

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ŠTUDIJ EKOLOGIJE IN BIODIVERZITETE

Jan KAVČIČ

**VPLIV UV SEVANJA NA AKUMULACIJO SILICIJA
PRI PŠENICI**

MAGISTRSKO DELO
Magistrski študij - 2. stopnja

Ljubljana, 2015

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ŠTUDIJ EKOLOGIJE IN BIODIVERZITETE

Jan KAVČIČ

VPLIV UV SEVANJA NA AKUMULACIJO SILICIJA PRI PŠENICI

MAGISTRSKO DELO
Magistrski študij - 2. stopnja

**THE EFFECT OF UV RADIATION ON THE ACCUMULATION OF
SILICON IN WHEAT**

M. SC. THESIS
Master Study Programmes

Ljubljana, 2015

Magistrsko delo je zaključek magistrskega študija 2. bolonjske stopnje Ekologija in biodiverziteta na Oddelku za biologijo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Delo je bilo opravljeno v prostorih Katedre za ekologijo in varstvo okolja Oddelka za biologijo Biotehniške fakultete.

Senat oddelka za biologijo je na predlog Komisije za študij 1. in 2. stopnje 21. 2. 2014 odobril temo magistrskega dela z naslovom Vpliv UV sevanja na akumulacijo silicija pri pšenici. Za mentorico magistrskega dela je imenoval prof. dr. Matejo Germ in za recenzentko prof. dr. Alenko Gaberščik.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednica: prof. dr. Katarina VOGEL MIKUŠ

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Članica: prof. dr. Mateja GERM

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Članica: prof. dr. Alenka GABERŠČIK

Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Datum zagovora: 7. 12. 2015

Podpisani izjavljam, da je naloga rezultat lastnega raziskovalnega dela. Izjavljam, da je elektronski izvod identičen tiskanemu. Na univerzo neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravici shranitve avtorskega dela v elektronski obliki in reproduciranja ter pravico omogočanja javnega dostopa do avtorskega dela na svetovnem spletu preko Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete.

Jan KAVČIČ

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du2
DK	581.5:635:546.23:546.28(043.2)=163.6
KG	pšenica/ UV sevanje/ selen/ silicij/
AV	KAVČIČ, Jan, diplomirani biolog (UN)
SA	GERM, Mateja (mentorica)/GABERŠČIK, Alenka (recenzentka)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Študij ekologije in biodiverzitete
LI	2015
IN	VPLIV UV SEVANJA NA AKUMULACIJO SILICIJA PRI PŠENICI
TD	Magistrsko delo (Magistrski študij – 2. stopnja)
OP	XI, 69 str., 22 pregl., 24 sl., 12 pril., 93 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	<p>V magistrski nalogi smo proučevali vpliv UV sevanja in selen na izbrane morfološke, biokemijske in optične lastnosti listov pšenice (<i>Triticum aestivum</i>). Rastline smo razdelili v štiri skupine in vsako skupino izpostavili različnim razmeram (dodan selen ali brez dodanega selen, naravno ali znižano UV sevanje) in tako smo dobili štiri različne obravnave. Naredili smo prereze listov in izmerili njihove debeline ter debeline različnih tkiv (mezenhim, povrhnjica, kutikula). Prešteli in izmerili smo listne reže in bodičke na obeh straneh listov. Iz listov smo izolirali fitolite, ekstrahirali fotosintezna barvila in UV absorbirajoče snovi. Izmerili smo tudi hitrost transpiracije in potencialno ter dejansko fotokemično učinkovitost FSII. Vpliv obravnave na optične lastnosti listov pa smo preučili z merjenjem odbojnosti in presevnosti listov. Način obravnave je vplival na debelino povrhnjice in kutikule. Na reže način obravnave nima velikega vpliva. Rastline obravnavane s Se+UV+ imajo najmanj fotosinteznih barvil in največ UV absorbirajočih snovi. Način obravnave vpliva tudi na maso fitolitov v listih, dejansko fotokemično učinkovitost FSII in transpiracijo. Rastline, obravnavane z različnimi obravnavami, se razlikujejo po odbojnih in presevnih spektrih svetlobe. Največjo odbojnost (razen NIR) imajo rastline, obravnavane s Se+UV+. Razlike v presevnosti med rastlinami z različnimi obravnavami so manj izrazite kot pri odbojnosti. Način obravnave rastlin torej vpliva na morfološke in biokemijske lastnosti ter na odbojnost in presevnost listov pšenice.</p>

KEY WORD DOCUMENTATION

- ND Du2
- DC 581.5:635:546.23:546.28(043.2)=163.6
- CX wheat/ UV radiation/ selenium/ silicon
- AU KAVČIČ, Jan
- AA GERM, Mateja (supervisor)/GABERŠČIK, Alenka (reviewer)
- PP SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Academic Study Programme in Ecology and Biodiversity
- PY 2015
- TY THE EFFECT OF UV RADIATION ON THE ACCUMULATION OF SILICON IN WHEAT
- DT M. Sc. Thesis (Master Study Programmes)
- NO XI, 69 p., 22 tab., 24 fig., 12 ann., 93 ref.
- LA sl
- Al sl/en
- AB In this thesis the influence of UV radiation and selenium (Se) on selected morphological, biochemical and optical properties and on phytolite concentrations in wheat leaves (*Triticum aestivum*) was studied. The plants were divided into four groups and each group was exposed to different treatment, namely no Se (Se-), added Se (Se+), ambient (UV+) and reduced UV radiation (UV-). Thickness of different tissues (mesophyll, epidermis, cuticula) were measured and the number and size of stomata and trichomes was examined. Phytoliths were isolated, photosynthetic pigments and UV absorbing compounds were extracted from the leaves. Transpiration rate, potential and effective photochemical efficiencies of FSII were also measured. The influence of the treatments on the optical properties of the leaves was studied by measuring the reflectance and transmittance of the leaves. Treatments affected the thickness of epidermis and cuticula, whereas the stomata were mostly not affected. The plants treated with Se+UV+ contained the lowest contents of pigments and the highest contents of UV absorbing compounds. Different treatments also affected the concentration of phytoliths in the leaves, the effective photochemical efficiency FSII and transpiration. Different treatments also resulted in different in reflectance and transmittance spectra. Plants treated with Se+UV+ reflected radiation at most (except NIR). The differences in reflectance in plants from different treatments are less pronounced than those in transmittance. Se+UV+ treatment affected the morphological and biochemical properties and phytolite concentrations as well as optical properties of wheat leaves.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION.....	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO SLIK.....	VIII
KAZALO TABEL.....	IX
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI.....	XI
1 UVOD	1
1.1 NAMEN NALOGE.....	1
1.2 DELOVNE HIPOTEZE.....	2
2 PREGLED OBJAV	2
2.1 SILICIJ	2
2.1.1 Kemijske lastnosti silicija.....	2
2.1.2 Silicij v tleh	2
2.1.3 Silicij v rastlinah	3
2.1.4 Fitoliti.....	4
2.1.5 Esencialnost silicija.....	5
2.2 SELEN	6
2.2.1 Kemijske lastnosti selena.....	6
2.2.2 Selen v okolju	6
2.2.3 Esencialnost selena za ljudi in živali	7
2.2.4 Selen v rastlinah.....	7
2.2.5 Strupenost selena	9
2.2.6 Esencialnost selena za rastline	9
2.3 UV SEVANJE.....	10
2.3.1 UV sevanje v atmosferi.....	10
2.3.2 Raziskovanje vpliva UV sevanja na rastline	11
2.3.3 Zaznavanje UV sevanja.....	12
2.3.4 Vpliv UV sevanja na morfološke in biokemijske lastnosti rastlin	12
2.3.5 Zaščita pred vplivi UV sevanja.....	14
2.3.6 Vpliv UV sevanja na ekosisteme.....	14
2.4 UV SEVANJE, SELEN, SILICIJ IN PŠENICA	15

2.4.1	Vpliv UV sevanja, silicija in selena na pšenico.....	15
3	MATERIALI IN METODE	16
3.1	IZVEDBA POIZKUSA.....	16
3.2	MERITVE.....	18
3.2.1	Morfološke in anatomske meritve	18
3.2.2	Biokemijske meritve	19
3.3	STATISTIČNA OBDELAVA PODATKOV	21
4	REZULTATI	22
4.1	MORFOLOŠKE MERITVE.....	22
4.1.1	Debelina kutikule na zgornji in spodnji strani listov.....	22
4.1.2	Debelina povrhnjice na zgornji in spodnji strani listov	23
4.1.3	Specifična listna površina.....	24
4.1.4	Dolžina listnih rež na zgornji strani listov.....	25
4.1.5	Dolžina manjših bodičk	26
4.1.6	Delež fitolitov.....	27
4.2	BIOKEMIJSKE MERITVE	28
4.2.1	Vsebnost antocianov na enoto suhe mase listov	28
4.2.2	Vsebnost antocianov na površino listov	29
4.2.3	Vsebnost klorofila <i>a</i> na enoto suhe mase listov	30
4.2.4	Vsebnost klorofila <i>a</i> na površino listov	31
4.2.5	Vsebnost klorofila <i>b</i> na enoto suhe mase listov	32
4.2.6	Vsebnost klorofila <i>b</i> na površino listov	33
4.2.7	Vsebnost karotenoidov na enoto suhe mase listov	34
4.2.8	Vsebnost karotenoidov na površino listov	35
4.2.9	Vsebnost UV-A absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov	36
4.2.10	Vsebnost UV-A absorbirajočih snovi na površino listov	37
4.2.11	Vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov	38
4.2.12	Vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na površino listov	40
4.3	FOTOKEMIČNA UČINKOVITOST FSII IN TRANSPIRACIJA	41
4.3.1	Dejanska fotokemična učinkovitost fotosistema II	41
4.3.2	Transpiracija.....	42
4.4	ODBOJNOST IN PRESEVNOST	43
4.4.1	Relativna odbojnost	43

4.4.2	Relativna presevnost.....	44
4.5	SPEARMANOV KORELACIJSKI INDEKS.....	45
4.5.1	Odbojni spektri svetlobe	45
4.5.2	Presevni spektri svetlobe.....	47
5	RAZPRAVA.....	48
5.1	MORFOLOŠKE IN ANATOMSKE MERITVE.....	48
5.2	FITOLITI	50
5.3	VSEBNOST BARVIL	51
5.4	FOTOKEMIČNA UČINKOVITOST FSII IN TRANSPIRACIJA	53
5.5	ODBOJNOST IN PRESEVNOST	54
5.6	NAJPOMEMBNEJŠI IZSLEDKI.....	56
6	SKLEPI	57
7	POVZETEK.....	59
8	VIRI.....	60
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO SLIK

Sl. 1: Postavljena konstrukcija za poizkus in pod njo pšenica v koritih.....	16
Sl. 2: Pšenica v koritih pod konstrukcijo.....	17
Sl. 3: Vpliv UV sevanja in Se na debelino kutikule na zgornji in spodnji strani listov	22
Sl. 4: Vpliv UV sevanja in Se na debelino povrhnjice na zgornji in spodnji strani listov ..	23
Sl. 5: Vpliv UV sevanja in Se na specifično listno površino (SLA)	24
Sl. 6: Vpliv UV sevanja in Se na dolžino listnih rež na zgornji strani listov	25
Sl. 7: Vpliv UV sevanja in Se na dolžino manjših bodičk	26
Sl. 8: Vpliv UV sevanja in Se na delež mase, ki jo v listu predstavljajo fitoliti.....	27
Sl. 9: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost antocianov na enoto suhe mase listov	28
Sl. 10: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost antocianov na površino listov.....	29
Sl. 11: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost klorofila <i>a</i> na enoto suhe mase listov	30
Sl. 12: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost klorofila <i>a</i> na površino listov.....	31
Sl. 13: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost klorofila <i>b</i> na enoto suhe mase listov	32
Sl. 14: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost klorofila <i>b</i> na površino listov.....	33
Sl. 15: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost karotenoidov na enoto suhe mase listov.....	34
Sl. 16: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost karotenoidov na površino listov	35
Sl. 17: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost UV-A absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov	36
Sl. 18: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost UV-A absorbirajočih snovi na površino listov	37
Sl. 19: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov	38
Sl. 20: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na površino listov	40
Sl. 21: Vpliv UV sevanja in Se na dejansko fotokemično učinkovitost FSII.....	41
Sl. 22: Vpliv UV sevanja in Se na transpiracijo	42
Sl. 23: Relativna odbojnost svetlobe ..	43
Sl. 24: Relativna presevnost svetlobe	44

KAZALO PREGLEDNIC

Pregl. 1: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v debelini kutikule na zgornji in spodnji strani listov.....	22
Pregl. 2: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v debelini povrhnjice na zgornji in spodnji strani listov ...	23
Pregl. 3: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vrednostih SLA.....	24
Pregl. 4: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v dolžini listnih rež na zgornji strani listov	25
Pregl. 5: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v dolžini manjših bodičk na zgornji strani listov.. ..	26
Pregl. 6: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v deležu mase fitolitov	27
Pregl. 7: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti antocianov na enoto suhe mase listov	28
Pregl. 8: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti antocianov na površino listov.....	29
Pregl. 9: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti klorofila <i>a</i> na enoto suhe mase listov.....	30
Pregl. 10: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti klorofila <i>a</i> na površino listov	31
Pregl. 11: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti klorofila <i>b</i> na enoto suhe mase listov	32
Pregl. 12: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti klorofila <i>b</i> na površino listov	33
Pregl. 13: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti karotenoidov na enoto suhe mase listov.....	34
Pregl. 14: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti karotenoidov na površino listov.....	35
Pregl. 15: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti UV-A absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov.. ..	36
Pregl. 16: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti UV-A absorbirajočih snovi na površino listov ..	37
Pregl. 17: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti UV-B absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov.	39
Pregl. 18: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti UV-B absorbirajočih snovi na površino listov	40

Pregl. 19: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vrednostih dejanske fotokemične učinkovitosti FSII	41
Pregl. 20: Statistično značilno pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vrednostih transpiracije	42
Pregl. 21: Spearmanov koeficient odvisnosti med posameznim območjem odbojnega spektra in anatomske in biokemijske parametri	45
Pregl. 22: Spearmanov koeficient odvisnosti med posameznim območjem presevnega spektra in anatomske in biokemijske parametri	47

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

Se	selen
Si	silicij
Se+UV+	rastline, obravnavane z dodanim selenom in pod naravnim UV sevanjem
Se-UV+	rastline, obravnavane brez dodanega selena in pod naravnim UV sevanjem
Se+UV-	rastline, obravnavane z dodanim selenom in pod znižanim UV sevanjem
Se-UV-	rastline, obravnavane brez dodanega selena in pod znižanim UV sevanjem

1 UVOD

UV sevanje predstavlja le manjši del elektromagnetnega sevanja, ki doseže Zemljo. Velik del UV-B sevanja prestreže ozon v atmosferi in tako zmanjša količino UV-B sevanja, ki doseže površje (Frohnmeier in Staiger, 2003). V drugi polovici 20. stoletja je količina ozona v atmosferi močno upadla in posledica je povečana intenziteta UV-B sevanja na površju Zemlje (Chipperfield in sod., 2015). UV-B sevanje vpliva na številne biološke in kemijske procese v rastlinah. UV-B sevanje vpliva na zgradbo in anatomske lastnosti listov, na fotosintežna barvila, na izgradnjo zaščitnih snovi, na fotosintezo, na fenološke lastnosti in rast rastlin ter na reprodukcijo (Germ, 2006).

Selen za rastline ni esencialen. Ima pa na rastline v ustreznih koncentracijah številne pozitivne učinke. Selen spodbuja rast rastlin in pomaga pri premagovanju različnih vrst stresnih dejavnikov kot so: UV-B sevanje, nizke in visoke temperature, slanost, suša, težke kovine. Selen tudi upočasnuje staranje rastlin in vpliva na vodni status (Nawaz in sod., 2014).

Silicij je drugi najbolj razširjen element v tleh (Balakhnina in Borkowska, 2013). Tako kot selen tudi silicij ni esencialen za rastline ima pa za rastline številne pozitivne učinke. Rastlini pomaga pri premagovanju stresa, ki ga povzročajo težke kovine, slanost, suša, visoke in nizke temperature, UV sevanje. Tkiva s silicijem rastlini nudijo oporo in zaščito pred rastlinojedci (Ma, 2004). Rastline ga privzemajo iz tal v obliki silicijeve kisline, nato pa se v obliki silicijevih struktur (fitolitov) nalaga v rastlinskih tkivih (Piperno, 2006). Fitoliti na površini lista in v listnem tkivu vplivajo na prehajanje in odboj svetlobe kar vpliva na optične lastnosti listov (Klančnik in sod., 2014).

1.1 NAMEN NALOGE

Namen magistrske naloge je ugotoviti, kako se spreminja količina silicija ob različnih odmerkih UV sevanja. Želimo ugotoviti, kako različne količine silicija v listih vplivajo na optične lastnosti listov. Zanima nas tudi vpliv dodanega selena na izbrane fiziološke, biokemijske in morfološke lastnosti pšenice ob različnih odmerkih UV sevanja.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Postavili smo dve hipotezi:

- dodani selen bo omilil negativno delovanje UV sevanja
- ker ima silicij strukturno in zaščitno vlogo, predvidevamo, da bo pri nižjih odmerkih UV sevanja količina silicijevih fitolitov v listih pšenice manjša

2 PREGLED OBJAV

2.1 SILICIJ

2.1.1 Kemijske lastnosti silicija

Silicij je polkovina z atomskim številom 28, ki sodi v ogljikovo skupino elementov (ogljik, silicij, germanij, kositer, svinec). Silicij tvori 8 različnih izotopov, od katerih je najpogostejši Si²⁸ (92,2 %). Elementarni silicij je trden, sive barve s kovinskim sijajem. Zaradi reaktivnosti se elementarni silicij v naravi ne pojavlja (»Silicon (Si)«, 2015).

2.1.2 Silicij v tleh

Silicij je drugi najbolj pogost element v tleh. Prst večinoma vsebuje med 50 in 400 g Si na kilogram prsti. V peščenih tleh ga je več kot v glinenih (Balakhnina in Borkowska, 2013). Silicij se v tleh nahaja v tekoči in trdni fazi. Silicij v trdni fazi je v kristalni in amorfni obliki. Amorfno obliko razdelimo na biogeno (npr. fitoliti) in amorfno obliko nebiološkega izvora. Kristalno obliko pa predstavljajo različni minerali (kremen, kaolinit, smektit itd.). V tekoči fazi se silicij nahaja v obliki monosilicijeve kisline (H_4SiO_4), polisilicijeve kisline in v obliki kompleksov z anorganskimi in organskimi spojinami (Matichenkov in Bocharkova, 2001). V talni raztopini je silicij prisoten predvsem v obliki H_4SiO_4 v koncentracijah od 0,1 do 0,6 mM kar je primerljivo s koncentracijami drugih makronutrientov kot sta kalij in kalcij (Epstein, 1994). V večjih koncentracijah H_4SiO_4 poteče polikondenzacija in nastanejo trdni delci (Currie in Perry, 2007). Količina H_4SiO_4 v tekoči fazi v tleh je poleg koncentracije odvisna še od temperature, pH, matične podlage,

sposobnosti tal za zadrževanje vode, redukcijskih procesov in od koncentracije železovih in aluminijevih ionov (Ma in Takahashi, 2002a).

2.1.3 Silicij v rastlinah

Rastline privzemajo silicij iz tal v obliki monosilicijeve kislina (H_4SiO_4) (Nikolic in sod., 2007). Privzem silicija je lahko aktivен ali pasiven. Najdemo pa tudi vrste, ki aktivno izločajo silicij iz rastline (Takahashi in sod., 1990). Primeri rastlin, ki aktivno črpajo silicij iz tal so riž (*Oryza sativa*), pšenica (*Triticum aestivum*), ječmen (*Hordeum vulgare*). Kumare (*Cucumis sativus*), jagode (*Fragaria vesca*), melona (*Cucumis melo*) privzemajo silicij pasivno. Fižol (*Phaseolus vulgaris*) in paradižnik (*Lycopersicon esculentum*) pa silicij aktivno črpata iz rastlin (Liang in sod., 2006). Fu in sodelavci (2002) pa so na primeru praproti *Matteuccia* sp. ugotovili, da je možen tudi privzem večjih delcev silicijevih mineralov v korenine. Iz teh delcev pa se v koreninah sprošča monosilicijeve kislina, ki se nato prenaša po rastlini (Fu in sod., 2002). Aktivni transport silicija omogočajo prenašalci. V rižu so do sedaj našli tri različne prenašalce silicija LSi1, LSi2 in LSi6 (Peleg in sod., 2010). LSi1 prenašalec je odgovoren za prenos silicija iz tal do skorje korenin, LSi2 pa je odgovoren za prenos silicija iz skorje do ksilema. Prenašalca najdemo v glavni korenini in stranskih koreninah ne pa tudi v koreninskih laskih. Ko silicij pride v ksilem, se s pomočjo transpiracijskega toka pomakne v nadzemne dele rastlin (Guntzer in sod., 2012). Prenašalec LSi6 pa je odgovoren za privzem silicija iz ksilema. Prenašalci, ki prenašajo silicij do celic, kjer se dokončno odlaga, pa še niso znani (Ma in Yamai, 2015). V pšenici so do sedaj potrdili obstoj TaLSi1, ki ima enako vlogo kot LSi1 prenašalec v rižu. Fitoliti so v listih riža razporejeni v ravnih vrstah, za kar je odgovoren LSi6 prenašalec. Nedelovanje tega prenašalca se kaže v neenakomerni razporeditvi fitolitov. Fitoliti se tudi v listih pšenice pojavljajo v ravnih vrstah, kar kaže na prisotnost LSi6 prenašalca (Montpetit in sod., 2012). Privzem silicija v pšenico (*Triticum aestivum*) sledi Michaelis-Mentenovi kinetiki. Privzem silicija iz tal v korenine pšenice močno zmanjša prisotnost kalijevega cianida in dinitrofenola. To je dokaz, da pšenica aktivno črpa silicij. Fosfor lahko vpliva na hitrost privzema silicija pri različnih vrstah rastlin vendar Rains in sodelavci (2006) tega pri pšenici niso potrdili. So pa ugotovili, da germanij v rastlino prenašajo isti prenašalci kot silicij in zato germanij vpliva na privzem silicija (Rains in

sod., 2006). Črpanje silicija iz tal v primeru pšenice je zelo hitro. Ko so pšenico prestavili iz medija, ki ne vsebuje silicija, v medij s silicijem, je koncentracija silicija v ksilemskem soku že v nekaj minutah zelo narasla. Silicij v ksilemskem soku lahko doseže koncentracijo tudi 8mM kar je lahko tudi štiristokrat več kot v zunanji raztopini. V ksilemskem soku pšenice so našli le mono in disilicijevo kislino v razmerju 7:1. Organosilikatnih kompleksov niso našli (Casey in sod., 2003).

Količina silicija v nadzemnih delih rastline se med različnimi rastlinskimi vrstami močno razlikuje. Silicij lahko predstavlja od 0,1 % do 10 % suhe mase nadzemnega dela rastline (Epstein, 1994). Ma in Takahashi (2002b) sta rastline razdelila v tri skupine glede na količino silicija in razmerja Si/Ca. Med akumulatorje silicija sta uvrstila rastline, ki imajo več kot 1 % silicija na suho maso snovi in razmerje Si/Ca manj kot 1. V skupino rastlin, ki izločajo silicij, spadajo rastline, ki imajo manj kot 0,5 % silicija na suho maso snovi in razmerje Si/Ca manj kot 0,5. Rastline, ki ne ustrezajo tem pogojem, pa so vmesna skupina (Ma in Takahashi, 2002b). Med višjimi rastlinami med akumulatorje silicija uvrščamo družini Cyperaceae in Poaceae. Sedem vrst žit od desetih spada med akumulatorje silicija (Guntzer in sod., 2012). V srednji razred spadata redova Rosales in Cucurbitales in družina Commelinaceae. Večina ostalih rastlin pa kopiči manjše količine silicija (Takahashi in sod., 1990).

2.1.4 Fitoliti

Fitoliti nastanejo, ko se koncentracija silicijeve kislinske v celici tako poveča, da poteče polimerizacija in nastane amorfni silicij ($\text{SiO}_2 \cdot \text{nH}_2$), ki se nato odloži v celične stene, lumen celice in medcelični prostor (Piperno, 2006). Silicij ni enakoverno razporejen med različnimi tkivi in različnimi tipi celic. Največ silicija najdemo v stenah epidermalnih celic, buliformnih celicah, celicah zapiralkah in različnih trihomih. Fitolite lahko najdemo tudi v mezofilu ampak v manjšem številu kot v epidermisu (Klančnik in sod., 2014).

Mehanizem tvorbe fitolitov ni dobro raziskan (Piperno, 2006). Motomura in sodelavci (2002) so za nastajanje fitolitov ponudili dve hipotezi. Prva hipoteza povezuje nastajanje fitolitov s transpiracijo (Motomura in sod., 2002). V celicah z aktivno transpiracijo se silicijeva kislina koncentrira in poteče polimerizacija. Pri travah (Poaceae) tako več

fitolitov najdemo na mestih, kjer poteka intenzivnejša transpiracija. Silicij, ki se odlaga v celicah, je tako le odpadni produkt transpiracije. Pri nekaterih rastlinah pa ni povezave med transpiracijo in fitoliti saj lahko največ fitolitov nastaja tudi v celicah, ki niso neposredno povezane z oddajanjem vode (Piperno, 2006). Motomura in sodelavci (2002) zato ponudijo drugo hipotezo, ki trdi, da rastline aktivno odlagajo silicij v celice z namenom obrambe rastline (Motomura in sod., 2002). Ugotovitev, da lahko rastlina kopiči silicij v zelo specializiranih strukturah oziroma celicah, podpira drugo hipotezo (Piperno, 2006). Hipotezo o aktivnem kopiranju silicija podpira tudi zgradba celic, katerih namen je kopiranje silicija. Te celice zelo hitro izgubijo jedro in citoplazmo, da tako ustvarijo prostor za silicij. Dokler celica še ima jedro, je to jedro zelo veliko, celica pa ima tudi veliko mitohondrijev. Zgradba in delovanje teh celic kažeta, da so te celice že vnaprej programirane za njihovo naloge (Sangster in sod., 2001). Zadnji dokaz, ki potrjuje hipotezo o aktivnem črpanju silicija pa je odkritje genetske kontrole tvorbe fitolitov pri koruzi in bučah. Odkrili so, da isti geni, ki nadzorujejo odlaganje lignina, nadzorujejo tudi odlaganje silicija v celicah (Piperno, 2006).

