svetloba, ki zapušča list, je predvsem svetloba odbita iz listne površine, del pa je razpršene svetlobe, ki prihaja iz notranjosti lista (Larcher, 2003). V UV regiji spektra kaže list malo odbojnosti (5 %) (Yoshimura in sod., 2012).

2.2.3.4 Vpliv zgradbe lista na optične lastnosti

Oblika celic, debelina plasti in delež površine celic, ki je v stiku z medceličnim zrakom, vplivajo na prodiranje svetlobe v list, dolžino optične poti ter na stopnjo odboja in razpršitve svetlobe (Liew in sod., 2008). Zgradba lista določa med drugim tudi razporejanje svetlobe znotraj lista. Celice listne povrhnjice fokusirajo svetlobo, medcelični zračni prostori mezofila pa jo močno razpršijo, kar poveča možnost njene absorpcije za fotosintezo (Vogelmann in sod., 1996).

Adaksialna kutikula odbija vidno in UV-B svetlobo, polifenoli v njej pa absorbirajo UV-B sevanje (Velazquez-Rosas in sod., 2012). Na odbojni spekter lista vplivajo spremembe v debelini kutikule (Liew in sod., 2008). Kutikula, ki je debelejša od 1 μm , ima ključen vpliv na odbojnost bližnje infrardeče svetlobe (Slaton in sod., 2001). Debelina kutikule se tako razlikuje med vrstami ter glede na okoljske razmere (Liew in sod., 2008).

Celice povrhnjice so prepustne za vidno svetlobo in so plankonveksne oblike, zaradi česar celica deluje kot leča, ki zbere in fokusira svetlobo. S to obliko celic lahko list ujame več razpršene svetlobe, hkrati pa celice povrhnjice lomijo svetlobo, ki tako pada bolj poševno v fotosintezno tkivo. Pot svetlobe se s tem podaljša in poveča se verjetnost prestrežanja svetlobe za fotosintezo (Vogelmann in sod., 1996). Povrhnjica vidno svetlobo deloma tudi odbija, zaradi vsebnosti polifenolov pa absorbira UV-B sevanje (Velazquez-Rosas in sod., 2012).

Mezofil lista ima nepravilno oblikovane celice, med njimi pa je velik delež medceličnega zračnega prostora. Razlika v lomnem količniku med listno celico in njenim medceličnim zračnim prostorom je vzrok za visoko odbojnost v zračnih prostorih. Razpršenje svetlobe poveča dolžino svetlobne poti in foton se v listu zadrži dlje časa, kar listu omogoča večjo količino absorbirane svetlobe. Tako list ustvarja svetlobno past in gostota fotonov v njem lahko preseže gostoto zunaj lista (Vogelmann in sod., 1996). Debelina gobastega mezofila in delež površin celic, izpostavljenih medceličnemu zraku na enoto površine lista, vplivajo na prodiranje svetlobe znotraj lista, na dolžino optične poti in na stopnjo razpršenja svetlobe znotraj lista (Liew in sod., 2008).

2.2.3.5 Biokemijske lastnosti lista in njihov vpliv na optične lastnosti

Pomembne absorbirajoče molekule so barvila, ki vplivajo na barvo lista. Sestavljeni so iz tetrapirolnih obročev s centralno vezanimi kovinami. Barva je odvisna bolj od zgradbe tetrapirolovega obroča in perifernih substitucij kot od vezane kovine. Tako se klorofil *a* in klorofil *b* razlikujeta v valovnih dolžinah, ki jih absorbirata zaradi pri klorofilu *a* vezane metilne skupine na mestu, kjer ima klorofil *b* vezano aldehidno skupino. Zaradi središčne vloge teh barvil pri fotosintezi, je vsebnost klorofila splošno sprejeta kot dober pokazatelj

fiziološkega stanja rastline. Pomanjkanje hranil namreč pogosto povzroči znižanje vsebnosti klorofila, čemur sledi porast odbojnosti v vidnem in infrardečem delu spektra. Kloroze povzročajo rumenenje listov (Liew in sod., 2008).

Tehnike daljinskega zaznavanja, ki ocenjujejo vsebnost barvil pri višjih rastlinah, so pomembno orodje za določitev rastlinskega fiziološkega stanja. Vendar pa imajo karotenoidi in klorofili prekrivajoče se absorpcijske pasove v modrem delu spektra, zato je razlikovanje med njimi zgolj z merjenjem odbojnega spektra oteženo (Zur, 2000).

Na značilnosti spektra vpliva tudi stopnja hidratacije. Odbojnost v vidnem delu je večja pri suhem, kot pri svežem listu. Absorpcija vode pa določa obliko krivulje v srednjem infrardečem delu z močnimi absorpcijskimi vrhovi okrog valovnih dolžin 1400 nm in 1900 nm (Liew in sod., 2008).

3 MATERIAL IN METODE

3.1 PREDMET RAZISKAV

3.1.1 Mesto vzorčenja

Rakov Škocjan je podolgovata kraška dolina med Cerkniškim in Planinskim kraškim poljem v Notranjskem podolju. Na jugu je omejena s pobočji Javornikov, na severu pa jo obdajajo nižji griči. Kotlino sestavljata dve ločeni kotanji. Reka Rak teče po približno dva kilometra dolgi kotanji jugovzodnega dela Rakovega Škocjana. Rak je sistem ponikalnic kraške Ljubljanice, izvira pa na vzhodnem delu iz vhoda v Zelške jame ter ponikne v Tkalca jamo. V dolini Raka se pojavljajo vode, ki poniknejo na SZ robu Cerkniškega polja, pritoki pa so tudi iz zahodne strani pod Javorniki. Značilna so velika nihanja gladine vode. Ob nižjih vodostajih voda ponika v živoskalni strugi in presahne že na polovici doline. Ob visokih vodostajih pa Rak poplavi in poplavne vode običajno dosežejo globino 10 m (Ferk, 2011).

V reki Rak je prisoten droben anorganski material, v sedimentu pa prevladuje matična kamnina. Ima strma pobočja, njen tok pa ima nizko hitrost, saj je padec blag. V njej je prisotnih je 35 vrst makrofitov s prevladujočimi predstavniki iz rodu *Potamogeton*, ki ga zastopa šest vrst. Glede na razporeditev vrst bi potok lahko razdelili na dva dela. Prvega, ki teče skozi gozd, naseljujejo predvsem mahovi, v njem pa je bila najdena tudi ogrožena vrsta *Potamogeton salicifolius*. Drugi del obdajajo odprta polnaravna območja. Prisotnost in količina nekaterih vrst v tem delu nakazujejo visok trofični status. Tu najdemo vrste *Potamogeton lucens*, *P. natans*, *P. perfoliatus*, *Sagittaria sagittifolia* in filamentozne alge (Gaberščik in sod., 2005).

3.1.2 Predstavitev vrst

Potamogeton crispus L.

Po slovensko ga imenujemo kodravi dristavec in sodi v družino Potamogetonaceae. Prisoten je po celotni Sloveniji in raste v počasi tekočih ali stoječih vodah. Cveti od maja do avgusta. Ta enokaličnica je hidrofit. Njeno steblo je štirioglato, listi pa sedeči, ozkosuličasti in z drobno nazobčanim valovitim robom (Martinčič in sod., 1999).



Slika 1: Kodravi dristavec (*Potamogeton crispus*)

***Potamogeton lucens* L.**

Njegovo slovensko ime je bleščéči dristavec in spada v družino Potamogetonaceae (drističavke). V Sloveniji je splošno prisoten v rekah, jezerih in ribnikih. Cveti od junija do avgusta. Vrsta je zelnata trajnica in hidrofit. Je enokaličnica, njegovi listi pa so kratkopecljati ali sedeči, suličasti, dolgi do 30 cm, z valovitim robom in bodico na vrhu. Pri nas velja za ranljivo vrsto (Martinčič in sod., 1999).



Slika 2: Bleščéči dristavec (*Potamogeton lucens*)

***Potamogeton perfoliatus* L.**

Slovensko ga poimenujemo preraslolistni dristavec in je prav tako član družine Potamogetonaceae. Prisoten je po celi Sloveniji v rekah, ribnikih in jezerih, vendar velja za ranljivo vrsto. Cveti od junija do avgusta. Vrsta je enokaličnica in je hidrofit. Ima okroglo, močno razraslo steblo ter sedeče liste, ki ga obdajajo. Listi so jajčasti, dolgi do 6 cm in imajo srčasto dno (Martinčič in sod., 1999).



Slika 3: Preraslolistni dristavec (*Potamogeton perfoliatus*)

3.2 MERITVE ODBOJNOSTI IN PRESEVNOSTI

Meritve smo izvajali na sveže nabranem rastlinskem materialu, ki smo mu odstranili obrast. Opravljali smo jih s pomočjo Jaz Modular Optical Sensing Suite (Ocean Optics, Inc., Dunedin, FL, USA). Tega sestavlja integracijska sfera ISP-30-6-R (Ocean Optics, Inc., Dunedin, FL), ki je povezana preko optičnega vlakna (QP600-1-SR-BX (Ocean Optics, Inc., Dunedin, FL, USA) s spektrometrom. Vir svetlobe, s katerim smo osvetljevali list (DH-2000, Ocean Optics, Inc., FL, USA), je bil sestavljen iz vidne, ultraviolečne svetlobe in svetlobe bližnjega infrardečega valovanja (UV-VIS-NIR svetlobni vir).

Naredili smo 3 meritve odbojnosti in prepustnosti na vsakem od desetih listov posamezne vrste. Merili smo odbojnost in prepustnost v razponu od 280 do 880 nm z razmakom 0,3 nm med intervali. Pred merjenjem smo napravo umerili. Pod sfero smo postavili belo referenčno ploščico, ki je predstavljala 100 % odbojnost. Nato smo merili odbojnost listov, ki smo jih pod sfero postavili tako, da je bila osvetljevana adaksialna stran, hkrati pa smo se izogibali osrednjemu rebru. Svetloba, ki se je odbila od lista, je prehajala v sfero in preko optičnega vlakna v spektrometer. Odbojni spekter vzorca je bil nato preračunan kot razmerje med odbojnostjo vzorca in bele referenčne ploščice pod istim osvetljevanjem, vrednost pa smo pomnožili še s 100, da smo dobili odstotke. Prepustnost smo merili tako, da smo list osvetljevali z adaksialne strani, na abaksialno stran lista pa smo položili sfero,

da je ta ujela svetlobo, ki je prehajala skozi list. Prepuščeno sevanje smo delili z referenčnim, ki je predstavljalo 100 % prepustnost ter preračunali v odstotke.

3.3 MORFOLOŠKE IN ANATOMSKE ANALIZE

3.3.1 Specifična listna površina

Delčke svežih listov z znano površino smo najprej stehali, nato pa dali sušiti za 24 ur na temperaturo 105 °C (sušilnik Sterimatic ST-11, Instrumentaria, Zagreb). Po sušenju smo določili njihovo suho maso. Iz dobljenih vrednosti smo izračunali specifično listno površino, ki je količnik med površino vzorca in njegovo suho maso [$\text{cm}^2 \text{mg}^{-1}$].

3.3.2 Zgradba lista

Naredili smo preparate prečnih prerezov listov. Prerez smo naredili na delu lista, ki je med osrednjo žilo in robom lista, na katerem smo predhodno merili tudi optične lastnosti. Za analizo zgradbe smo uporabljali svetlobni mikroskop (Olympus CX41) na katerega je bila pripeta kamera. S pomočjo računalniškega programa smo merili debelino lista ter njegovih plasti, tako spodnje in zgornje povrhnjice, spodnje in zgornje kutikule, kot tudi mezofila.

3.4 BIOKEMIJSKE ANALIZE

Vzorci za merjenje vsebnosti barvil smo predhodno pripravili in jih shranili v zamrzovalnik, da smo ohranili barvila nepoškodovana za kasnejše analize. Naredili smo tri vzorce za vsakega izmed desetih listov ene vrste. En vzorec smo namenili za ekstrakcijo klorofilov, drugega za antociane in tretjega za ekstrakcijo UV absorbirajočih snovi. Vsakemu vzorcu smo izmerili maso in površino lista.

