

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ŠTUDIJ BIOTEHNOLOGIJE

Neva ROZMAN

**VPLIV DODAJANJA KOČK IN KOSMIČEV
MINERALNE VOLNE V SUBSTRAT NA RAST IN
RAZVOJ IZBRANIH RASTLIN**

MAGISTRSKO DELO

Magistrski študij - 2. stopnja

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ŠTUDIJ BIOTEHNOLOGIJE

Neva ROZMAN

**VPLIV DODAJANJA KOČK IN KOSMIČEV MINERALNE VOLNE
V SUBSTRAT NA RAST IN MINERALNO SESTAVO IZBRANIH
RASTLIN**

MAGISTRSKO DELO
Magistrski študij - 2. stopnja

**EFFECTS OF ADDING MINERAL WOOL (CUBES AND FLAKES)
IN THE SUBSTRATE ON GROWTH AND MINERAL
COMPOSITION OF CHOSEN PLANTS**

M. SC. THESIS
Master Study Programmes

Ljubljana, 2016

Magistrsko delo je zaključek Univerzitetnega študija 2. bolonjske stopnje Biotehnologija. Delo je bilo opravljeno na Katedri za botaniko in fiziologijo rastlin, Oddelka za biologijo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. XRF analize so bile opravljene v Laboratoriju za rentgensko fluorescenčno spektrometrijo Odseka za fiziko nizkih in srednjih energij Inštituta Jožef Stefan v Ljubljani.

Študijska komisija je za mentorja magistrskega dela imenovala prof. dr. Katarino Vogel-Mikuš.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: prof. dr. Branka JAVORNIK
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Mentor: prof. dr. Katarina VOGEL-MIKUŠ
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Recenzent: prof. dr. Dominik VODNIK
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

Datum zagovora: 29.9.2016

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

Neva Rozman

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Du2
DK	UDK 635.9 : 581.6 : 581.1 : 666.198 (043.2)
KG	biotehnologija/mineralna volna/sončnica/mineralna sestava/akumulacija v rastlinah/ /substrat/tla/elementi
AV	ROZMAN, Neva, univ. dipl. biotehnologinja (UN)
SA	VOGEL-MIKUŠ, Katarina (mentorica)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Študij biotehnologije
LI	2016
IN	VPLIV DODAJANJA KOCK IN KOSMIČEV MINERALNE VOLNE V SUBSTRAT NA RAST IN MINERALNO SESTAVO IZBRANIH RASTLIN
TD	Magistrsko delo (Magistrski študij - 2. stopnja)
OP	XIX, 80 str., 49 pregl., 44 sl., 1 pril., 44 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Mineralna volna (MV) se v današnjih časih uporablja na področju kmetijstva v hidroponiki, saj večina intenzivne pridelave zelenjave temelji na sistemih brez dodanih tal. Na trgu je MV dostopna v različnih oblikah, ki se jih v vrtnarstvu uporablja kot dodatek tlem ali kot samostojni substrat. MV velja za kemijsko inerten material, z rahlo alkalnim pH, majhno električno prevodnostjo in z zmožnostjo zadrževanja vode ter zagotavljanja zračnosti substrata. Namen magistrske naloge je ugotoviti ali dodatek MV (v obliki kock in kosmičev) v substrat (uporabili smo dva substrata; bogatega in revnega z organsko snovjo) vpliva na rast in mineralno sestavo sončnic ter ali je sončnica zmožna ekstrakcije elementov iz MV in njihovega kopičenja v svojih tkivih. Izmerili smo suho maso in fotokemično učinkovitost listov sončnic ter spektrofotometrično določili vsebnost fotosinteznih pigmentov v njih. Koncentracije mineralov v tkivih sončnice in sestavo MV smo izmerili z rentgensko fluorescenčno spektrometrijo (XRF). Dodatek MV v različna substrata ni statistično vplival na biomaso sončnic in vsebnost vode v nadzemnih delih. Sončnice, ki so rasle v substratu revnem z organsko snovjo in primešano MV, so imele v nadzemnih delih statistično višje koncentracije silicija, fosforja, žvepla in železa kot kontrolne rastline. Sončnice, ki so rasle v tleh bogatih z organsko snovjo in primešano MV, pa so imele statistično višjo vsebnost klorofila <i>a</i> in karotenoidov, večjo potencialno fotokemično učinkovitost in višje koncentracije silicija in železa v nadzemnih delih kot kontrolne rastline.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Du2

DC UDC 635.9 : 581.6 : 581.1 : 666.198 (043.2)

CX biotechnology/mineral wool/sunflower/mineral composition/accumulation in plants/substrate/soil/elements

AU ROZMAN, Neva (first cycle graduate in biotechnology)

AA VOGEL-MIKUŠ, Katarina (supervisor)

PP SI-1000 Ljubljana, Jamnikarjeva 101

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Biotechnology

PY 2016

TI EFFECTS OF ADDING MINERAL WOOL (CUBES AND FLAKES) IN THE SUBSTRATE ON GROWTH AND MINERAL COMPOSITION OF CHOSEN PLANTS

DT M. SC. Thesis (Master study programmes)

NO XIX, 80 p., 49 tab., 44 fig., 1 ann., 44 ref.

LA sl

AL sl/en

AB Nowadays, mineral wool (MW) is widely used in hydroponics as most of the industrial production of vegetables is based on soilless culture systems (SCS). MW is accessible in different shapes, which are used in gardening as an additive to the soil or as a self-standing substrate. MW is a chemically inert substrate with slightly alkaline reaction. It has low electrical conductivity, high ability to retain water and it assures good aeration of the substrate. The aim of the master thesis is to determine the effects of MW addition in the two different potting substrates on the growth and mineral composition of the sunflowers, and to investigate whether the sunflowers are able to extract minerals from the MW and accumulate them in the shoots or roots. The dry mass, photosynthetic efficiency and the contents of photosynthetic pigments of sunflowers have been measured. The concentrations of minerals in the tissue of sunflowers and the composition of MW have been determined by XRF. The addition of MW to different soils did not affect the plant biomass and the water content in the shoots. Sunflowers that grew in the soil with low organic matter content and added MW had statistically higher concentrations of Si, P, S and Fe in the shoots when compared to the control plants. The sunflowers that grew in the soil high in organic matter content and added MW had statistically higher concentrations of chlorophyll *a* and carotenoids, higher potential photosynthetic efficiency effectiveness and higher concentrations of Si and Fe in the shoots compared to control plants.