Velikost in oblika fitolitov se med različnimi taksoni razlikuje. Fitoliti so tudi precej obstojni in jih lahko najdemo v tleh še dolgo potem, ko je rastlina že propadla. Ti dve dejstvi omogočata, da s pomočjo fitolitov rekonstruiramo podnebje in rastje v preteklosti. To s pridom uporablajo arheologi in paleoarheologi (Piperno, 2006). Ker je fitolite med različnimi taksoni včasih težko ločiti, so Elbaum in sodelavci (2009) skušali iz fitolitov izolirati DNK rastline, v kateri so ti fitoliti nastali. DNK jim ni uspelo izolirati. So pa izolirali glikoproteine, maščobe, monosaharide in beljakovine (Elbaum in sod., 2009). Fitoliti torej niso zgolj amorfni SiO_2 . V fitolitih najdemo vodo (4-9 % mase) in ogljik (1-5 % mase). V fitolitih so še manjše količine Al, Fe, Mn, Mg, P, Cu, N (Piperno, 2006).

2.1.5 Esencialnost silicija

Večina rastlin razen družine Equisetaceae in diatomej, ki so alge, lahko uspevajo v substratih brez silicija. Silicija zato ne štejemo med esencialne elemente (Epstein, 2009). Kljub temu, da silicija ne štejemo med esencialne elemente, pa silicij omogoča rastlini lažje preživetje biotičnih in abiotičnih stresnih dejavnikov. Tako silicij pomaga rastlini pri kontroli različnih bolezni in škodljivcev. Rastlini tudi pomaga pri stresu, ki jih povzročajo

težke kovine, slanost, suša, visoke in nizke temperature, neravnovesje hranil, UV sevanje, radioaktivnost (Ma, 2004).

Mehanizmi sodelovanja silicija pri premagovanju stresa so zelo različni in še niso do konca raziskani. Obstajata dve hipotezi o premagovanju stresa s pomočjo silicija. Prva hipoteza pravi, da silicij predstavlja fizično oviro in tako onemogoči prodom bolezenskih agensov v tkivo in naredi tkivo manj občutljivo na encime. Po drugi hipotezi pa silicij deluje kot signalna molekula, ki sproži nastajanje fitoaleksinov, peroksidaz, polifenoloksidaz in številnih drugih snovi (Ma, 2004). Škodljiv vpliv težkih kovin na rastline silicij lahko omeji na več načinov. Prvi način je preprečitev vstopa težkih kovin v rastlino. Silicij v tleh lahko vpliva na pH in tako vpliva na mobilnost kovin. Lahko se sam silicij veže na kovino, ki se nato odlaga v tleh ali pa spodbudi nastajanje fenolnih snovi, ki se vežejo s kovino in se nato odlagajo v tleh. Lahko pa težke kovine kljub temu vstopijo v rastlino. Silicij se v rastlini veže na kovino in jo tako imobilizira. Lahko vpliva na prenos kovin iz korenin v nadzemne dele rastlin. Silicij omogoči, da se več kovin veže na celične stene. Več kovin se tudi prenese v vakuole. In nazadnje vpliva na tvorbo antioksidantov (Liand in sod., 2006).

2.2 SELEN

2.2.1 Kemijske lastnosti selena

Selen (Se) je nekovina in je po kemijskih lastnostih podoben žveplu in telurju. Elementaren selen se pojavlja v treh stabilnih alotropnih oblikah in je v vodi netopen (Barceloux, 1999; Fernández-Martínez in Charlet, 2009). Selen ima 5 stabilnih izotopov in obstaja v petih valenčnih stanjih in sicer kot selenid (2^-), elementarni selen (0), tioselenat (2^+), selenit (4^+) in selenat (6^+) (Terry in sod., 2000; Fernández-Martínez in Charlet, 2009). Selen pa ni vezan le anorganskih spojinah ampak tudi v nehlapnih organskih spojinah kot sta selenometionin in selenocistein in v hlapnih organskih oblikah kot sta dimetil selenid in dimetil diselenid (Fernández-Martínez in Charlet, 2009).

2.2.2 Selen v okolju

Selenat je termodinamično stabilen v bazičnem in dobro prezračenem okolju. V tleh je šibko vezan na delce in se hitro luži in je zato v tleh mobilen in dobro dostopen rastlinam.

Selenit se pojavlja v slabo prezračenih tleh z nevtralnim pH-jem in je močneje vezan na delce v tleh in zato slabše mobilen in težje dostopen rastlinam kot selenat (Uden, 2005). Viri selena v okolju so zrak, voda in tla. Selen pride v ozračje s kurjenjem fosilnih goriv in premoga in pa tudi z vulkanskimi izbruhi. V ozračju se nahaja kot elementarni selen, vezan na delce v ozračju (Barceloux, 1999). Vir selena v tleh je predvsem preperevanje matične podlage, ki vsebuje selenit in selenid vezan s sulfidnimi minerali. Antropogena vira selena v tleh sta predvsem kmetijstvo in rudarstvo (Dreher in Finkelman, 1992). Količina selena v tleh se med različnimi področji močno razlikuje. Večina tal vsebuje 0,1-2mg Se/kg. Kjer je selena v tleh veliko, je količina lahko tudi 1200mg Se/kg. Prisotnost selena v vodi je posledica suhega in mokrega odlaganja iz atmosfere in spiranja iz površja. Količina selena v morski vodi je nizka 0,04 µg Se/L, v površinskih voda pa je razpon koncentracij velik od 0,06µg Se/L do 400µg Se/L (Barceloux, 1999).

2.2.3 Esencialnost selena za ljudi in živali

Selen je esencialen za ljudi in živali. Optimalna dnevna količina zaužitega selena je pomembna, ker preprečuje nastanek različnih vrst raka (pljučni rak, rak prostate, itd), preprečuje razvoj kardiovaskularnih bolezni, podpira delovanje imunskega sistema in preprečuje razvoj HIV-a v AIDS, pomaga pa tudi pri zastrupitvah z težkimi kovinami (Eiche in sod., 2015). Selen je pri ljudeh in živalih pomemben tudi zato, ker se selen s seleno-aminokislinami (SeCys) veže v beljakovine, ki so pomembni antioksidanti (Diwadkar-Navsariwala in sod., 2006). Večino selena ljudje zaužijemo s hrano. Količina zaužitega selena s hrano je odvisna od vrste hrane in od načina njene priprave. Priporočen dnevni vnos selena je med 55-70µg selena na dan. Večje količine lahko povzročijo zastrupitve (Barceloux, 1999).

2.2.4 Selen v rastlinah

Rastline privzemajo selen v obliki selenata, selenita in v obliki organskega selena (Zayed in sod., 1998). Na akumulacijo selena poleg oblike (selenat, selenit, organski selen) in razmerja med različnimi oblikami selena, vplivajo še kationska izmenjevalna kapaciteta tal, pH, koncentracija različnih ionov, delež organske snovi in tekstura tal (Terry in sod., 2000). Selenat se v rastline prenaša aktivno s pomočjo sulfatnih prenašalcev. To je mogoče

zaradi kemijske in fizikalne podobnosti selena in žvepla. Rastlina tako z istim prenašalcem privzema tako selen kot žveplo kar vpliva na privzemanje selena, njegov transport po rastlini in njegovo asimilacijo (Sors in sod., 2005). Za selenit je dolgo časa veljalo, da v rastline prehaja pasivno. Raziskave pa kažejo, da selenit v rastlino prehaja s pomočjo fosfatnih prenašalcev (Li in sod., 2008) in s pomočjo prenašalcev za silicij (Zhao in sod., 2010). Li in sodelavci (2008) so na primeru pšenice (*Triticum aestivum*) ugotovili, da če mediju, v katerem raste rastlina, odvzamejo sulfat, se privzem selenata poveča za desetkrat. Nasprotno pa pomanjkanje sulfata ne vpliva na privzem selenita. Pri rastlinah, ki so rastle v pomanjkanju fosfata, se je močno povečal privzem selenita. Dodajanje fosfata v rastni medij pa je zmanjšalo privzem selenita. Dodajanje metabolnega inhibitorja je zmanjšalo privzem tako selenata kot tudi selenita kar dokazuje aktivni privzem. S tem so dokazali, da selenat v rastlino prehaja aktivno s sulfatnim prenašalcem, selenit pa aktivno z fosfatnim prenašalcem (Li in sod., 2008). Rastline lahko aktivno privzamejo tudi organske oblike selena (Sors in sod., 2005). Pšenica (*Triticum turgidum*) lahko organske oblike selena privzema tudi do 100-krat hitreje kot selenat (Kikkert in Berkelaar, 2013). Od oblike selena je odvisen tudi transport po rastlini. Selenat se hitro prenese iz korenin v nadzemne dele rastline. Tam se selenat reducira do selenita. Selenit se lahko nato naprej reducira do selenocisteina in naprej do selenimetionina, ki pa se lahko na koncu pretvorita v hlapne organske spojine. Večina selenita, ki ga rastline privzamejo, ne pride v nadzemne dele rastlin, saj se v koreninah hitro pretvori v organske oblike (Terry in sod., 2000; Eiche in sod., 2015). Ko so Li in sodelavci (2008) pšenici (*Triticum aestivum*) kot vir selena dodali selenat so ugotovili, da je bil selenat po enem dnevu prevladujoča oblika selena v koreninah, poganjkih in ksilemu. Manjša količina selenata se je pretvorila v organsko obliko. Ko so rastlinam dodali kot vir selena selenit, se ga je več kot 70 % v koreninah pretvorilo v organsko obliko (SeMet, SeOMet, MeSeCys). Le nekaj selenita je bilo v ksilemu (Li in sod., 2008). Različne vrste rastlin imajo različno sposobnost kopiranja selena. Rastlinske vrste zato razdelimo na neakumulirajoče (<100mg Se/kg suhe mase), akumulirajoče (100-1000mg Se/kg suhe mase) in hiperakumulirajoče (>1000mg Se/kg suhe mase) (Valdez Barillas in sod., 2011). Nekatere vrste iz rodov *Astragalus*, *Stanleya*, *Morinda*, *Neptunia*, *Oonopsis*, *Xylorhiza* lahko akumulirajo tudi več kot 4000mg Se/kg suhe mase (Terry in sod., 2000). Neakumulirajoče rastline se od hiperakumulirajočih razlikujejo v tem, da privzet selen kopijo večinoma kot selenat v prevodnih tkivih in ga v

manjši meri pretvorijo v organske oblike. Hiperakumulirajoče rastline pa privzet selenat večinoma pretvorijo v metilselenocistein, ki ga kopijo v vakuolah epidermalnih celic in v strukturah na površini listov (Valdez Barillas in sod., 2011).

2.2.5 Strupenost selena

Pri poskusu na pšenici (*Triticum aestivum*) je bila kritična količina selena, pri kateri so se pokazali znaki stupenosti selena (kloroze, nekroze, bledenje), 325mg Se/kg suhe mase. Pri količini 200mg Se/kg suhe mase pa je prišlo do zmanjšane rasti rastlin (Lyons in sod., 2005). Selen ima 3 stopnje biološke aktivnosti. Selen v sledovih je potreben za normalno rast in razvoj, zmerne količine omogočajo zagotavljanje homeostaze, povišane količine selena pa so lahko za rastline škodljive (Hamilton, 2004). Pomembna je torej ustrezna koncentracija selena. Stupenost selena se kaže kot upočasnjeni rast korenin, nižja biomasa, kloroze, bledenje listov, nižja fotosinteza učinkovitost, zmanjšana izgradnja beljakovin, sušenje in zvijanje listov ter prezgodnje odmiranje rastlin (Terry in sod., 2000; Van Hoewyk, 2013). Občutljivost rastlin na povečane količine selena je odvisna od rastlinske vrste, količine sulfata v tleh, oblike akumuliranega selena in od starosti rastlin. Glavni mehanizem stupenosti selena je vgradnja selenocisteina in selenometionina v beljakovine namesto cisteina in metionina, kar povzroči spremembo terciarne strukture beljakovin in vpliva na njihovo katalitično sposobnost. Prevelike količine selena negativno vplivajo tudi na izgradnjo klorofila in glutationa in na privzemanje nitratov (Reilly, 2006).

2.2.6 Esencialnost selena za rastline

Dokazov za esencialnost selena pri rastlinah še ni. Vendar pa selen v primernih količinah lahko spodbuja rast tako neakumulirajočih kot tudi hiperakumulirajočih rastlin. Je pa učinek na rast večji pri hiperakumulirajočih rastlinah (Pilon-Smith in sod., 2009). Kashin in Shubina (2011) sta semena pšenice (*Triticum aestivum*) predhodno obdelala s selenitom in poganjke še kasneje popršila s selenitom. Ugotovila sta, da so bile rastline, ki sta jim dodala selenit večje, imele so večjo listno površino in višjo fotosintezeno učinkovitost kot rastline brez dodanega selenita. Učinek selenita pa je bil odvisen od koncentracije in od razvojne stopnje rastline (Kashin in Shubina, 2011).

Poleg vpliva na rast ima selen pozitiven učinek tudi na premagovanje različnih vrst stresnih razmer kot so UV-B sevanje, nizke in visoke temperature, slanost, suša, prisotnost težkih kovin, upočasnuje staranje rastlin in vpliva na vodni status rastlin (Nawaz in sod., 2014). Yao in sodelavci (2009) so pšenico izpostavili pomanjkanju vode. Rastline, katerim so dodali selen, so imele večjo biomaso, večjo aktivnost korenin, večjo koncentracijo katalaze, peroksidaze, proline, klorofila in karotenoidov. Učinek je bil odvisen od koncentracije selena (Yao in sod., 2009). Pšenici pod vročinskim stresom je dodajanje selenja povečalo koncentracijo klorofila, katalaze, peroksidaze, karotenoidov, antocianinov in askorbinske kisline. Povečalo se je tudi število zrn v klasu. Zmanjšala pa se je koncentracija oksidantov. Učinek je bil odvisen od koncentracije selena (Iqbal in sod., 2015). Selen ima pozitiven učinek na pšenico, ki je pod stresom zaradi nizkih temperatur. Rastline, ki so jima dodali selen, so imele večjo biomaso, večjo koncentracijo antioksidantov, zmanjšal se je nastanek prostih radikalov in zmanjšale so se poškodbe membran zaradi prostih radikalov (Chu in sod., 2010). Selen ščiti rastline tudi pred biotičnim stresom. Številne živali ne jedo rastlin z veliko vsebnostjo selena, saj se lahko tako zastrupijo s selenom. Selen ščiti rastline tudi pred boleznimi, ki jih povzročajo glive (Hanson in sod., 2004).

2.3 UV SEVANJE

2.3.1 UV sevanje v atmosferi

Sončev sevanje ne dovaja le toplotne do našega planeta ampak je tudi primarni vir energije za izgradnjo organskih molekul in vpliva na kroženje vode. Energija Sonca tako ustvarja primerne razmere za življenje. Zemeljsko biosfero doseže sevanje valovnih dolžin med 280 in 10^5 nm. Območje sevanja med 400 in 700nm predstavlja fotosintežno aktivni spekter sevanja (Trošt Sedej, 2005). UV sevanja predstavlja 7 % vsega elektromagnetnega sevanja, ki ga oddaja Sonce. UV sevanje razdelimo na UV-C (200-280nm), UV-B (280-320nm) in UV-A (320-400nm) del. UV-C sevanje v celoti absorbirajo atmosferski plini in zato ne doseže zemeljskega površja. Velik del UV-B sevanja prestreže ozon v atmosferi. Na UV-A sevanje pa ozon nima takega vpliva in zato večina UV-A sevanja doseže zemeljsko površje (Frohnmyer in Staiger, 2003).

V drugi polovici 20. stoletja je količina ozona v atmosferi močno upadla zaradi česar je več UV sevanja doseglo površje. Ugotovili so, da florokloroogljkovi plini in snovi z brominom, pospešujejo razpad ozona. Posledica izpuščanja teh snovi v ozračje je nastanek ozonske luknje. Količina florokloroogljika je dosegla vrh v letu 1993 in šele predvidoma leta 2050 bo izginila ozonska luknja nad Antarktiko (Chipperfield in sod., 2015). Količina UV-B sevanja, ki doseže zemeljsko površje, je poleg količine ozona odvisna še od aerosolov v atmosferi, oblačnosti in kota vpadanja sončnih žarkov (Kataria in sod., 2014a).

2.3.2 Raziskovanje vpliva UV sevanja na rastline

Raziskave različnih avtorjev, ki raziskujejo vpliv UV-B sevanja na rastline, dajo lahko zelo nasprotujoče si rezultate. Temu so vzrok neenake razmere v času in načinu izvedbe poizkusa. Veliko raziskav je bilo opravljenih v rastnih komorah ali toplih gredah, kjer so uporabili umetne vire svetlobe. Sončna svetloba in umeten vir svetlobe se med seboj razlikujeta v spektralni sestavi svetlobe. Ker so procesi v rastlinah, ki so odvisni od svetlobe, povezani z spektralno sestavo svetlobe, je pomembno v kakšnih razmerah so rastline rastle. Tako lahko dobimo različne rezultate, če poizkus izvedemo zunaj ali v notranjih prostorih pod umetno svetlogo (Hollósy, 2002).

Pri preučevanju vpliva UV sevanja na rastline, ki uspevajo na prostem, uporabimo dva pristopa. Prvi pristop je, da s pomočjo posebnih filtrov znižamo ali odstranimo naravno UV-B sevanje. Lahko pa s pomočjo dodatnih virov svetlobe še povečamo količino UV-B sevanja, ki sicer pride s sončno svetlogo (Kataria in sod., 2014b).

UV-B sevanje je okoljski dejavnik, ki pri rastlinah sproži različne odzive in lahko vpliva na spremembe v metabolizmu, razvoju in razmnoževanju rastlin. Kakšen bo odziv rastline, je odvisno od več dejavnikov. Pomembno je, kako dolgo je rastlina obsevana, s kakšnimi valovnimi dolžinami UV-B sevanja in s kakšno močjo. Sprememba v samo enem ali vseh dejavnikih lahko sproži različen odziv. Odziv rastline je povezan tudi s tem, kako je rastlina aklimatizirana in prilagojena na UV-B sevanje. Različne vrste rastlin so različno strpne. V raziskavi z več kot 200 vrstami rastlin so ugotovili, da je 20 % vrst na UV-B sevanje zelo občutljivih, 50 % rastlin je srednje občutljivih, 30 % rastlin pa je popolnoma neobčutljivih na UV-B sevanje (Teramura, 1983). Rastline, ki so aklimatizirane na nizko

jakost UV-B sevanja, bodo z višanjem jakosti sevanja bolj verjetno doživele stres kot pa rastline, ki so aklimatizirane na večje jakosti in so zato bolj strpne za večanje jakosti UV-B sevanja. Odziv rastline pa je odvisen tudi še od kombinacije UV-B sevanja z drugimi okoljskimi dejavniki kot so suša, nizke temperature itd. (Jenkins, 2009).

2.3.3 Zaznavanje UV sevanja

Signalne poti od zaznave UV-B sevanja pa do odziva rastline so precej kompleksne in še ne do konca raziskane. Kakšna signalna pot bo potekla, je odvisno od jakosti sevanja in aklimatizacije rastline. Visoke jakosti UV-B sevanja lahko v rastlini povzročijo poškodbe DNK, nastanek reaktivnih kisikovih spojin in vplivajo na različne celične procese. Ampak enak odziv lahko povzročijo tudi druge vrste biotskih ali abiotskih stresnih dejavnikov. Zato je odziv rastlin na visoke jakosti sevanja nespecifičen. Nižje jakosti UV-B sevanja pa sprožijo fotomorfogenetski odziv in tako vplivajo na izgradnjo flavonoidov, dolžino hipokotila, odprtost listih rež itd. Za tak odziv in aklimacijo rastline pa je potreben poseben UV-B fotoreceptor UVR8, ki v kombinaciji še z drugimi proteini in molekulami vpliva na izražanje genov, povezanih s fotomorfogenezo rastline (Ulm in Nagy, 2005; Jenkins, 2009).

2.3.4 Vpliv UV sevanja na morfološke in biokemijske lastnosti rastlin

Učinki UV-B sevanja so: krajše, kompaktnejše in bolj razvezjane rastline, spremenjeno razmerje med podzemnim in nadzemnim delom rastline, zmanjšana suha masa podzemnih in nadzemnih delov rastline. Listi so debelejši in manjši, imajo več epidermalnih in kutikularnih struktur, zmanjša se število listnih rež in listi se lahko deformirajo. UV-B sevanja učinkuje tudi na reprodukcijo rastlin. UV-B sevanje lahko vpliva na morfologijo cvetov, število cvetov, čas cvetenja, lahko pospešuje ali zavira cvetenje, vpliva tudi na število in kakovost semen (Germ, 2006; Kataria in sod. 2014a; Kataria in sod. 2014b). Nekatere izmed teh vplivov UV-B sevanja so dokazali tudi pri pšenici (*Triticum aestivum*) in grahu (*Pisum sativum*). Obe vrsti rastlin sta bili v razmerah, kje ni bilo UV-B sevanja, višji, imeli sta večjo suho maso stebla in listov in imeli sta večjo listno površino. Ti učinki so bili večji pri grahu. Razlog pa je orientacija listov. Učinki UV-B sevanja so namreč

večji na horizontalno usmerjene liste kot pa na vertikalno usmerjene liste (Pal in sod., 2006).

Najbolj pogoste tarče UV-B sevanja so DNK, beljakovine in lipidi (Hollósy, 2002). UV-B sevanje povzroča poškodbe DNK, ki onemogočajo normalno prepisovanje in podvajanje. Poškodbe se lahko odpravijo na tri načine in sicer z fotoreaktivacijo, z izrezom in z homologno rekombinacijo. Proces fotoreaktivacije poteka na svetlobi s pomočjo fotoliaz, izrez in rekombinacija pa lahko potekata v temi s pomočjo različnih encimov (Frohnmeier in Staiger, 2003). UV-B sevanje lahko poleg aminokislin poškoduje tudi celotne beljakovine in encime in tako onemogoči njihovo delovanje. Glikolipidi in fosfolipidi, ki so glavna komponenta celičnih membran, vsebujejo nenasičene maščobne kisline, ki jih lahko UV-B sevanje poškoduje in tako vpliva na zgradbo membran (Hollósy, 2002). UV-B sevanje ima na proces fotosinteze posreden in neposreden vpliv. Neposredno vpliva na: zmanjšanje trdnosti tilakoidnih membran, poškodbe fotosistema I in II, zmanjšano vezavo CO₂ in sproščanje O₂, nižjo suho maso in na nižjo vsebnost škroba in klorofila. Posredni vplivi UV-B sevanja na fotosintezo: zmanjšana izmenjava plinov zaradi zapiranja listnih rež, spremenjene svetlobne razmere v listu zaradi sprememb v debelini in anatomsiji lista in vpliv na fotosintezno aktivnost celotne rastline zaradi sprememb v morfologiji rastline (Kataria in sod., 2014b). Kakani in sodelavci (2003a) so v preglednem članku povzeli rezultate 129 raziskav na 35 različnih vrstah kulturnih rastlin. Ugotovili so, da je pod povečanim UV-B sevanjem intenziteta fotosinteze upadla za od 3 do 90 % glede na kontrolne rastline. Intenziteta fotosinteze se je v vseh raziskavah zmanjšala ali pa ni bilo sprememb v intenziteti fotosinteze. So pa v teh raziskavah intenzitetu fotosinteze merili na različne načine v različnih razmerah (Kakani in sod., 2003a). Pal in sodelavci (2006) so odkrili povečanje neto fotosinteze za 8 % pri pšenici in za 24 % pri grahu, ko so znižali intenzitetu UV-B sevanja (Pal in sod., 2006). Zmanjšanje neto fotosinteze pri pšenici so odkrili tudi Correia in sodelavci (Correia in sod., 1999). S fotosintezo so povezana tudi fotosintezna barvila klorofil *a* in *b* ter karotenoidi. Kakani in sodelavci (2003a) so v preglednem članku podali tudi podatke o fotosinteznih barvilih. Ugotovili so, da se je količina klorofila v večini proučevanih vrst rastlin zmanjšala pod povečanim UV-B sevanjem. Količina klorofila se je zmanjšala za od 10 pa do 70 %. Večje zmanjšanje je bilo opaženo pri dvokaličnicah kot pri enokaličnicah (Kakaini in sod. 2003). Zmanjšanje

količine klorofila ob povečanju UV-B sevanju oziroma povečanje količine klorofila ob zmanjšani intenziteti UV-B sevanja so ugotovili tudi za pšenico (*Triticum aestivum*) (Correis in sod., 1999; Pal in sod. 2006; Fahad in sod. 2013). Je pa povečano UV-B sevanja povzročilo povečanje vsebnosti klorofilov v listih zelene solate (*Lactuca sativa*) (Caldwell in Britz, 2006).

2.3.5 Zaščita pred vplivi UV sevanja

Rastline se zaščitijo pred škodljivimi vplivi UV sevanja s kopičenjem zaščitnih snovi, ki absorbirajo UV-B sevanje. Te snovi so predvsem flavonoidi, ki močno absorbirajo UV-B sevanje in delujejo tudi kot antioksidanti. Flavonoidi zadržijo UV-B sevanje in prepuščajo fotosintežno aktivni spekter sevanja do mezofila (Kataria in sod., 2014a). Največ flavonoidov se kopči v povrhnjici in lahko tudi v trihomih, pri enokaličnicah pa jih najdemo še v mezofilu (Hollósy, 2002). Germ in sodelavci (2010) so pri šentjanževki (*Hypericum perforatum*) odkrili, da se vsebnost flavonoidov v listih povečuje skupaj s povečevanjem odmerka UV-B sevanja (Germ in sod., 2010). V raziskavi 20 različnih kultivarjev pšenice so odkrili, da se vsebnost flavonoidov poveča le pri enem kultivarju, na 7 kultivarjev UV-B sevanje ni imelo vpliva, pri ostalih 12 kultivarjih pa je prišlo celo do zmanjšanja vsebnosti flavonoidov (Yuan in sod., 2000). Posledica UV-B sevanja je tudi nastanek reaktivnih kisikovih spojin, ki povzročajo oksidacijo lipidov in proteinov (Mittler, 2002). Rastline so zato razvile obrambni sistem, ki ga sestavljajo številni antioksidanti. Ti so lahko encimi kot so superoksid dismutaza, peroksidaza, katalaza. Kot antioksidanti delujejo tudi askorbat, glutation in karotenoidi, ki pa niso encimi (Blokhina in sod., 2003). V raziskavi iz leta 1998 so ugotovili, da se aktivnost superoksid dismutaze in katalaze pri obsevanju kloropalastov pšenice z UV-B sevanjem poveča. Po nekaj urah obsevanja pa aktivnost teh dveh encimov upade in naraste aktivnost flavonoidov (Dawar in sod., 1998).

2.3.6 Vpliv UV sevanja na ekosisteme

Ker se različne vrste rastlin različno odzivajo na UV-B sevanje, lahko pride do sprememb v vrstni sestavi rastlin. Vrste, ki se bolje prilagodijo povečanemu UV-B sevanju, dobijo prednost pred drugimi vrstami in jih lahko izrinejo. Večja kompeticija poteka med različnimi vrstami kot pa znotraj ene vrste (Robson in sod., 2015). Na primeru pšenice in

ovsa se je pokazalo, kako pomemben je morfogenetski odziv na povečano UV-B sevanje. Pšenica je v primerjavi z ovsom imela daljše liste, ki so bili tudi višje postavljeni in je tako zasenčila oves. Pšenica je bila tako v kompeticijski prednosti in bi lahko izrinila oves iz poskusnega polja (Barnes in sod., 1988). UV-B sevanje vpliva tudi na organizme v tleh in lahko spremeni vrstno sestavo mikroorganizmov v tleh in tako posredno vpliva na rastline. Rastline, izpostavljene UV-B sevanju, so lahko tudi manj hranljive in vsebujejo več sekundarnih metabolitov in so zato manj privlačne za rastlinojedce (Caldwell in sod., 2007).