3.4.1 Klorofili in karotenoidi

Pri določanju vsebnosti klorofila *a* in *b* ter karotenoidov smo se ravnali po metodi Lichtenthaler in Buschmann (2001a, 2001b). Sveže zamrznjene vzorce smo strli v terilnici in jih ekstrahirali v 10 mL 100 % acetona (v/v). 4 minute smo jih centrifugirali pri 4000 rpm in 4 °C, nato pa smo odčitali prostornine ekstraktov. Z UV-VIS spektrofotometrom (Lambda 25, Perkin–Elmer, Norwalk, CT, USA) smo izmerili ekstinkcije pri valovnih dolžinah 470, 645 in 662 nm. Vsebnosti klorofilov (Kl *a* in Kl *b*) ter karotenoidov (Kar) smo izrazili glede na suho maso [mg g^{-1}], in površino vzorca [mg cm^{-2}].

$$Kl\ a\ [\text{mg g}^{-1}\ \text{ss};\ \text{mg cm}^2] = c_a * V / \text{ss} * 1000 = (11,24 E_{662} - 2,04 E_{645}) * V / \text{ss} \quad \dots (1)$$

$$Kl\ b\ [\text{mg g}^{-1}\ \text{ss};\ \text{mg cm}^2] = c_b * V / \text{ss} = (20,13 E_{645} - 4,19 E_{662}) * V / \text{ss} \quad \dots (2)$$

$$Kar\ [\text{mg g}^{-1}\ \text{ss};\ \text{mg cm}^2] = (1000 E_{470} - 1,9 c_a - 63,14 c_b) * V / \text{ss} / 214 \quad \dots (3)$$

$c_{a,b}$ = koncentracija klorofila *a*, *b*

V = volumen ekstrakta [mL]

ss = suha masa vzorca [mg]

E = ekstinkcija pri izbrani valovni dolžini

3.4.2 Antociani

Pri določanju vsebnosti antocianov smo se ravnali po metodi Khare in Guruprasad (1993). Vzorce, ki smo jih strli v terilnici smo ekstrahirali v 10 mL ekstrakcijskega medija metanol : HCl (37 %) = 99 : 1 (v/v). Vzorce smo centrifugirali 4 min pri 4000 rpm in 4 °C, nato pa odčitali prostornine ekstraktov. Sledila je 24-urna inkubacija vzorcev na 3-5 °C v temi. Ekstinkcije smo merili z UV-VIS spektrofotometrom pri valovni dolžini 530 nm. Vsebnosti antocianov (Ant) smo nato preračunali glede na suho maso in površino ter jih izrazili v relativnih enotah.

$$Ant\ (\text{relativna enota}) = E_{530} * V / \text{ss}; \quad E_{530} * V / P \quad \dots (4)$$

E_{530} = ekstinkcija pri valovni dolžini 530 nm

V = prostornina ekstrakta [mL]

ss = suha masa [g]

P = površina vzorca [cm²]

3.4.3 UV absorbirajoče snovi

Vsebnosti UV-A in UV-B absorbirajočih snovi smo določali po metodi, ki jo je postavil Caldwell (1968). Vzorce smo strli v terilnici in ekstrahirali v 10 mL ekstrakcijskega medija metanol : destilirana voda : HCl (37 %) = 79 : 20 : 1 (v/v). Sledila je 20 minutna inkubacija in nato centrifugiranje pri 4000 rpm in 10 °C za 10 minut. Odčitali smo prostornine ekstraktov ter izmerili ekstinkcije z UV-VIS spektrofotometrom pri valovnih dolžinah med 280 in 400 nm. Vsebnosti UV absorbirajočih snovi smo nato izračunali kot integral ekstinkcijskih vrednosti od 280 do 320 nm (za UV-B absorbirajoče snovi) ter od 320 do 400 nm (UV-A absorbirajoče snovi) in jih izrazili v relativnih enotah glede na površino in suho maso vzorca.

$$UV\ abs\ (relativna\ enota) = I * V^{-1} * ss^{-1}; \quad I * V^{-1} * P^{-1} \quad \dots (5)$$

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]

P = površina vzorca [cm²]

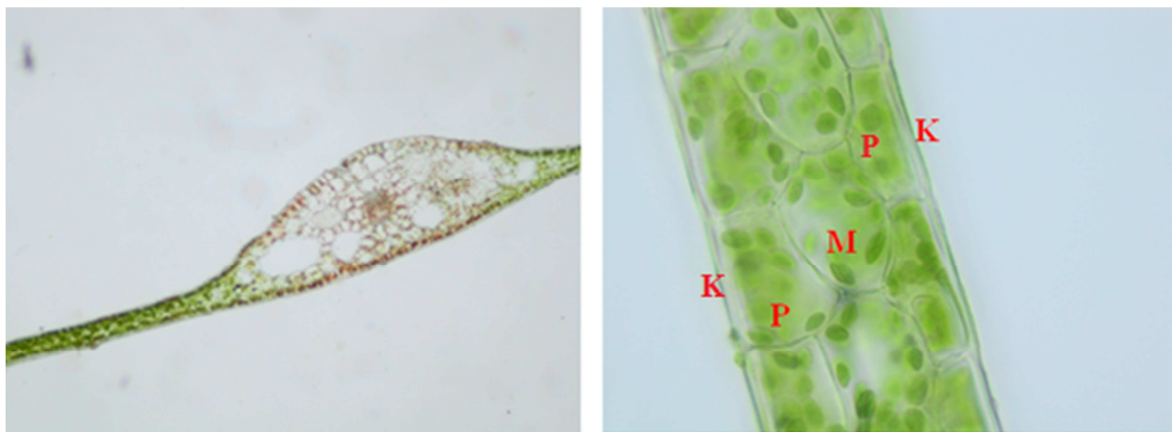
3.5 STATISTIČNA ANALIZA

Analizirali smo razlike med vrstami glede na njihove morfološke in biokemijske značilnosti. Za normalno razporejene podatke smo uporabili test ANOVA, za nenormalno razporejene pa Kruskal-Wallis test. Podatkom odbojnega in prepustnega spektra listov smo določili povprečje znotraj 5 nm intervalov. S Kruskal-Wallis testom smo preverili razlikovanje vrst v odbojnih in prepustnih spektrih. Za določitev stopnje povezanosti odbojnih in prepustnih spektrov s posameznimi lastnostmi lista, smo določili Spearmanov korelacijski koeficient. Izračune smo izdelali s programom SPSS Statistics 19.0 (SPSS, Inc., IBM Company, ZDA). Verjetnost značilnih razlik smo označili z zvezdicami (* $p \leq 0,05$ in ** $p \leq 0,01$). Na koncu smo naredili še klustersko analizo podobnosti.

4 REZULTATI

4.1 MORFOLOŠKE ZNAČILNOSTI

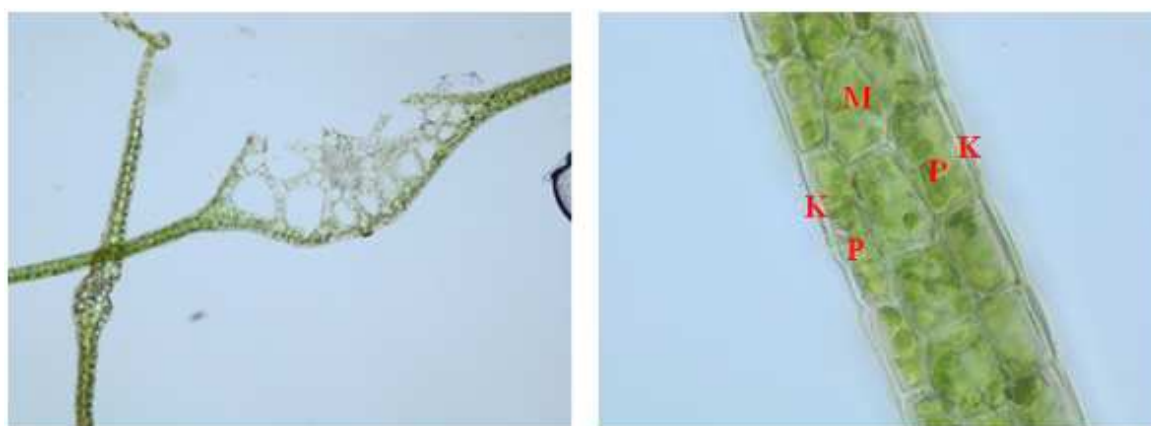
Na prečnih prerezih vidimo na vsaki strani lista prosojno kutikulo, pod njo plast celic povrhnjice, ki vsebujejo kloroplaste, ter plast celic listne sredice ali mezofila, prav tako s kloroplasti. Pri prerezih z manjšo povečavo je viden del lista z žilo (Slika 4-6).



Slika 4: Prečni prerez lista vrste *Potamogeton crispus*. Desetkratna povečava (levo) in štiridesetkratna povečava (desno). K-kutikula; M-celica mezofila; P-celica povrhnjice



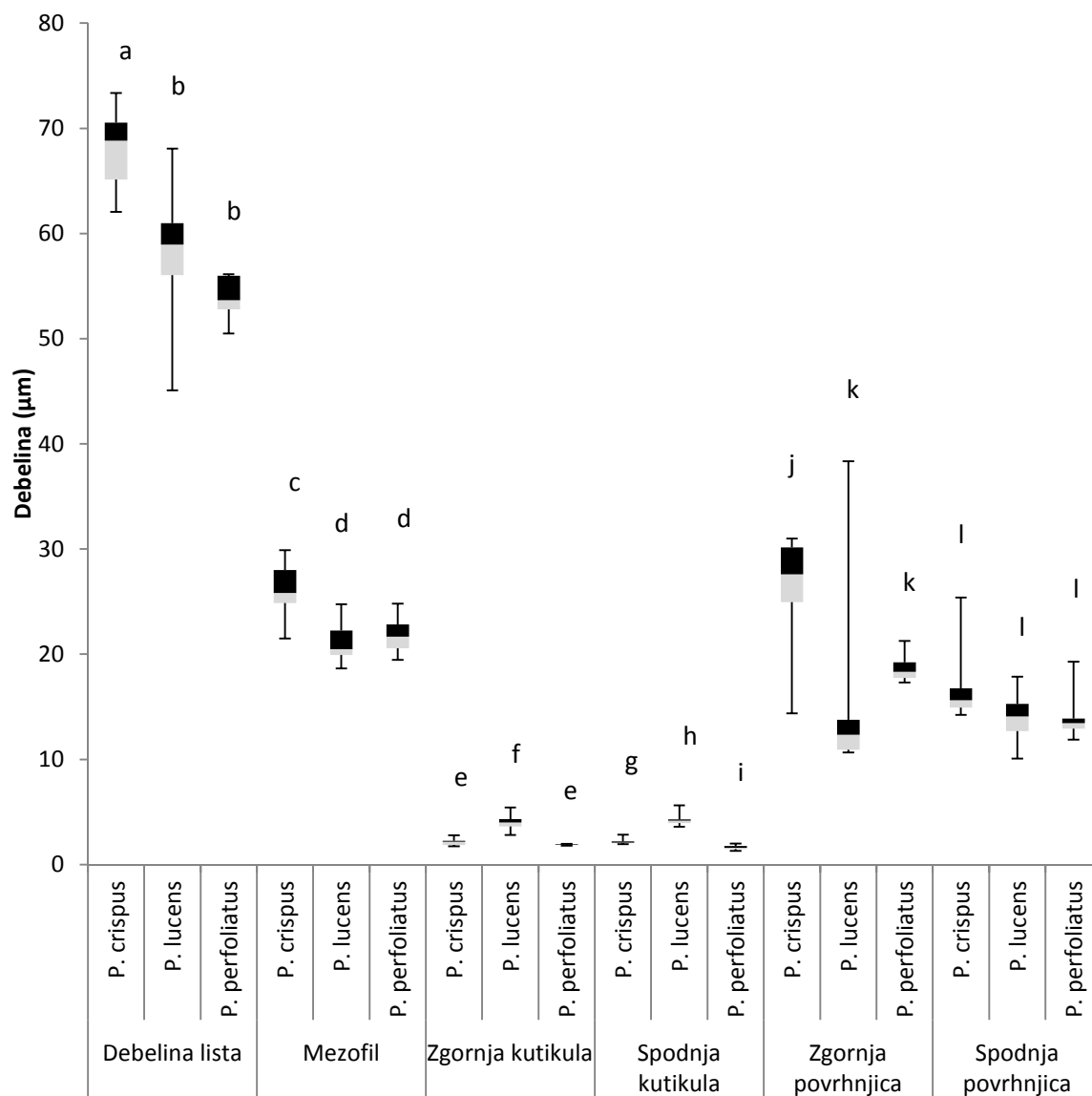
Slika 5: Prečni prerez lista vrste *Potamogeton lucens*. Desetkratna povečava (levo) in štiridesetkratna povečava (desno). K-kutikula; M-celica mezofila; P-celica povrhnjice