KAZALO VSEBINE

	KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
	KEY WORDS DOCUMENTATION.....	IV
	KAZALO VSEBINE	V
	KAZALO SLIK.....	IX
	KAZALO PREGLEDNIC	XIII
	KAZALO PRILOG	XVIII
	OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XIX
1	UVOD	1
1.1	NAMEN RAZISKAVE	2
1.2	OSNOVNE HIPOTEZE	3
2	PREGLED OBJAV	4
2.1	SONČNICA	4
2.2	MINERALNA VOLNA.....	4
2.2.1	Mineralna volna in kmetijstvo	5
2.2.2	Kocke in kosmiči mineralne volne.....	5
2.2.3	Mineralna volna primešana v rastni substrat	6
2.2.4	Industrija mineralne volne v Evropi	7
2.3	TLA.....	8
2.4	PRIVZEM HRANIL	9
2.4.1	Fiziologija privzema hranil.....	9
2.4.1.1	Prečkanje celične membrane	10
2.4.1.2	Transport na dolge razdalje	10
2.4.2	Dejavniki, ki vplivajo na privzem hranil	11
2.4.2.1	Vpliv pH.....	12
2.4.2.2	Vpliv metabolne aktivnosti in prehranskega statusa rastline	13
2.4.2.3	Vpliv razpoložljivosti hranil v rizosferi	13
2.4.2.4	Vpliv interakcije med ioni v rizosferi	13
2.5	MINERALNA PREHRANA	14
2.5.1	Določanje pomanjkanja mineralov	15
3	MATERIAL IN METODE	16
3.1	MATERIAL	16

3.1.1	Sončnica	16
3.1.2	Substrat Tonsubstrat	16
3.1.3	Njivska tla	16
3.1.4	Mineralna volna v obliki kock in kosmičev	17
3.2	METODE DELA	17
3.2.1	Merjenje fotokemične učinkovitosti fotosistema II	18
3.2.2	Priprava rastlin za izvedbo analiz	18
3.2.3	Analiza mineralov z rentgensko fluorescenčno spektrometrijo (XRF).	18
3.2.4	Analiza vsebnosti fotosinteznih pigmentov	19
3.2.5	Analiza tal	19
3.2.6	Analiza mineralne volne	20
3.2.7	Statistična analiza	20
3.2.7.1	Potek statistične obdelave rezultatov	20
4	REZULTATI.....	23
4.1	LASTNOSTI TAL	23
4.2	LASTNOSTI KOCK IN KOSMIČEV	25
4.3	BIOMASA RASTLIN	27
4.3.1	Nadzemni deli.....	27
4.3.2	Korenine.....	28
4.3.3	Fotografije sončnic.....	29
4.3.3.1	Kontrolne izpostavitve	29
4.3.3.2	Izpostavitve z dodatkom kock mineralne volne	31
4.3.3.3	Izpostavitve z dodatkom kosmičev mineralne volne.....	33
4.4	VSEBNOST VODE V NADZEMNIH DELIH	36
4.5	ANALIZA FOTOSINTEZNIH PIGMENTOV	36
4.5.1	Rezultati obeh rastnih substratov (substrat Tonsubstrat in njivska tla).....	36
4.5.1.1	Klorofil a	37
4.5.1.2	Klorofil b	38
4.5.1.3	Karotenoidi.....	38
4.5.2	Rezultati iz substrata Tonsubstrat	39
4.5.3	Rezultati iz njivskih tal	41
4.6	FOTOKEMIČNA UČINKOVITOST FOTOSISTEMA II.....	42
4.6.1	Rezultati obeh rastnih substratov (substrat Tonsubstrat in njivska tla).....	42

4.6.1.1	Dejanska fotokemična učinkovitost.....	42
4.6.1.2	Potencialna fotokemična učinkovitost	43
4.6.2	Rezultati iz substrata Tonsubstrat	44
4.6.2.1	Dejanska fotokemična učinkovitost.....	44
4.6.2.2	Potencialna fotokemična učinkovitost	44
4.6.3	Rezultati iz njivskih tal	46
4.7	KONCENTRACIJE ELEMENTOV V NADZEMNIH DELIH IN KORENINAH SONČNIC	46
4.7.1	Skupni podatki.....	46
4.7.1.1	Silicij	46
4.7.1.2	Fosfor	47
4.7.1.3	Železo	48
4.7.2	Nadzemni deli.....	50
4.7.2.1	Rezultati obeh rastnih substratov (substrat Tonsubstrat in njivska tla)	50
4.7.2.2	Rezultati iz substrata Tonsubstrat	50
4.7.2.3	Rezultati iz njivskih tal	52
4.7.3	Korenine.....	57
4.7.3.1	Rezultati obeh rastnih substratov (substrat Tonsubstrat in njivska tla)	57
4.7.3.2	Rezultati iz substrata Tonsubstrat	57
4.7.3.3	Rezultati iz njivskih tal	57
4.8	PREGLED STATISTIČNO ZNAČILNIH VPLIVOV	58
4.8.1	Biomasa	58
4.8.2	Vsebnost vode.....	58
4.8.3	Fotosintezni pigmenti.....	58
4.8.4	Fotokemična učinkovitost.....	59
4.8.5	Vsebnost mineralov v sončnicah	59
5	DISKUSIJA.....	60
5.1	LASTNOSTI TAL	60
5.2	LASTNOSTI KOCK IN KOSMIČEV MINERALNE VOLNE.....	61
5.2.1	Pomanjkljivosti poskusov in meritev	61
5.3	BIOMASA RASTLIN	62
5.3.1	Pomanjkljivosti poskusov in meritev	63
5.3.2	Fotografije sončnic.....	63
5.3.2.1	Kontrolne izpostavitve	63
5.3.2.2	Izpostavitve z dodatkom kock mineralne volne	63

5.3.2.3	Izpostavitve z dodatkom kosmičev mineralne volne.....	63
5.4	VSEBNOST VODE V NADZEMNIH DELIH SONČNIC	64
5.4.1	Pomanjkljivosti poskusov in meritev	64
5.5	ANALIZA FOTOSINTEZNIH PIGMENTOV	65
5.6	FOTOKEMIČNA UČINKOVITOST.....	66
5.7	KONCENTRACIJE MINERALOV V NADZEMNIH DELIH IN KORENINAH SONČNIC	67
5.7.1	Analiza vseh rezultatov.....	68
5.7.2	Analiza nadzemnih delov.....	68
5.7.3	Analiza korenin.....	70
5.7.4	Pomanjkljivosti poskusov in meritev	70
5.8	PREDLOGI ZA NADALJNJE RAZISKAVE.....	71
6	SKLEPI	73
7	POVZETEK.....	74
8	VIRI.....	77
	ZAHVALA	
	PRILOGE	