2.4 UV SEVANJE, SELEN, SILICIJ IN PŠENICA

2.4.1 Vpliv UV sevanja, silicija in selena na pšenico

Odziv in posledice UV-B sevanja na pšenico (*Triticum aestivum*) so odvisne tudi vsebnosti selena in silicija. V raziskavi, ki so jo izvedli Yao in sodelavci (2013) so ugotovili, da je pšenica pod vplivom UV-B sevanja nižja, ima nižjo koncentracijo klorofila in višjo koncentracijo vodikovega peroksida, malondialdehida in proline. V zrnju je manj beljakovin, dušika in železa in več cinka in mangana. Ko so rastlinam dodali selen, se je koncentracija vodikovega peroksida in malondealdehyda zmanjšala, rese so bile daljše, koncentracija klorofila se je povečala. V zrnju je bilo več dušika, železa, bakra in beljakovin (Yao in sod., 2013). Yao in sodelavci (2010a) so pri 20 dni starih rastlinah pšenice prišli do podobnih rezultatov kot v prejšnji raziskavi. Ugotovili so, da dodatek selena ob povečanem UV-B sevanju zniža koncentracijo malondealdehyda in poviša koncentracijo proline, flavonoidov in fenolnih snovi. Poveča se aktivnost katalaze in superoksid dismutaze. Povečala se je tudi biomasa rastlin in koncentracija klorofila (Yao in sod. 2010a). Dodajanje silicija pšenici (*Triticum aestivum*) pod povečanim UV-B sevanjem ima podobne učinke kot dodajanje selena. Dodajanje silicija je povečalo biomaso rastlin, koncentracijo klorofila. Povečala se je tudi količina topnih sladkorjev, antocianinov in flavonoidov. Zmanjšala se je koncentracija malondialdehyda in prostih kisikovih radikalov (Yao in sod., 2011).

3 MATERIALI IN METODE

3.1 IZVEDBA POIZKUSA

Poskus smo izvedeli na zemljišču Oddelka za biologijo Biotehniške fakultete. Prostor smo zgradili z mrežo in postavili streho iz prozornih plastičnih plošč. Polovica rastlin je rasla pod ploščami, ki prepuščajo približno 90 % celotnega Sončevega sevanja (Quinn cast UVT), druga polovica rastlin pa pod ploščami, ki odbijejo približno 80 % UV dela sevanja (Quinn XT), preostali del spektra pa prepuščajo podobno kot Quinn cast UVT. 22.10.2013 smo posejali pšenico sorte Reska.



Slika 1: Postavljen konstrukcija za poizkus in pod njo pšenica v koritih (Kavčič, 2014)

Pšenico smo posejal v plastična korita z notranjo mero 75x32x30 centimetrov in zunanjo mero 80x36x30 centimetrov. Kot substrat smo uporabili prst iz okolice mesta poskusa, dodali smo še centimeter debelo plast kupljenega substrata CVETAL (univerzalni biosubstrat). V vsako korito smo posejali 70 semen. Za rezervo smo nekaj semen posejali tudi v lonec, katerih dno je bilo pokrito s kartonom. V vsak lonec smo dali po 7 semen.

27.3.2014 smo korita in lonec zalili. 28.3.2014 smo substrat dognojili z gnojilom SUBSTRAL, ki je gnojilo za trave z dolgotrajnim delovanjem (NPK 22:5:5). V vsako korito smo dodali po 12 gramov gnojila. 6.5.2014 smo rastline poškropili z natrijevim selenatom (Na_2SeO_4) s koncentracijo 10 mg/L. Za vsak zaboj smo uporabili 1,3 dl raztopine. Vsaka rastlina je tako prejela približno 18,57 μg Se(VI). 8.5.2014 smo rastline poškropili s fungicidom (PROSARO) proti rji pšenice. 18.5.2014 smo začeli z meritvami.

Tako smo na koncu dobili štiri različna obravnavanja in sicer rastline izpostavljene naravnemu UV sevanju in selenu, rastline izpostavljene selenu in znižanemu UV sevanju, rastline izpostavljene naravnemu UV sevanju brez dodanega selena in pa rastline, ki so bile izpostavljene znižanemu UV sevanju brez dodanega selena. Za nadaljnje analize smo za vsako obravnavanje uporabili po 20 rastlin, torej skupno 80 rastlin.



Slika 2: Pšenica v koritih pod konstrukcijo (Kavčič, 2014)

3.2 MERITVE

3.2.1 Morfološke in anatomske meritve

3.2.1.1 Zgradba lista

Iz prečnih prerezov lista smo naredili preparate. Prereze smo naredili na mestu, kjer smo že prej opravili meritve presevnosti in odbojnosti. S pomočjo svetlobnega mikroskopa smo izmerili debeline celotnega lista, mezenhima, zgornje in spodnje povrhnjice ter zgornje in spodnje kutikule. Pri merjenju smo se izogibali žilam, režam, bulifornim celicam in robnim delom lista.

3.2.1.2 Specifična listna površina

Iz sveže nabranih listom smo izrezali krožce z znano površino. Sveže krožce smo stehtali, jih zavili v folijo in jih dali sušiti za 24 ur na 105 °C. Po sušenju smo krožce ponovno stehtali. Specifično listno površino smo določili kot količnik med površino krožca in njegovo suho maso.

3.2.1.3 Število, velikost listnih rež in bodičk

Del lista smo po zgornji in spodnji strani premazali z prozornim lakom za nohte. Ko se je lak posušil, smo ta del lista prelepili z prozornim lepilnim trakom. Lepilni trak smo nato previdno odlepili in ga prilepili na objektno stekelce. To smo potem pregledali pod svetlobnim mikroskopom (Olympus CX41) in prešteli listne reže ter bodičke na petih vidnih poljih. Nato smo izmerili dolžino in širino listnih rež ter dolžino bodičk. Vse meritve smo opravili na srednjem delu lista, kjer smo opravili tudi meritve presevnosti in odbojnosti.

3.2.1.4 Presevnost in odbojnost

Presevnost in odbojnost smo izmerili na sveže nabranih listih. Za vsako obravnavanje smo uporabili po 20 listov različnih rastlin (skupaj 80 listov z 80 rastlin). Presevne in odbojne spektre smo merili z spektrometrom Jaz Modular Optical Sensing suite (Ocean Optics , Inc., Florida, ZDA). Spektrometer smo preko optičnega kabla povezali s sfero ISP-30-6

(Ocean Optics, Inc., Florida, ZDA). Kot svetlobni vir smo uporabili UV-VIS-NIR (DH-2000, Ocean optics, Inc., Florida, ZDA). Najprej smo napravo kalibrirali. Kot referenco za 100 % odbojnost smo uporabili bel standard, za kalibracijo na 0 % odbojnost pa smo izključili svetlobni vir. List smo nato namestili pod sfero in izmerili odbojnost na zgornji površini lista in presevnost na spodnji površini lista. Merili smo valovne dolžine med 191 in 887 nm na 0,3 nm natančno.

3.2.1.5 Transpiracija

Transpiracijo smo merili s pomočjo porometra (DECAGON, Model SC-1, ZDA).

3.2.1.6 Fotokemična učinkovitost FSII

Potencialno in dejansko fotokemično učinkovitost fotosistema II smo merili z fluorometrom PAM 2500 Portable Chlorophyll Fluorometer, WALZ. Predenj smo izmerili potencialno fotokemično učinkovitost FSII smo za 15 minut na liste pritrdirli ščipalke. Nato smo list osvetlili s saturacijskim pulzom bele svetlobe ($8000\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 0,8s) in odčitali rezultat. Dejansko fotokemično učinkovitost FSII smo izmerili na listih pri danih svetlobnih razmerah. Liste smo osvetlili s saturacijskim pulzom bele svetlobe ($\approx 9000\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 0,8s) in odčitali rezultat.

3.2.2 Biokemijske meritve

3.2.2.1 Klorofili in karotenoidi

Vsebnost klorofilov *a* in *b* ter karotenoidov smo določili po metodi Lichtenthaler in Buschmann (2001). Vzorce z znano maso in površino smo strli v terilnici, jih ekstrahirali v 5 ml acetona (100 % (v/v)) in jih centrifugirali (4000 obratov na minuto, 4°C, 4 min; Sigma 2-16 PK, Nemčija). Ekstraktom smo odčitali volumen in izmerili ekstinkcijo z UV/VIS spektrometrom (Lambda 25, Perkin-Elmer, Norwalk, CT, ZDA) pri valovnih dolžinah 470, 645 in 662nm. Vsebnosti klorofila *a* in *b* ter karotenoidov smo izrazili na suho maso in površino vzorca.

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

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

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

$$Kl\ b [mg\ cm^{-2}] = c_b * V/P = (11,24 E_{662} - 2,04 E_{645}) * V/P \quad \dots (5)$$

$$Kar [mg\ g^{-1}ss] = (1000 E_{470} - 1,9 c_a - 63,14 c_b) * V/ss/214 \quad \dots (6)$$

$$Kar [mg\ cm^{-2}] = (1000 E_{470} - 1,9 c_a - 63,14 c_b) * V/P/214 \quad \dots (7)$$

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

V = volumen ekstrakta [ml]

E = ekstinkcija pri dani valovni dolžini

ss = suha masa [g]

P = površina vzorca [cm⁻²]

3.2.2.2 Antociani

Vsebnost antocianov smo določili po Khaler-ju in Guruprasad-u (1993). Vzorce z znano maso in površino smo strli v terilnici, jih ekstrahirali v 5 ml ekstrakcijskega medija (metanol : HCl (37 %) = 99:1 (v/v)) in jih centrifugirali (4000 obratov na minuto, 4°C, 4 min; Sigma 2-16 PK, Nemčija). Ekstraktom smo odčitali volumen in jih shranili za 24 ur v temo (3-5 °C). Nato smo izmerili ekstinkcijo pri valovni dolžini 530nm z UV/VIS spektrometrom (Lambda 25, Perkin-Elmer, Norwalk, CT, ZDA). Vsebnost antocianov smo določili na površino vzorca in suho maso v relativnih enotah.

$$Ant (\text{relativna enota}) = E_{530} * V * ss^{-1}; E_{530} * V * P^{-1} \quad \dots (8)$$

E = ekstinkcija pri dani valovno dolžini

V = Volumen ekstrakta [ml]

ss = suha masa [g]

P = površina vzorca [cm⁻²]

3.2.2.3 UV absorbirajoče snovi

Vsebnost UV-A (320 – 400nm) in UV-B (280-320nm) absorbirajočih snovi smo določili po Caldwellu (1968). Vzorce smo strli v terilnici, jih ekstrahirali v 5 ml ekstrakcijskega medija

(metanol : destilirana voda : HCl (37 %) = 79:20:1 (v/v)) in jih inkubirali 20 minut v temi. Vzorce smo nato centrifugirali (4000 obratov na minuto, 10°C, 10 min; Sigma 2-16 PK, Nemčija), jim odmerili prostornino in izmerili ekstinkcije pri valovnih dolžina od 280 do 400 nm z UV/VIS spektrometrom (Lambda 25, Perkin-Elmer, Norwalk, CT, ZDA). Vsebnost UV absorbirajočih snovi smo izračunali kot integral ekstinkcijskih vrednosti od 280 do 320nm in od 320 do 400nm. Vsebnost UV absorbirajočih snovi smo določili na površino vzorca in suho maso v relativnih enotah.

$$\text{UV abs (relativna enota)} = I * V^{-1} * ss^{-1} ; I * V^{-1} * P^{-1} \quad \dots (9)$$

I = integral absorpcijskih vrednosti v intervalu 280-320nm (UV-B abs) ter 320-400nm (UV-A abs)

V = volumen ekstrakta [ml]

ss = suha masa [g]

P = površina vzorca [cm^{-2}]

3.2.2.4 Izolacija fitolitov

Najprej smo del listov vsake rastline posušili. Vzorcem smo dodali 5ml HNO_3 in pustili čez noč. Vsak vzorec posebej smo nato prenesli v »teflonke« in dodali še 5ml HNO_3 in 4ml H_2O_2 . Vse skupaj smo nato postavili v mikrovalovno pečico za 15 minut najprej na 200 °C in nato na 150 °C pri tlaku 45 bar. Ves rastlinski preostanek se je usedel na dno. Odvečno tekočino smo odlili in sprali vzorce z destilirano vodo in HCl, da smo odstranili kalcijev oksalat. Vzorce smo nato prefiltrirali skozi teflonski filter. Filtre smo nato posušili in stehtali.

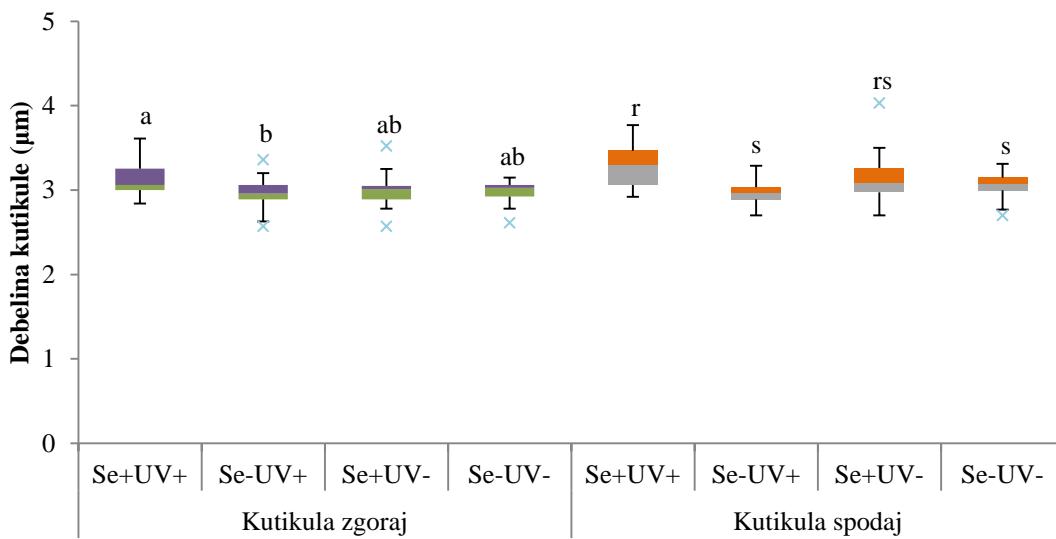
3.3 STATISTIČNA OBDELAVA PODATKOV

Vse podatke smo najprej uredili v programu Excel. S programom SPSS 20 smo izračunali enosmerno in dvosmerno analizo variance. Spearmanov koreacijski indeks smo izračunali v programu SPSS in programu RStudio.

4 REZULTATI

4.1 MORFOLOŠKE MERITVE

4.1.1 Debelina kutikule na zgornji in spodnji strani listov



Slika 3: Vpliv UV sevanja in Se na debelino kutikule na zgornji in spodnji strani listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b in r,s) označujejo statistično značilne razlike v debelini kutikule; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

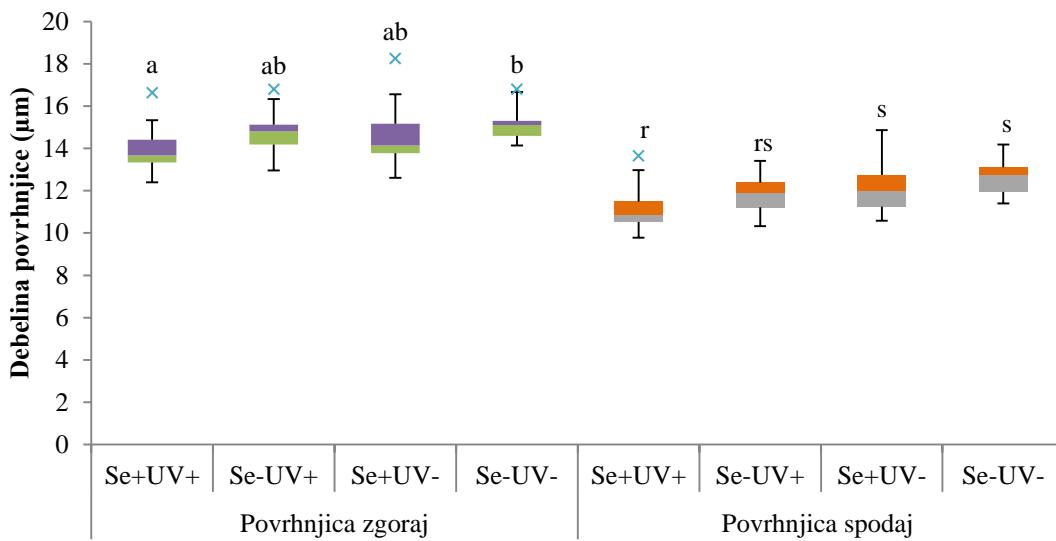
Preglednica 1: Rezultati dvosmerne analize varianc, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v debelini kutikule na zgornji in spodnji strani listov; $*\leq 0,05$.

Kutikula zgoraj	Kutikula spodaj
UV	0,18
Se	0,022*
UV·Se	0,112
	UV·Se
	0,065

Statistično značilno se med seboj razlikujeta debelini kutikule na zgornji strani listov pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in Se-UV+ (Slika 3). V primeru kutikule na zgornji strani listov je najpomembnejši dejavnik, ki vpliva na razlike v debelini kutikule, selen (Preglednica 1). Statistično značilno se med seboj razlikujeta debelini kutikule na spodnji strani listov pri rastlinah, obravnavnih s Se+UV+ in Se-UV+ ter pri rastlinah,

obravnavanih s Se+UV+ in Se-UV- (Slika 3). Najpomembnejši dejavnik, ki vpliva na razlike v debelini kutikule na spodnji strani listov, je selen (Preglednica 1).

4.1.2 Debelina povrhnjice na zgornji in spodnji strani listov



Slika 4: Vpliv UV sevanja in Se na debelino povrhnjice na zgornji in spodnji strani listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b in r,s) označujejo statistično značilne razlike v debelini povrhnjice; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

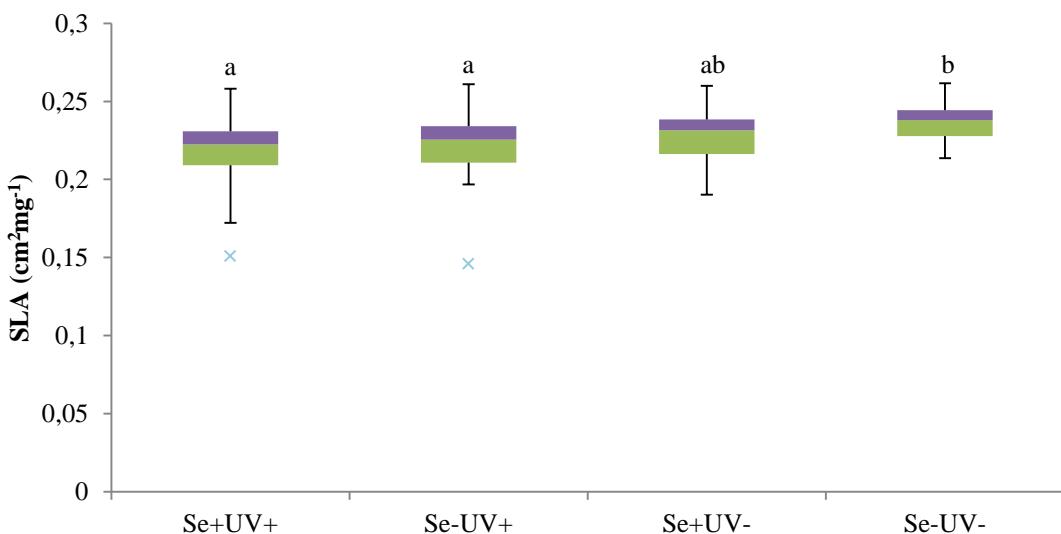
Preglednica 2: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v debelini povrhnjice na zgornji in spodnji strani listov; $*\leq 0,05$.

Povrhnjica zgoraj	Povrhnjica spodaj
UV	UV
0,037*	0,001*
Se	Se
0,009*	0,0*
UV·Se	UV·Se
0,712	0,72

Statistično značilno se med seboj razlikujeta debelini povrhnjice na zgornji strani listov pri rastlinah, obravnavanih z Se+UV+ in Se-UV- (Slika 4). V primeru povrhnjice na zgornji strani listov sta pomembna dejavnika, ki vpliva na razlike v debelini povrhnjice, selen in UV sevanje (Preglednica 2). Statistično značilno se med seboj razlikujeta debelini povrhnjice na spodnji strani listov pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in Se-UV- ter pri rastlinah, obravnavnih s Se+UV+ in Se-UV- (Slika 4). V primeru povrhnjice na spodnji

strani listov sta pomembna dejavnika, ki vpliva na razlike v debelini povrhnjice, selen in UV sevanje (Preglednica 2).

4.1.3 Specifična listna površina



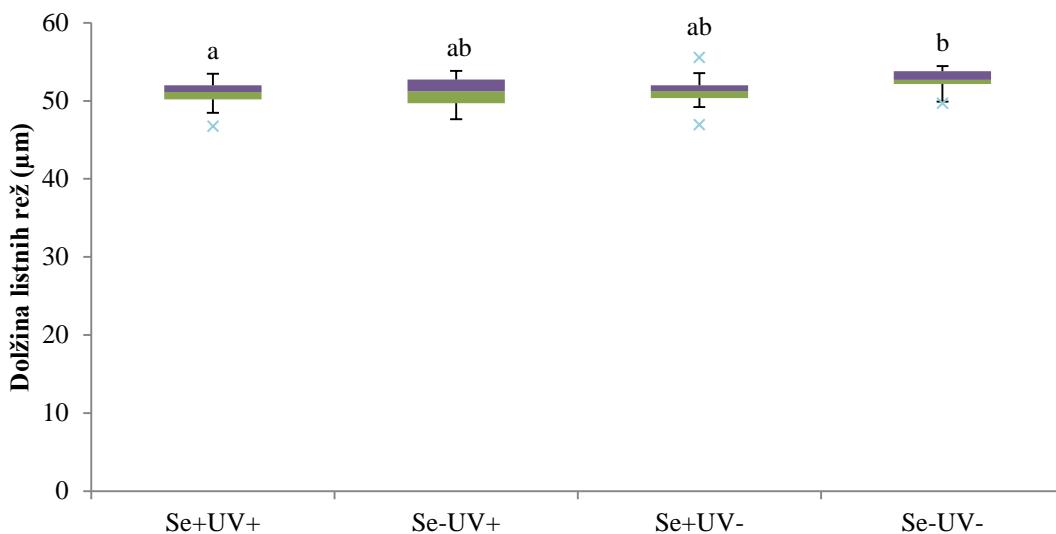
Slika 5: Vpliv UV sevanja in Se na specifično listno površino (SLA). Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b) označujejo statistično značilne razlike v vrednostih SLA; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.

Preglednica 3: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vrednostih SLA; * $\leq 0,05$.

Specifična listna površina (SLA)	
UV	0,020*
Se	0,007*
UV·Se	0,837

Statistično značilno se med seboj, v vrednostih SLA, razlikujejo rastline, obravnavane s Se+UV+ in Se-UV- ter rastline, obravnavane s Se-UV+ in Se-UV- (Slika 5). V primeru vrednosti SLA sta pomembna dejavnika, ki vplivata na razlike v vrednostih SLA, UV sevanje in selen (Preglednica 3).

4.1.4 Dolžina listnih rež na zgornji strani listov



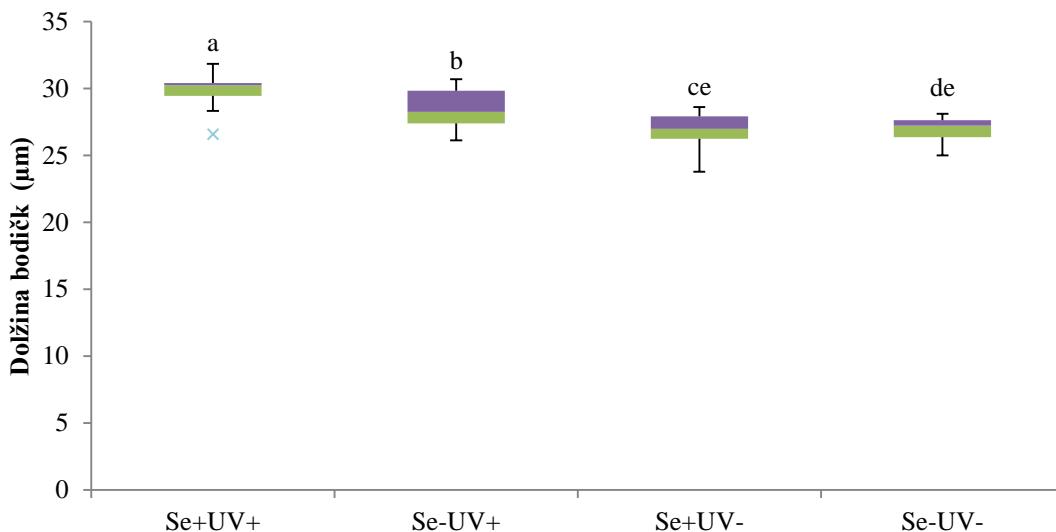
Slika 6: Vpliv UV sevanja in Se na dolžino listnih rež na zgornji strani listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b) označujejo statistično značilne razlike v dolžini rež na zgornji strani listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.

Preglednica 4: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v dolžini listnih rež na zgornji strani listov; $*\leq 0,05$.

Dolžina listnih rež na zgornji strani listov	
UV	0,029*
Se	0,074
UV·Se	0,24

Statistično značilno se med seboj razlikujejo dolžine rež na zgornji strani listov pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in Se-UV-. Statistično značilno daljše reže so pri rastlinah, obravnavanih s Se-UV-, kot pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ (Slika 6). V primeru dolžine rež na zgornji strani listov je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v dolžini rež na zgornji strani listov, UV sevanje (Preglednica 4).