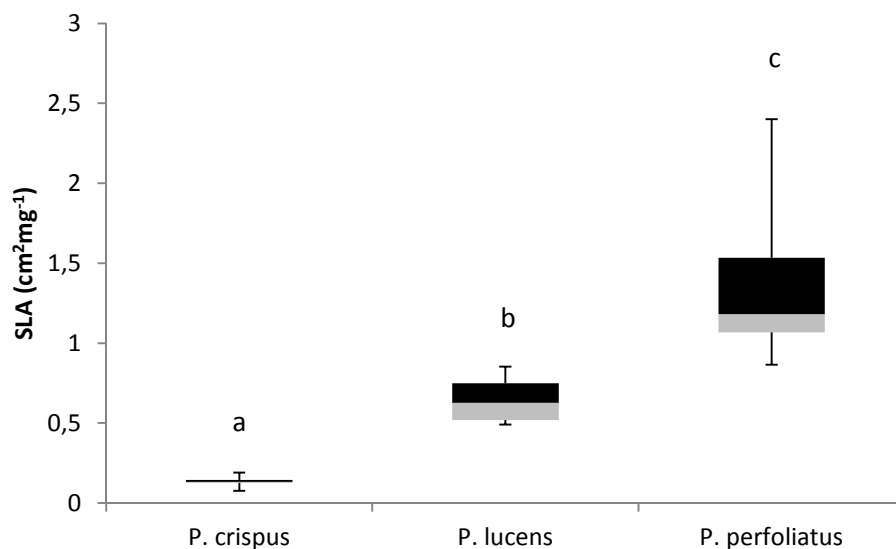
Slika 6: Prečni prerez lista vrste *Potamogeton perfoliatus*. Desetkratna povečava (levo) in štiridesetkratna povečava (desno). K-kutikula; M-celica mezofila; P-celica povrhnjice

Na osnovi primerjave morfoloških značilnosti med vrstami smo z ANOVA in Kruskal-Wallis testom ($p \leq 0,05$) ugotovili, da se od vseh treh vrst najbolj razlikuje vrsta *P. crispus*. To bi lahko ocenili tudi po zunanem izgledu rastline, saj se vrsta od drugih dveh bistveno razlikuje po manjših in bolj čvrstih listih. Vrsta *P. crispus* se statistično značilno razlikuje od drugih dveh vrst v debelini lista, debelini mezofila, spodnje kutikule, zgornje povrhnjice in specifične listne površine. Vrsta je imela izmed vseh najbolj debele liste, mezofil ter zgornjo povrhnjico. Statistično pomembnih razlik med vrsto *P. crispus* in drugima vrstama ni opaziti le pri spodnji povrhnjici, po debelini zgornje kutikule pa se vrsta pomembno razlikuje le z vrsto *P. lucens*. Najbolj podobni po večini morfoloških značilnosti sta si vrsti *P. lucens* in *P. perfoliatus*. Med njima namreč pri debelini lista, mezofila in zgornje povrhnjice ni opaziti statistično značilnih razlik (Slika 7). Morfološki lastnosti pri katerih

se vse tri vrste med seboj statistično značilno razlikujejo sta SLA, kjer največjo vrednost dosega vrsta *P. perfoliatus* (Slika 8) ter debelina spodnje kutikule, kjer ima vrsta *P. lucens* najvišjo vrednost (Slika 7).



Slika 7: Debeline plasti listov vseh treh vrst. Okvirji prikazujejo mediano, ki predstavlja polovico podatkov, ročaji pa predstavljajo neizstopajoče podatke; n=10. Rezultati ANOVA in Kruskal-Wallis testa so prikazani kot črke a-l, ki označujejo statistično značilne razlike v posameznem parametru med posameznimi vrstami ($p \leq 0,05$).



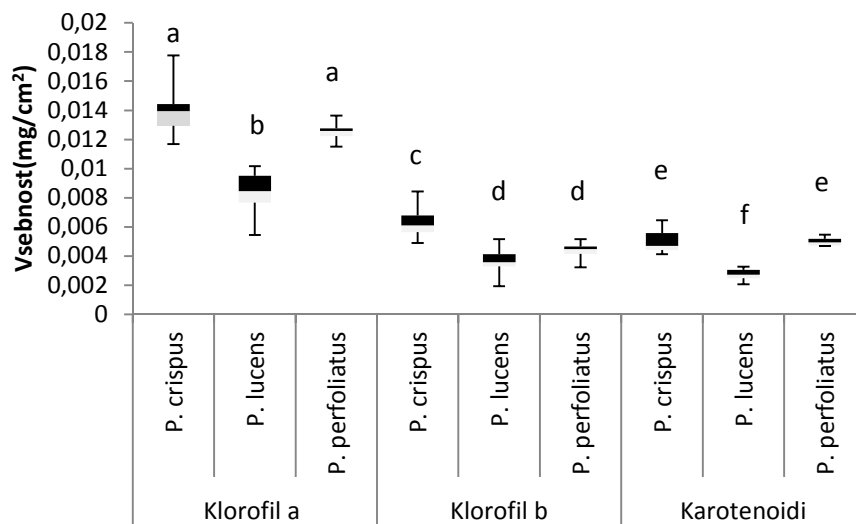
Slika 8: Specifična listna površina (SLA). Okvirji prikazujejo mediano, ki predstavlja polovico podatkov, ročaji pa predstavljajo neizstopajoče podatke; $n=10$. Rezultati Kruskal-Wallis testa so prikazani kot črke a, b, c, ki označujejo statistično značilne razlike v vrednostih SLA med posameznimi vrstami ($p \leq 0,05$).

4.2 BIOKEMIJSKE ZNAČILNOSTI

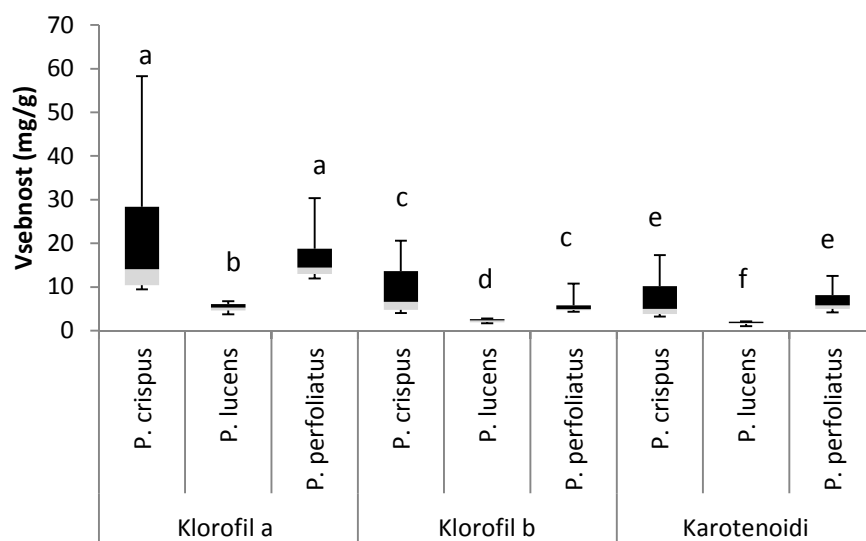
Po biokemijskih značilnostih sta med seboj najbolj podobni vrsti *P. perfoliatus* in *P. crispus*, saj med njima pri večini merjenih vsebnosti ni statistično značilnih razlik. Vendar pa pri teh lastnostih opazimo pomembna razlikovanja vrste *P. lucens* z ostalima vrstama ($p \leq 0,05$). Te lastnosti so vsebnost klorofila *a*, klorofila *b* izraženega na maso suhe snovi, vsebnost karotenoidov (Slika 9), antocianov (Slika 10) ter UV absorbirajočih snovi izraženih na suho snov (Slika 11).

Vrsta *P. crispus* se statistično značilno razlikuje le v vsebnostih klorofila *b* na enoto površine, kjer ima največjo vsebnost, ter v vsebnostih UV absorbirajočih snovi na enoto površine, kjer je po količini na drugem mestu. Vrsta *P. perfoliatus* ima izmed vseh treh vrst največ UV absorbirajočih snovi izraženih na enoto površine. Te biokemijske značilnosti so hkrati tudi edine, pri katerih se vse tri vrste med seboj tudi statistično značilno razlikujejo (Slika 9-11).

A

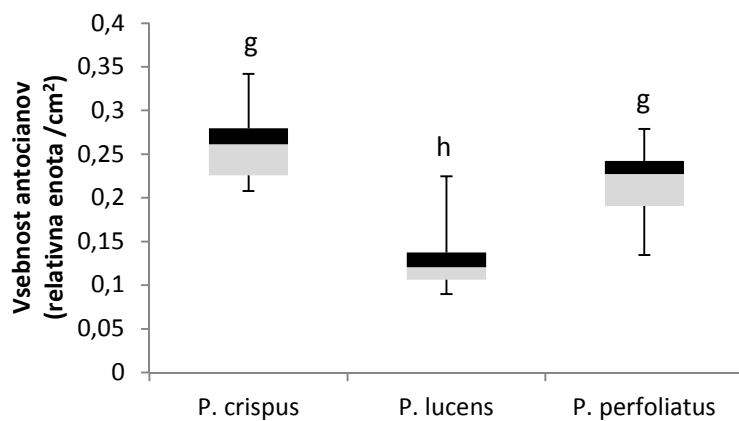


B

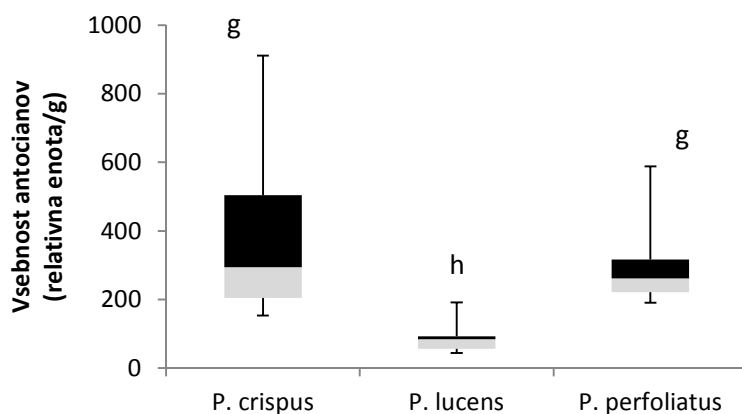


Slika 9: Vsebnost klorofila *a*, klorofila *b* in karotenoidov. Vsebnost izražena na površino lista (A) in na suho maso lista (B). Okvirji prikazujejo mediano, ki predstavlja polovico podatkov, ročaji pa predstavljajo neizstopajoče podatke; n=10. Rezultati testa ANOVA in Kruskal-Wallis testa so prikazani kot črke a-f, ki označujejo statistično značilne razlike v vsebnostih klorofilov in karotenoidov med posameznimi vrstami ($p \leq 0,05$).