KAZALO SLIK

Slika 1: Potovanje ionov po prečnem prerezu korenine, po apoplastni (preko celične stene) ali simplastni poti (preko citoplazme in plazmodezm) (prirejeno po Hopkins in Hüner, 2009).....	9
Slika 2: Odvisnost stopnje privzema ionov (I; ang. <i>uptake rate</i>) od zunanje koncentracije hranil (c_s); c_{min} – stopnja privzema je nič (tok v celico je enak toku iz celice) (prirejeno po White, 2012a: 12).	13
Slika 3: Povprečna vsebnost makro in mikrohranil v nadzemnih delih rastlin (prirejeno po Kirkby, 2012).....	14
Slika 4: Odvisnost rasti od koncentracije hranil (prirejeno po Römheld, 2012).	14
Slika 5: Uporabljen substrat Tonsubstrat in cvetlični lončki.	16
Slika 6: Njivska tla in uporabljeni cvetlični lončki.....	17
Slika 7: Preučevani dejavniki pri faktorski analizi ANOVA – vpliv substrata in vpliv dodatka mineralne volne (MV). Uporabljeni so vsi podatki.	21
Slika 8: Preučevani dejavniki pri enosmerni analizi ANOVA – vpliv dodatka mineralne volne (MV), vpliv oblike MV in vpliv odstotkov MV. Uporabljeni so podatki iz določenega rastnega substrata.	21
Slika 9: Vsebnost mineralov v njivskih tleh, pred izvedbo poskusov.	24
Slika 10: Vsebnost elementov v mineralni volni v obliki kock in kosmičev.	25
Slika 11: Prisotnost izluženih mineralov (makrohranila) iz mineralne volne, po dvodnevem luženju v bidestilirani vodi, s pH 7,5 in 5,0.....	26
Slika 12: Prisotnost izluženih mineralov (mikrohranila) iz mineralne volne, po dvodnevem luženju v bidestilirani vodi, s pH 7,5 in 5,0.....	26
Slika 13: Suha masa nadzemnih delov sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 30. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Duncanov test in Unequal N HSD test, p <0,05).	28
Slika 14: Suha masa korenin sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 28. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Duncanov test in Unequal N HSD test, p <0,05).	29
Slika 32: Kontrolna izpostavitve sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti). V ozadju je fotografirano merilo. .	30
Slika 33: Kontrolna izpostavitve sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat; sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).	30
Slika 34: Kontrolna izpostavitve sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti). V ozadju je fotografirano merilo.....	30

Slika 35: Kontrolna izpostavitve sončnic, ki so rasle v njivskih tleh; sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).	31
Slika 36: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat s 60 v/v % kock mineralne volne. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).	31
Slika 37: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat s 60 v/v % kock mineralne volne. Sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).	32
Slika 38: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v njivskih tleh s 60 v/v % kock mineralne volne. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).	32
Slika 39: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v njivskih tleh s 60 v/v % kock mineralne volne. Sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).	32
Slika 40: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat s 60 v/v % kosmičev mineralne volne. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).	33
Slika 41: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat s 60 v/v % kosmičev mineralne volne. Sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).	34
Slika 42: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v njivskih tleh s 60 v/v % kosmičev mineralne volne. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).	34
Slika 43: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v njivskih tleh s 60 v/v % kosmičev mineralne volne. Sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).	35
Slika 15: Koncentracija klorofila <i>a</i> v nadzemnih delih sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla.. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 29. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).	37
Slika 16: Koncentracija klorofila <i>b</i> v nadzemnih delih sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla.. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 29. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).	38
Slika 17: Koncentracija karotenoidov v nadzemnih delih sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 29. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).	39
Slika 18: Koncentracije klorofila <i>a</i> , klorofila <i>b</i> in karotenoidov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 29. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).	40
Slika 19: Dejanska fotokemična učinkovitost nadzemnih delov sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla.	

Povprečje $\pm$ se, n = 4 do 30. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, p <0,05).....	43
Slika 20: Potencialna fotokemična učinkovitost nadzemnih delov sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, n = 3 do 5. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, p <0,05).....	44
Slika 21: Potencialna fotokemična učinkovitost nadzemnih delov sončnic pri različnih izpostavitvah, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 28. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Duncanov test, p <0,05).	45
Slika 22: Vsebnost silicija v koreninah in nadzemnih delih sončnic, pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 30. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, p <0,05).....	47
Slika 23: Vsebnost fosforja v koreninah in nadzemnih delih sončnic, pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 30. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, p <0,05).....	48
Slika 24: Vsebnost železa v koreninah in nadzemnih delih sončnic, pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 30. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, p <0,05).....	49
Slika 25: Vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 10. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncan test, p <0,05).	51
Slika 26: Vsebnost železa v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 10. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, p <0,05).	51
Slika 27: Vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 8. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, p <0,05).	53
Slika 28: Vsebnost fosforja v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 8. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, p <0,05).	53
Slika 29: Vsebnost žvepla v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 8. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, p <0,05).	54
Slika 30: Vsebnost železa v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, n = 5 do 8. Različne črke označujejo statistično	

značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, $p < 0,05$).	55
Slika 31: Vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, $n = 3$ do 5. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, $p < 0,05$).	56
Slika 44: Sončnica v substratu Tonsubstrat.....	65

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Največji proizvajalci kamene in steklene volne v Evropski Uniji.....	7
Preglednica 2: Zasnova poskusa, za posamezni rastni substrat.....	17
Preglednica 3: Izmerjene karakteristike uporabljenih substratov za izvedbo poskusa. ..	23
Preglednica 4: Povprečni pH substrata Tonsubstrat po poskusu.	24
Preglednica 5: Povprečni pH njivskih tal po poskusu.	24
Preglednica 6: Izmerjene karakteristike uporabljenih dodatkov mineralne volne, v obliki kock ali kosmičev.	25
Preglednica 7: Prevodnost mineralne volne v obliki kock in kosmičev (odšteta prevodnost bidestilirane vode) po 48 urah izluževanja.	27
Preglednica 8: Rezultati factorske ANOVA za suho maso nadzemnih delov. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	27
Preglednica 9: Rezultati factorske ANOVA za suho maso korenin. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	28
Preglednica 10: Rezultati factorske ANOVA za vsebnost vode v nadzemnih delih sončnic. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	36
Preglednica 11: Rezultati factorske ANOVA za vsebnost klorofila <i>a</i> v nadzemnih delih sončnic. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	36
Preglednica 12: Rezultati factorske ANOVA za vsebnost klorofila <i>b</i> v nadzemnih delih sončnic. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	36
Preglednica 13: Rezultati factorske ANOVA za vsebnost karotenoidov v nadzemnih delih sončnic. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	37
Preglednica 14: Enosmerne ANOVA za koncentracijo klorofila <i>a</i> v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.....	39
Preglednica 15: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo karotenoidov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so	

označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	40
Preglednica 16: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo klorofila b v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.....	40
Preglednica 17: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo klorofila a v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.....	41
Preglednica 18: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo krottenoidov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	41
Preglednica 19: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo klorofila a v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.....	41
Preglednica 20: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo klorofila b v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.....	41
Preglednica 21: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo karotenoidov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.....	42
Preglednica 22: Rezultati faktorske ANOVA za dejansko fotokemično učinkovitost v nadzemnih delih sončnic. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	42
Preglednica 23: Rezultati faktorske ANOVA za potencialno fotokemično učinkovitost v nadzemnih delih sončnic. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	43
Preglednica 24: Rezultati enosmerne ANOVA za dejansko fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.....	44
Preglednica 25: Rezultati enosmerne ANOVA za potencialno fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.....	45
Preglednica 26: Rezultati enosmerne ANOVA za potencialno fotokemično učinkovitost sončnic (in vpliv oblike mineralne volne), ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z	

odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	45
Preglednica 27: Rezultati enosmerne ANOVA za dejansko fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.....	46
Preglednica 28: Rezultati enosmerne ANOVA za potencialno fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.....	46
Preglednica 29: Rezultati faktorske ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih in koreninah sončnic, ki so rasle v obeh rastnih substratih. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	47
Preglednica 30: Rezultati faktorske ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih in koreninah sončnic, ki so rasle v obeh rastnih substratih. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	48
Preglednica 31: Rezultati faktorske ANOVA za vsebnost železa v nadzemnih delih in koreninah sončnic, ki so rasle v obeh rastnih substratih. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	49
Preglednica 32: Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost mineralov v vseh sončnicah (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 S2)	50
Preglednica 33: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat in vpliv dodatka mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	50
Preglednica 34: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost železa v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat in vpliv dodatka mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	50
Preglednica 35: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat in vpliv oblike mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.	52
Preglednica 36: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost železa v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat in vpliv oblike mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$).	

Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test. 52

Preglednica 37: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh in vpliv dodatka mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test. 52

Preglednica 38: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost fosforja v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh in vpliv dodatka mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test. 53

Preglednica 39: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost žvepla v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh in vpliv dodatka mineralne volne. Z Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test. 54

Preglednica 40: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost železa v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh in vpliv dodatka mineralne volne. Z Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test. 54

Preglednica 41: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh in vpliv oblike mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test. 55

Preglednica 42: Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost mineralov v nadzemnih delih sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). 56

Preglednica 43: Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost mineralov v koreninah sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 in S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). 57

Preglednica 44: Pregled statistično značilnih vplivov na biomaso sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 in S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. 58

Preglednica 45: Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost vode v nadzemnih delih sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 in S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. 58

Preglednica 46: Preglednica. Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost fotosinteznih pigmentov v nadzemnih delih sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 in S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. 58

Preglednica 47: Pregled statistično značilnih vplivov na fotokemično učinkovitost fotosistema II (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 in S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. 59

Preglednica 48: Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost mineralov v nadzemnih delih sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla..... 59

Preglednica 49: Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost mineralov v koreninah sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla..... 59

KAZALO PRILOG

Priloga A	Razdelitev vlaknastih materialov
-----------	----------------------------------

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

Al	aluminij
B	bor
C	ogljik
Ca	kalcij
Cd	kadmij
Cl	klor
Fe	železo
H	vodik
K	kalij
Mg	magnezij
Mn	mangan
Mo	molibden
MV	mineralna volna
N	dušik
Na	natrij
Ni	nikelj
NH_4^+	amonij
NO_3^-	nitrat
O	kisik
P	fosfor
S	žveplo
SCS	sistemi gojenja rastlin brez tal
Si	silicij
SO_4^{2-}	sulfat
Ti	titan
TXRF	rentgenska fluorescenčna spektrometrija s popolnim odbojem
XRF	rentgenska fluorescenčna spektrometrija
Zn	cink

1 UVOD

Mineralna volna je v gradbeništvu pomemben izolacijski material, po odsluženi rabi pa predstavlja odpadek, ki bi ga bilo potrebno reciklirati ali ponovno uporabiti kot izhodno surovino (Vantsi in Karki, 2014). Možna uporaba mineralne volne (iz gradbeništva in hidroponike), ki je brez dodatkov in veziv, se kaže na področju kmetijstva in vrtnarjenja. Mineralna volna se lahko v manjših kosih (narezana na kocke ali v kosmih) meša v tla (Bussell in McKennie, 2004).

V začetku 70. let je bilo ugotovljeno, da je možno mineralno volno uporabljati tudi v agronomiji za rast in gojenje rastlin. Mineralna volna, ki je bila proizvedena z določenimi spremembami v proizvodnji (t.i. hortikultura mineralna volna), se uporablja za propagacijo rastlin in kot rastni substrat (Bussel in McKennie, 2004). Mineralna volna velja za kemijsko inerten anorganski material, z rahlo alkalnim pH (7,5) in nizko električno prevodnostjo (EC znaša med 50-100 uS/cm) (De Rijck in Schrevens, 1998).

Po podatkih iz literature proizvajalci že vrsto let kot eno izmed možnosti nadomeščanja tal v agronomiji uporabljajo medij iz mineralne volne (Dannehl in sod., 2015). Gre za način gojenja rastlin v rastlinjakih, kjer se za oporo koreninskemu sistemu rastlin uporabljajo substrati iz mineralne volne, hranila pa se dovajajo v obliki vodne raztopine. Omenjeni način gojenja je ena izmed oblik hidroponike in je v Evropi zelo razširjen (največji tržni delež predstavlja znamka Grodan). Večina zelenjave (paradižnik, kumare, paprike, fižol, jajčevci, solata) kot tudi rezano cvetje (vrtnice, gerbere), orhideje (*Cymbidium orchid*, ki rastejo v granulatu) in sadje (jagode) gojijo v rastlinjakih s hidroponiko (Dannehl in sod., 2015; Grodan, Bussell in McKennie, 2004; Nowak 2010). Mineralna volna, ki se uporablja v hidroponiki, ima dobre fizikalne parametre, ki so odgovorni za gibanje in zadrževanje vode v substratu. Mineralna volna je kemijsko inertna, hidrofilna, se hitro omoči in v vlaknasti strukturi zadržuje vodo (je rezervoar tekočine), po drugi strani pa omogoča tudi odtekanje vode. Po besedah Dannehl in sod., (2015) ima mineralna volna majhno kapaciteto zadrževanja vode. Poleg omenjene hidrofilnosti in zadrževanja vode, je z uporabo substratov, ki nadomeščajo tla, možno natančnejše nadzorovanje mineralnih in vodnih potreb rastlin, zagotavljanje optimalnega razmerja med vodo in zrakom v območju korenin, enostavnejše rokovanje, zagotavljanje boljših rasti razmer ter zmanjšana je možnost kontaminacije rasti substratov z mikroorganizmi (Bougoul in sod., 2005; Olle in sod., 2012; Jaroszuk-Sierocińska in sod., 2014). Mineralna volna omogoča tudi sterilne in homogene pogoje, visoko vsebnost por in doseganje konstantnih donosov (Dannehl in sod., 2015).