4.1.5 Dolžina manjših bodičk



Slika 7: Vpliv UV sevanja in Se na dolžino manjših bodičk. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b,c,d,e) označujejo statistično značilne razlike v dolžini manjših bodičk na zgornji strani listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

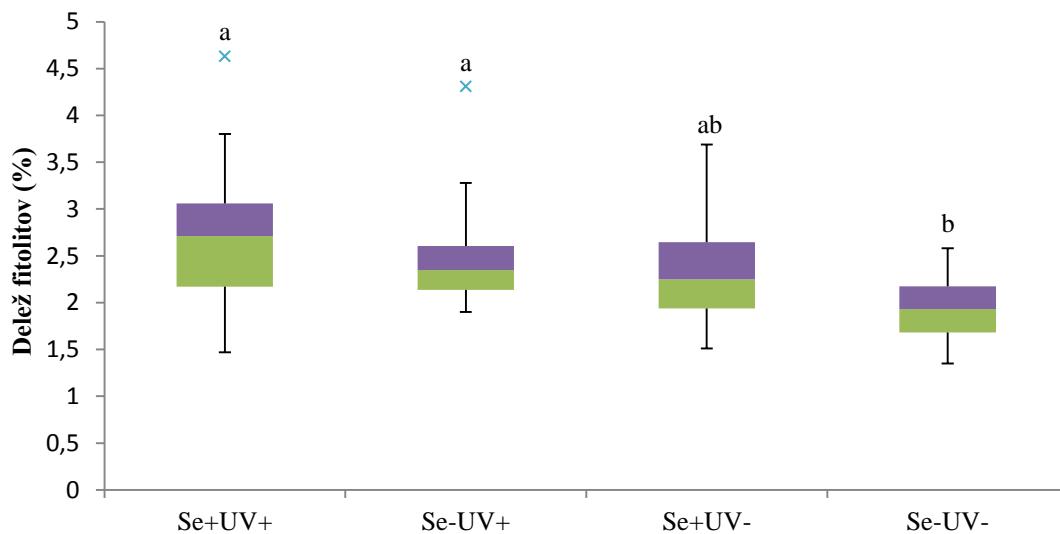
Preglednica 5: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v dolžini manjših bodičk na zgornji strani listov. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v dolžini manjših bodičk na zgornji strani listov med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); * $\leq 0,05$.

Dolžina manjših bodičk na zgornji strani listov				
UV	0,000*	+Se/-Se		+UV/-UV
Se	0,035*	-UV	0,777 -Se	0,000*
UV·Se	0,013*	+UV	0,001* +Se	0,000*

Statistično značilno se med seboj razlikujejo dolžine manjših bodičk pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinami z ostalimi obravnavami. Prav tako se med seboj statistično značilno razlikujejo dolžine manjših bodičk pri rastlinah, obravnavanih s Se-UV+ in rastlinami z ostalimi obravnavami (Slika 7). V primeru dolžine manjših bodičk je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v dolžini manjših bodičk, interakcija oben dejavnikov. Razlika v dolžini bodičk med rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se- je samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v dolžini bodičk med rastlinami,

obravnavanimi z UV+ in UV- pa je tako v prisotnosti kot v odsotnosti selena (Preglednica 5).

4.1.6 Delež fitolitov



Slika 8: Vpliv UV sevanja in Se na delež mase, ki jo v listu predstavljajo fitoliti. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b) označujejo statistično značilne razlike v deležu fitolitov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.

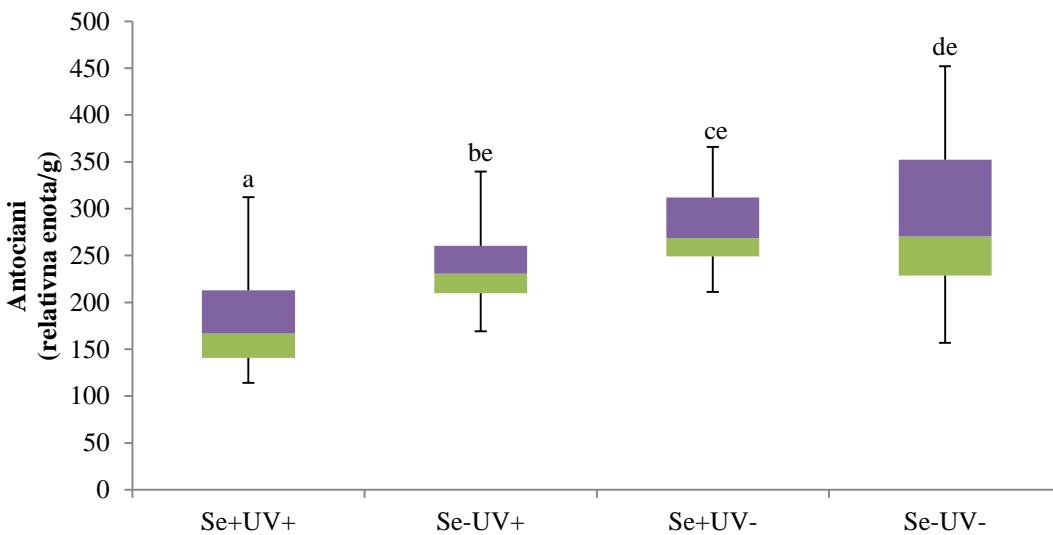
Preglednica 6: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v deležu fitolitov; $*\leq 0,05$.

Delež fitolitov	
UV	0,017*
Se	0,00*
UV·Se	0,323

Statistično značilno se med seboj razlikujejo deleži mase, ki jo v listih predstavljajo fitoliti pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in Se-UV- ter pri rastlinah obravnavanih s Se-UV- in Se+UV+ (Slika 8). V primeru mase fitolitov sta pomembna dejavnika, ki vplivata na razlike v masi fitolitov, UV in selen (Preglednica 6).

4.2 BIOKEMIJSKE MERITVE

4.2.1 Vsebnost antocianov na enoto suhe mase listov



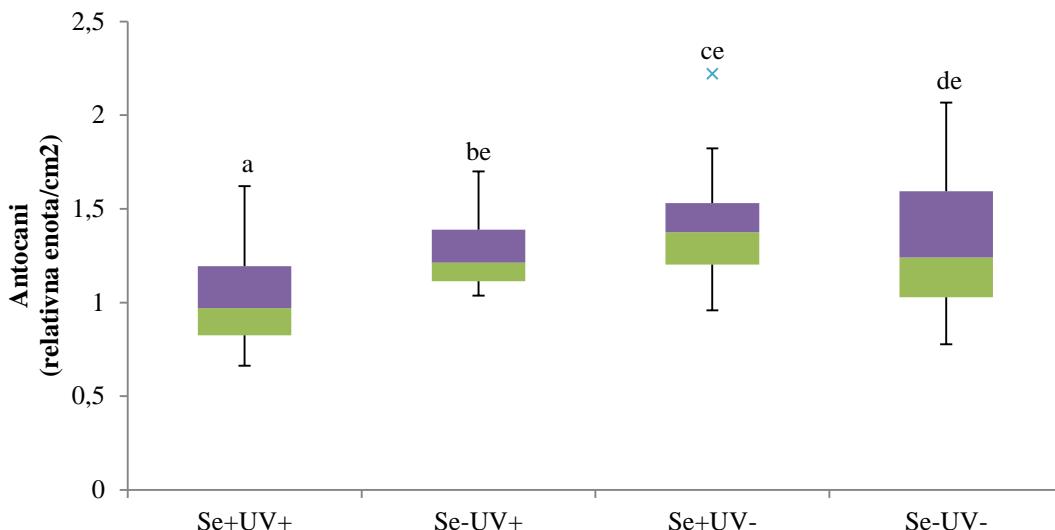
Slika 9: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost antocianov na enoto suhe mase listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke; n=20. Različne črke (a,b,c,d,e) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti antocianov izraženih na suho maso listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

Preglednica 7: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti antocianov na enoto suhe mase listov; $*\leq 0,05$.

Vsebnost antocianov na enoto suhe mase listov	
UV	0,000*
Se	0,011*
UV·Se	0,103

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije antocianov pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinah z ostalimi obravnavami. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno najmanj antocianov na enoto suhe mase listov (Slika 9). V primeru koncentracije antocianov sta pomembna dejavnika, ki vplivata na razlike v koncentraciji, UV in selen (Preglednica 7).

4.2.2 Vsebnost antocianov na površino listov



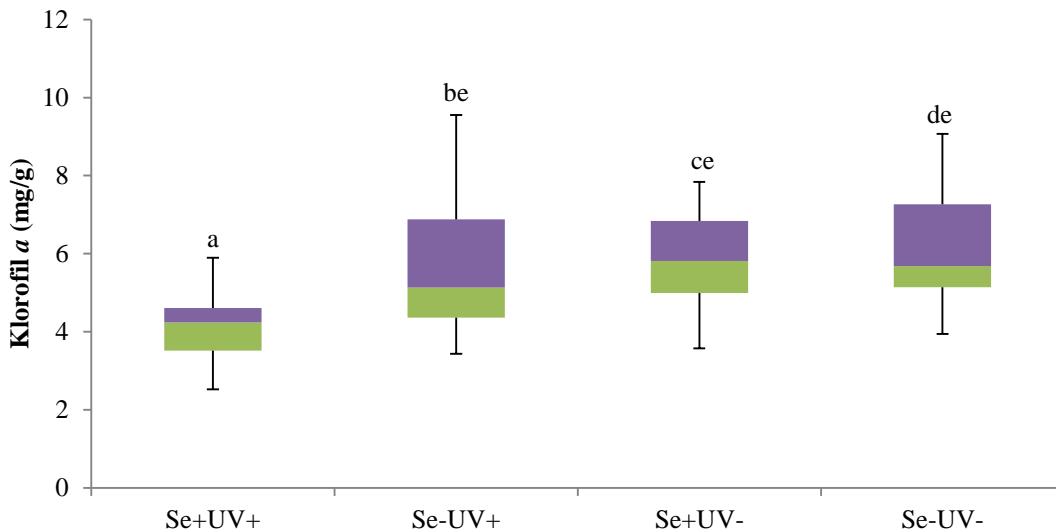
Slika 10: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost antocianov na površino listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b,c,d,e) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti antocianov na površino listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

Preglednica 8: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti antocianov na površino listov. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo, pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vsebnosti antocianov na površino listov med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); * $\leq 0,05$.

Vsebnost antocianov na površino listov					
UV	0,000*	+Se/-Se		+UV/-UV	
Se	0,109	-UV	0,217	-Se	0,848
UV·Se	0,001*	+UV	0,001*	+Se	0,000*

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije antocianov pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinami z ostalimi obravnavami. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno najmanj antocianov na površino listov (Slika 10). V primeru koncentracije antocianov je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v koncentraciji, interakcija obeh dejavnikov. Razlika v koncentraciji antocianov med rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v koncentraciji antocianov med rastlinami, obravnavanimi z UV+ in UV-, pa obstaja le v primeru, da je prisoten selen (Preglednica 8).

4.2.3 Vsebnost klorofila *a* na enoto suhe mase listov



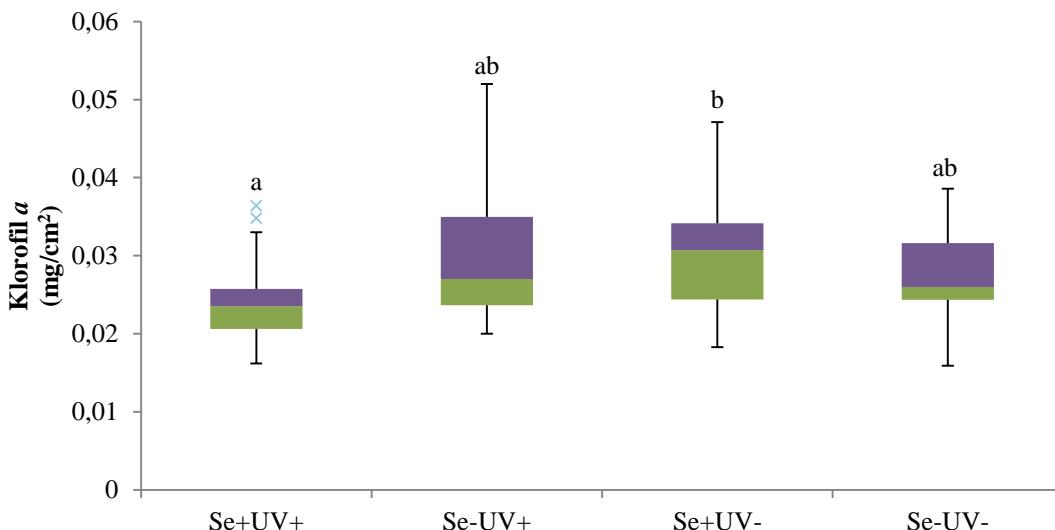
Slika 11: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost klorofila *a* na enoto suhe mase listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji pa predstavljajo neizstopajoče podatke; n=20. Različne črke (a,b,c,d,e) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti klorofila *a* izraženega na enoto suhe mase listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

Preglednica 9: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti klorofila *a* na enoto suhe mase listov. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vsebnosti klorofila *a* na enoto suhe mase listov med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); * $\leq 0,05$.

Vsebnost klorofila <i>a</i> izraženega na enoto suhe mase listov					
UV	0,000*	+Se/-Se		+UV/-UV	
Se	0,003*	-UV	0,717	-Se	0,332
UV·Se	0,014*	+UV	0,000*	+Se	0,000*

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije klorofila *a* pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinami z ostalimi obravnavami. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno najmanj klorofila *a* na enoto suhe mase listov (Slika 11). V primeru koncentracije klorofila *a* je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v koncentraciji, interakcija obeh dejavnikov. Razlika v koncentraciji klorofila *a* med rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v koncentraciji klorofila *a* med rastlinami, obravnavanimi s UV+ in UV-, pa obstaja le v primeru, da je prisoten selen (Preglednica 9).

4.2.4 Vsebnost klorofila *a* na površino listov



Slika 12: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost klorofila *a* na površino listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti klorofila *a* na površino listov; (p ≤ 0,05). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.

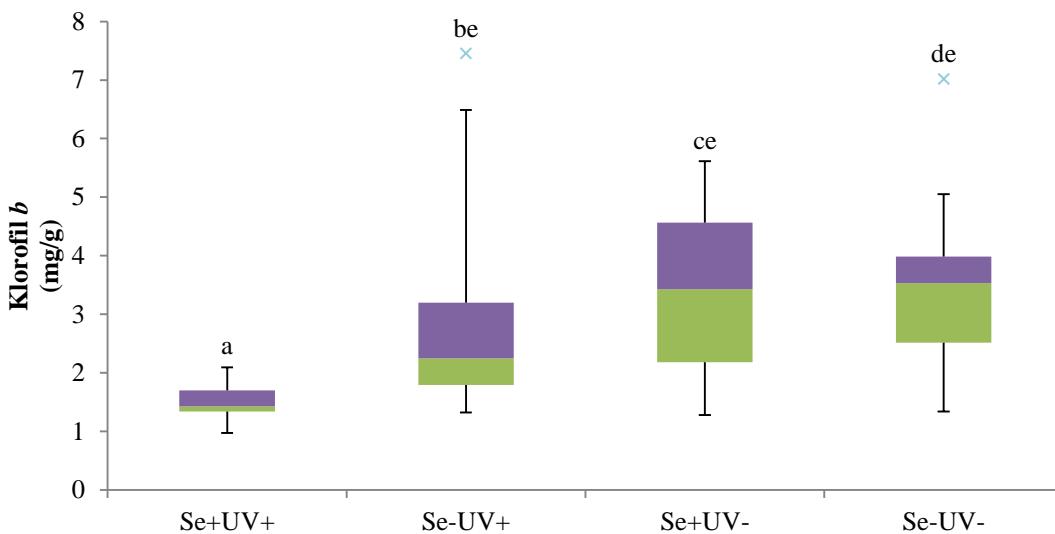
Preglednica 10: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti klorofila *a* na površino lista. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vsebnosti klorofila *a* na površino lista med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); *≤ 0,05.

Vsebnost klorofila <i>a</i> izraženega na površino listov				
UV	0,343	+Se/-Se		+UV/-UV
Se	0,284	-UV	0,222 -Se	0,191
UV·Se	0,006*	+UV	0,007* +Se	0,009*

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije klorofila *a* pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinah, obravnavanih s Se+UV-. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno manj klorofila *a* na površino listov kot rastline, obravnavane s Se+UV- (Slika 12). V primeru koncentracije klorofila *a* je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v koncentraciji, interakcija obih dejavnikov. Razlika v koncentraciji klorofila *a* med rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v koncentraciji klorofila *a* med

rastlinami, obravnavanimi z UV+ in UV-, pa obstaja le v primeru, da je prisoten selen (Preglednica 10).

4.2.5 Vsebnost klorofila *b* na enoto suhe mase listov



Slika 13: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost klorofila *b* na enoto suhe mase listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b,c,d,e) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti klorofila *b* na enoto suhe mase listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

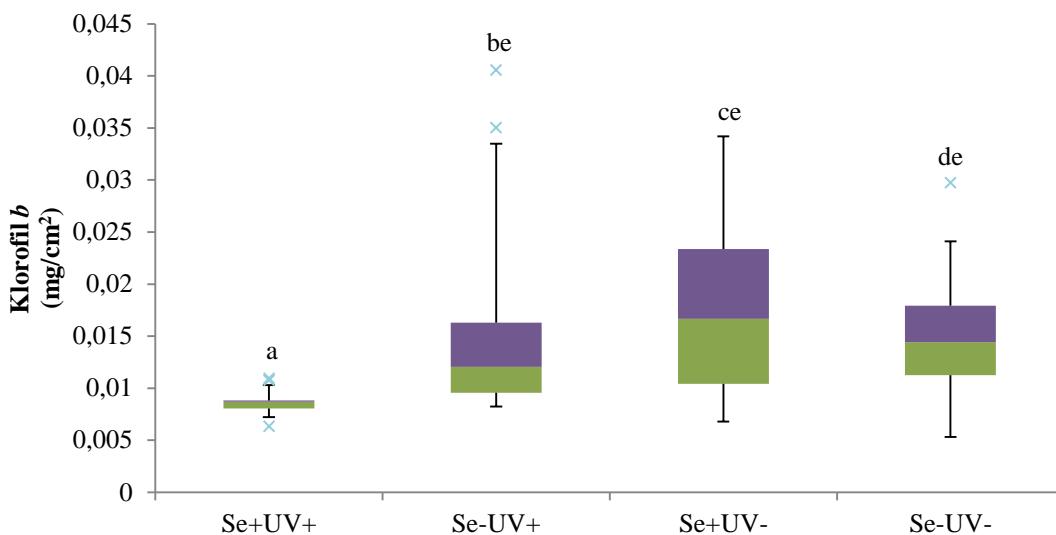
Preglednica 11 Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti klorofila *b* na enoto suhe mase listov. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vsebnosti klorofila *b* na suho maso listov med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); * $\leq 0,05$.

Vsebnost klorofila <i>b</i> na enoto suhe mase listov				
UV	0,001*		+Se/-Se	
Se	0,005*	-UV	0,662	-Se
UV·Se	0,026*	+UV	0,000*	+Se
				0,000*

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije klorofila *b* pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinah z ostalimi obravnavami. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno najmanj klorofila *b* na enoto suhe mase listov (Slika 13). V primeru koncentracije klorofila *b* je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v koncentraciji, interakcija obih dejavnikov. Razlika v koncentraciji klorofila *b* med

rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v koncentraciji klorofila *b* med rastlinami, obravnavanimi z UV+ in UV-, pa obstaja le v primeru, da je prisoten selen (Preglednica 11).

4.2.6 Vsebnost klorofila *b* na površino listov



Slika 14: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost klorofila *b* na površino listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b,c,d,e) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti klorofila *b* na površino listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

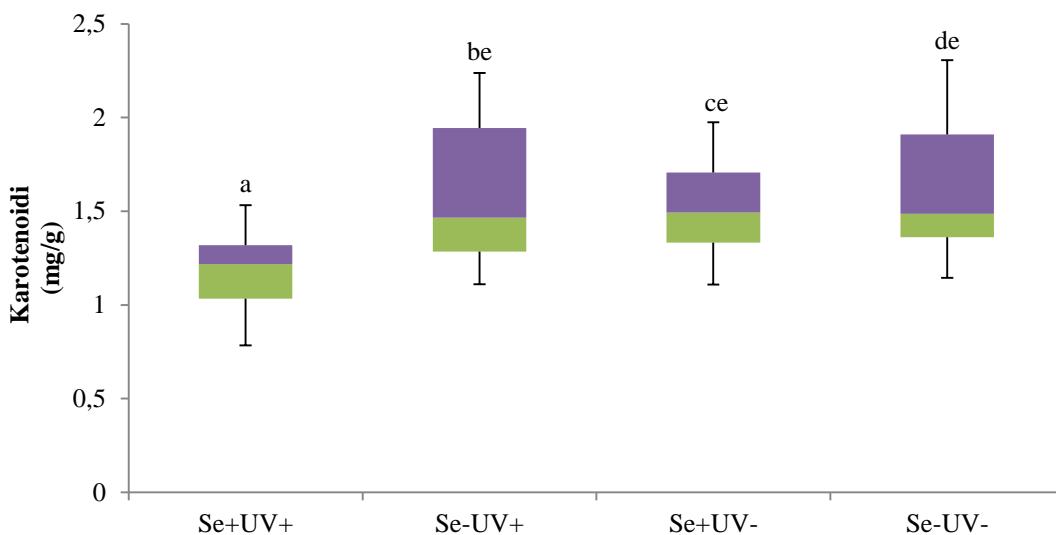
Preglednica 12: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti klorofila *b* na površino listov. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vsebnosti klorofila *b* na površino listov med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); * $\leq 0,05$.

Vsebnost klorofila <i>b</i> na površino listov				
UV	0,001*		+Se/-Se	
Se	0,056	-UV	0,323	-Se
UV·Se	0,001*	+UV	0,000*	+Se
				0,000*

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije klorofila *b* pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinami z ostalimi obravnavami. Rastline, obravnavane Se+UV+, imajo statistično značilno najmanj klorofila *b* na površino listov (Slika 14). V primeru koncentracije klorofila *b* je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v koncentraciji, interakcija obih dejavnikov. Razlika v koncentraciji klorofila *b* med

rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v koncentraciji klorofila *b* med rastlinami, obravnavanimi z UV+ in UV-, pa obstaja le v primeru, da je prisoten selen (Preglednica 12).

4.2.7 Vsebnost karotenoidov na enoto suhe mase listov



Slika 15: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost karotenoidov na enoto suhe mase listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke; n=20. Različne črke (a,b,c,d,e) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti karotenoidov na enoto suhe mase listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

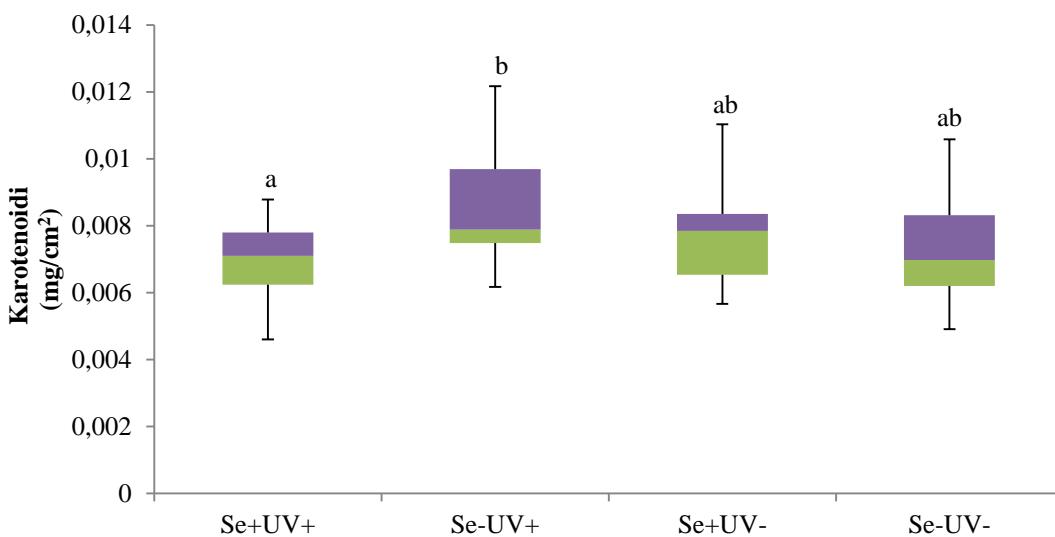
Preglednica 13: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti karotenoidov na enoto suhe mase listov. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vsebnosti karotenoidov na enoto suhe mase listov med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); * $\leq 0,05$.

Vsebnost karotenoidov na enoto suhe mase listov					
UV	0,003*	+Se/-Se		+UV/-UV	
Se	0,000*	-UV	0,337	-Se	0,674
UV·Se	0,016*	+UV	0,000*	+Se	0,000*

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije karotenoidov pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinami z ostalimi obravnavami. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno najmanj karotenoidov na enoto suhe mase listov (Slika 15). V primeru koncentracije karotenoidov je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v

koncentraciji, interakcija oba dejavnikov. Razlika v koncentraciji karotenoidov med rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v koncentraciji karotenoidov med rastlinami, obravnavanimi z UV+ in UV-, pa obstaja le v primeru, da je prisoten selen (Preglednica 13).

4.2.8 Vsebnost karotenoidov na površino listov



Slika 16: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost karotenoidov na površino listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke; n=20. Različne črke (a,b) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti karotenoidov na površino listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

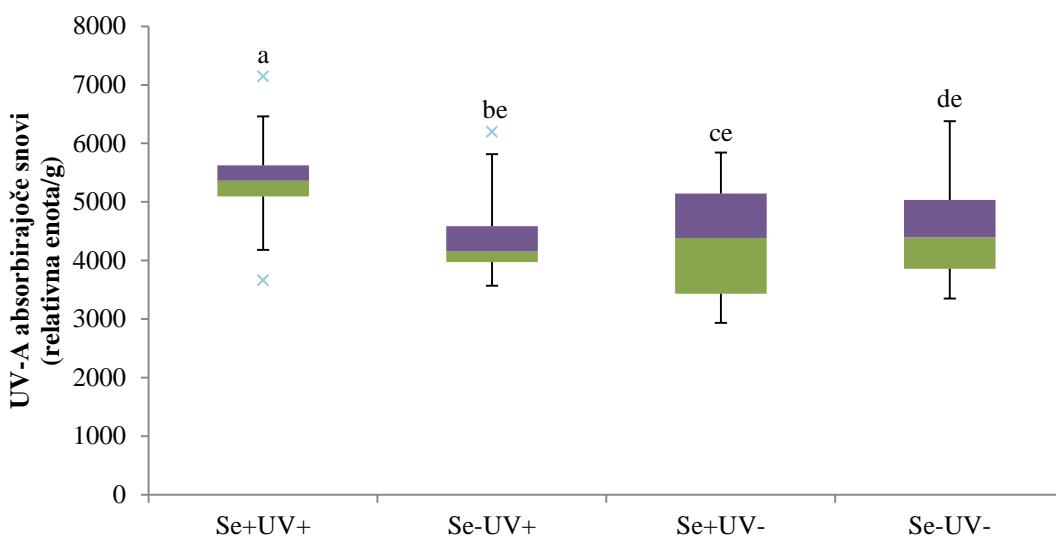
Preglednica 14: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti karotenoidov na površino listov. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vsebnosti karotenoidov na površino listov med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); * $\leq 0,05$.