A

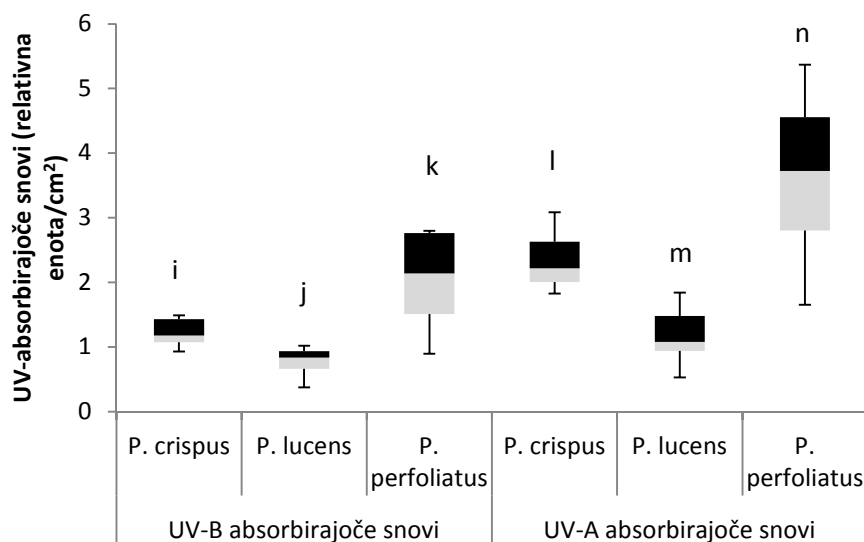


B

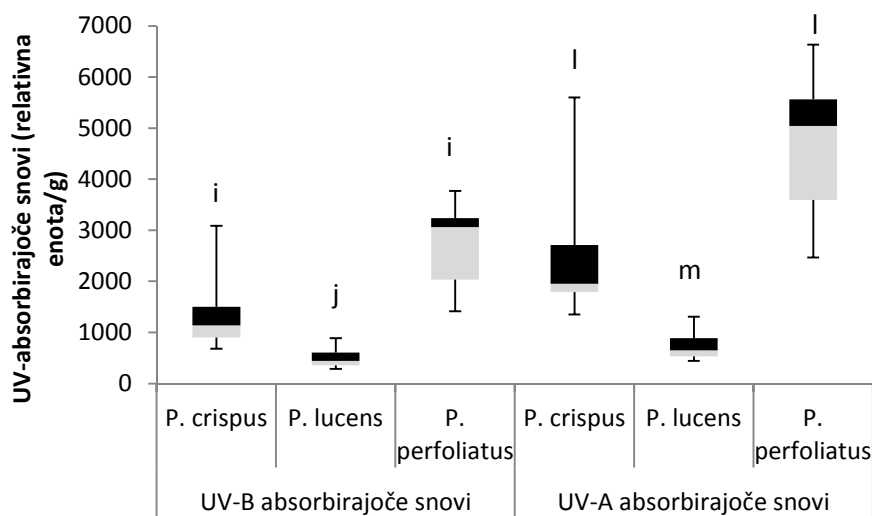


Slika 10: Vsebnost antocianov. Vsebnost izražena na površino lista (A) in maso suhe snovi lista (B). Okvirji prikazujejo mediano, ki predstavlja polovico podatkov, ročaji pa predstavljajo neizstopajoče podatke; n=10. Rezultati testa ANOVA in Kruskal-Wallis testa so prikazani kot črki g in h, ki označujeta statistično značilne razlike v vsebnostih antocianov med posameznimi vrstami ($p \leq 0,05$).

A



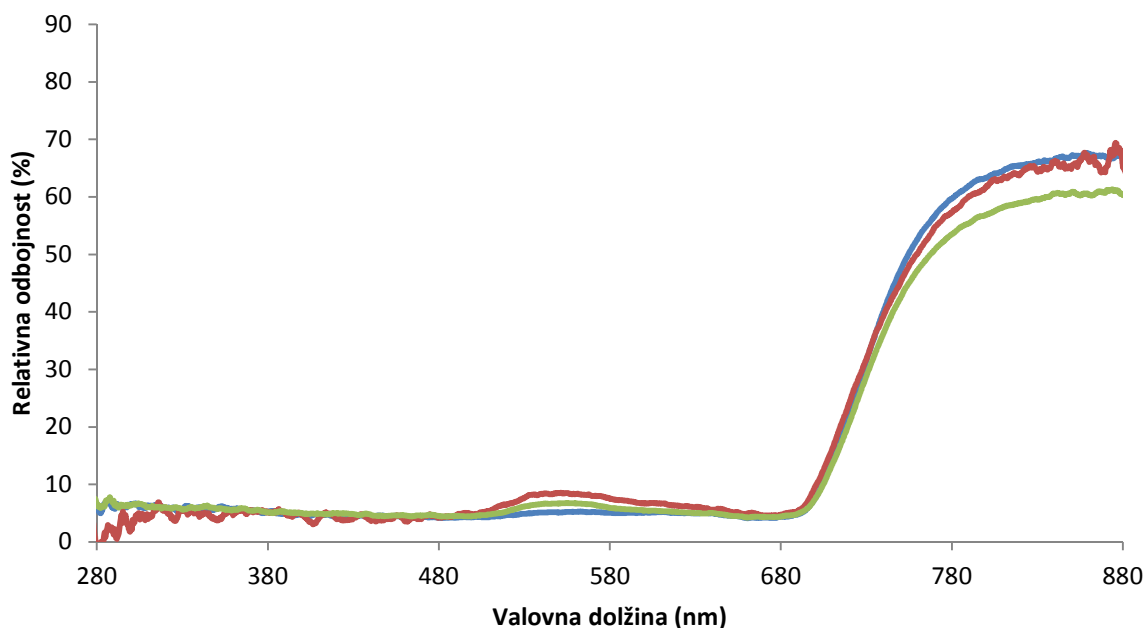
B



Slika 11: Vsebnost UV-absorbirajočih snovi. Vsebnost UV-B in UV-A absorbirajočih snovi glede na posamezno vrsto. Vsebnost je izražena na površino lista (A) in maso suhe snovi lista (B). Okvirji prikazujejo mediano, ki predstavlja polovico podatkov, ročaji pa predstavljajo neizstopajoče podatke; n=10. Rezultati testa ANOVA so prikazani kot črke i-n, ki označujejo statistično značilne razlike v vsebnostih UV-absorbirajočih snovi med posameznimi vrstami ($p \leq 0,05$).

4.3 ODBOJNOST

Odbojnost je pri vseh treh vrstah nizka v UV (280-400 nm) ter vidnem delu (400-700 nm), kjer opazimo rahel vrh v zelenem delu (550 nm). Visoko odbojnost opazimo v bližnjem infrardečem delu spektra (700-887 nm) (Slika 12).

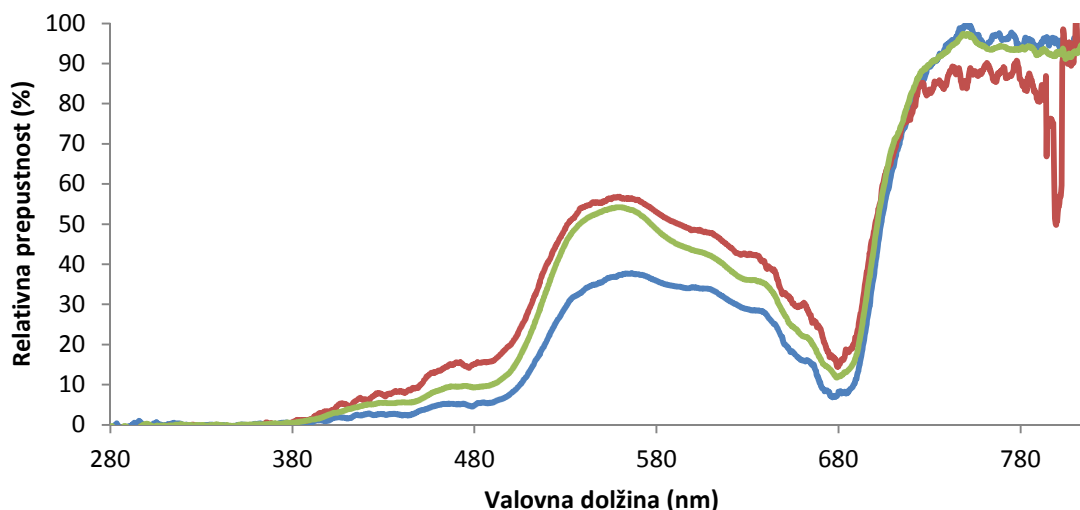


Slika 12: Odbojni spektri listov vrst *P. crispus* (—), *P. lucens* (—), *P. perfoliatus* (—). Prikazane vrednosti so povprečja znotraj 5 nm intervalov; n=10.

Statistično značilne razlike v odbojnosti med vrstami ($p \leq 0,05$) smo opazili v zelenem in rumenem delu spektra (500-620 nm), kjer ima največjo odbojnost vrsta *P. lucens* in najnižjo vrsta *P. crispus*. V pretežnem delu tega pasu se med seboj statistično značilno razlikujejo vse tri vrste. Tudi v bližnjem infrardečem delu valovanja so opazne statistično značilne razlike. Tu ima največjo odbojnost vrsta *P. crispus*, najnižjo pa vrsta *P. perfoliatus*. V tem delu se med seboj najbolj razlikujeta vrsti *P. crispus* in *P. perfoliatus*, značilnih razlik pa ni opaziti med vrstama *P. crispus* in *P. lucens* (Slika 12).

4.4 PREPUSTNOST

List valovnih dolžin UV dela spektra ne prepušča. Nato prepustnost začne naraščati in doseže prvi vrh okoli 500 nm, drugega pa v bližnjem infrardečem delu (700-887 nm) (Slika 13).



Slika 13: Prepustni spektri listov vrst *P. crispus* (—), *P. lucens* (—), *P. perfoliatus* (—). Prikazane vrednosti so povprečja znotraj 5 nm intervalov; n=10.

Vrste se med seboj razlikujejo v celotnem razponu vidnih valovnih dolžin, kjer svetlobo najbolj prepušča vrsta *P. lucens*, najmanj pa vrsta *P. crispus*. Tu sta si v prepustnosti najbolj podobni vrsti *P. lucens* in *P. perfoliatus*, saj med njima statistično značilnih razlik skoraj ni. Vrste se pomembno razlikujejo tudi v prepustnosti bližnjega infrardečega valovanja. V tem delu se od drugih dveh vrst statistično značilno razlikuje vrsta *P. lucens* (Slika 13).

4.5 POVEZAVA MED OPTIČNIMI TER MORFOLOŠKIMI IN BIOKEMIJSKIMI ZNAČILNOSTMI

Izračuni Spearmanovih korelacijskih koeficientov so pokazali, da sta odbojnost in prepustnost lista povezani tako z morfološkimi, kot z biokemijskimi lastnostmi lista (Preglednica 1, 2).

4.5.1 Odbojnost lista

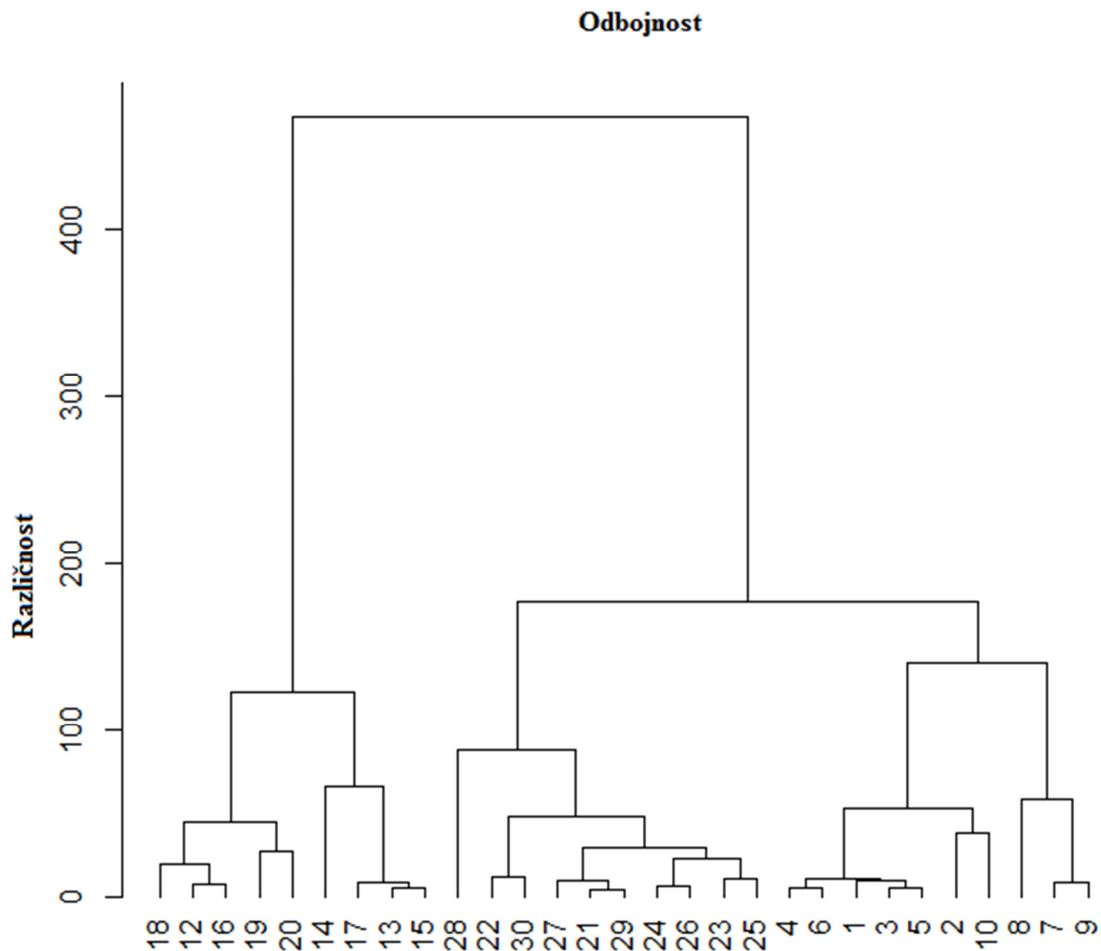
Vpliv zgradbe na odbojnost se izraža v zelenem, rumenem in rdečem delu, kjer igra pomembno vlogo debelina zgornje kutikule, ki je v pozitivni zvezi z odbojnostjo teh valovnih dolžin. Debelina mezofila ter spodnja in zgornja povrhnjica pa so z odbojnostjo v zelenem delu v negativni zvezi. Odbojnost bližnjega infrardečega dela spektra je pozitivno povezana z debelino lista in debelino spodnje kutikule, negativno pa s specifično listno površino (Preglednica 1).