Danes so na trgu na voljo tudi izdelki iz mineralne volne v različnih oblikah, ki se jih dodaja rastnemu substratu (zemlji) (Bussel in McKennie, 2004) in so razviti izključno za vrtnarjenje in rastlinsko pridelavo (Dowgert, 2016; internetni vir 5). Dodatek mineralne volne v substrate izboljša prezračevost in poveča vodno kapaciteto mešanice (Bussell in McKennie, 2004). Uporaba izdelkov omogoča boljšo rast rastlin in manj

zalivanja. Kocke in kosmiče kamene volne proizvajalci priporočajo pri gojenju rastlin (lončnice, rastline iz balkonskega zelenjavnega vrta, okrasne rastline...) in vrtnarjenju. Izdelki obogatijo zemljo, omogočajo optimalno vpijanje in zadrževanje vode ter poleg vlage zagotavljajo tudi zračnost. Glede na podatke proizvajalca, določeni izdelki iz mineralnih vlaken ne vsebujejo dodatkov (npr. fenol-formaldehida) ali veziv (Urbanscape, 2016).

V predhodnih poskusih z dodajanjem kosmičev in kock kamene volne v substrat je bil dokazan vpliv na rast lončnic. Opažena je bila boljša rast rastlin, ki se kaže v močnem in bolj razvejanem koreninskem sistemu, močnejšem nadzemnem delu, vendar vzroki za omenjene učinke še niso pojasnjeni (Urbanscape, 2016).

Namen magistrske naloge je ugotoviti vpliv dodajanja kock in kosmičev mineralne volne v rastni substrat, na rast in mineralno sestavo rastlin. Za poskus smo uporabili sončnico, ker je dober akumulator elementov, je pomembna kulturna in okrasna rastlina, hitro raste in jo je enostavno gojiti.

Rezultati magistrskega dela so pomembni za sodobno agronomijo, kot tudi za proizvajalce dodatkov iz mineralne volne.

1.1 NAMEN RAZISKAVE

- Določiti mineralno sestavo mineralne volne z rentgensko fluorescenčno spektrometrijo (XRF) in ugotoviti biodostopnost elementov v mineralni volni z rentgensko fluorescenčno spektrometrijo s popolnim odbojem (TXRF)
- Proučiti vpliv dodajanja mineralne volne, v obliki kock in kosmičev, na rast in mineralno sestavo sončnic
- Ugotoviti ali mineralna volna izboljša rast sončnic in ugotoviti, ali mineralna volna predstavlja vir mineralov za sončnice
- Ugotoviti ali obstajajo različni vplivi na rast in mineralno sestavo sončnic, kot posledica različnih oblik dodane mineralne volne (kocke ali kosmiči mineralne volne)
- Proučiti ali je vpliv mineralne volne odvisen od vrste substrata (bogat oz. reven z organsko snovjo)
- Proučiti zmožnost sončnice za ekstrakcijo in akumulacijo mineralov iz mineralne volne
- Ovrednotiti nekatere kazalnike fiziološkega stanja rastlin, gojenih v substratih z oz. brez dodatka mineralne volne:
 - suha in sveža biomasa nadzemnih delov in korenin,
 - vsebnost mineralov v nadzemnih delih in koreninah z XRF,

- vsebnost fotosinteznih pigmentov (klorofil *a*, klorofil *b*, karotenoidi) v nadzemnih delih
- fotokemična učinkovitost sončnice tekom rasti

1.2 OSNOVNE HIPOTEZE

1. Rast rastlin bo ob dodatku mineralne volne boljša, prav tako fotokemična učinkovitost, večja bo vsebnost fotosinteznih pigmentov.
2. Zaradi kompaktnosti dodanih oblik mineralne volne (kocke in kosmiči) bo opazen različen vpliv na fiziološko stanje in mineralno sestavo sončnic.
3. Rastline bodo imele ob dodatku mineralne volne izboljšano preskrbo z vodo.
4. Rastline bodo imele ob dodatku mineralne volne povečano vsebnost nekaterih mineralnih elementov.

2 PREGLED OBJAV

2.1 SONČNICA

Sončnica (*Helianthus annuus* L.) spada v družino nebinovk (Asteraceae); je enoletnica in dvokaličnica. Izvira iz Severne Amerike, v Evropo so jo prinesli v začetku 16. stoletja. Do sredine 19. stoletja ni bila gospodarsko pomembna poljščina, kasneje pa so iz sončničnih semen začeli stiskati olje (Sončnica, 2016). Sedaj je peti najpomembnejši vir za pridobivanje jedilnega olja (Cantamutto in Poverene, 2007). Sončnica se uporablja tudi za krmo, preučuje se njena zmožnost odstranjevanja onesnažil iz zemlje in akumulacije le-teh v nadzemnih delih (fitoekstrakcija). Možno bi bilo proizvajati tudi biodiesel iz sončničnega olja, vendar so potrebe po sončničnem olju za prehrano ljudi tako velike, da ni zadostne produkcije še za biodiesel (Kötschau in sod., 2014).

Sončnica ima razvejano korenino z veliko črpalno močjo za hranila in vodo. Steblo ima premer 2-4 cm in je obraslo z dlačicami, s starostjo postane olesenelo. Oljne sorte so visoke 1-2 m, krmne so višje. Veliki srčasti listi z dolgimi peclji so na stebelu nameščeni spiralno in so prav tako hrapavi in dlakavi. Glavni oprasovalci so čebele in čmrlji, ki jih privlači z zlato do rdečerumenimi venčnimi listi (Sončnica, 2016).

Za uspešno rast potrebuje sončnica globoka, rodovitna in rahla tla, s pH med 6-8. Sončnica uspešno raste pri temperaturi okrog 20 °C, rastna doba je med 70-150 dni. Sončnica potrebuje za rast zadostne količine dušika, ki pa jih ne more pridobiti z bakterijsko fiksacijo dušika. Pomanjkanje dušika zavira rast in razvoj sončnice v revnih tleh (Sončnica, 2016).

2.2 MINERALNA VOLNA

Kamena volna (prištevamo jo med mineralno volno) je anorganski vlaknast material, narejen iz obdelane kamnine in spada v skupino MMMF (angl. *man-made mineral fibers*) (priloga A) (Costa, 2012). Mineralna volna kot izolacijski material je bila prvič proizvedena leta 1935 (Bussell in McKennie, 2004).

Mineralno volno proizvajajo iz magmatske (bazalt in diabaz) in karbonatne kamnine (dolomit), z dodanim koksom, pri temperaturi taljenja 1600 °C. Z razpihovanjem taline in hitrim ohlajanjem nastajajo vlakna, ki jih običajno povežejo z dodajanjem veziva (Aure, 2016; Fonteno in Nelson, 1990). Dandanes se uporabljajo tudi veziva na biološki osnovi brez formaldehida, fenolov in akrilov (Knauf Insulation, 2016). Ob dodatku veziva dobi mineralna volna značilno sivozeleno barvo. Proizvajajo jo v obliki plošč, lamel, rol...

Materiali iz mineralnih vlaken so široko uporabljeni predvsem za toplotno in zvočno izolacijo, v gradbeništvu, tehniki in industriji. Izolacija iz mineralne volne ne trohni, se ne stara, je negorljiva in obstojna pri visokih temperaturah. Zaradi vlaknaste zgradbe so

materiali lahko potencialno škodljivi človeškemu zdravju, zaradi možnosti vdihavanja majhnih delcev v pljuča, podobno kot pri azbestu (Costa 2012).