Vsebnost karotenoidov na površino listov				
UV	0,519	+Se/-Se		+UV/-UV
Se	0,133	-UV	0,336	-Se
UV·Se	0,005*	+UV	0,002*	+Se
				0,114

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije karotenoidov pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinah, obravnavanih s Se-UV+. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno manj karotenoidov na površino listov kot rastline, obravnavane s Se-UV+ (Slika 16). V primeru koncentracije karotenoidov je pomemben

dejavnik, ki vpliva na razlike v koncentraciji, interakcija oba dejavnika. Razlika v koncentraciji karotenoidov med rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v koncentraciji karotenoidov med rastlinami, obravnavanimi z UV+ in UV-, pa obstaja le v primeru, da selen ni prisoten (Preglednica 14).

4.2.9 Vsebnost UV-A absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov



Slika 17: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost UV-A absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b,c,d,e) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti UV-A absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

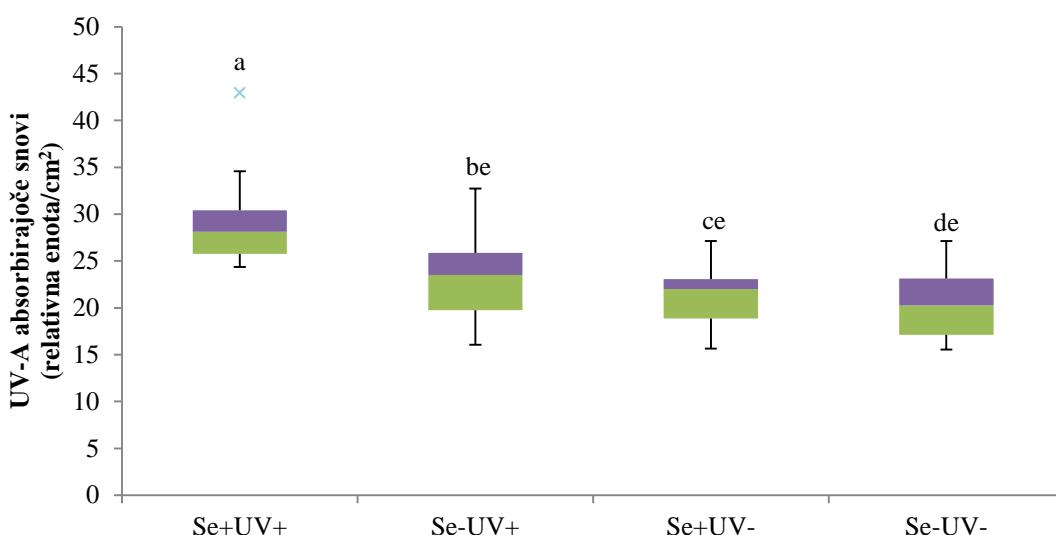
Preglednica 15: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti UV-A absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vsebnosti UV-A absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); * $\leq 0,05$.

Vsebnost UV-A absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov					
UV	0,011*		+Se/-Se		+UV/-UV
Se	0,082	-UV	0,474	-Se	0,919
UV·Se	0,007*	+UV	0,002*	+Se	0,000*

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije UV-A absorbirajočih snovi pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinami z ostalimi obravnavami. Rastline,

obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno največ UV-A absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov (Slika 17). V primeru koncentracije UV-A absorbirajočih snovi je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v koncentraciji, interakcija obih dejavnikov. Razlika v koncentraciji UV-A absorbirajočih snovi med rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v koncentraciji UV-A absorbirajočih snovi med rastlinami, obravnavanimi z UV+ in UV-, pa obstaja le v primeru, da je prisoten selen (Preglednica 15).

4.2.10 Vsebnost UV-A absorbirajočih snovi na površino listov



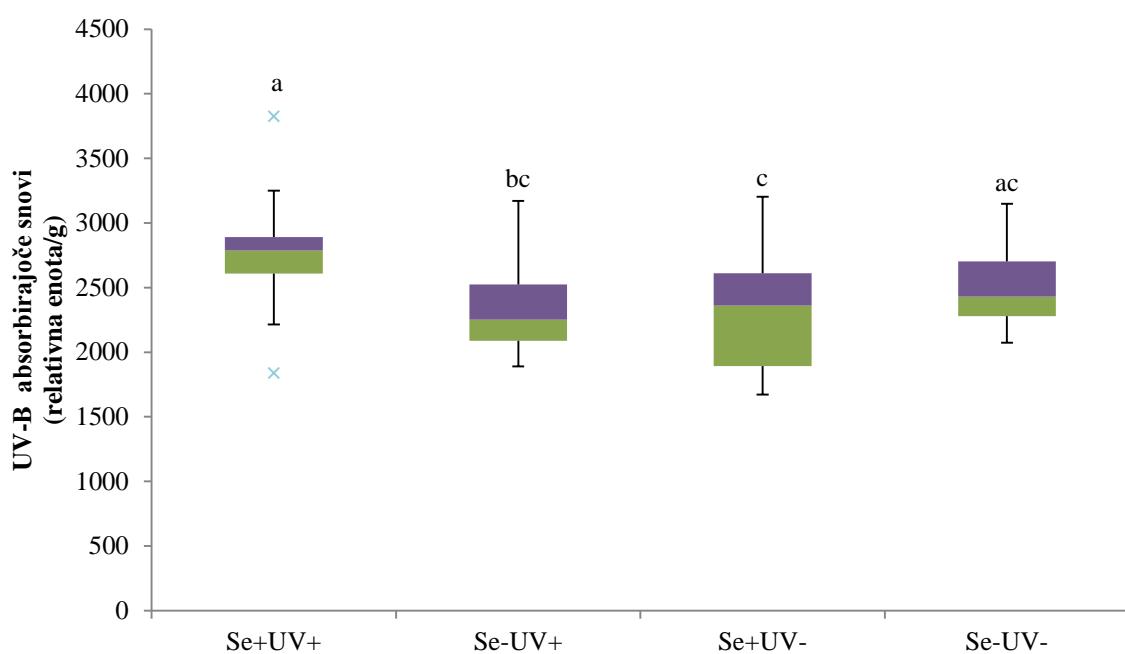
Slika 18: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost UV-A absorbirajočih snovi na površino listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b,c,d,e) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti UV-A absorbirajočih snovi na površino listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

Preglednica 16: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti UV-A absorbirajočih snovi na površino listov. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vsebnosti UV-A absorbirajočih snovi na površino listov med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); * $\leq 0,05$.

Vsebnost UV-A absorbirajočih snovi na površino listov				
UV	0,000*		+Se/-Se	
Se	0,000*	-UV	0,303	-Se
UV·Se	0,012*	+UV	0,000*	+Se
				0,000*

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije UV-A absorbirajočih snovi pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinami z ostalimi obravnavami. Rastline obravnavane s Se+UV+ imajo statistično značilno največ UV-A absorbirajočih snovi na površino listov (Slika 18). V primeru koncentracije UV-A absorbirajočih snovi je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v koncentraciji, interakcija obih dejavnikov. Razlika v koncentraciji UV-A absorbirajočih snovi med rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v koncentraciji UV-A absorbirajočih snovi med rastlinami, obravnavanimi z UV+ in UV-, pa obstaja v primeru odsotnosti ali prisotnosti selena (Preglednica 16).

4.2.11 Vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov



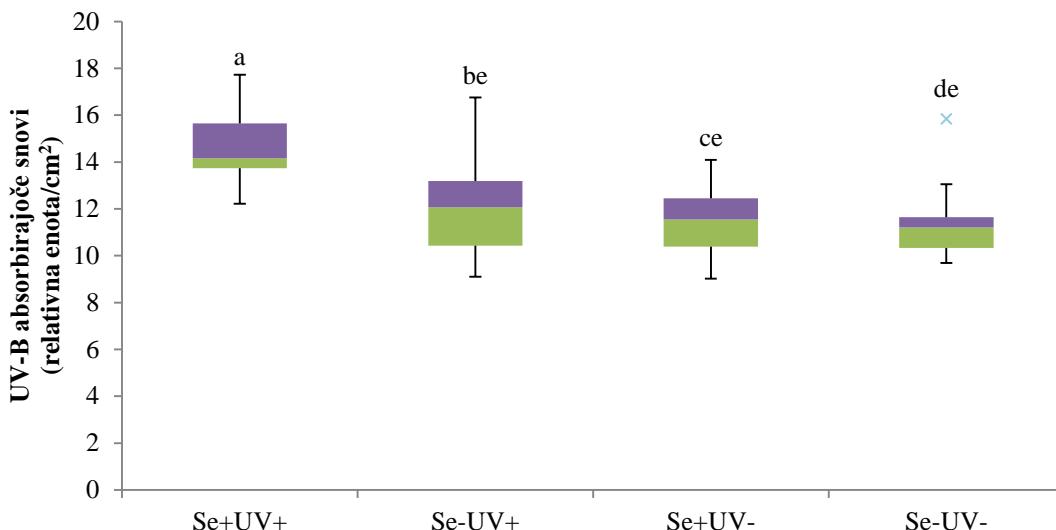
Slika 19: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b,c) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti UV-B absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.

Preglednica 17: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti UV-B absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vsebnosti UV-B absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); $* \leq 0,05$.

Vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov					
UV	0,512	+Se/-Se		+UV/-UV	
Se	0,078	-UV	0,28	-Se	0,062
UV·Se	0,001*	+UV	0,001*	+Se	0,007*

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije UV-B absorbirajočih snovi pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinah, obravnavanih s Se-UV+ in Se+UV-. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno več UV-B absorbirajočih snovi na enoto suhe mase listov kot rastline, obravnavane s Se-UV+ in Se+UV- (Slika 19). V primeru koncentracije UV-B absorbirajočih snovi je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v koncentraciji, interakcija obeh dejavnikov. Razlika v koncentraciji UV-B absorbirajočih snovi med rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v koncentraciji UV-B absorbirajočih snovi med rastlinami, obravnavanimi z UV+ in UV-, pa obstaja v primeru prisotnosti selena (Preglednica17).

4.2.12 Vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na površino listov



Slika 20: Vpliv UV sevanja in Se na vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na površino listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b,c,d,e) označujejo statistično značilne razlike v vsebnosti UV-B absorbirajočih snovi na površino listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenia, znižano UV sevanje.

Preglednica 18: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vsebnosti UV-B absorbirajočih snovi na površino listov. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vsebnosti UV-B absorbirajočih snovi na površino listov med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); * $\leq 0,05$.

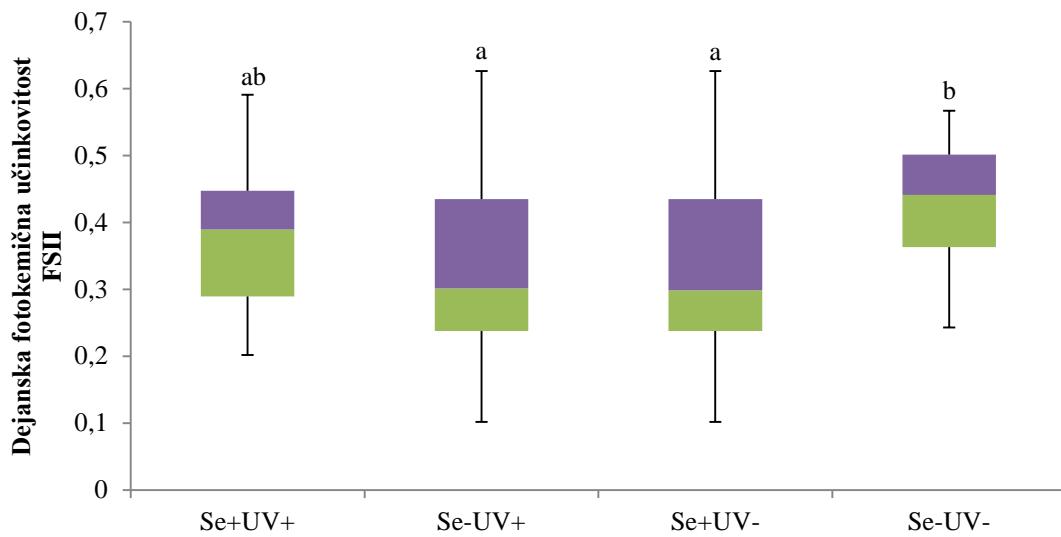
Vsebnost UV-B absorbirajočih snovi na površino listov					
UV	0,000*	+Se/-Se		+UV/-UV	
Se	0,000*	-UV	0,694	-Se	0,157
UV·Se	0,002*	+UV	0,000*	+Se	0,000*

Statistično značilno se med seboj razlikujejo koncentracije UV-B absorbirajočih snovi pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in rastlinami z ostalimi obravnavami. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno največ UV-B absorbirajočih snovi na površino listov (Slika 20). V primeru koncentracije UV-B absorbirajočih snovi je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v koncentraciji, interakcija obeh dejavnikov. Razlika v koncentraciji UV-B absorbirajočih snovi med rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru, da je prisotno naravno UV sevanje. Razlika v koncentraciji

UV-B absorbirajočih snovi med rastlinami, obravnavanimi z UV+ in UV-, pa obstaja v primeru prisotnosti selena (Preglednica 18).

4.3 FOTOKEMIČNA UČINKOVITOST FSII IN TRANSPIRACIJA

4.3.1 Dejanska fotokemična učinkovitost fotosistema II



Slika 21: Vpliv UV sevanja in Se na dejansko fotokemično učinkovitost FSII. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke; n=20. Različne črke (a,b) označujejo statistično značilne razlike v vrednostih dejanske fotokemične učinkovitosti FSII; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

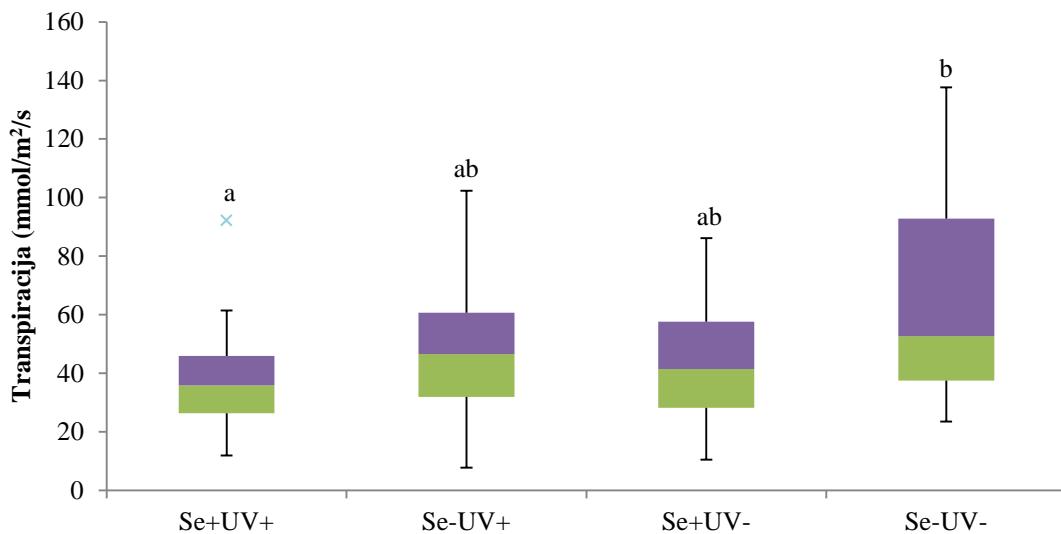
Preglednica 19: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vrednostih dejanske fotokemične učinkovitosti FSII. V tabeli so tudi podatki, ki pokažejo pod katerimi razmerami (+Se, -Se, +UV, -UV) obstajajo statistično značilne razlike v vrednostih dejanske fotokemične učinkovitosti med +Se in -Se (+Se/-Se) ter +UV in -UV (+UV/-UV); * $\leq 0,05$.

Dejanska fotokemična učinkovitost FSII					
UV	0,384	+Se/-Se		+UV/-UV	
Se	0,368	-UV	0,008*	-Se	0,009*
UV·Se	0,005*	+UV	0,158	+Se	0,152

Statistično značilno se med seboj v dejanski fotokemični učinkovitosti FSII razlikujejo rastline, obravnavane s Se-UV- in Se-UV+ ter rastline, obravnavane s Se-UV- in Se+UV- (Slika 21). V primeru dejanske fotokemične učinkovitosti FSII je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike, interakcija obeh dejavnikov. Razlika v vrednostih dejanske fotokemične

učinkovitosti FSII med rastlinami, obravnavanimi s Se+ in Se-, obstaja samo v primeru znižanega UV sevanja. Razlika v vrednostih dejanske fotokemične učinkovitosti FSII med rastlinami, obravnavanimi z UV+ in UV-, pa obstaja v primeru odsotnosti selen (Preglednica 19).

4.3.2 Transpiracija



Slika 22: Vpliv UV sevanja in Se na transpiracijo. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Različne črke (a,b) označujejo statistično značilne razlike v vrednostih transpiracije; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selenja, znižano UV sevanje.

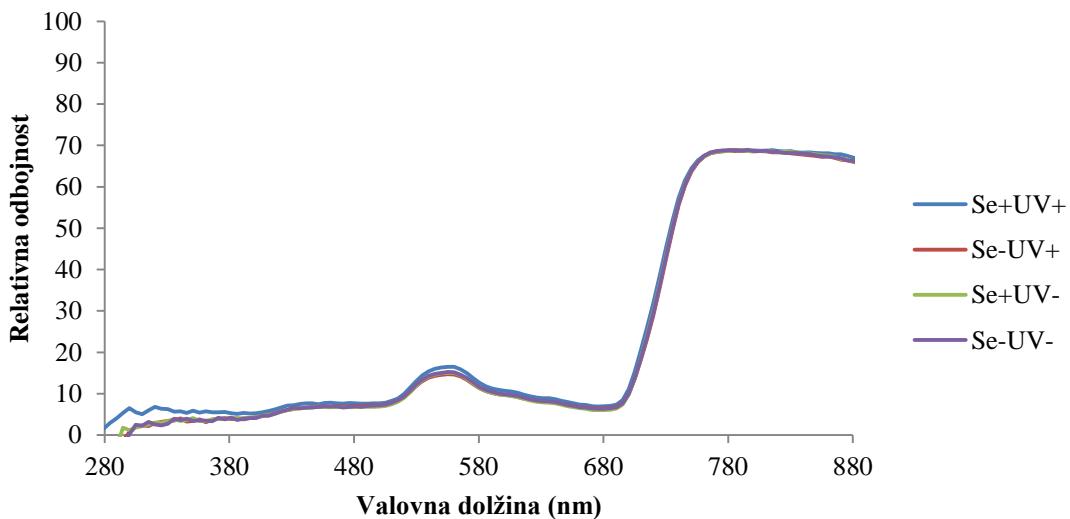
Preglednica 20: Rezultati dvosmerne analize variance, ki kažejo statistično pomemben učinek posameznega dejavnika (UV, Se) in interakcije (UV*Se) na razliko v vrednostih transpiracije; * $\leq 0,05$.

Transpiracija	
UV	0,117
Se	0,009*
UV·Se	0,323

Statistično značilno se med seboj v intenzivnosti transpiracije razlikujejo rastline, obravnavane s Se-UV- in Se+UV+ (Slika 22). V primeru transpiracije je pomemben dejavnik, ki vpliva na razlike v intenzivnosti transpiracije, selen (Preglednica 20).

4.4 ODBOJNOST IN PRESEVNOST

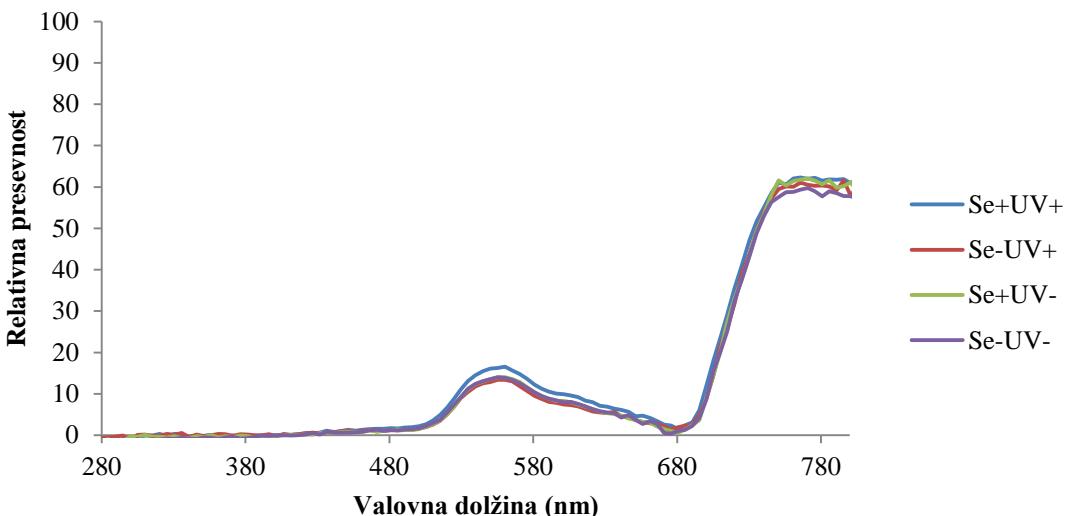
4.4.1 Relativna odbojnosc



Slika 23: Relativna odbojnosc svetlobe pri rastlinah z različnimi obravnavami. Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.

Statistično značilne razlike v odbojnosti ($p \leq 0,05$) so prisotne v vseh spektrih svetlobe, razen v bližnjem infrardečem delu spektra (700-887nm). Listi rastlin, obravnavani s Se+UV+, so imeli pri vseh valovnih dolzinah največjo relativno odbojnost. Listi rastlin, obravnavani s Se+UV+, so se v vseh valovnih dolzinah (razen NIR) statistično značilno razlikovali v relativni odbojnosti od listov rastlin, obravnavanih s Se-UV+, Se+UV- in Se-UV-. Listi rastlin, obravnavani s Se-UV+, Se+UV- in Se-UV-, se med seboj statistično značilno ne razlikujejo (Slika 23).

4.4.2 Relativna presevnost



Slika 24: Relativna presevnost svetlobe pri rastlinah z različnimi obravnavami. Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.

Statistično značilne razlike v presevnosti ($p \leq 0,05$) se v UV-B spektru (280-320nm) pojavijo med rastlinami, obravnavanimi s Se+UV+ in Se-UV- ter med rastlinami, obravnavanimi s Se-UV+ in Se-UV-. V UV-A spektru (320-400nm) se statistično značilno razlikujejo listi rastlin, obravnavani s Se+UV+ in Se-UV-, Se-UV+ in Se+UV- ter Se-UV+ in Se-UV-. V zelenem (500-580nm) in rumenem delu spektra (580-620nm) se statistično značilno razlikujejo listi rastlin, obravnavani s Se+UV+ in Se-UV+. V bližnjem infrardečem spektru (700-887nm) se statistično značilno razlikujejo listi rastlin, obravnavani s Se+UV+ in Se-UV- ter listi rastlin, obravnavani s Se-UV+ in Se-UV-. V celotnem spektru svetlobe (razen UV spektra) imajo listi rastlin, obravnavani s Se+UV+, največjo relativno propustnost vendar razlika v primerjavi z listi z drugimi obravnavami ni vedno statistično značilna ($p \geq 0,05$) (Slika 24).

4.5 SPEARMANOV KORELACIJSKI INDEKS

4.5.1 Odbojni spektri svetlobe

Preglednica 21: Spearmanov koeficient odvisnosti med posameznim območjem odbognega spektra in anatomskevimi in biokemijskimi parametri različnih obravnav; * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$

Parameter/Območje odbojnega spektra	UVB	UVA	Vijolična	Modra	Zelena	Rumena	Rdeča	NIR
Debelina lista	-0,209	-0,271*	-0,362**	-0,355**	-0,539**	-0,531**	-0,476**	-0,435**
Debelina kutikule zgoraj	0,067	0,095	0,067	0,060	-0,007	0,021	0,123	-0,172
Debelina kutikule spodaj	0,097	0,195	0,156	0,089	0,018	0,034	0,110	-0,063
Debelina mezenhima	-0,190	-0,260*	-0,348**	-0,326**	-0,489**	-0,487**	-0,437**	-0,380**
Debelina povrhnjice zgoraj	-0,148	-0,136	-0,211	-0,248*	-0,375**	-0,375**	-0,357**	-0,203
Debelina povrhnjice spodaj	-0,222	-0,255*	-0,326**	-0,400**	-0,347**	-0,360**	-0,441**	-0,280*
Dolžina rež spodaj	-0,041	-0,052	-0,128	-0,196	-0,333**	-0,359**	-0,371**	-0,192
Širina rež spodaj	-0,076	-0,105	-0,167	-0,132	-0,278*	-0,232*	-0,156	-0,161
Število rež spodaj	-0,131	-0,126	-0,097	-0,111	0,161	0,123	0,043	0,031
Dolžina rež zgoraj	-0,151	-0,129	-0,188	-0,173	-0,187	-0,191	-0,244*	-0,194
Širina rež zgoraj	-0,068	-0,063	-0,061	-0,023	-0,081	-0,060	-0,068	-0,152
Število rež zgoraj	-0,022	-0,025	0,016	0,048	0,353**	0,298**	0,177	0,229*
Skupno število trihomov zgoraj	0,113	0,195	0,249	0,285*	0,170	0,168	0,240	0,249
Število manjših trihomov	0,087	0,158	0,207	0,249*	0,189	0,201	0,245*	0,186
Število večjih trihomov	0,038	0,051	0,074	0,024	-0,039	-0,052	-0,035	0,076
Dolžina manjših trihomov	0,304**	0,325**	0,288*	0,328**	0,209	0,237*	0,331**	0,039
Dolžina večjih trihomov	0,086	0,118	0,111	0,086	-0,199	-0,204	-0,144	-0,102
Masa fitolitov	0,062	0,003	0,009	0,053	-0,156	-0,132	-0,040	-0,138
Antociani (mg/g)	-0,297**	-0,282*	-0,351**	-0,429**	-0,485**	-0,512**	-0,539**	-0,207
Antociani (mg/cm ²)	-0,243*	-0,227*	-0,310**	-0,367**	-0,563**	-0,576**	-0,541**	-0,208
Kl A (mg/g)	-0,025	-0,056	-0,079	-0,128	-0,375**	-0,367**	-0,284*	-0,095
Kl B (mg/g)	-0,006	-0,024	-0,029	-0,087	-0,266*	-0,265*	-0,214	0,026
Karotenoidi (mg/g)	-0,037	-0,073	-0,099	-0,145	-0,428**	-0,419**	-0,316**	-0,175
Kl A (mg/cm ²)	0,084	0,072	0,054	0,045	-0,358**	-0,328**	-0,163	-0,037
Kl B (mg/cm ²)	0,012	0,001	0,010	-0,034	-0,271*	-0,252*	-0,166	0,035
Karotenoidi (mg/cm ²)	0,081	0,053	0,046	0,060	-0,387**	-0,352**	-0,156	-0,115
UV-A absorbirajoče snovi (rel./g)	0,081	0,123	0,093	0,111	0,214	0,193	0,179	-0,101

»se nadaljuje«

»nadaljevanje«

Preglednica 22: Spearmanov koeficient odvisnosti med posameznim območjem odbojnega spektra in anatomske in biokemijske parametri različnih obravnav; * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$

Parameter/Območje odbojnega spektra	UVB	UVA	Vijolična	Modra	Zelena	Rumen	Rdeča	NIR
UV-B absorbirajoče snovi (rel./g)	0,060	0,107	0,068	0,080	0,199	0,173	0,150	-0,056
UV-A absorbirajoče snovi (rel./cm ²)	0,201	0,246*	0,241*	0,287*	0,307**	0,316**	0,368**	-0,055
UV-B absorbirajoče snovi (rel./cm ²)	0,199	0,236*	0,250*	0,294**	0,313**	0,320**	0,374**	0,035
SLA	-0,110	-0,101	-0,088	-0,102	0,149	0,094	-0,052	0,053
Potencialna fotokemična učinkovitost	0,095	0,084	0,019	-0,015	-0,193	-0,195	-0,155	-0,235*
Dejanska fotokemična učinkovitost	0,081	0,089	0,103	0,102	-0,035	-0,043	0,016	-0,020
Transpiracija	-0,195	-0,254*	-0,252*	-0,212	-0,180	-0,174	-0,205	-0,124

Med odbojnimi spektromi svetlobe in morfološkimi lastnostmi listov se kaže močna negativna korelacija ($p \leq 0,01$) skoraj pri vseh odbojnih spektrih. Statistično značilne korelacije pa ni med odbojnimi spektromi in debelini zgornje in spodnje kutikule. Med širino rež spodaj in zelenim ter rumenim odbojnim spektrom je pozitivna korelacija ($p \leq 0,05$). Med zelenim in rumenim odbojnim spektrom ter številom rež zgoraj je pozitivna korelacija ($p \leq 0,01$). Med karotenoidi, klorofili, antociani in odbojni spektrom zelene in rumene svetlobe, je negativna korelacija. Antociani so v negativni korelaciiji tudi z drugimi odbojnimi spektromi. UV-A in UV-B merjeno na površino lista so v močni pozitivni korelaciiji ($p \leq 0,01$) v zelenem, rumenem in rdečem odbojnem spektru. Vsebnost UV-A in UV-B absorbirajočih snovi, merjenih na suho maso lista pa niso v statistično značilni korelaciiji z nobenim delom odbojnega spektra svetlobe (Preglednica 21).