Pri analizi povezanosti odbojnih spektrov z biokemijskimi lastnostmi lista smo opazili tesno povezavo s fotosintezniimi barvili in antociani v zelenem in rumenem delu spektra ($p \leq 0,01$). Povezava med vsebnostjo teh snovi in odbojnostjo je v tem delu negativna. Statistično pomemben ($p \leq 0,05$) vpliv na odbojnost UV-B, UV-A in vijolične valovne dolžine imajo antociani in UV absorbirajoče snovi, ki pa so v našem primeru pokazali pozitivno povezanost z odbojnostjo (Preglednica 1).

Preglednica 1: Spearmanov koeficient odvisnosti med posameznimi območji odbojnega spektra in morfološki ter biokemijski lastnosti listov preučevanih vrst. * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$.

Parameter/Območje odbojnega spektra	UVB	UVA	Vijolična	Modra	Zelena	Rumena	Rdeča	NIR
Morfološke lastnosti								
Debelina lista	0,016	0,054	0,000	0,015	-0,311	-0,044	0,142	0,385*
Debelina mezofila	0,281	0,286	0,261	0,184	-0,580**	-0,339	-0,035	0,294
Debelina zgornje kutikule	-0,355	-0,222	-0,268	0,023	0,563**	0,539**	0,407*	0,282
Debelina spodnje kutikule	-0,374*	-0,288	-0,342	-0,105	0,340	0,354	0,280	0,483**
Debelina zgornje povrhnjice	0,286	0,245	0,239	-0,035	-0,639**	-0,411*	-0,271	-0,064
Debelina spodnje povrhnjice	0,168	0,171	0,186	0,074	-0,453*	-0,251	-0,066	0,183
SLA	0,038	0,004	0,089	0,141	0,460*	0,214	0,039	-0,566**
Biokemijske lastnosti								
Klorofil <i>a</i> (mg/cm ²)	0,301	0,216	0,195	-0,089	-0,742**	-0,545**	-0,347	-0,033
Klorofil <i>a</i> (mg/g)	0,261	0,221	0,225	0,031	-0,578**	-0,432*	-0,315	-0,250
Klorofil <i>b</i> (mg/cm ²)	0,139	0,038	-0,017	-0,283	-0,726**	-0,553**	-0,364*	0,046
Klorofil <i>b</i> (mg/g)	0,307	0,252	0,213	-0,010	-0,644**	-0,494**	-0,325	-0,119
Karotenoidi (mg/cm ²)	0,286	0,190	0,178	-0,106	-0,710**	-0,614**	-0,458*	-0,257
Karotenoidi (mg/g)	0,297	0,269	0,271	0,055	-0,560**	-0,423*	-0,305	-0,271
Antociani (mg/cm ²)	0,412*	0,348	0,307	0,042	-0,673**	-0,494**	-0,287	-0,018
Antociani (mg/g)	0,391*	0,376*	0,352	0,142	-0,547**	-0,373*	-0,224	-0,148
UV-B absorbirajoče snovi (mg/cm ²)	0,516**	0,457*	0,504**	0,218	-0,345	-0,296	-0,193	-0,289
UV-B absorbirajoče snovi (mg/g)	0,453*	0,423*	0,448*	0,208	-0,402*	-0,317	-0,212	-0,303
UV-A absorbirajoče snovi (mg/cm ²)	0,442*	0,375*	0,425*	0,120	-0,473**	-0,407*	-0,294	-0,343
UV-A absorbirajoče snovi (mg/g)	0,420*	0,397*	0,429*	0,176	-0,432*	-0,338	-0,237	-0,320

Primerjali smo odbojnosti ter morfološke in biokemijske lastnosti vseh treh vrst med seboj in izdelali dendrogram, ki prikazuje, kako so si vrste druga drugi podobne. Iz njega lahko razberemo, da sta si vrsti *P. crispus* in *P. perfoliatus* med seboj najbolj podobni, vrsta *P. lucens* pa izstopa (Slika 14).



Slika 14: Dendrogram podobnosti, ki vključuje odbojne spektre ter morfološke in biokemijske lastnosti listov vrst *P. crispus* (vzorci 1-10), *P. lucens* (vzorci 11-20) in *P. perfoliatus* (vzorci 21-30). Ker podatki pri nekaterih vzorcih niso bili popolni, nekatere številke manjkajo.

4.5.2 Prepustnost lista

Pri vplivu morfoloških značilnosti na prepustnost opazimo močno negativno povezavo med vidnim delom spektra in debelinami zgornje povrhnjice, spodnje povrhnjice ter mezofila ($p \leq 0,01$). V pozitivni zvezi s tem delom spektra pa je debelina zgornje kutikule ter SLA. Na prepustnost UV-B in NIR valovnih dolžin negativno vplivata debelini tako zgornje, kot spodne kutikule, debelina zgornje povrhnjice pa je z njimi v pozitivni zvezi (Preglednica 2).

Analiza povezav med prepustnostjo in biokemijskimi značilnostmi pokaže v UV in NIR delu spektra močno pozitivno zvezo ($p \leq 0,01$) tako s fotosintezni barvili, kot tudi z antociani in UV absorbirajočimi snovmi. Fotosintezna barvila in antociani vplivajo tudi na vidni del spektra, vendar so z njim pretežno v močni negativni zvezi ($p \leq 0,01$) (Preglednica 2).

Preglednica 2: Spearmanov koeficient odvisnosti med posameznimi območji prepustnega spektra in morfološkimi ter biokemijskimi lastnostmi listov preučevanih vrst. * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$.

Parameter/Območje prepustnega spektra	UVB	UVA	Vijolična	Modra	Zelena	Rumena	Rdeča	NIR
Morfološke lastnosti								
Debelina lista	0,192	0,033	-0,306	-0,369*	-0,373*	-0,335	-0,256	0,107
Debelina mezofila	0,462*	-0,158	-0,685**	-0,686**	-0,669**	-0,657**	-0,599**	0,354
Debelina zgornje kutikule	-0,659**	0,099	0,577**	0,547**	0,499**	0,518**	0,477**	-0,470*
Debelina spodnje kutikule	-0,617**	-0,097	0,377*	0,326	0,215	0,241	0,239	-0,530**
Debelina zgornje povrhnjice	0,495**	-0,219	-0,656**	-0,656**	-0,636**	-0,603**	-0,543**	0,488**
Debelina spodnje povrhnjice	0,271	-0,095	-0,536**	-0,561**	-0,566**	-0,521**	-0,442*	0,226
SLA	-0,135	0,181	0,456*	0,498**	0,544**	0,543**	0,507**	-0,069

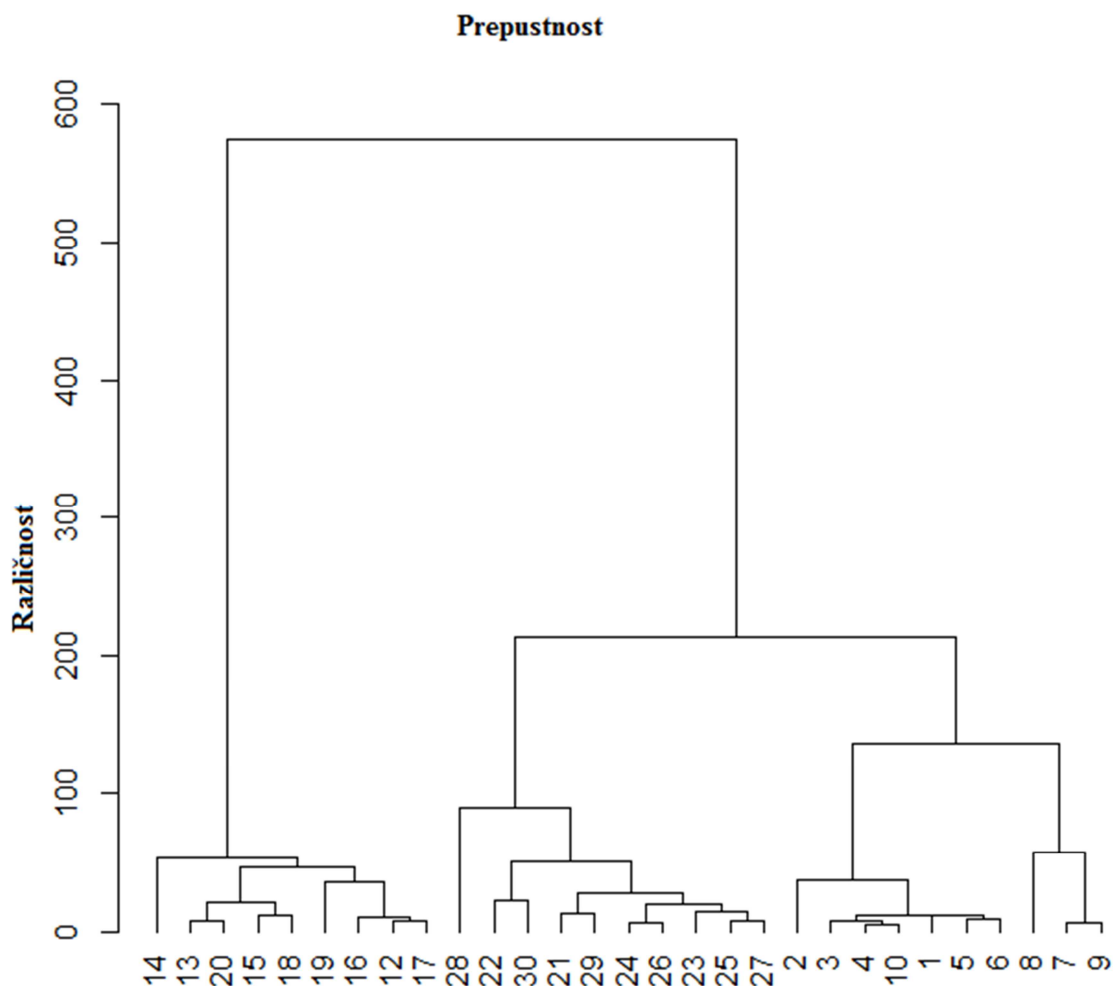
» se nadaljuje«

»nadaljevanje«

Preglednica 2: Spearmanov koeficient odvisnosti med posameznimi območji prepustnega spektra in morfološki ter biokemijski lastnosti listov preučevanih vrst. * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$.