Mineralno volno prištevamo med porozni material. Vlakna imajo v povprečju premer 4 μm , gostota kamene volne se giblje med 40 in 100 kg/m^3 . Orientacija vlaken v mineralni volni se med proizvodi lahko razlikuje, lahko je vertikalna ali horizontalna. Mineralna volna je sterilna in kemijsko inertna, s pH vrednostjo 7,5 in nizko električno prevodnostjo ($\text{EC} = 50\text{-}100 \mu\text{S/cm}$) (Bougoul in sod., 2005). Ima velik delež majhnih zračnih prostorov oz. por (ang. *total pore space*; nad 95 v/v %,) in velik volumen zraka (ang. *air volume*; nad 50 v/v %) (Dannehl in sod., 2015).

2.2.1 Mineralna volna in kmetijstvo

Dandanes se za vzgojo rastlin na intenzivni ravni uporabljajo rastni substrati, ki vsebujejo različne nadomestke zemlje in šote. Uporaba substratov brez tal (ang. *soilless culture system*, SCS) omogoča predvsem natančnejše nadzorovanje potreb rastlin po mineralih in vodi ter zmanjša možnost kontaminacije rastnih substratov z mikroorganizmi (Bougoul in sod., 2005; Gruda, 2009). Začetki uporabe mineralne volne v hortikulturi segajo v leto 1969, ko so razvili mineralno volno primerne gostote, ki omogoča rast rastlin v tem mediju in z dodatkom aditivov, ki povečajo absorpcijo vode. Mineralna volna se uporablja v hidroponiki, za propagacijo rastlin in kot rastni substrat (Bussell in McKennie, 2004). Dostopna je v obliki plošč, kock, valjev... Mineralna volna velja za inerten, sterilen in homogen medij (Dannehl in sod., 2015).

Po besedah Olle in sod. (2012) se v današnjih časih v največjih deležih hidroponskega načina pridelovanja zelenjave uporabljajo anorganski substrati. Za najbolj uporabljen rastni medij za hidroponiko velja mineralna volna, zaradi kemijske in biološke inertnosti ter prostega odvodnjavanja (drenaže), ki omogoča pogosto namakanje in tudi regulacijo razmerja vsebnosti zraka in vode v rastnem mediju (Olle in sod., 2012).

Na trgu je dostopna mineralna volna tudi v obliki granul in kock, ki se jih primeša rastnemu substratu; lahko pa se jih uporablja tudi samostojno, brez dodanega substrata (Dowgert, 2016; Urbanscape, 2016). Dodatek mineralne volne vpliva na večjo vodno kapaciteto substrata in prezračevanje (Bussell in McKennie, 2004; Olle in sod., 2012).

2.2.2 Kocke in kosmiči mineralne volne

Kocke in kosmiči mineralne volne primešani v rastne substrate izboljšujejo vodno-zračni režim tal in s tem povečujejo sposobnost zadrževanja vode. Voda se ujame med vlakna in se v tla sprošča postopoma. Kocke in kosmiči brez dodanih veziv z rahljanjem tal in zadrževanjem vode ustvarjajo optimalne razmere za rast in razvoj rastlin. Rastline v takih substratih razvijejo močan koreninski sistem in močan nadzemni del. Mineralna vlakna imajo premer okrog 6 μm , kocke so dimenzij 2 x 2 x 2 cm, velikost kosmičev je med 3-20 mm. Uporabo mešanice mineralne volne z zemljo se priporoča za

oplemenitenje tal vrta, za izboljšanje zemlje na njivah, za gojenje rastlin v cvetličnih lončkih, za balkonski zelenjavni vrt, za sajenje posodovk v večja korita (Dowgert, 2016; Urbanscape, 2016).

2.2.3 Mineralna volna primešana v rastni substrat

Ob iskanju znanstvene literature iz omenjenega področja na »Web of science« in »ScienceDirect« smo ugotovili, da je raziskovalnih člankov, ki se nanašajo na mineralno volno primešano v rastni substrat in vpliv mešanice rastnega substrata na rast raslin izredno malo. Gre za področje, ki ni aktualno, večina mineralne volne se uporablja v intenzivni pridelavi zelenjave v sistemih gojenja brez dodanih tal, poleg tega pa je število raziskav omejeno predvsem zaradi skrivanja informacij s strani podjetij (patenti na komercialne izdelke). Najdene znanstvene študije so v večini primerov nedostopne, z redkimi izjemami (Hanan, 1983; Dubský in Šrámek, 2009; Šušek in sod., 2015). V študijah se osredotočajo predvsem na fizikalne lastnosti uporabljenih rastnih substratov s primešano mineralno volno. Zaradi pomanjkljive literature v večini primerov nismo mogli primerjati rezultatov naših poskusov z že objavljenimi raziskavami.

Študija, ki je v največji meri podobna našim poskusom je, študija Šuška in sod. (2015). V študiji so preučevali vpliv različnih oblik mineralne volne (koluti mineralne volne debeline 4 mm oz. 2 mm in kocke mineralne volne) dodane v tla na lastnosti zadrževanja vode v rastnem substratu in na rast pelargonij. V tla so primešali različne odstotke mineralne volne (20 % mineralne volne in 80 % tal; 40 % mineralne volne in 60 % tal; 60 % mineralne volne in 40 % tal oz. kolute različnih debelin in 100 % tal). Tekom celotnega poskusa so, na osnovi tehtanja, spremljali zadrževanje vode v rastnem substratu v izpostavitvah brez rastlinskega pokrova. Ugotovili so, da je rastni substrat brez rastlinskega pokrova z dodatkom 60 % kock mineralne volne tekom celotnega poskusa zadrževal največje količine vode, v primerjavi s preostalimi izpostavitvami in kontrolno izpostavitvijo (100 % tla). Ob koncu poskusa je omenjeni rastni substrat vseboval 1,5 x večji volumen vode kot kontrolni substrat. Po drugi strani pa je najmanjši volumen zadrževane vode vsebovala izpostavitev brez rastnega pokrova z dodatkom 60 % kock in 40 % tal. Podatki o zadrževanju vode v substratih, kjer so rasle pelargonije, podatki niso bili podani. Ob koncu poskusa so analizirali tudi vpliv na morfološke značilnosti pelargonij. Ugotovili so, da se sveže in suhe mase nadzemnih delov in korenin pelargonij pri različnih izpostavitvah med seboj statistično ne razlikujejo (Šušek in sod., 2015).