4.5.2 Presevni spektri svetlobe

Preglednica 23: Spearmanov koeficient odvisnosti med posameznim območjem presevnega spektra in anatomskega in biokemijskih parametri različnih obravnav; * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$

Parameter/Območje presevnega spektra	UVB	UVA	Vijolična	Modra	Zelena	Rumena	Rdeča	NIR
Debelina lista	-0,119	-0,243*	-0,283*	-0,333**	-0,519**	-0,490**	-0,419**	-0,212
Debelina kutikule zgoraj	0,035	0,077	-0,019	-0,031	0,022	0,015	-0,035	-0,115
Debelina kutikule spodaj	0,087	0,072	-0,074	-0,059	-0,034	-0,032	-0,087	0,037
Debelina mezenhima	-0,130	-0,241*	-0,280*	-0,317**	-0,486**	-0,460**	-0,402**	-0,207
Debelina povrhnjice zgoraj		0,108	-0,058	-0,008	-0,134	-0,357**	-0,332**	-0,251*
Debelina povrhnjice spodaj		-0,055	-0,206	-0,262*	-0,237*	-0,319**	-0,286*	-0,279*
Dolžina rež spodaj	-0,110	-0,169	-0,142	-0,144	-0,311**	-0,289**	-0,218	-0,107
Širina rež spodaj	-0,018	0,013	-0,085	-0,138	-0,270*	-0,262*	-0,156	0,032
Število rež spodaj	0,163	-0,025	-0,068	-0,109	0,039	0,006	-0,050	-0,080
Dolžina rež zgoraj	-0,053	-0,119	0,015	-0,081	-0,226*	-0,210	-0,164	-0,016
Širina rež zgoraj	-0,224	-0,128	0,067	0,013	-0,129	-0,113	-0,094	0,007
Število rež zgoraj	-0,009	0,035	-0,029	0,100	0,410**	0,400**	0,292*	0,041
Skupno število trihomov zgoraj	0,151	0,208	0,210	0,161	0,299*	0,279*	0,237	0,352**
Število manjših trihomov	0,153	0,252*	0,225	0,170	0,220	0,215	0,207	,259*
Število večjih trihomov	0,054	0,135	0,225	0,165	0,150	0,158	0,180	0,164
Dolžina manjših trihomov		0,306**	0,479**	0,291*	0,237*	0,235*	0,214	0,308**
Dolžina večjih trihomov	-0,122	-0,091	0,069	0,058	-0,162	-0,152	-0,058	-0,007
Masa fitolitov	0,164	0,246*	0,034	-0,075	-0,246*	-0,240*	-0,130	0,308**
Antociani (mg/g)	-0,111	-0,254*	-0,056	-0,173	-0,257*	-0,219	-0,221	-0,292**
Antociani (mg/cm ²)	-0,033	-0,165	-0,048	-0,181	-0,334**	-0,296**	-0,246*	-,256*
Kl A (mg/g)	-0,154	-0,217	0,026	-0,103	-0,445**	-0,409**	-0,337**	-0,213
Kl B (mg/g)	-0,170	-,272*	0,011	-0,081	-0,409**	-0,371**	-0,318**	-0,236*
Karotenoidi (mg/g)	-0,093	-0,127	0,051	-0,100	-0,423**	-0,394**	-0,294**	-0,164
Kl A (mg/cm ²)	0,030	-0,039	0,085	-0,076	-0,476**	-0,445**	-0,305**	-0,105
Kl B (mg/cm ²)	-0,109	-0,195	0,051	-0,058	-0,446**	-0,405**	-0,313**	-0,203
Karotenoidi (mg/cm ²)	0,151	0,091	0,128	-0,041	-0,424**	-0,399**	-0,220	-0,033
UV-A absorbirajoče snovi (rel./g)	-0,007	0,031	-0,012	0,108	0,201	0,162	0,139	0,121

»se nadaljuje«

»nadaljevanje«

Preglednica 24: Spearmanov koeficient odvisnosti med posameznim območjem presevnega spektra in anatomskimi in biokemijskimi parametri različnih obravnav; * $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$

Parameter/Območje odbojnega spektra	UVB	UVA	Vijolična	Modra	Zelena	Rumena	Rdeča	NIR
UV-B absorbirajoče snovi (rel./g)	-0,049	-0,008	-0,050	0,059	0,159	0,123	0,085	0,055
UV-A absorbirajoče snovi (rel./cm ²)	0,127	0,207	0,037	0,134	0,227*	0,191	0,207	0,184
UV-B absorbirajoče snovi (rel./cm ²)	0,105	0,196	0,051	0,153	0,216	0,184	0,224	0,131
SLA (cm ² mg ⁻¹)	-0,301**	-0,293**	-0,086	-0,024	0,156	0,145	0,056	-0,189
Potencialna fotokemična učinkovitost	0,013	0,007	-0,017	0,024	0,014	0,020	0,006	0,051
Dejanska fotokemična učinkovitost	-0,189	-0,193	-0,107	-0,064	0,007	0,035	-0,051	0,055
Transpiracija	0,117	0,134	-0,058	-0,199	-0,064	-0,078	-0,094	-0,002

Med debelino povrhnjice, debelino mezenhima in presevnimi spektri svetlobe obstaja močna korelacija ($p \leq 0,01$) v modrem, zelenem, rumenem in rdečem spektru. Med debelino zgornje in spodnje povrhnjice ter presevnimi spektri ni statistično značilne korelacijske. Debelina povrhnjice pa je v negativni korelacijski s presevnimi spektri predvsem v rumenem in zelenem delu. Dolžina rež spodaj in število rež zgoraj sta v močni negativni korelacijski ($p \leq 0,01$) s presevnimi spektri v zelenem in rumenem območju. Med karotenoidi, klorofili, antociani ter presevnimi spektri obstaja negativna korelacija predvsem v rumenem in zelenem delu presevnega spektra. Med UV absorbirajočimi snovmi in presevnimi spektri praktično ni nobene korelacijske (Preglednica 22).

5 RAZPRAVA

5.1 MORFOLOŠKE IN ANATOMSKE MERITVE

Rezultati meritev prerezov kažejo, da različne obravnave pri pšenici ne vplivajo na debelino celotnega lista in na debelino mezenhima. Morfološki odziv rastlin na UV-B sevanje so debelejši listi. S tem se zmanjša število plasti celic, do katerih pride UV-B sevanje. Sevanje teh valovnih dolžin namreč prehaja le skozi prvi plasti celic (Cen

in Bornman, 1993). V našem poizkusu pa ni bilo statistično značilnih razlik v debelini listov med rastlinami, obravnavanimi s Se-UV+ in Se-UV-, ki bi pokazali vpliv UV sevanja na debelino lista. Z debelino lista je povezana tudi specifična listna površina (SLA). Čeprav v debelini lista ni bilo statistično značilnih razlik, pa so bile razlike pri vrednosti SLA. Statistično značilno se razlikujejo rastline, obravnavane s Se+UV+ in Se-UV- ter rastline, obravnavane s Se-UV+ in Se-UV-. Dvosmerna analiza variance kaže na statistično značilen vpliv obeh posameznih dejavnikov na vrednost SLA. Fahad in sodelavci (2013) so pri treh sortah pšenice ugotovili, da daljše kot je obsevanje z UV-B svetlobo, debelejši so listi (Fahad in sod., 2013). Naši rezultati torej niso v skladu z njihovo raziskavo. Pri raziskavi na bombažu (*Gossypium hirsutum*) pa so raziskovalci prišli do rezultata, da se debelina lista zmanjšuje s povečevanjem intenzitete UV-B sevanja (Kakani in sod., 2003b). Za razliko od debeline lista in mezenhima pa ima način obravnave v naši raziskavi statistično značilen vpliv na debelino kutikule in povrhnjice. Kutikula na zgornji in spodnji strani listov je bila najdebelejša pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ ampak razlika ni vedno statistično značilna. Pri debelini povrhnjice pa je ravno obratno. Pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+, je povrhnjica najtanjša ampak tudi v tem primeru razlike niso vedno statistično značilne. Razlika v debelini povrhnjice na zgornji in spodnji strani lista med rastlinami, obravnavanimi s Se-UV- in Se-UV+, ni statistično značilna. UV-B sevanje očitno ni imelo vpliva na debelino povrhnjice. Prav tako ni bilo statistično značilnih razlik v debelini kutikule med rastlinami, obravnavanimi s Se-UV- in Se-UV+. Na primeru bombaža (*Gossypium hirsutum*) so ugotovili, da povečano UV-B sevanje nima vpliva na debelino povrhnjice (Kakani in sod., 2003b). Pri brezi (*Betula pendula*) so zaznali težnjo naraščanja debeline povrhnjice s povečevanjem intenzitete UV-B sevanja ampak razlike niso bile statistično značilne (Wulff in sod., 1999). V raziskavi na pšenici so ugotovili, da UV-B sevanje povzroči močno odebelitev kutikule (Sharma in sod., 1997). V našem primeru pa ni bilo statistično značilnih razlik med rastlinami, obravnavanimi s Se-UV+ in Se-UV-, ki bi pokazale vpliv UV-B sevanja na debelino kutikule. Ker na statistično značilne razlike v debelini povrhnjice in kutikule lahko vplivata tako selen kot UV sevanje in njuna interakcija, je bilo potrebno izračunati dvosmerno analizo variance. Ta analiza je pri debelini kutikule zgoraj in spodaj pokazala, da na statistično značilne razlike vpliva predvsem selen. Na debelino povrhnjice pa vplivata tako selen kot UV sevanje ne pa tudi njuna interakcija.

Razlike v številu listnih rež na zgornji in spodnji strani listov med rastlinami z različnimi obravnavami niso bile statistično značilne. Prav tako ni bilo statistično značilnih razlik med rastlinami z različnimi obravnavami v dolžini in širini rež razen v dolžini rež na zgornji strani listov. Dolžina rež pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+, je bila statistično značilno manjša kot pri rastlinah, obravnavanih s Se-UV-. Na primeru bombaža (*Gossypium hirsutum*) so ugotovili povečano število listnih rež na zgornji in spodnji strani listov ob povečani intenziteti UV-B sevanja. Reže na zgornji strani listov so bile tudi daljše zaradi večje intenzitete UV-B sevanja, na širino rež pa to sevanje ni vplivalo (Kakani in sod., 2003b). Pri številu in velikosti rež je bilo več podatkov izločenih zaradi slabih odtisov. Število rež in njihova velikost sta bili precej odvisni od tega ali smo meritve opravili na sredini lista ali bolj ob straneh. V izračun statistično značilnih razlik so bile upoštevane samo reže, ki so bile merjene na sredini lista.

Bodičke smo najprej glede na obliko in velikost razdelili na večje in manjše. Prešteli in izmerili smo bodičke na zgornji strani listov. Tako kot pri režah, je tudi pri bodičkah pomembno ali jih merimo na sredini lista ali ob straneh. Zaradi slabih odtisov je bilo zato nekaj podatkov izločenih. Pri skupnem številu bodičk, številu večjih bodičk, dolžini večjih bodičk in številu manjših bodičk ni bilo statistično značilnih razlik med rastlinami z različnimi obravnavami. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno največ bodičk. V naši raziskavi nismo ugotovili, da bi UV-B sevanje vplivalo na število bodičk. So pa raziskovalci na primeru navadnega repnjakovca (*Arabidopsis thaliana*) ugotovili, da povečano UV-B sevanja spodbuja nastanek trihomov (Yan in sod., 2012).

Številni raziskovalci pri testiranju vpliva UV-B sevanja in selena merijo tudi višino rastlin, biomaso nadzemnih in podzemnih delov rastlin, število in kakovost semen. Če bi v magistrski nalogi imeli tudi te podatke, bi lažje spremljali vpliv posamezne obravnave. Merjenje debeline listov in posameznih struktur je namreč zaradi strukture listov pšenice zelo težko.

5.2 FITOLITI

Količino fitolitov smo izmerili kot % suhe mase listov. Listi z obravnavo Se-UV-vsebujejo statistično značilno manj fitolitov kot listi z obravnavo Se+UV+ in Se-UV+.

Dvosmerna analiza variance kaže statistično značilen vpliv obeh dejavnikov na količino fitolitov. Fitoliti predstavljajo približno med 2 in 3 % suhe mase lista. Parr in Sullivan (2011) sta preverila količino fitolitov v 53 sortah pšenice iz 25 držav. Ugotovila sta, da fitoliti predstavljajo med 2,7 in 7,9 % suhe mase listov in stebel (Parr in Sullivan, 2011). Naši rezultati so v okviru spoznanj iz te raziskave. Da bi lažje razpravljali (primerjali), kako na količino fitolitov hkrati vplivata UV-B sevanje in selen, bi potrebovali znanstvene članke na to temo. Kolikor nam je znano, takih znanstvenih objav še ni.

5.3 VSEBNOST BARVIL

Pri meritvah količin barvil in UV absorbirajočih snovi smo prišli do zanimivega vzorca. Pri meritvah količine klorofila *a* in *b*, antocianov in karotenoidov smo ugotovili, da rastline, obravnavane s Se+UV+, vsebujejo najmanj teh barvil, vsebujejo pa največ UV absorbirajočih snovi. Vse statistično značilne razlike, ki se pojavijo pri meritvah teh snovi, najdemo med rastlinami, obravnavanimi s Se+UV+ in ostalimi obravnavami. Statistično značilno najmanj klorofila *b* na površino in enoto suhe mase listov je bilo pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+. Statistično značilno najmanj klorofila *a* na enoto suhe mase listov imajo rastline obravnavane s Se+UV+. V primeru meritve klorofila *a* na površino listov pa imajo rastline, obravnavane s Se+UV+ statistično značilno manj barvil kot rastline, obravnavane s Se+UV-. Rezultat dvosmerne analize variance pokaže statistično značilen vpliv interakcije obeh dejavnikov na vsebnost klorofila *a* in *b*. Nadaljnja analiza interakcije pokaže, da na količino klorofilov vpliva selen samo v prisotnosti UV sevanja in obratno. Yao in sodelavci (2013) so merili količino klorofilov pri zimski pšenici. Prišli so do drugačnih rezultatov. Pšenici, ki je uspevala v naravnih sevalnih razmerah (naravno intenzitetu UV-B sevanja) so dodali selen in količina klorofila v listih je narasla. Ko so povečali intenzitetu UV-B sevanja, se je koncentracija klorofilov zopet zmanjšala. V nadaljevanju poskusa so spet dodali selen in količina klorofilov je zopet narasla (Yao in sod., 2013). Ti rezultati so v nasprotju z našimi rezultati. V našem poizkusu je dodatek selena rastlinam pod UV-B svetlobo še zmanjšal količino klorofilov. Yao in sodelavci (2010b) so izvedli še eno podobno raziskavo na pšenici, kjer pa so merili klorofil *a* in *b* posebej. Pri klorofilu *a* niso našli statistično značilnih razlik med listi pšenice pod povečanim UV-B sevanjem in listi rastlin pod povečanim UV-B sevanjem, ki so jim dodali

selen. Za klorofil *b* pa so ugotovili, da dodatek selena poveča količino klorofila *b* pri rastlinah, izpostavljenih UV-B sevanju (Yao in sod., 2010b). UV sevanje različno vpliva na zeleno in rdečo solato (*Lactuca sativa*). Povečano UV-B sevanje je povzročilo povečanje koncentracije klorofilov v listih zelene solate in zmanjšalo koncentracijo klorofilov v listih rdeče solate (Caldwell in sod., 2006). V našem poizkusu pa ni bilo statistično značilnih razlik med rastlinami, obravnavanimi s Se-UV+ in Se-UV-. Dodatek selena kitajski kustovnici (*Lycium chinense*) je povzročil veliko povečanje koncentracije klorofila *a* in *b* v listih rastline (Dong in sod., 2012). Mi smo prišli do drugačnih rezultatov. Rastline, obravnavane s Se+UV+, so namreč imele manj klorofila *a* in *b* kot rastline z obravnavo Se-UV+.

V našem poizkusu je tudi koncentracija antocianov najmanjša pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+. Dvosmerna analiza variance pokaže, da na koncentracijo antocianov, merjenih na površino, vpliva interakcija UV sevanja in selena. Na koncentracijo antocianov merjenih na enoto suhe mase listov pa vplivata oba dejavnika posebej. V raziskavi iz leta 2010 so ugotavljali vpliv različnih koncentracij selena na količino antocianov pod povečanim UV-B sevanjem pri pšenici. Ob dodatku 1 ali 2 mg Se/kg tal se je koncentracija antocianov v listih pšenice povečala glede na rastline, ki jim selena niso dodali. Dodatek 0,5 ali 3 mg Se/kg tal pa ni vplival na količino antocianov glede na rastline brez dodanega selena (Yao in sod., 2010a). Rezultati naše raziskave pa so v nasprotju s temi ugotovitvami saj imajo listi rastlin, obravnavani s Se+UV+, manjšo koncentracijo antocianov kot pa listi rastlin obravnavani s Se-UV+.

Najmanj karotenoidov na enoto suhe mase listov vsebujejo rastline, obravnavane s Se+UV+, ki se statistično razlikuje od ostalih treh obravnav. Edina statistično značilna razlika v koncentraciji karotenoidov, merjenih na površino listov, je med rastlinami, obravnavanimi s Se+UV+ in Se-UV+. Yao in sodelavci (2010b) so ugotovili, da največ karotenoidov vsebujejo listi pšenice, ki so uspevali v razmerah povečanega UV-B sevanja z dodanim selenom. Obravnave listov pšenice samo s selenom, s povečano jakostjo UV-B sevanja ali z naravno jakostjo UV-B sevanja niso vplivale na koncentracijo karotenoidov (Yao in sod., 2010b).

Pri meritvah UV absorbirajočih snovi izstopajo rastline, obravnavane s Se+UV+ saj listi, ki so bili izpostavljeni tej obravnavi, vsebujejo statistično značilno največ UV-A in UV-B absorbirajočih snovi merjenih tako na enoto suhe mase listov kot na površino listov. Edina izjema je odsotnost statistično značilne razlike v koncentraciji UV-B absorbirajočih snovi merjenih na enoto suhe mase listov med rastlinami, obravnavanimi s Se+UV+ in rastlinami, obravnavanimi s Se-UV-. Dvosmerna analiza variance pri vseh meritvah pokaže pozitivno korelacijo obeh dejavnikov. UV absorbirajoče snovi kot so flavonoidi in fenilpropanoidne snovi se lahko v velikih koncentracijah kopičijo v vakuolah celic povrhnjice. Te snovi zmanjšajo količino UV sevanja, ki prodre globlje v liste hkrati pa ne vpliva na prehajanje vidne svetlobe. Na različnih sortah soje (*Glycine max*) so ugotovili, da so rastline pod povečanim UV-B sevanjem kopičile večje koncentracije UV-B absorbirajočih snovi (Mazza in sod., 2010). Breznik in sodelavci (2005) so na rastlinah navadne (*Fagopyrum esculentum*) in tatarske ajde (*Fagopyrum tataricum*) spremljali kopičenje UV-A in UV-B absorbirajočih snovi pod povečanim UV-B sevanjem z dodajanjem in brez dodajanja selena. Koncentracijo UV absorbirajočih snovi so izmerili pri različno starih rastlinah. Ob povečanem UV-B sevanju se je koncentracija UV absorbirajočih snovi začela povečevati v petem tednu. Tudi rastline, ki so jim dodali selen, so pod povečanim UV-B sevanjem začele kopičiti UV absorbirajoče snovi, ampak koncentracije teh snovi niso bile višje kot pri rastlinah, ki jim niso dodali selena (Breznik in sod., 2005). V našem poizkusu pa so rastline, obravnavane s Se+UV+, imele največjo koncentracijo UV-A in UV-B absorbirajočih snovi. Poleg izolacije barvil bi nam koristne podatke dala tudi izolacija drugih snovi kot so različni antioksidanti (superoksid dismutaza in peroksidaza, fenolne snovi, katalaza). Mislim, da bi nam izolacija teh snovi dala še boljši vpogled v to, kako UV-B sevanje in selen vplivata na rastline.

5.4 FOTOKEMIČNA UČINKOVITOST FSII IN TRANSPIRACIJA

Izmerili smo tudi hitrost transpiracije. Edina statistično značilna razlika v intenziteti transpiracije je med rastlinami, obravnavanimi s Se+UV+ in rastlinami, obravnavanimi s Se-UV-. Dejavnik, ki statistično značilno vpliva na transpiracijo, je selen. V raziskavi na pšenici so ugotovili, da višja kot je intenziteta UV-B sevanja nižja je intenziteta transpiracije (Zheng in sod., 2004). V našem primeru pa ni bilo statistično značilnih razlik

med rastlinami, obravnavanimi s Se-UV- in Se-UV+. V raziskavi na hruški (*Pyrus bretschneideri*), grozdju (*Vitis vinifera*) in breskvi (*Prunus persica*) so ugotovili, da dodan selen ne vpliva na intenziteto transpiracije pri grozdju in breskvi. Pri hruški pa se je transpiracija ob dodatku selena zmanjšala. Dodatek selena pšenici je povečal transpiracijo pri rastlinah, ki so bile pod sušnim stresom (Kuznetsov in sod., 2003). Pri našem poizkusu pa ni bilo statistično značilnih razlik med rastlinami, obravnavanimi Se+UV+ in Se-UV+.

Potencialno in dejansko fotokemično učinkovitost fotosistema (FS) II smo merili samo enkrat. Tako kot pri transpiraciji, bi tudi pri merjenju fotokemične učinkovitosti morali opraviti več meritev. Potencialno fotokemično učinkovitost FSII izražamo s parametrom Fv/Fm (Schreiber in sod., 1995). Rezultat meritev potencialne fotokemične učinkovitosti FSII je pokazal, da ni statistično značilnih razlik med obravnavami. Parameter Fv/Fm je bil blizu teoretičnega maksimuma 0,83 kar kaže na to, da rastline niso bile pod stresom. Statistično značilne razlike pa smo našli pri meritvah dejanske fotokemične učinkovitosti FSII. Statistično značilno so se razlikovale rastline, obravnavane s Se-UV+ in Se-UV- ter s Se+UV- in Se-UV-. Vrednosti dejanske fotokemične učinkovitosti FSII so bile precej nižje kot vrednosti potencialne fotokemične učinkovitosti FSII kar verjetno kaže na irreverzibilne poškodbe fotosinteznega aparata. Na različno stopnjo prizadetosti fotosinteznega aparata kažejo tudi statistično značilne razlike med posameznimi obravnavami. V članku iz leta 2005 je opisan vpliv selena in UV-B sevanja na potencialno in dejansko fotokemično učinkovitost FSII. Poizkus je bil zastavljen enako kot naš iz širih različnih obravnav le da so namesto pšenice opravljali poskuse na bučah (*Cucurbita pepo*). Raziskovalci niso našli statistično značilnih razlik v potencialni in dejanski fotokemični učinkovitosti FSII med različnimi obravnavami (Germ in sod. 2005).

5.5 ODBOJNOST IN PRESEVNOST

Odbojnosc lista je odvisna od zgradbe povrhnjice, prisotnosti trihomov, zgradbe notranjosti lista in od biokemijskih lastnosti (Liew in sod., 2008). Listi, obravnavani s Se+UV+, imajo statistično značilno večjo odbojnost svetlobe kot listi, izpostavljeni ostalim obravnavam v vseh valovnih dolžinah razen v bližnji infrardeči svetlobi. Na odbojnost v valovnih dolžinah 400-700nm vpliva predvsem koncentracija barvil (klorofili, antocianini, karotenoidi) v celicah. Na odbojnost v spektru 700-1400nm vpliva predvsem struktura

celic, na odbojnost v spektru 1400-2000nm pa vpliva vsebnost vode. Klorofili najbolj absorbirajo svetlobo v modrem in rdečem spektru in imajo absorpcijski minimum pri valovni dolžini 550nm. Karotenoidi pa absorbirajo predvsem v valovnih dolžinah 500-520nm (Liew in sod., 2008). Med klorofili, karotenoidi in antociani najdemo močne negativne korelacje v zelenem in rumenem delu odbojnega spektra. To pomeni, da več kot je teh barvil manjša je odbojnost tega dela spektra zaradi večje absorbcije. Pri antocianih smo nepričakovano dobili močne negativne korelacje tudi v ostalih delih odbojnega spektra. Med odbojnimi spektri svetlobe in UV absorbirajočimi snovmi, merjenih na suho snov, ni korelacij, so pa korelacije če UV absorbirajoče snovi merimo na površino. Med debelino lista, mezenhima in povrhnjice smo dobili negativne korelacije.