Parameter/Območje prepustnega spektra	UVB	UVA	Vijolična	Modra	Zelena	Rumena	Rdeča	NIR
Biokemijske lastnosti								
Klorofil <i>a</i> (mg/cm ²)	0,735**	0,059	-0,661**	-0,702**	-0,610**	-0,593**	-0,549**	0,604**
Klorofil <i>a</i> (mg/g)	0,782**	0,139	-0,571**	-0,588**	-0,432*	-0,441*	-0,438*	0,613**
Klorofil <i>b</i> (mg/cm ²)	0,543**	0,009	-0,545**	-0,620**	-0,579**	-0,542**	-0,499**	0,413*
Klorofil <i>b</i> (mg/g)	0,762**	0,160	-0,590**	-0,644**	-0,507**	-0,507**	-0,499**	0,575**
Karotenoidi (mg/cm ²)	0,674**	-0,019	-0,623**	-0,644**	-0,520**	-0,493**	-0,479**	0,635**
Karotenoidi (mg/g)	0,727**	0,039	-0,598**	-0,595**	-0,442*	-0,447*	-0,459*	0,620**
Antociani (mg/cm ²)	0,670**	-0,232	-0,703**	-0,727**	-0,727**	-0,666**	-0,615**	0,475**
Antociani (mg/g)	0,736**	-0,041	-0,608**	-0,614**	-0,547**	-0,512**	-0,494**	0,563**
UV-B absorbirajoče snovi (mg/cm ²)	0,515**	-0,104	-0,379*	-0,354	-0,307	-0,284	-0,231	0,414*
UV-B absorbirajoče snovi (mg/g)	0,655**	-0,002	-0,467**	-0,438*	-0,307	-0,321	-0,311	0,561**
UV-A absorbirajoče snovi (mg/cm ²)	0,592**	-0,118	-0,465**	-0,450*	-0,386*	-0,358	-0,309	0,478**
UV-A absorbirajoče snovi (mg/g)	0,675**	0,002	-0,480**	-0,460*	-0,328	-0,334	-0,318	0,573**

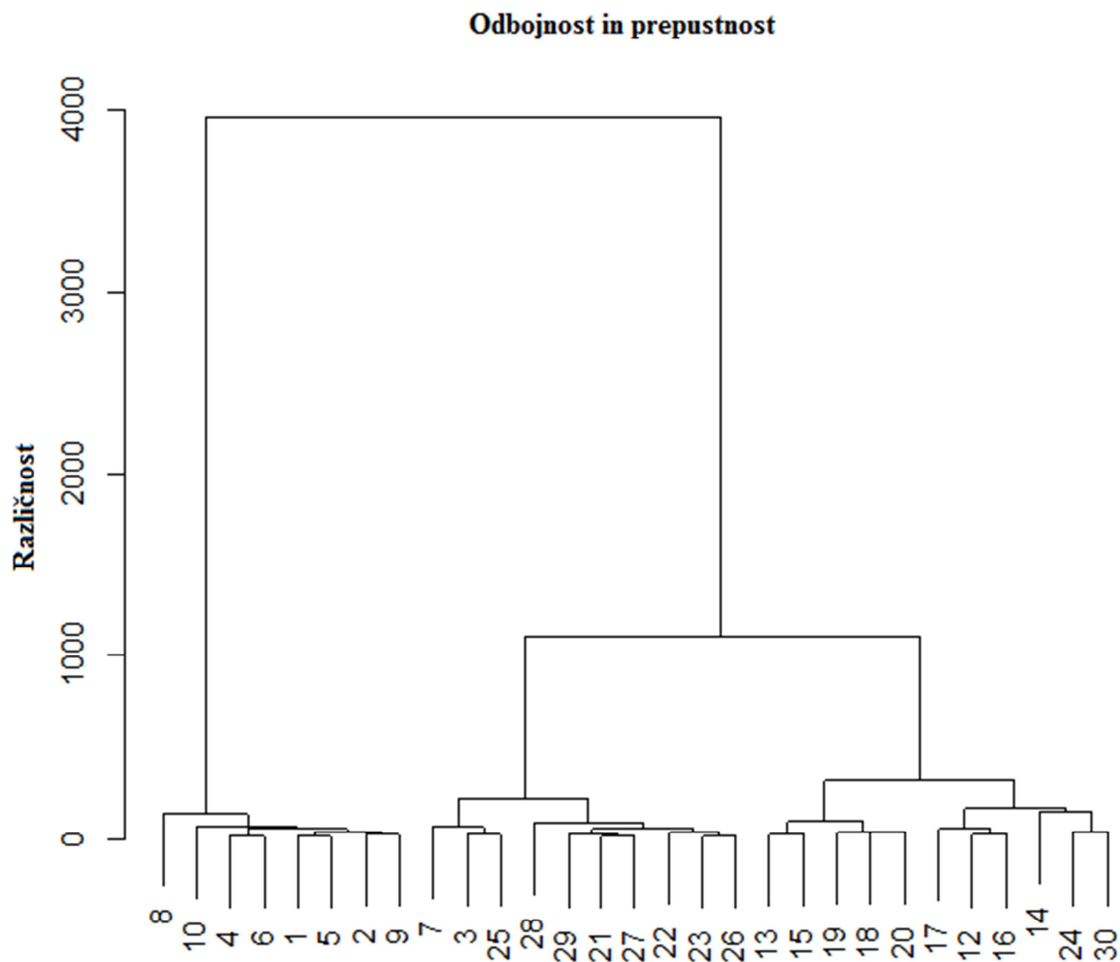
Primerjali smo prepustnosti vseh treh vrst med seboj in izdelali dendrogram, ki prikazuje kako so si vrste druga drugi podobne. Iz njega lahko razberemo, da sta si vrsti *P. crispus* in *P. perfoliatus* med seboj najbolj podobni, vrsta *P. lucens* pa izstopa (Slika 14).



Slika 15: Dendrogram podobnosti, ki vključuje prepustne spektre ter morfološke in biokemijske lastnosti listov vrst *P. crispus* (vzorci 1-10), *P. lucens* (vzorci 11-20) in *P. perfoliatus* (vzorci 21-30). Ker podatki pri nekaterih vzorcih niso bili popolni, nekatere številke manjkajo.

4.5.3 Odbojnost in prepustnost

Upoštevajoč tako odbojnost kot prepustnost in vse ostale merjene lastnosti, smo dobili dendrogram podobnosti, kjer sta si podobni vrsti *P. lucens* in *P. perfoliatus*, medtem ko se vrsta *P. crispus* od vseh najbolj razlikuje (Slika 16).



Slika 16: Dendrogram podobnosti, ki vključuje prepustne spektre ter morfološke in biokemijske lastnosti listov vrst *P. crispus* (vzorci 1-10), *P. lucens* (vzorci 11-20) in *P. perfoliatus* (vzorci 21-30). Ker podatki niso bili popolni, serije številčk ponekod manjkajo.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 RAZPRAVA

V diplomskem delu smo preučevali kako na optične lastnosti izbranih vrst vplivajo morfološke in biokemijske značilnosti listov. Te lastnosti smo preučevali na treh vrstah dristavcev. Vse tri vrste so podvodne rastline z listi, plavajočimi v vodnem stolpcu, ki rastejo v pretežno enakih svetlobnih razmerah. Kljub temu pa se njihovi listi med seboj razlikujejo po nekaterih značilnostih, ki vplivajo na prestrezanje in odboj svetlobe.

Morfološko sta si najbolj podobni vrsti *P. lucens* in *P. perfoliatus*, vendar se v nekaterih biokemijskih lastnostih razlikujeta. Listi vrste *P. crispus* se razlikujejo od drugih dveh predvsem po morfoloških lastnostih. Po biokemijskih lastnostih pa najbolj izstopa vrsta *P. lucens*.

Diagrama podobnosti, pri katerih smo upoštevali morfološke in biokemijske lastnosti skupaj z odbojnostjo ter posebej še s prepustnostjo, kot vrsto z največ razlikami izpostavljata *P. lucens*. Ko pa smo upoštevali vse merjene značilnosti ter odbojnost in prepustnost hkrati, najbolj izstopa vrsta *P. crispus*. Ta se že na prvi pogled po obliki listov najbolj razlikuje od drugih dveh vrst, značilna razlikovanja pa smo opazili tudi pri merjenih morfoloških lastnostih ter pri odbojnosti in prepustnosti v vidnem delu spektra.

5.1.1 Razlike v odboju sevanja pri listih izbranih vrst

Spekter in velikost odbojnosti določa list z zgradbo povrhnjice, notranjo zgradbo ter z biokemijskimi značilnosti (Liew in sod., 2008). Te lastnosti se od vrste do vrste razlikujejo in tako pride tudi do razlik v odbojnem spektru. Kljub temu pa se ohranjajo glavne zakonitosti odboja svetlobe od listov višjih rastlin.

Preučevane vrste se v odbojnosti razlikujejo predvsem v vidnem ter bližnjem infrardečem delu spektra. Iz tega sledi, da se tudi lastnosti lista, ki vplivajo na odbojnost teh valovnih dolžin med vrstami razlikujejo.

5.1.1.1 Razlike v odbojnosti ultravijoličnega dela spektra

List odbija malo (5 %) UV valovnih dolžin (Yoshimura in sod., 2012). V tem delu so si spektri vrst med seboj podobni, saj med njimi ni opaziti statistično značilnih razlik. Odbojnost v našem primeru pri nobeni od vrst ne presega 10 % (Slika 12), zaradi česar lahko sklepamo, da vsebujejo listi vseh treh vrst dovolj veliko količino UV absorbirajočih snovi, ki rastlino zaščitijo pred škodljivimi učinki UV sevanja. To so flavonoidi, ki ščitijo celice pred ultravijoličnim sevanjem, kot tudi epikutikularni voski in karotenoidi. Pri kopenskih rastlinah le 5-10 % vpadnega UV sevanja doseže zgornjo plast celic mezofila, kjer ga absorbirajo klorofili (Larcher, 2003; Yoshimura in sod., 2012). Pri vodnih rastlinah pa so biokemijske in morfološke razlike med povrhnjico in mezofilom majhne, zato lahko gledamo list kot celoto. Vrsta *P. lucens* ima nekoliko nižjo odbojnost teh valovnih dolžin, na kar verjetno vpliva površina lista, vendar pa razlike med vrstami niso statistično značilne. V vodi se z globino intenziteta svetlobe znižuje zaradi absorpcije in razpršenja, ki ga povzroči voda ter raztopljeni in neraztopljeni delci v njej. UV sevanje tako doseže največ do nekaj metrov v globino, jakost sevanja pa se tudi močno spreminja (Larcher, 2003).

5.1.1.2 Razlika v odbojnosti vidnega dela spektra

Odbojnost vidnih valovnih dolžin je določena s klorofili, karotenoidi in antociani (Slaton in sod., 2001). Listi odbijajo v povprečju le 6-10 % vpadnih vidnih valovnih dolžin. Nekoliko močneje pa se odbija zelena svetloba (10-20 %) (Larcher, 2003). Te splošne značilnosti odbojnega spektra so značilne za vse višje rastline in so opazne tudi pri naših meritvah.

Klorofili imajo absorpcijski minimum pri valovnih dolžinah okoli 550 nm, kar povzroči močnejši odboj zelene svetlobe (Liew in sod., 2008). Absorpcijski pas karotenoidov je od 500-520 nm (Baltzer in Thomas, 2005). V delu kjer je odboj vidne svetlobe največji absorbirajo le še antociani, katerih absorpcijski pas je med 400 in 600 nm in v UV delu spektra (Close in Beadle, 2003). Med 400 in 600 nm ima največjo odbojnost vrsta *P.*

lucens pri kateri je bila vsebnost antocianov najmanjša, več pa smo jih našli pri vrsti *P. crispus*, ki kaže najmanjšo odbojnost v tem delu.

Rezultati kažejo, da utegne imeti tudi SLA vpliv na odbojnost zelenega dela spektra (Preglednica 1). V vrednostih SLA se vrste med seboj statistično značilno razlikujejo (Slika 8), vendar se ne skladajo povsem s krivuljami odbojnosti. Najnižjo SLA ima vrsta *P. crispus*, ki ima tudi najnižjo odbojnost, najvišja SLA pa pripada vrsti *P. perfoliatus*, ki je po odbojnosti na drugem mestu. Iz tega lahko sklepamo, da imajo na odbojnost večji vpliv drugi dejavniki.

5.1.1.3 Razlike v odbojnosti bližnjega infrardečega dela spektra

V bližnjem infrardečem delu spektra imajo listi vseh vrst visoko odbojnost, saj je absorpcija teh valovnih dolžin zelo šibka. Fotosintezna barvila na njih namreč nimajo vpliva, zato ima tu glavni vpliv na odbojnost listna zgradba (Slaton in sod., 2001). Kljub podobno visoki odbojnosti, pa so se v tem delu vse tri vrste med seboj razlikovale, saj so med njimi opazne razlike tudi pri merjenju njihovih morfoloških značilnosti. Pomembno vlogo pri odbojnosti bližnjih infrardečih valovnih dolžin igra kutikula, ki z debeljenjem povečuje odbojnost (Liew in sod. 2008), nanjo pa vplivajo tudi stične površine med celico in medceličnim zrakom, ki odbijajo svetlobo (Slaton in sod., 2001). Večja odbojnost je povezana tudi z povečano debelino listov, saj imajo debelejši listi več stičnih površin med celico in zračnim prostorom (Knapp in Carter, 1998). Čeprav razlika med vrstama *P. lucens* in *P. crispus* ni statistično značilna, opazamo pri slednji največjo odbojnost. Pri tej vrsti smo namreč izmerili največje vrednosti debeline lista, mezofila ter zgornje in spodnje povrhnjice (Slika 7). Torej lahko tudi iz naših rezultatov sklepamo, da ima debelina lista ter njegovih plasti pomembno vlogo pri odbojnosti bližnjih infrardečih valovnih dolžin.