Dubský in Šrámek (2009) so v študiji preučevali vpliv dodatka 35 % zdrobljene mineralne volne kot nadomestka šote, v različne rastne substrate (šota, šota in kompost, šota in smrekovo lubje), na fizikalne in kemijske lastnosti rastnega substrata ter na rast izbranih trajnic (*Salvia nemorosa* cv. Tesqui cola, *Erigeron speciosus* cv. Rosa Juwel, *Veronica incana*, *Veronica porphyriana* in *Lychnis viscaria* cv. Atropurpurea).

Ugotovili so, da ime dodatek mineralne volne v različne rastne substrate vpliv na spremenjene fizikalne lastnosti substratov – poroznost, lahko dostopna voda, volumen zraka, zadrževalna kapaciteta vode, vsebnost organske snovi. Na svežo maso izbranih trajnic dodatek mineralne volne v rastne substrate ni imel statistično značilnega vpliva (Dubský in Šrámek, 2009).

Večina znanstvenih študij, ki smo jih našli, se osredotoča na področje hidroponike in uporabe mineralne volne oz. različnih drugih nadomestkov za gojenje različne zelenjave (paradižnik, paprika) in sadja (jagode). Študije se osredotočajo na primerjave različnih rastnih substratov (npr. kokosova vlakna, riževa stebila, perlit, agrotekstil, mineralna volna...). Pri tem je preučevanje vpliva rastnih substratov na mineralno prehrano izbranih rastlin manj relevantno, zaradi dodajanja mineralne hranilne raztopine v rastne medije. Večina študij se za ocenjevanje vpliva rastnega substrata osredotoča na produktivnost (suha masa nadzemnih delov, plodov...) rastlin, kot pa na kemijske lastnosti rastlin (prisotnost primarnih oz. sekundarnih metabolitov, mineralna sestava...). Primerjave rezultatov naših poskusov z omejenimi študijami tako niso mogoče.

2.2.4 Industrija mineralne volne v Evropi

Industrija mineralne volne v Evropi je obsežna in zajema proizvodnjo steklene in kamene volne. Preglednica 1 prikazuje pet glavnih proizvajalcev v EU, ki zavzemajo 95 % celotne produkcije mineralne volne (Öko-Institut, 2009).

Preglednica 1: Največji proizvajalci kamene in steklene volne v Evropski Uniji.

Proizvajalci v EU	Država
Saint-Gobain,	Francija
Rockwool International	Danska
Paroc Group	Finska
URSA	Španija
Knauf Insulation	Nemčija

Zaradi omejenega števila proizvajalcev, patentov ter tržne usmerjenosti so podatki o proizvodih precej omejeni (Öko-Institut, 2009), prav tako tudi različne študije o vplivu mineralne volne na rast rastlin.

Prvi proizvajalec mineralne volne za hortikulturo je bilo dansko podjetje Grodan (v lasti skupine Rockwool). Ostali večji proizvajalci hortikulture mineralne volne so še Cutilene (FR), Growool (Australia) in Vacroc (SK) (Bussel in McKennie, 2004).

2.3 TLA

Tla so kompleksni medij, ki je zgrajen iz trdne, tekoče in plinaste faze (White, 2012) ter raznolikih združb organizmov in mikroorganizmov (Hopkins in Hüner, 2008). Trdna faza je sestavljena iz različnih anorganskih mineralnih delcev, ki izvirajo iz kamnin ter organskih ostankov, ki se nahajajo v različnih stopnjah razgradnje. Mineralni elementi so za rastline primarni vir hranil. Zaradi različnih vplivov (npr. vremenski pojavi, človeška dejavnost, vpliv rastlin...) se številni elementi sprostijo v vodno raztopino v tleh in s tem postanejo rastlinam dostopni (Hopkins in Hüner, 2008).

V tleh so prisotni koloidni delci peska, mulja, glin in humusa. Zanje je značilna velika specifična površina in negativni naboj. Tla imajo kationsko izmenjevalno kapaciteto, kar odraža zmožnost razpoložljivost vezavnih mest za katione na omenjene delce v tleh. Nabiti minerali se začasno vežejo na koloidne delce z različno afiniteto vezave. Najmočnejše se vežejo aluminijevi ioni (Al^{3+}), sledijo vodikovi (H^+), kalcijevi (Ca^{2+}), magnezijevi (Mg^{2+}), kalijevi (K^+) in amonijevi (NH_4^+) ter z najnižjo afiniteto vezave natrijevi (Na^+) ioni. Zaradi kationske izmenjevalne kapacitete tal prihaja do zapoznelega sproščanja mineralov v vodno raztopino in posledično manjše biodostopnosti mineralov (Hopkins in Hüner, 2008). V tleh tako nastajajo cone pomanjkanja (Marschner in Rengel, 2012). Pri normalnih pogojih izločajo rastline v tla H^+ , ki se z večjo afiniteto vezave vežejo na koloidne delce in s tem sprostijo ostale vezane ione (Hopkins in Hüner, 2008).

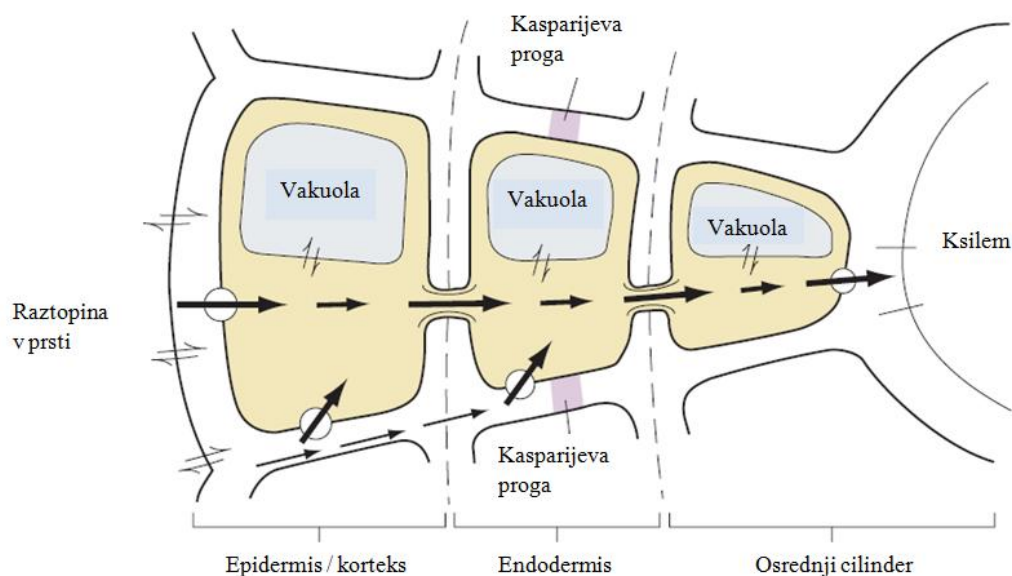
Hranila prehajajo po tleh z masnim tokom vode (poganja ga rastlinska transpiracija) in difuzijo (gonilna sila je koncentracijski gradient snovi), po drugi strani pa korenine z rastjo dosežejo hranila v različnih predelih tal (Marschner in Rengel, 2012).