Koliko svetlobe bo šlo skozi list, je odvisno od tega, koliko svetlobe se že prej odbije od lista oziroma se je absorbira. Listi so najbolj propustni za zeleno in bližnjo infrardečo svetlobo. Poleg barvil pa na propustnost vpliva tudi zgradba lista (Larcher, 2003). Večina UV sevanja se absorbira (91-95 %). Večinoma se absorbira v povrhnjici, kjer je največ UV absorbirajočih snovi. 5-9 % UV sevanja se odbije od lista in samo manj kot 1 % UV sevanja pride skozi list. Zato je presevnost v tem območju nizka (Qi in sod., 2010). Tudi v našem poizkusu je bila presevnost v tem območju nizka. Največja prepustnost svetlobe v vidnem delu spektra je pri 500nm valovne dolžine. Razlog za to je nizka absorpcija barvil v tem delu. V delih, kjer je večja odbojnost, je tudi presevnost večja (Larcher, 2003). V našem primeru se v vidnem delu spektra statistično značilno razlikujejo rastline, obravnavane s Se+UV+ in Se-UV+. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo statistično značilno najmanj klorofilov in karotenoidov in zato je tudi presevnost pri tej obravnavi večja. V bližnjem infrardečem spektru svetlobe se statistično značilno razlikujejo rastline, obravnavane s Se+UV+ in Se-UV- ter rastline, obravnavane s Se-UV+ in Se-UV-. Ker je odbojnost v NIR visoka, je visoka tudi prepustnost listov za te valovne dolžine (Larcher, 2003). Korelacija med vidno svetlobo in vsebnostjo fotosinteznih barvil je negativna. To pomeni, da se propustnost lista za vidno svetlobo zmanjšuje z naraščanjem koncentracije barvil. Med propustnostjo lista in koncentracijo UV absorbirajočih snovi ni pozitivne korelacije. Med morfološkimi lastnostmi lista in propustnostjo so negativne korelacije. Večja kot je debelina lista, nižja je propustnost kar je v skladu z pričakovanji.

Med odbojnostenjo in fitoliti ni bilo korelacije. Bila pa je korelacija med presevnostjo in fitoliti. V zelenem in rumenem delu spektra je korelacija negativna kar pomeni, da več kot je fitolitov, manjša je presevnost. V spektru bližnje infrardeče svetlobe pa je korelacija močno pozitivna. Skupaj z naraščajočo maso fitolitov se veča tudi presevnost za bližnjo infrardečo svetlobo. Ko smo naredili multivariantno analizo, da bi ugotovili v kolikšni meri lahko razlike v presevnosti in odbojnosti razložimo z maso fitolitov, rezultati niso bili statistično značilno različni. Klančnik in sodelavci (2014) so pri nekaterih travah in šaših preučevali vpliv fitolitov in drugih struktur s silicijem na optične lastnosti. Ko so v izračun multivariantne analize vključili morfološke in biokemijske značilnosti ter maso fitolitov, merjeno na volumen, so ugotovili, da fitoliti razložijo 21 % razlik v odbojnosti med različnimi vrstami trav in šašev. Masa fitolitov merjena, na volumen pa razloži 11 % razlik v presevnih spektrih. Ko pa so namesto mase fitolitov merjene na volumen v izračun vključili maso fitolitov merjeno na suho maso listov, so fitoliti razložili le še 6 % razlik v odbojnosti med različnimi vrstami. Pri izračunu razlik v presevnosti pa fitoliti niso imeli statistično značilnega vpliva (Klančnik in sod., 2014).

5.6 NAJPOMEMBNEJŠI IZSLEDKI

Morfološke in biokemijske značilnosti nam lahko povedo o stanju rastlin, ali so rastline pod stresom ali ne. Način obravnave je vplival na morfološke in biokemijske značilnosti. Med rastlinami z različnimi obravnavami smo našli statistično značilne razlike v debelini kutikule in povrhnjice. Način obravnave ni vplival na število in velikost listnih rež razen na dolžino listnih rež na zgornji strani listov. Najmanj fotosinteznih barvil v listih je bilo pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+. Pri enaki obravnavi pa je bilo največ UV absorbirajočih snovi. Način obravnave ni imel učinka na potencialno fotokemično učinkovitost FSII, imel pa je učinek na dejansko fotokemično učinkovitost FSII. Transpiracija je bila najnižja pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+. Količina fitolitov v listih je bila odvisna od načina obravnave. Način obravnave je vplival tudi na razlike v odbojnosti in presevnosti. Največjo odbojnost so imeli listi rastlin, obravnavani s Se+UV+ (razen NIR), pri presevnosti pa ni bilo takega odstopanja listov rastlin, obravnavanih s Se+UV+.

6 SKLEPI

Vpliv načina obravnave na morfologijo rastline je viden samo pri debelini kutikule in povrhnjice. Debelina celotnega lista in mezenhima ni odvisna od načina obravnave. Kutikula na zgornji in spodnji strani lista je najdebelejša pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+. Dejavnik, ki najbolj vpliva na debelino kutikule pa je selen. Povrhnjica je najtanjša pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in na njeno debelino vplivata tako UV sevanje kot selen, ni pa pozitivne interakcije med dejavnikoma.

Na reže ima način obravnave malo vpliva. Število rež na zgornji in spodnji strani listov, širina rež na zgornji in spodnji strani listov ter dolžina rež na spodnji strani listov se med različnimi obravnavami med seboj statistično značilno ne razlikujejo. Se pa pojavi statistično značilna razlika v dolžini rež na zgornji strani listov med rastlinami z različnimi obravnavami. Reže so statistično značilno krajše pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ kot pri rastlinah, obravnavanih s Se-UV-.

Bodičke smo glede na izgled razdelili na krajše in daljše. Skupno število manjših in večjih bodičk se ni statistično značilno razlikovalo med rastlinami z različnimi obravnavami. Edina statistično značilna razlika je bila v dolžini manjših bodičk. Pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+, so bile bodičke statistično značilno daljše kot pri ostalih obravnavah.

Koncentracija vseh fotosinteznih barvil se med različnimi obravnavami statistično značilno razlikuje. Količina antocianov, klorofilov in karotenoidov je bila statistično značilno najmanjša pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+. Drugih statistično značilnih razlik v koncentraciji barvil med rastlinami z različnimi obravnavami ni bilo. Na količino fotosinteznih barvil je največkrat vplivala interakcija obeh dejavnikov. Če je bilo fotosinteznih barvil najmanj pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+, pa je bilo UV absorbirajočih snovi pri tej obravnavi statistično značilno največ. Drugih statistično značilnih razlik med rastlinami z različnimi obravnavami, tako kot pri fotosinteznih barvilih, ni bilo. Na razlike v koncentraciji fotosinteznih snovi je najbolj vplivala interakcija obeh dejavnikov.

Statistično značilnih razlik v potencialni fotokemični učinkovitosti FSII ni bilo, so bile pa razlike v dejanski fotokemični učinkovitosti FSII kjer so se statistično značilno razlikovale rastline, obravnavane s Se-UV+ in Se-UV- ter rastline, obravnavane s Se+UV- in Se-UV-. Na te razlike je vplivala interakcija obeh dejavnikov.

Transpiracija je bila statistično značilno manjša pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ kot pri rastlinah, obravnavanih s Se-UV-.

Naša prva hipoteza je bila, da bo dodan selen omilil negativno delovanje UV sevanja. Te hipoteze ne moremo v celoti potrditi. Fotosinteznih barvil je bilo namreč pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+, najmanj kar je v nasprotju z našo hipotezo. Je bilo pa pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+, največ UV absorbirajočih snovi kar pa je v skladu z našo hipotezo. Pri analizi debeline listov, števila rež, števila bodičk pa statistično značilnih razlik med rastlinami z različnimi obravnavami ni bilo.

Odstotek celotne suhe mase listov, ki ga predstavljajo fitoliti, je bil statistično značilno manjši pri rastlinah, obravnavanih s Se-UV- kot pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+ in Se-UV+. Na te razlike pa sta vplivala tako UV sevanje kot selen. S tem lahko potrdimo eno izmed naših hipotez. Predvidevali smo, da bo količina fitolitov manjša pri nižji intenziteti UV sevanja.

Rastline obravnavane s Se+UV+ imajo statistično značilno največjo odbojnost, razen pri NIR kjer statistično značilnih razlik ni bilo. Rastline z drugimi obravnavami se glede odbojnosti med seboj statistično značilno niso razlikovale. Statistično značilnih razlik v presevnosti v vijoličnem, modrem in rdečem spektru ni bilo. V ostalih spektrih pa so bile statistično značilne razlike. V splošnem lahko rečemo, da v večini meritev izstopajo rastline, obravnavane s Se+UV+. Tako ima najdebelejšo kutikulo in najtanjsa povrhnjico. Ima najmanj fotosinteznih barvil in največ UV absorbirajočih snovi. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo tudi največjo odbojnost. Edino pri količini fitolitov in presevnosti pa izrazitega izstopanja rastlin, obravnavanih s Se+UV+, ni.

7 POVZETEK

Zaradi tanjše ozonske plasti je intenziteta UV-B sevanja na površini Zemlje večja in zato je večji tudi vpliv sevanja na rastline. Selen ima v ustreznih količinah pozitiven učinek na rast rastlin in premagovanje stresa. Selen in UV sevanja vplivata na privzem silicija in s tem na nastanek fitolitov.

V magistrski nalogi nas je zanimal vpliv UV sevanja na izbrane morfološke in biokemijske lastnosti listov pšenice. Izmerili smo tudi odbojnost in presevnost listov ter vsebnost fitolitov. V korita smo posadili pšenico in korita postavili pod plošče, ki so prepuščale naravno ali pa znižano UV sevanje. Tako smo dobili štiri različne obravnave Se+UV+, Se-UV+, Se+UV- in Se-UV-. Za meritve morfoloških, biokemijskih lastnosti, mase fitolitov in odbojnosti ter presevnosti, smo za vsako obravnavo uporabili po 20 rastlin, torej skupaj 80. Nato smo izmerili debeline različnih tkiv, število in velikost rež, število in velikost bodičk, količino fotosinteznih barvil, količino UV absorbirajočih snovi, količino fitolitov, potencialno in dejansko fotokemično učinkovitost FSII, intenzitetu transpiracije in nazadnje še odbojnost in presevnost listov pšenice.

Rezultati so nam dokazali, da imata UV-B sevanja in selen vpliv na morfološke in biokemijske lastnosti listov pšenice. Način obravnave je vplival na debelino povrhnjice in kutikule. Na reže način obravnave ni imel velikega vpliva. Pri fotosinteznih barvilih in UV absorbirajočih snoveh so se pojavile le statistično značilne razlike med rastlinami, obravnavanimi s Se+UV+ in rastlinami z ostalimi obravnavami. Fotosinteznih barvil je bilo največ pri rastlinah, obravnavanih s Se+UV+, UV absorbirajočih snovi pa najmanj. Način obravnave ima vpliv na količino fitolitov. Najmanj jih je bilo pri rastlinah, obravnavanih s Se-UV-. Rastline, obravnavane s Se+UV+, imajo večjo odbojnost rastlin z drugimi obravnavami. Pri presevnosti pa ni bilo tako izrazitega učinka obravnave rastlin s Se+UV+.

Način obravnave je torej pomemben dejavnik, ki vpliva na morfološke in biokemijske lastnosti rastlin. Način obravnave je pomemben tudi za privzem silicija in nastanek fitolitov. Raziskava nam je pokazala zanimiv vzorec razlik med posameznimi obravnavami, kjer največkrat izstopajo rastline, obravnavane s Se+UV+.

8 VIRI

- Balakhnina T., Borkowska A. 2013. Effects of silicon on plant resistance to environmental stresses: review. International agrophysics, 27: 225-232
- Barceloux D.G. 1999. Selenium. Clinical toxicology, 37, 2: 145-172
- Barnes P.W., Jordan P.W., Gold W.G., Flint S.D., Caldwell M.M. 1988. Competition, morphology and canopy structure in wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena fatua* L.) exposed to enhanced ultraviolet-B radiation. Functional ecology, 2: 319-330
- Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K.V. 2003. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review. Annals of botany, 91: 179-194
- Breznik B., Germ M., Gaberščik A., Kreft I. 2005. Combined effects of elevated UV-B radiation and the addition of selenium on common (*Fagopyrum esculentum* Moench) and tartary [*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn.] buckwheat. Photosynthetica, 43, 4: 583-589
- Caldwell C.R., Britz S.J. 2006. Effect of supplemental ultraviolet radiation on the carotenoid and chlorophyll composition of green house-grown leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars. Journal food composition and analalsys, 19: 637-644
- Caldwell M.M., Bornman J.F., Balarré C.L., Flint S.D., Kulandaivelu G. 2007. Terrestrial ecosystems, increased solar ultraviolet radiation, and interactions with other climate change factors. Photochemical & photobiological sciences, 6: 252-266
- Casey W.H., Kinrade S.D., Knight C.T.G., Rains D.W., Epstein E. 2003. Aqueous silicate complexes in wheat, *Triticum aestivum* L. Plant, cell, and environment, 27: 51-54
- Cen Y.P., Bornman J.F. 1993. The effect of exposure to enhanced UV-B radiation on the penetration of monochromatic and polychromatic UV-B radiation in leaves of *Brassica napus*. Physiologia plantarum, 87, 3: 249-255

- Chipperfield M.P., Dhomse S.S., Feng W., McKenzie R.L., Velders G.J.M., Pyle J.A. 2015. Quantifying the ozone and ultraviolet benefits already achieved by the Montreal protocol. *Nature communications*, 6: 1-8
- Chu J., Yao X., Zhang Z. 2010. Responses of wheat seedlings to exogenous selenium supply under cold stress. *Biological trace element research*, 136, 3: 355-363
- Correia C.M., Torres-Pereira M.S., Torres-Pereira J.M.G. 1999. Growth, photosynthesis and UV-B absorbing compounds of Portuguese Barbela wheat exposed to ultraviolet-B radiation. *Environmental pollution*, 104: 383-388
- Currie H.A., Perry C.C. 2007. Silica in plants: Biological, biochemical and chemical studies. *Annals of botany*, 100: 1383-1389
- Dawar S., Vani T., Singhal G.S. 1998. Stimulation of antioxidant enzymes and lipid peroxidation by UV-B irradiation in thylakoid membranes of wheat. *Biologia plantarum*, 41, 1: 65-73
- Diwadkar-Navsariwala V., Prins G.S., Swanson S.M., Birch L.A., Ray V.H., Hedayat S., Lantvit D.L., Diamond A.M. 2006. Selenoprotein deficiency accelerates prostate carcinogenesis in a transgenic model. *PNAS*, 103: 8179-8184
- Dong J.Z., Wang Y., Wang S.H., Yin L.P., Xu G.J., Zheng C., Lei C., Zhang M.Z. 2012. Selenium increases chlorogenic acid, chlorophyll and carotenoids of *Lycium chinense* leaves. *Journal of the science of food and agriculture*, 93, 2: 310-315
- Dreher G.B., Finkelman R.B. 1992. Selenium mobilization in a surface coal mine, Powder River Basin, Wyoming, U.S.A.. *Environmental geology water sciences*, 19: 155–169
- Eiche E., Bardelli F., Nothstein A.K., Charlet L., Göttlicher J., Steininger R., Dhillon K.S., Sadana U.S. 2015. Selenium distribution and speciation in plant parts of wheat (*Triticum aestivum*) and Indian mustard (*Brassica juncea*) from a seleniferous area of Punjab, India. *Science of the total environment*, 505: 952-961

- Elbaum R., Melamed-Bessudo C., Tuross N., Levy A.A., Weiner S. 2009. New method to isolate organic materials from silicified phytoliths reveal fragmented glycoproteins but no DNA. *Quaternary international*, 193: 11-19
- Epstein E. 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *PNAS*, 91: 11-17
- Epstein E. 2009. Silicon: its manifold roles in plants. *Annals of applied biology*, 155: 155-160
- Fahad S., Chen Y., Saud S., Wang K., Xiong D., Chen C., Wu C., Shah F., Nie L., Huang J. 2013. Ultraviolet radiation effect on photosynthetic pigments, biochemical attributes, antioxidant enzyme activity and hormonal contents of wheat. *Journal of food, agriculture & environment*, 11, 3&4: 1635-1641
- Fernández-Martínez A., Charlet L. 2009. Selenium environmental cycling and bioavailability: a structural chemist point of view. *Reviews in environmental science and bio/technology*, 8: 81-110
- Frohnmyer H., Staiger D. 2003. Ultraviolet-B radiation mediated responses in plants. Balancing damage and protection. *Plant physiology*: 133, 4: 1420-1428
- Fu F., Akagi T., Yabuki S. 2002. Origin of silica particles found in cortex of *Matteuccia* roots. *Soil science society of America journal*, 66, 4: 1265-1271
- Germ M. 2006. Odziv kmetijskih rastlin na UV-B sevanje. *Acta agriculturae Slovenica*, 87, 2: 275-283
- Germ M., Kreft I., Osvald J. 2005. Influence of UV-B exclusion and selenium treatment on photochemical efficiency of photosystem II, yield and respiratory potential in pumpkins (*Cucurbita pepo* L.). *Plant physiology and biochemistry*, 43: 445-448
- Germ M., Stibilj V., Kreft S., Gaberščik A., Kreft I. 2010. Flavonoid, tannin and hypericin concentrations in the leaves of St. John's wort (*Hypericum perforatum* L.) are affected by UV-B radiation levels. *Food chemistry*, 122: 471-474
- Guntzer F., Keller C., Meunier J.D. 2012. Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for sustainable development*, 32: 201-213

Hamilton S.J. 2004. Review of selenium toxicity in the aquatic food chain. Science of total environment, 326: 1-31

Hanson B., Dawn Lindblom S., Loeffler M.L., Pilon-Smith E.A.H. 2004. Selenium protects plants from phloem-feeding aphids due to both deterrence and toxicity. New phytologist, 162, 3: 655-662

Hollósy F. 2002. Effects of ultraviolet radiation on plant cells. Micron, 33: 179-197

Iqbal M., Hussain I., Liaqat H., Ashraf M.A., Rasheed R., Rehman A.U. 2015. Exogenously applied selenium reduces oxidative stress and induces heat tolerance in spring wheat. Plant physiology and biochemistry, 94: 95-103

Jenkins G.I. 2009. Signal transduction in responses to UV-B radiation. Annual review of plant biology, 60: 407-431

Kakani V.G., Reddy K.R., Zhao D., Sailaja K. 2003a. Field crop responses to ultraviolet-B radiation: a review. Agricultural and forest meteorology, 120: 191-218

Kakani V.G., Reddy K.R., Zhao D., Mohammed A.R. 2003b. Effects of ultraviolet-B radiation on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) morphology and anatomy. Annals of botany, 91: 817-826

Kashin V.K., Shubina O.I. 2011. Biological effect and selenium accumulation in wheat under condition of selenium deficient biogeochemical province. Chemistry for sustainable development, 19: 145-150

Kataria S., Baroniya S.S., Baghel L., Kanungo M. 2014a. Effect of exclusion of solar UV radiation on plants. Plant science today, 1, 4: 224-232

Kataria S., Jajoo A., Guruprasad K.N. 2014b. Impact of increasing Ultraviolet-B radiation on photosynthetic processes. Journal of photochemistry and photobiology B: Biology, 137: 55-66

Kikkert J., Berkelaar E. 2013. Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium. Archives of environmental contaminant and toxicology, 65: 458-465

Klančnik K., Vogel-Mikuš K., Gaberščik A. 2014. Silicified structures affect leaf optical properties in grasses and sedge. *Journal of photochemistry and photobiology B: biology*, 130: 1-10

Klančnik K., Vogel-Mikuš K., Kelemen M., Vavpetič P., Pelicon P., Kump P., Jezeršek D., Gianoncelli A., Gaberščik A. 2014. Leaf optical properties are affected by the location and type of deposited biominerals. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 140: 276-285

Kuznetsov Vas.V., Kholodova V.P., Kuznetsov VI.V., Yagodin B.A. 2003. Selenium regulates the water status of plants exposed to drought. *Doklady biological sciences*, 390: 266-268

Larcher W. 2003. *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups*. 4th ed. Berlin, Springer: 514 str.

Li H.F., McGrath S.P., Zhao F.J. 2008. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite. *New phytologist*, 178: 92-102

Liang Y., Sun W., Zhu Y.G., Christie P. 2006. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental pollution*, 147, 2: 422-428

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

Lyons G.H., Stangoulis J.C.R., Graham R.D. 2005. Tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) to high soil and solution selenium levels. *Plant and soil*, 270: 179-188

Ma J.F. 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil science and plant nutrition*, 50, 1: 11-18

Ma J.F., Takahashi E. 2002a. Silicon in soil. V: Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan. Ma J.F., Takahashi E. (eds.). Amsterdam, Elsevier: 27-48

Ma J.F., Takahashi E. 2002b. Silicon-accumulating plants in the plant kingdom. V: Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan. Ma J.F., Takahashi E. (eds.). Amsterdam, Elsevier: 63-71

Ma J.F., Yamai N. 2015. A cooperated system of silicon transport in plants. Trends in plant science, 20, 7: 435-442

Matichenkov V.V., Bocharkova E.A. 2001. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. V: Silicon in agriculture. Datnoff L.E., Snyder G.H., Korndörfer G.H. (eds.). Amsterdam, Elsevier: 209-219

Mazza C.A., Boccalandro H.E., Giordano C.V., Battista D., Scopel A.L., Ballaré C.L. 2010. Functional significance and induction by solar radiation of ultraviolet-absorbing sunscreens in field-grown soybean crops. Plant physiology, 122: 117-125

Mittler R. 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends in plant science, 7, 9: 405-410

Montpetit J., Vivancos J., Mitani-Ueno N., Yamaji N., Rémus-Borel W., Belzile F., Ma J.F., Bélanger R.R. 2012. Cloning, functional characterization and heterologous expression of TaLsi1, a wheat silicon transporter gene. Plant molecular biology, 79: 35-46

Motomura H., Mita N., Suzuki M. 2002. Silica accumulation in long-lived leaves of *Sasa veitchii* (Carrière) Rehder (Poaceae–Bambusoideae). Annals of botany: 90, 1: 149-152

Nawaz F., Yasin Ashraf M., Ahmad R., Waraich E.A., Nauman Shabbir R. 2014. Selenium (Se) regulates seedling growth in wheat under drought stress. Advances in chemistry, 2014: 1-7

Nikolic M., Nikolic N., Liang Y., Kirkby E.A., Römhild V. 2007. Germanium-68 as an adequate tracer for silicon transport in plants. Characterization of silicon uptake in different crop species. Plant physiology, 143: 495-503

Pal M., Zaidi P.H., Voleti S.R., Raj A. 2006. Solar UV-B exclusion effects on growth and the photosynthetic characteristics of wheat and pea. Journal of new seeds, 8, 1: 19-34

Parr J.F., Sullivan L.A. 2011. Phytolith occluded carbon and silica variability in wheat cultivars. Plant and soil, 342: 165-171

- Peleg Z., Saranga Y., Fahima T., Aharoni A., Elbaum R. 2010. Genetic control over silica deposition in wheat awns. *Physiologia Plantarum*, 140: 10–20
- Peñuelas J., Filella I. 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in plant science*, 3, 4: 151-156
- Pilon-Smith E., Quinn C.F., Tapken W., Malagoli M., Schiavon M. 2009. Physiological functions of beneficial elements. *Current opinion in plant biology*, 12: 267-274
- Piperno D.R. 2006. Phytoliths: a comprehensive guide for archaeologist and paleoecologist. Lanham, Altamira press: 238 str.
- Qi Y., Heisler G.M., Gao W., Vogelmann T.C., Bai S. 2010. Characteristics of UV-B radiation tolerance in broadleaf trees in southern USA. V: UV radiation in global climate change. Measurements, modeling and effects on ecosystems. Gao W., Schmoldt D.L., Slusser J.R. (eds.). Peking, Tsinghua university press: 509-530
- Rains D.W., Epstein E., Zasoski R.J., Aslam M. 2006. Active silicon uptake by wheat. *Plant and soil*, 280: 223-228
- Reilly C. 2006. The biology of selenium. V: Selenium in food and health. 2nd ed. New York, Springer: 20-42
- Robson T.M., Klem K., Urban O., Jansen M.A.K. 2015. Re-interpreting plant morphological responses to UV-B radiation. *Plant, cell and environment*, 38: 856-866
- Sangster A.G., Hodson M.J., Tubb H.J. 2001. Silicon deposition in higher plants. V: Silicon in agriculture. Datnoff L.E., Snyder G.H., Korndörfer G.H. (eds.). Amsterdam, Elsevier: 85-113
- Schreiber U., Bilger W., Neubauer C. 1995. Chlorophyll fluorescence as a nonintrusive indicator for rapid assessment of in vivo photosynthesis. V: Ecophysiology of Photosynthesis. E.D. Schulze, M.M. Caldwell (eds.). Heidelberg, Springer: 49-69
- Sharma P.K., Shetye R., Bhonsle S. 1997. Effect of supplementary ultraviolet-B radiation on young wheat seedlings. *Current science*, 72, 6: 400-405

Silicon (Si). 2015. Encyclopædia Britannica Online.

<http://www.britannica.com/science/silicon> (september 2015)

Sors T.G., Ellis D.R., Salt D.E. 2005. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants. *Photosynthesis research*, 86: 373-389

Takahashi E., Syo S., Myake Y. 1990. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. *Comment on agricultural and food chemistry*, 2: 99-122

Teramura A.H. Effects of ultraviolet-B radiation on the growth and yield of crop plants. *Physiologia plantarum*, 58: 415-427

Terry N., Zayed A.M., de Souza M.P., Tarun A.S. 2000. Selenium in higer plants. Annual review in of plant physiology and plant molecular biology, 51: 401-432

Trošt Sedej T. 2005. Ekologija rastlin: priročnik za vaje. Ljubljana, Študentska založba: 81 str.

Uden P.C. 2005. Speciation of Selenium. V: *Handbook of elemental speciation II – Species in the environment, food, medicine and occupational health*. Cornelis R., Caruso J., Crews H., Heumann K (eds.). Chichester, John Wiley & Sons: 346-365

Ulm R., Nagy F. 2005. Signalling and gene regulation in response to ultraviolet light. *Current opinion in plant biology*, 8: 477-482

Valdez Barillas J.R., Quinn C.F., Pilon-Smith E.A.H. 2011. Selenium accumulation in plants-phytotechnological applications and ecological implications. *International journal of phytoremediation*, 13, 1: 166-178

Van Hoewyk D. 2013. A tale of two toxicities: malformed selenoproteins and oxidative stress both contribute to selenium stress in plants. *Annals of botany*, 112: 965-972

Wulff A., Anttonen S., Pellinen R., Savonen E.A., Sutinen M.L., Heller W., Sandermann H., Kangasjärvi. 1999. Birch (*Betula pendula* Roth.) responses to high UV-B radiation. *Boreal environment research*, 4: 77-88

- Yan A., Pan J., An L., Gan Y., Feng H. 2012. The responses of trichome mutants to enhanced ultraviolet-B radiation in *Arabidopsis thaliana*. Journal of photochemistry and photobiology B: Biology, 113: 29-35
- Yao X., Chu J., Wang G. 2009. Effects of selenium on wheat seedlings under drought stress. Biological trace element research, 130: 283-290
- Yao X., Chu J., He X., Ba C. 2010a. Protective role of selenium in wheat seedlings subjected to enhanced UV-B radiation. Russian journal of plant physiology, 58, 2: 283-289
- Yao X., Chu J., Ba C. 2010b. Antioxidant responses of wheat seedlings to exogenous selenium supply under enhanced ultraviolet-B radiation. Biological trace element research, 136: 96-105
- Yao X., Chu J., Cai K., Liu L., Shi J., Geng W. 2011. Silicon improves the tolerance of wheat seedlings to ultraviolet-B stress. Biological trace element research, 143: 507-517
- Yao X., Jianzhou C., Xueli H., Binbin L., Jingmin L., Zhaowei Y. 2013. Effects of selenium on agronomical characters of winter wheat exposed to enhanced ultraviolet-B. Ecotoxicology and environmental safety, 92: 320-326
- Yuan L., Yanqun Z., Jianjun C., Haiyan C., Jilong Y., Zhide H. 2000. Intraspecific differences in physiological response of 20 wheat cultivars to enhanced ultraviolet-B radiation under field conditions. Environmental and experimental botany, 44: 95-103
- Zayed A., Lytle C.M., Terry N. 1998. Accumulation and volatization of different chemical species of selenium by plants. Planta, 206: 284-292
- Zhao X.Q., Mitani N., Yamain N., Fang Shen R., Feng Ma J. 2010. Involvement of silicon influx transporter OsNIP_{2;1} in selenite uptake in rice. Plant physiology, 153, 4: 1871-1877

Zheng Y., Guo X., Zhang C. 2004. Enhanced UV-B effects on wheat under different temperature, solar light and soil moisture. Saskatoon, University of Saskatchewan: 10 str.