SLA ima tudi z odbojnostjo bližnjih infrardečih valovnih dolžin statistično pomembno povezavo, ki pa je negativna. Vrsta *P. perfoliatus* ima kot vrsta z največjo SLA najnižjo odbojnost, vrsta *P. crispus* pa z nižjo vrednostjo SLA dosega večjo odbojnost v tem delu.

5.1.2 Razlike v prepustnosti sevanja pri listih izbranih vrst

Katere valovne dolžine in v kakšni meri bodo prešle skozi list, je odvisno od količine absorpcije in odboja svetlobe. Zaradi nižje vsebnosti snovi, ki bi absorbirale svetlobo, je absorpcija manjša okoli zelenega dela spektra, v bližnjem infrardečem delu pa je skoraj ni, zato te valovne dolžine list tudi najbolj prepušča. Na prepustnost torej poleg vsebnosti snovi za absorpcijo svetlobe vpliva tudi zgradba in debelina lista (Larcher, 2003). Prepustnosti vrst so se med seboj razlikovale v vidnem in bližnjem infrardečem delu spektra.

5.1.2.1 Razlike v prepustnosti ultravijoličnega dela spektra

Da se listi pred določenimi valovnimi dolžinami zaščitijo, ima njihova povrhnjica sposobnost selektivne absorpcije (Robberecht in Caldwell, 1978). Zaščito pred UV sevanjem jim omogočajo fenolne spojine v celicah povrhnjice, ki ga absorbirajo, k zaščiti pa pripomore tudi kutikula, ki UV svetlobo odbija. Preostanek, ki doseže mezofil, prestrežejo ostala tkiva. Tako list ne prepušča UV svetlobe, saj se je 95 % absorbira, 5 % pa odbije (Yoshimura in sod., 2012). Meritve prepustnosti listov naših preučevanih vrst se s temi dejstvi ujemajo. Prepustnost je majhna in začne naraščati šele pri 380 nm, razlik med vrstami pa v tem delu ni (Slika 13).

5.1.2.2 Razlike v prepustnosti vidnega dela spektra

Ko vidna svetloba prehaja skozi list, jo listne strukture v veliki meri absorbirajo. Absorpcija se zgodi zaradi nihanja kovalentnih vezi med elementi, ki so prisotni v sladkorjih, ligninu, celulozi in proteinih rastline, velik del absorpcije pa pripada fotosinteznim barvilom (Liew in sod., 2008). Prepustnost začne v vidnem delu spektra naraščati in doseže vrh pri okoli 500 nm, kar je vzrok nizke absorpcije fotosinteznih barvil v tem delu. Prepustnost je velika v delih, kjer je velika tudi odbojnost (Larcher, 2003), zato nižja absorpcija zelenega dela spektra pripomore tako k večji odbojnosti, kot tudi večji prepustnosti valovnih dolžin v tem delu.

Na količino prepuščene vidne svetlobe pri posamezni vrsti ima torej na eni strani vpliv količina fotosinteznih barvil. Večja je njihova koncentracija, manj vidne svetlobe bo list prepuščal, kar smo dokazali tudi z našimi meritvami. Vrsta *P. crispus*, kot vrsta z večjo koncentracijo klorofilov in karotenoidov (Slika 9), prepušča najmanj vidnih valovnih dolžin. Vrsta *P. lucens* pa z manjšo vsebnostjo fotosinteznih barvil prepušča več vidne svetlobe. V količini fotosinteznih barvil se vrsti *P. crispus* in *P. perfoliatus* statistično značilno ne razlikujeta, vendar je v prepustnosti med njima opazna razlika, kar pomeni, da nanjo vplivajo še druge značilnosti listov teh vrst. Določa jo torej tudi listna zgradba in debelina lista (Liew in sod., 2008). List, ki je debelejši, vsebuje več snovi, ki absorbirajo vidne valovne dolžine in zato prepušča manj svetlobe. Krivulje prepustnosti se tudi v tem primeru skladajo z meritvami debelin lista in posameznih plasti lista, saj ima vrsta *P. crispus* najdebelejše liste ter najdebelejšo povrhnjico in zato prepušča najmanj svetlobe. Debeline listov in listnih plasti vrst *P. lucens* in *P. perfoliatus* so bile manjše, med njima pa ni opaziti statistično značilnih razlik v debelinah ter posledično tudi ne v prepustnosti.

5.1.2.3 Razlike v prepustnosti bližnjega infrardečega dela spektra

Zaradi visoke odbojnosti bližnjega infrardečega dela spektra, je tudi prepustnost njegovih valovnih dolžin visoka (Larcher, 2003). Absorpcija tega dela spektra je namreč zelo nizka. Če bi rastline enako učinkovito, kot vidne valovne dolžine, absorbirale energijo bližnjega infrardečega valovanja, bi lahko prišlo do prevelikega segrevanja ter denaturacije beljakovin (Gates, 1965). List zato skoraj nima snovi za absorpcijo teh valovnih dolžin in je prepustnost svetlobe v tem delu zelo visoka. V pretežnem delu bližnjega infrardečega spektra se od ostalih vrst pomembno razlikuje le vrsta *P. lucens*, ki ima nekoliko nižjo prepustnost. Pri tej vrsti smo izmerili, najbolj debelo kutikulo, ki pa ima želatinozno zgradbo. Vsebuje torej več vode, ki NIR sevanje nekoliko absorbira (Liew in sod., 2008), kar povzroča manjšo prepustnost. Med ostalima dvema vrstama ni opaziti statistično pomembnih razlik.

5.1.3 Mofrološke in biokemijske lastnosti, ki v največji meri vplivajo na odbojne spektre listov izbranih vrst

Biokemijske značilnosti vplivajo predvsem na odbojnost vidnega dela spektra zaradi vsebnosti barvil, ki energijo teh valovnih dolžin izkoriščajo za fotosintezo (Liew in sod., 2008). Najtesnejša je povezava med klorofoli, karotenoidi in antociani v zelenem in rumenem delu vidnega spektra (Preglednica 1). Ta povezava je negativna, kar pomeni, da se ob povečani količini teh barvil odbojnost tega dela spektra zniža, kar lahko pripišemo večji absorpciji. To nam potrjuje tudi krivulja odbojnosti v zelenem in rumenem delu spektra, kjer se vrste razlikujejo v odbojnosti. Največjo odbojnost imajo listi vrste *P. lucens*, saj vsebujejo najmanjšo količino fotosinteznih barvil in antocianov.

UV sevanje list zelo šibko odbija (Yoshimura in sod., 2012), saj predvsem UV absorbirajoče snovi in antociani ta del sevanja močno absorbirajo (Robberecht in Caldwell, 1978). Količina UV-B, UV-A absorbirajočih snovi in antocianov pa je proti pričakovanju v pozitivni povezavi z količino odbitega UV sevanja. Vzrok temu je verjetno velika razpršenost odbojnega spektra v UV območju pri bleščečem dristavcu. Ko smo analize naredili brez bleščečega dristavca, povezave niso bile statistično značilne.

Na odbojnost bližnjega infrardečega valovanja po naših rezultatih biokemijske značilnosti nimajo vpliva. Ta opažanja se skladajo z drugimi raziskavami, ki odbojnost v tem delu bolj povezujejo z morfološkimi značilnostmi (Slaton in sod., 2001; Liew in sod., 2008; Knapp in Carter, 1998). Rezultati kažejo, da pri večji debelini lista naraste odbojnost teh valovnih dolžin. Vzrok tega je najverjetneje porast odbojnih površin med celicami in medceličnim zrakom v debelejših listih (Slaton in sod., 2001). Vrsta *P. perfoliatus* ima z nekoliko manjšo debelino lista od drugih dveh vrst tudi najmanjšo odbojnost v NIR delu spektra. K večjemu odboju svetlobe pripomore tudi debelejša spodnja kutikula (Slaton in sod., 2001). Zopet lahko vzporednico najdemo pri vrsti *P. perfoliatus*, ki ima z najtanjšo spodnjo kutikulo najnižjo odbojnost, drugi dve vrsti pa se v odbojnosti tega dela spektra značilno ne razlikujeta. Specifična listna površina je z odbojnostjo NIR valovnih dolžin v negativni povezavi, kar se sklada z nizko odbojnostjo vrste *P. perfoliatus*, ki ima največjo SLA.

Morfološke lastnosti močno vplivajo tudi na odbojnost v vidnem delu spektra. Prisotnost debele kutikule lahko odbija vidne valovne dolžine in tako upočasni fotosintezo pri nekaterih vrstah (Slaton in sod., 2001). Debelina zgornje kutikule igra tudi po naših ugotovitvah pomembno vlogo, saj je z odbojnostjo v tem delu v pozitivni zvezi. To pomeni, da se zelena, rumena in rdeča bolj odbijajo, če ima list debelejšo zgornjo kutikulo. Krivulja odbojnosti se s temi ugotovitvami sklada, saj ima vrsta *P. lucens* najdebelejšo zgornjo kutikulo ter tudi največjo odbojnost v tem delu. Negativen vpliv na odbojnost predvsem zelenih valovnih dolžin ima debelina mezofila, ter spodnje in zgornje povrhnjice, ki z naraščanjem niža odbojnost zelenega dela spektra. To so namreč tkiva s fotosintezniimi barvili (Trošt Sedej, 2005), ki s svojo debelitvijo povzročajo večjo absorpcijo vidne svetlobe. Na krivulji odbojnosti opazimo, da vrsta *P. crispus*, kot vrsta z najdebelejšim mezofilom in zgornjo povrhnjico, najslabše odbija ta del svetlobe. Zeleni del odbojnega spektra je z SLA v pozitivni zvezi, vendar se te ugotovitve ne ujemajo s krivuljo odbojnosti. Najverjetneje imajo drugi dejavniki večji vpliv na odbojnost kot SLA. V skladu s pričakovanji na odbojnost UV-B, UV-A, vijolične in modre svetlobe morfološke lastnosti nimajo pomembnega vpliva, saj igrajo tu večjo vlogo snovi, ki te valovne dolžine absorbirajo.

5.1.4 Morfološke in biokemijske lastnosti, ki v največji meri vplivajo na prepustne spektre listov izbranih vrst

Biokemijske lastnosti imajo pomemben vpliv na prepustnost listov. Največji vpliv imajo fotosintezna barvila in antociani, ki so močno povezani s prepustnostjo v vidnem delu spektra, saj absorbirajo te valovne dolžine (Liew, 2008). Ta povezava je negativna, kar pomeni, da se prepustnost vidnih valovnih dolžin zmanjšuje z naraščanjem vsebnosti teh snovi (Preglednica 2). Nekoliko večje, čeprav ne statistično značilno različne vsebnosti smo opazili pri vrsti *P. crispus*, katerega prepustnost je v vidnem delu spektra najnižja. Najnižje vsebnosti smo opazili pri vrsti *P. lucens*, katerega prepustnost je, čeprav ne popolnoma značilno, višja od ostalih dveh vrst.

UV valovnih dolžin list ne prepušča (Yoshimura in sod., 2012), zato je pozitivna povezava, ki smo jo dobili z biokemijskimi lastnostmi, verjetno slučajna. Vzrok je lahko velika

razpršenost podatkov v UV območju pri blešččem dristavcu. Ko smo analize naredili brez blešččega dristavca povezave niso bile statistično značilne.

Prav vse biokemijske lastnosti, tako vsebnosti klorofilov, karotenoidov, antocianov kot UV absorbirajočih snovi pa so v pozitivni povezavi z NIR. Ker naj te lastnosti na NIR ne bi vplivale predpostavljamo, da je vzrok takšne povezave debelina lista, ki pa ima vpliv na te valovne dolžine (Slaton in sod., 2001). S povečevanjem debeline lista se namreč spreminjajo tudi vrednosti teh biokemijskih lastnosti.

Tudi morfološke značilnosti kažejo močan vpliv na prepustnost vidnega dela spektra. V močni negativni zvezi z vidnimi valovnimi dolžinami so debelina mezofila, zgornje in spodnje povrhnjice. Kloroplasti, ki vsebujejo barvila za absorpcijo vidne svetlobe, so pri vodnih rastlinah za dodaten izkoristek svetlobe prisotni tako v povrhnjicah kot v mezofilu (Trošt Sedej, 2005). Prepustnost se torej z večanjem debelin teh plasti znižuje, saj je svetloba zaradi večje količine barvil bolj absorbirana. Tudi krivulja prepustnosti podpira te ugotovitve. Vrsta *P. crispus* je vrsta z največjo debelino mezofila ter povrhnjic in ima najnižjo prepustnost. Pozitivno povezavo z valovnimi dolžinami v vidnem delu spektra in prepustnostjo tvori zgornja kutikula. Ta mora, kot del povrhnjice, vidne valovne dolžine prepuščati (Robberecht in Caldwell, 1978). Vrsta *P. lucens* ima najdebelejšo zgornjo kutikulo in hkrati nekoliko večjo prepustnost, čeprav se razen v modrem delu, statistično značilno ne razlikuje od vrste *P. perfoliatus*. Povezava z SLA kaže, da ob večji SLA list prepušča več vidne svetlobe. Vrsta *P. crispus* ima najnižjo SLA in je njegova prepustnost najnižja, vendar pa pri ostalih dveh vrstah krivulja prepustnosti tej povezavi ne sledi popolnoma. Sklepamo, da imajo v tem primeru drugi dejavniki večji vpliv na prepustnost.

Na prepustnost NIR dela spektra negativno vplivata debelini spodnje in zgornje kutikule. Kutikula namreč s svojo debelino povečuje odbojnost bližnjih infrardečih valovnih dolžin (Slaton in sod., 2001). Krivulja prepustnosti kaže, da ima vrsta *P. lucens*, ki ima najbolj debelo kutikulo res nižjo prepustnost, za ostali dve vrsti pa razlike niso statistično značilne. Pozitivna povezava se je pokazala med prepustnostjo in debelino zgornje povrhnjice, ki pa se s krivuljo prepustnosti ne sklada.

5.2 SKLEPI

Optične lastnosti listov vseh vrst so podobne, saj rastejo v podobnih svetlobnih razmerah.

Optične lastnosti pri listih vseh treh vrst so bile podobne. Oblika krivulje odbojnega in presevnega spektra je podobna kot pri vseh višjih rastlinah.

Vse krivulje odbojnosti kažejo zelo nizko odbojnost UV-B in UV-A valovnih dolžin, ter nekoliko višjo a še vedno nizko odbojnost vidnega dela spektra z vrhom v zelenem delu. Odbojnost pri vseh močno naraste v bližnjem infrardečem delu spektra. Nekoliko razlik med vrstami smo opazili le v delih, kjer je odbojnost narasla. Pojavile so se v vidnem delu spektra kot posledica razlik med vsebnostmi fotosinteznih in drugih barvil ter v NIR delu zaradi razlikovanja v zgradbi listov. Podobnosti so rezultat podobne biokemijske in morfološke zgradbe višjih rastlin. Zaščititi se morajo pred UV, uporabljati morajo vidno svetlobo za fotosintezo, sevanju v NIR pa se izogibajo zaradi nevarnosti pregretja.

Tudi krivulje prepustnosti so si med seboj podobne. Listi UV svetlobe ne prepuščajo, v vidnem delu prepustnost naraste in doseže vrh pri okoli 500 nm, drugič pa prepustnost močno naraste v NIR delu. Te ugotovitve se zopet skladajo z optičnimi lastnostmi drugih višjih rastlin. Listi UV svetlobo skoraj popolnoma absorbirajo, kjer je v vidnem delu manjša absorpcija, ta del svetlobe bolj prehaja skozi list, prav tako pa se zgodi z NIR sevanjem, ki se ne absorbira in ga list prepušča.

Na presevnosti in na odbojnost bo imela največji vpliv količina fotosinteznih barvil.

Kljub vplivu tudi morfoloških lastnosti na vidni del spektra, je imela količina fotosinteznih barvil nekoliko večji vpliv na odbojnost in prepustnost v tem delu spektra. Ker je imela vsaka vrsta nekoliko drugačno vsebnost barvil, so se pojavile razlike v odbojnosti in prepustnosti vidnega dela spektra. Na UV-B in UV-A ter NIR spektre pa fotosintezna barvila niso imela vpliva.

6 POVZETEK

V diplomskem delu smo preučili optične lastnosti treh vrst dristavcev: bleščeči dristavec (*Potamogeton lucens*), kodravi dristavec (*Potamogeton crispus*) in preraslolistni dristavec (*Potamogeton perfoliatus*).

Vse tri vrste so submerzni makrofiti, ki v reki Rak rastejo v podobnih svetlobnih razmerah, zato smo prepostavili, da imajo podobne optične lastnosti. Izmerili smo torej koliko svetlobe in katere valovne dolžine se od listov odbijejo ter koliko in katere valovne dolžine presevajo skozi list. Liste smo osvetljevali z UV-VIS-NIR svetlobnim virom ter merili odbito in prepuščeno sevanje s spektrometrom.

Rezultati so pokazali veliko podobnosti v optičnih lastnostih listov vseh treh vrst. Krivulje odbojnosti in prepustnosti pa so se tudi skladale z optičnimi lastnostmi vseh višjih rastlin. Odbojnost je bila v UV delu spektra nizka, v območju vidnih valovnih dolžin je nekoliko narasla in dosegla vrh v zelenem delu, močan porast odbojnosti pa smo opazili v bližnjem infrardečem delu. List UV svetlobe ni prepuščal, v vidnem delu spektra pa je prepustnost narasla in dosegla vrh pri okoli 500 nm. Bližnje infrardeče valovne dolžine so močno prehajale skozi liste. Na značilnosti spektrov naj bi v skladu s pregledanimi objavami vplivale UV-absorbirajoče snovi in fotosintezna barvila, ki absorbirajo določeno svetlobo ter listna zgradba. Razlike med optičnimi lastnostmi vrst so bile opazne le v delih, kjer je bila odbojnost nekoliko višja. Naši rezultati so pokazali, da vzrok zanje leži v razlikah v vsebnostih barvil ter listni zgradbi. Merili smo namreč tudi morfološke lastnosti listov in tako določili njihovo debelino, debelino njihovih plasti ter specifično listno površino, izmerjene biokemijske lastnosti pa so bile vsebnosti klorofilov, karotenoidov, antocianov in UV-absorbirajočih snovi. Postavljena hipoteza, da na odbojnost in prepustnost najbolj vplivajo barvila drži za valovne dolžine vidnega dela spektra. V UV in NIR delu pa smo uspeli dokazati, da imata na odbojnost in presevnost vpliv vsebnost UV absorbirajočih snovi in listna zgradba.

7 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: 241-223
- Beck C.B., 2005. An introduction to plant structure and development : plant anatomy for the 21st century. 1st edition. Cambridge, Cambridge University Press: 431 str.
- Caldwell M.M., 1968. Solar ultraviolet radiation as an ecological factor for alpine plants. *Ecological Monography*, 38: 243-268
- Chalker-Scott L. 1999. Environmental significance of anthocyanins in plant stress responses. *Photochemistry and Photobiology*, 70, 1: 1-9
- Close D.C., Beadle C.L. 2003. The ecophysiology of foliar anthocyanin. *The Botanical Review*, 69: 149-161
- Dawson T.P., Curran P.J., Plummer S.E. 1996. LIBERTY-Modeling the effects of leaf biochemical concentration on reflectance spectra. *Remote Sensing Environment*, 65: 50-60
- Ferk M., Stepišnik U. 2011. Geomorfološke značilnosti Rakovega Škocjana. Ljubljana, Založba ZRC: 70 str.
- Gaberščik A., Germ M., Kržič N., Urbanc-Berčič O. 2005. The "Multifunctional integrated study Danube, Corridor and Catchment"(MIDCC): partnet report 2004: macrophytes of the rivers Stržen, Obrh, Rak and Ljubljanica. Ljubljana, National institute of biology. Biotechnical faculty, Department of biology: 108 str.
- Gates D. M., Keegan H. J., Schleter J. C., Weidner V. R. 1965. Spectral properties of plants. *Applied Optics*, 4, 1: 11-20
- Gimond M. 2003. Description and verification of an aquatic optics Monte Carlo model. *Environmental Modelling & Software*, 19: 1065-1076
- Khare M., Guruprasad K.N., 1993. UV-B induced anthocyanin synthesis in maize regulated by FMN and inhibitors of FMN photoreactions. *Plant Science*, 91: 1-5
- Klančnik K., Mlinar M., Gaberščik A. 2012. Heterophylly results in a variety of "spectral signatures" in aquatic plant species. *Aquatic botany*, 98: 20-26
- Knapp A.K., Carter G.A. 1998. Variability in leaf optical properties among 26 species from a broad range of habitats. *American Journal of Botany*, 85: 940-946
- Larcher W. 2003. Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups, 4th edition. Berlin, Springer: 513 str.

- Lichtenthaler H.K., Buschmann C., 2001a. Extraction of photosynthetic tissues: chlorophylls and carotenoids. V: *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. New York, J. Wiley & Sons: F4.2.1.-F4.2.6.
- Lichtenthaler H.K., Buschmann C., 2001b. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterisation by UV-vis. V: *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*. New York, J. Wiley & Sons: F4.3.1.-F4.3.8.
- 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
- Martinčič A., Wraber T., Jogan N., Ravnik V., Podobnik A., Turk B., Vreš B. 1999. *Mala flora Slovenije: ključ za določevanje praprotnic in semenk*. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 845 str.
- Mazej Z. 1998. *Pojavljanje makrofitov v različnih tipih jezer: magistrska naloga*. Ljubljana, Z. Mazej: 104 str.
- Middleton E.M., Teramura A.H. 1993. The role of flavonol glycosides and carotenoids in protecting soybean from ultraviolet-B damage. *Plant Physiology*, 103: 741-752
- Oštir K. 2006. *Daljinsko zaznavanje*. Ljubljana, Založba ZRC: 250 str.
- Robberecht R., Caldwell M. 1978. Leaf epidermal transmittance of ultraviolet radiation and its implications for plant sensitivity to ultraviolet-radiation induced injury. *Oecologia*, 32, 3: 277-287
- Rozema J., Björn L.O., Bornman J.F., Gaberščik A., Hader D.P., Trošt T., Germ M., Klisch M., Grohiger A., Sinha R.P., Lebert M., He Y.Y., Buffoni-Hall R., de Bakker N.V., van de Staaij J., Meijkamp B.B. 2002. The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems – an experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 66: 2-12
- Slaton M.R., Hunt E.R., Smith W.K. 2001. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. *American Journal of Botany*, 88: 278-284.
- Tanaka Y., Sasaki N., Ohyima A. 2008. Biosynthesis of plants pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids. *The Plant Journal*, 54: 733-749
- Trošt-Sedej T., 2005. *Ekologija rastlin: priročnik za vaje*. Ljubljana. Študentska založba: 81 str.
- Velazquez-Rosas N., Barradas V.L., Vazquez-Santana S., Cruz-Ortega R., Garcia-Jimenez F., Toledo-Alvarado E., Orozco-Segovia A. 2010. Optical and morpho-functional traits of the leaves of tree species growing in a mountain cloud forest. *Acta Oecologica*, 36: 587-598

- Vogelmann T.C., Nishio J.N., Smith W.K. 1996. Leaves and light capture: light propagation and gradients of carbon fixation within leaves. *Trends in Plant Science*, 1, 2: 65-71
- 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: 179-191
- Zimmerman R.C., Dekker A.G., 2006. Aquatic Optics: Basic concepts for understanding how light affects seagrasses and makes them measurable from space. V: *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Dordrecht, Larkum A. W. D., Orth R. J., Duarte C.: 295-301
- Zur R.L., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Merzlyak M.N. 2000. The spectral contribution of carotenoids to light absorption and reflectance of green leaves. V: *Proceeding of the Second International Conference on Geospatial Information in Agriculture and Forestry: vol. 2*. Lake Buena Vista, ERIM International: 17-23

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. Alenki Gaberščik, za vzpodbudo in nasvete ob izdelavi moje diplomske naloge. Iskrena hvala tudi Katji Klančnik za ves trud in pomoč pri praktičnem delu ter obdelavi podatkov.

Zahvaljujem se doc. dr. Mateji Germ ter doc. dr. Katarini Vogel-Mikuš za pregled in tehtne popravke diplome.

Posebna zahvala gre mojim staršem, za razumevanje ter vso podporo tekom študija.

Hvala tudi prijateljem, sošolcem ter vsem, ki so me spremljali skozi vzpone in padce teh čudovitih in nepozabnih študentskih let.