[http://www.usask.ca/soilsncrops/conference-](http://www.usask.ca/soilsncrops/conference-proceedings/previous_years/Files/2004/2004docs/029.pdf)

proceedings/previous_years/Files/2004/2004docs/029.pdf (september 2015)

ZAHVALA

Najprej se zahvaljujem prof. dr. Mateji Germ za pomoč, številne nasvete, hiter pregled magistrske naloge. Še posebej se zahvaljujem za prijaznost in dostopnost.

Zahvaljujem se tudi prof. dr. Alenki Gaberščik za številne nasvete, usmeritve in pregled magistrskega dela.

Zahvaljujem se prof. dr. Katarini Vogel Mikuš za pregled mojega magistrskega dela.

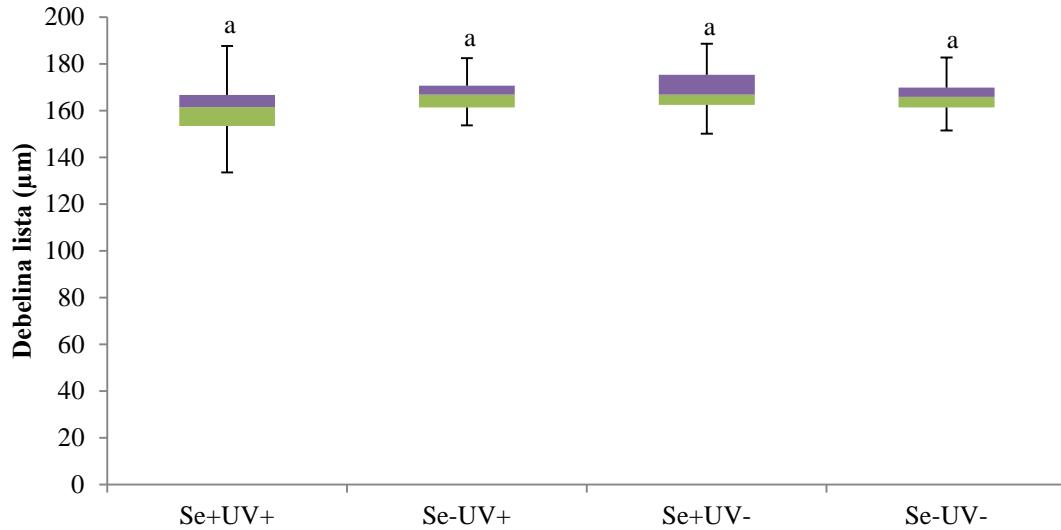
Posebna zahvala gre mladi raziskovalki Aleksandri Golob za pomoč pri izvedbi poizkusov, številne nasvete, diskusije in za prijaznost ter dostopnost, ki sta delo naredili prijetnejše.

Hvala tudi Katji Klančnik za multivariantno analizo podatkov in nasvete.

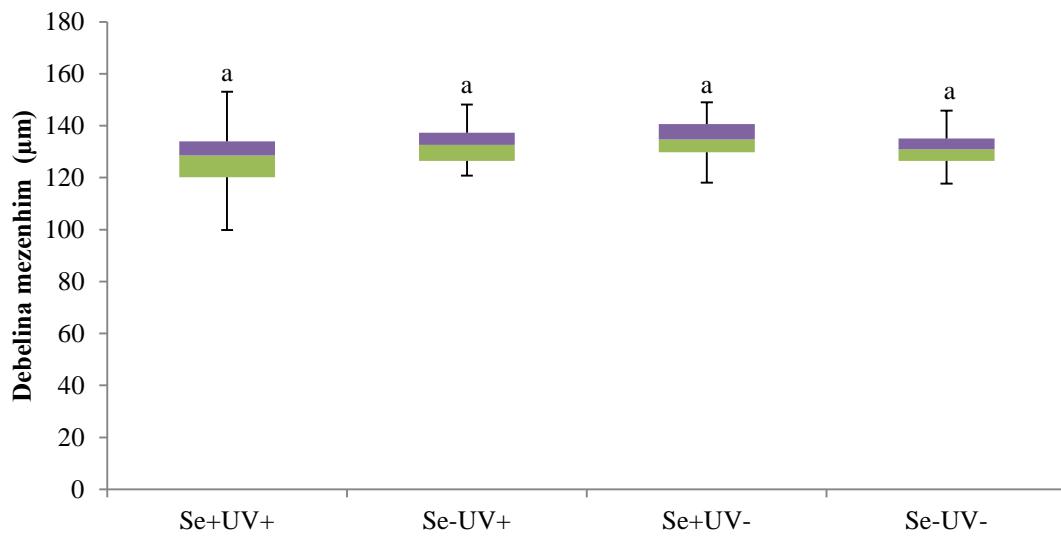
Moje magistrske naloge ne bi bilo brez moje družine, ki mi je tekom celotnega študija stala ob strani, me spodbujala in podpirala.

In nazadnje hvala tudi tebi Janina za spodbudo, razumevanje, podporo in preprosto zato, ker me imaš rada.

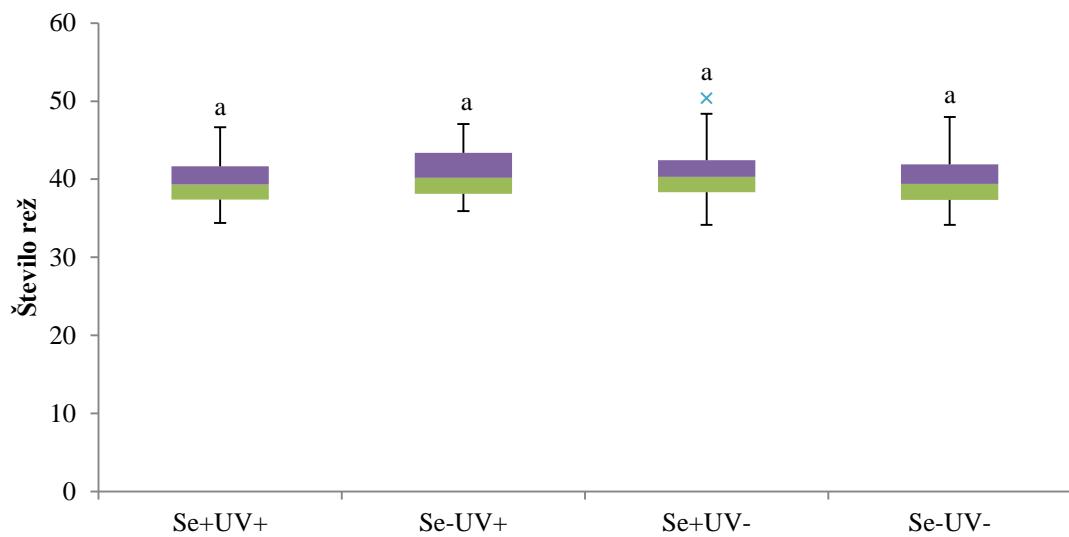
PRILOGE



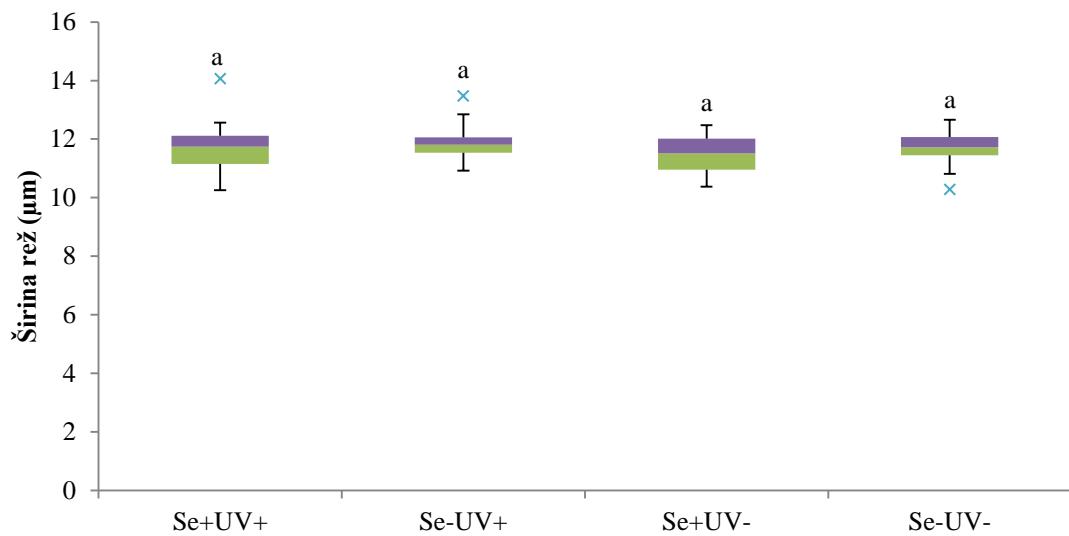
Priloga A: Vpliv UV sevanja in Se na debelino listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v debelini lista; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.



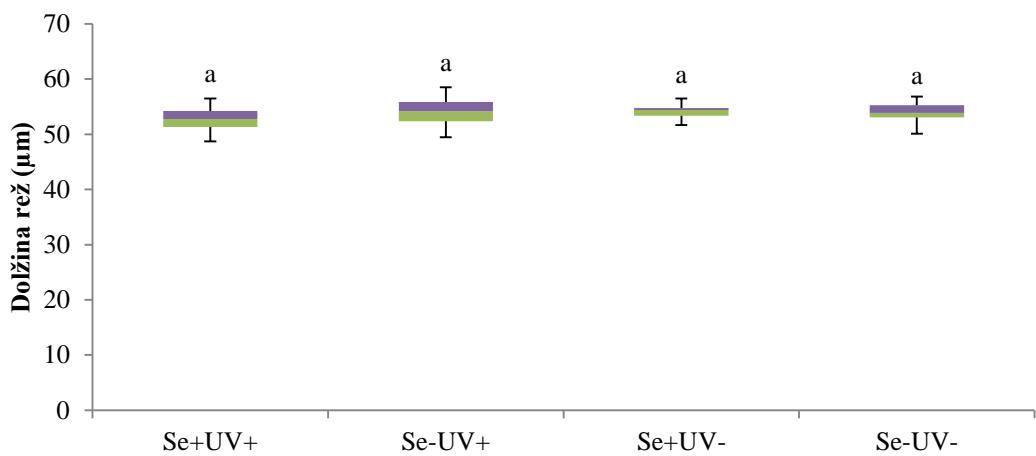
Priloga B: Vpliv UV sevanja in Se na debelino mezenhima. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v debelini lista; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje



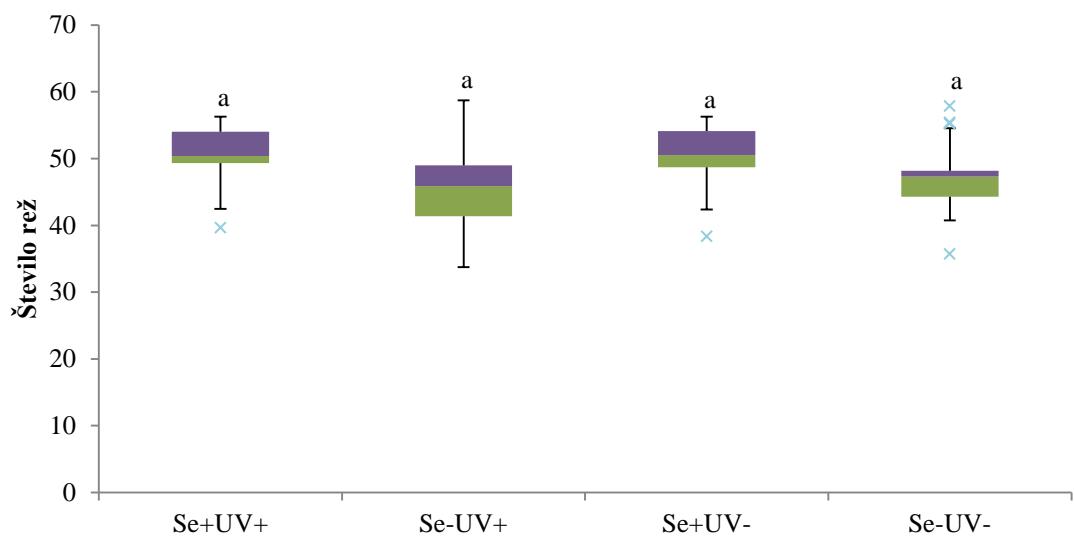
Priloga C: Vpliv UV sevanja in Se na število rež na spodnji strani listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v številu rež na spodnji strani listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.



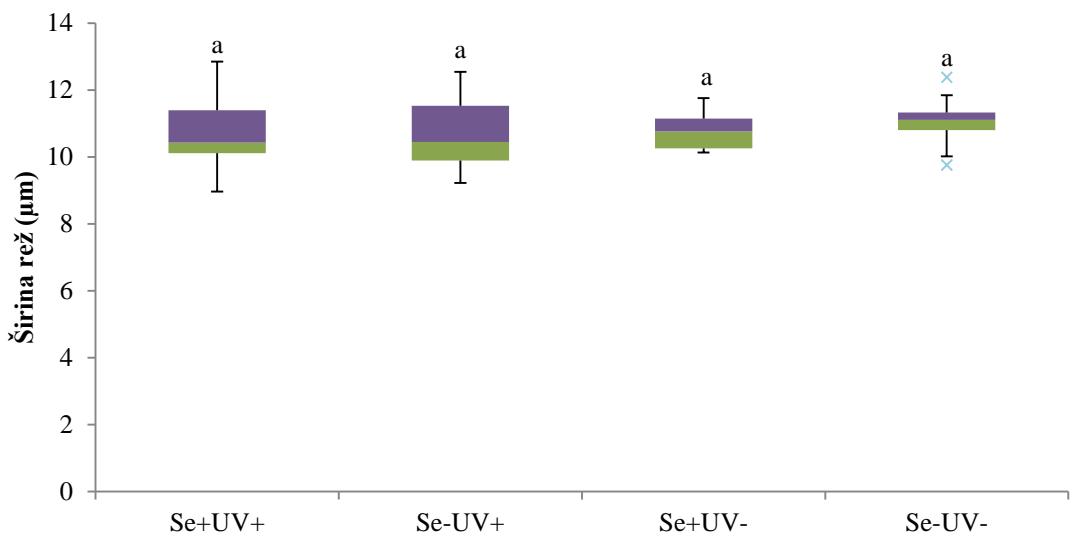
Priloga D: Vpliv UV sevanja in Se na širino rež na spodnji strani listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v širini rež na spodnji strani listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.



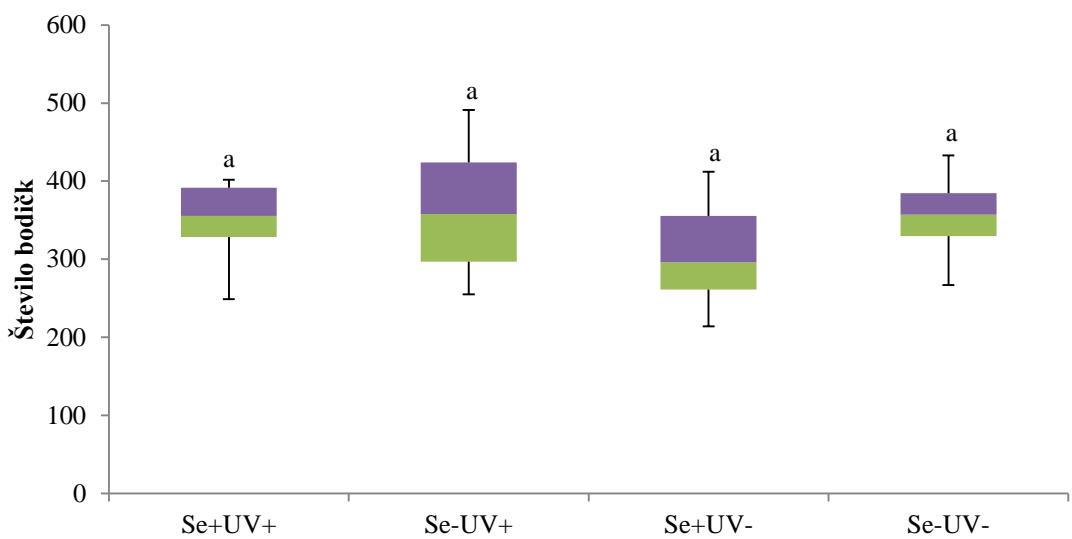
Priloga E: Vpliv UV sevanja in Se na dolžino rež na spodnji strani listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v dolžini rež na spodnji strani listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.



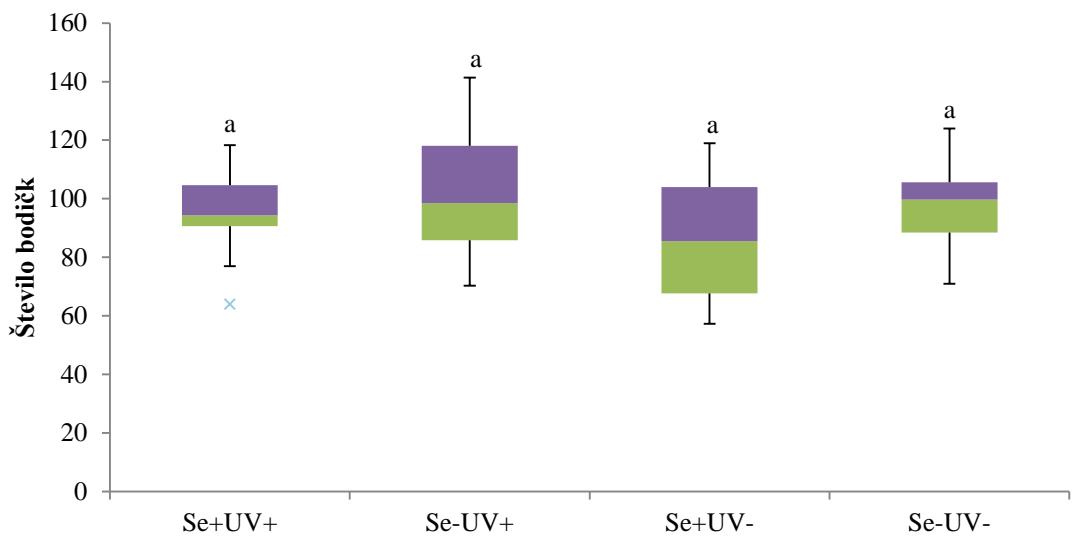
Priloga F: Vpliv UV sevanja in Se na število rež na zgornji strani listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v številu rež na zgornji strani listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.



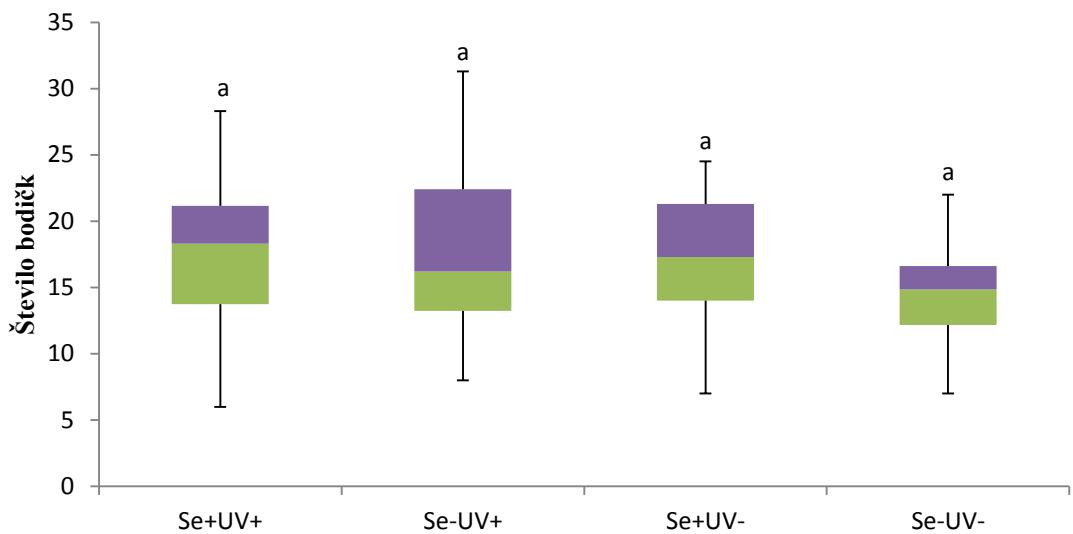
Priloga G: Vpliv UV sevanja in Se na širino rež na zgornji strani listov. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji pa predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v širini rež na zgornji strani listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.



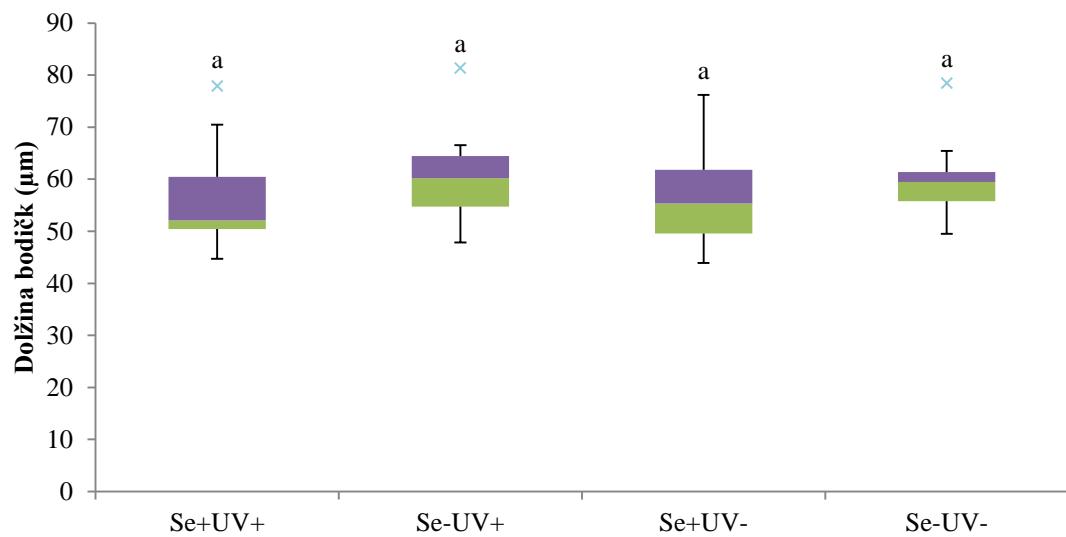
Priloga H: Vpliv UV sevanja in Se na skupno število bodičk. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji pa predstavljajo neizstopajoče podatke; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v skupnem številu bodičk na zgornji strani listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.



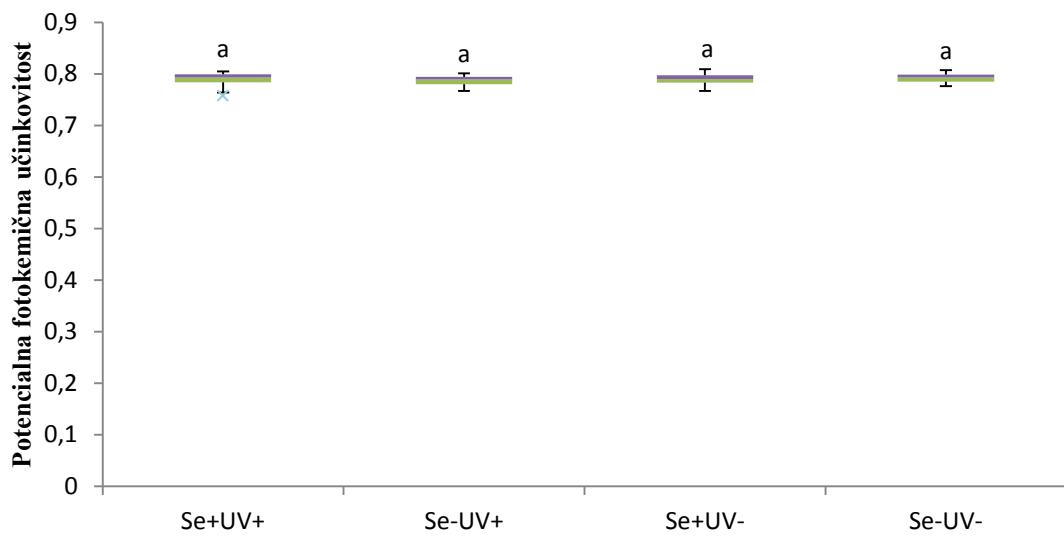
Priloga I: Vpliv UV sevanja in Se na število manjših bodičk. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji pa neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v številu manjših bodičk na zgornji strani listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.



Priloga J: Vpliv UV sevanja in Se na število večjih bodičk. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji pa predstavljajo neizstopajoče podatke; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v številu večjih bodičk na zgornji strani listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.



Priloga K: Vpliv UV sevanja in Se na dolžino večjih bodičk. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v dolžini večjih bodičk na zgornji strani listov; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.



Priloga L: Vpliv UV sevanja in Se na potencialno fotokemično učinkovitost FSII. Okvirji z mediano predstavljajo polovico podatkov, ročaji predstavljajo neizstopajoče podatke, oznaka x pa označuje izstopajoče vrednosti; n=20. Črke označujejo statistično značilne razlike v vrednostih potencialne fotokemične učinkovitosti med posameznimi obravnavami; ($p \leq 0,05$). Se+UV+: dodan Se, naravno UV sevanje; Se-UV+: brez dodanega Se, naravno UV sevanje; Se+UV-: dodan Se, znižano UV sevanje; Se-UV-: brez dodanega selena, znižano UV sevanje.