Koncentracija hranil v tleh se spreminja in je odvisna od vsebnosti vode v tleh, globine tal, pH, kationske izmenjevalne kapacitete tal, količine koloidnih delcev, mikrobne aktivnosti in dodatka gnojil. V splošnem velja, da je v prezračenih tleh z nevtralnim pH koncentracija Ca, Mg, sulfata (SO_4^{2-}) in nitrata (NO_3^-) razmeroma visoka, koncentracija NH_4^+ in fosfata (PO_4^-) pa nizka. Koncentracije mikroelementov (mangan (Mn), železo (Fe), cink (Zn), baker (Cu)) v raztopini v tleh je odvisna predvsem od pH tal, redoks potenciala in prisotnih organskih snovi. Ob nižjem pH so omenjeni mikroelementi dostopnejši (Marschner in Rengel, 2012).

Rastline črpajo vodo z raztopljenimi hranili s pomočjo koreninskega sistema. Voda z raztopljenimi hranili potuje preko različnih slojev korenine; preko povrhnjice, eksodermisa, korteksa do endodermisa in nato z žilnim prevodnim sistemom (ksilem) v nadzemne dele (slika 1) (Marschner in Rengel, 2012). Rastline potrebujejo hranila za rast in obstoj in jih akumulirajo v svojih tkivih. Zaradi genetske raznolikosti, različnih fizioloških in razvojnih potreb ter okoljskih faktorjev se potrebe po hranilih med rastlinskimi vrstami razlikujejo. Nekateri minerali so za posamezne rastline odvečni ali

celo strupeni, zato imajo rastline razvite mehanizme za selektivni privzem hranil (White, 2012).

Ob pomanjkanju vode v tleh prihaja do zaviranja rasti korenin zaradi mehanskega upora in omejenega privzema hranil. Rastline in mikroorganizmi v rizosferi so se prilagodili na sušo s sintezo in izločanjem eksopolisaharidov, ki izboljšajo kontakt med tlemi in koreninami ter neposredno vplivajo na difuzijo in masni tok (Marschner in Rengel, 2012).



Slika 1: Potovanje ionov po prečnem prerezu korenine, po apoplastni (preko celične stene) ali simplastni poti (preko citoplazme in plazmodezm) (prirejeno po Hopkins in Hüner, 2009).

2.4 PRIVZEM HRANIL

2.4.1 Fiziologija privzema hranil

Transport vode in raztopljenih snovi po korenini poteka po apoplastni ali/in simplastni poti (slika 1).

Po apoplastni poti vstopajo hranila preko začasne vezave na nabite skupine pektinov v celičnih stenah koreninskih celic. Pozitivno nabiti ioni (hranila) se vežejo na ostanke karboksilnih skupin ($R-COO^-$), ki delujejo kot kationski izmenjevalci. S takim načinom transporta je omogočena minimalna selektivnost privzema. Rastline se razlikujejo po zmožnosti kationske izmenjevalne kapacitete v celični steni; navadno imajo dvokaličnice večjo izmenjevalno kapaciteto kot enokaličnice. Radialni transport po apoplastu je pomemben za Ca, Na, Zn, Fe in Cd ione (White, 2012a).

Raztopljena hranila lahko potujejo po korenini tudi s transportom po simplastu. Transport po simplastu se lahko prične v rizodermu, eksodermu ali endodermu; povsod pa morajo hranila prečkati celično membrano. Nadaljnji transport topljencev poteka po citoplazmi celic skozi plazmodezme, ki povezujejo sosednje celice. Transport po simplastu poteka predvsem zaradi difuzije in valovanja citoplazme (ang. *streaming*). Med transportom po simplastu se lahko hranila metabolizirajo ali shranijo v vakuolah koreninskih celic. Vakuole lahko odstranijo toksične elemente, ki potujejo po simplastu. Preferenčna akumulacija Ca, Cd, molibdenovih (Mo) in Al ionov v koreninah omejuje translokacijo elementov do nadzemnih delov (White, 2012a).

Molekule vode prehajajo koreninske celice po apoplastni ali simplastni poti. Prehod vode skozi celice je pospešen z akvaporini, ki so prisotni v celičnih membranah (White, 2012a).

2.4.1.1 Prečkanje celične membrane

Glavna selektivnost privzema hranil poteka s pomočjo plazemske membrane in raznolikimi membranskimi proteini. Celična membrana ima zaradi izpostavljenih fosfatnih skupin negativni potencial, kar vpliva na prost prehod snovi. Glavni kriterij raznolikosti v privzemu hranil so lastnosti topljenca, torej njihov velikost in naboj. Le nekatere nizko-molekularne in nenabite molekule (npr. O₂, CO₂, NH₃) lahko prehajajo membrano prosto z difuzijo ali masnim tokom, za večino ionov in večjih molekul pa je lipidni dvosloj nepermeabilen in ga lahko prečkajo le s pomočjo membranskih proteinov. Membranske proteine razdelimo v 3 skupine. (White, 2012a):

- **Kanalčki:** gre za pasivni transport, kjer je gonila sila elektrokemijski gradient za nabite topljence oz. koncentracijski gradient za nenabite molekule. Kanalčki so zelo specifični, med transportom se konformacijsko ne spremenijo. Transport ionov je izredno hiter, gre za pospešeno difuzijo snovi.
- **Prenašalci:** so del pasivnega ali aktivnega (sekundarnega) transporta. Pri transportu specifičnih snovi se konformacijsko spremenijo. Prenašalci prenašajo molekule hitreje kot črpalke.
- **Črpalke:** so del aktivnega (primarnega) transporta in za delovanje potrebujejo ATP. Prenos molekul s pomočjo črpalk je relativno počasen, ob transportu molekul se konformacijsko spremenijo.

2.4.1.2 Transport na dolge razdalje

Transport na dolge razdalje v rastlinah poteka s ksilemom in floemom. Po ksilemu se transportira voda z raztopljenimi nizko-molekularnimi hranili od korenin do nadzemnih delov, transport poganja vodni gradient vode. Po floemu poteka transport od virov fotosintatov do ponorov, gonilna sila pa je koncentracijski gradient snovi. Transport tekočine po žilnem sistemu ksilema in floema ima več pomembnih vlog: zagotavljanje

mineralne prehrane nadzemnim delom in prerazporeditev esencialnih elementov med tkiva, vzdrževanje ravnovesja v naboj, odstranjevanje toksičnih in odpadnih elementov ter signaliziranje o prehranskem statusu rastline. Med transportom po rastlini se hranila obsežno prenašajo med ksilemom in floemom. Izmenjava poteka tekom cele rastline, pomembno vlogo ima steblo (White, 2012a).

Hranila se nalagajo v ksilem s pomočjo proteinskih prenašalcev. Minerali se po ksilemu prenašajo v ionskih oblikah (nitrati, fosfati, sulfati...), nekateri pa v kompleksih z organskimi kislinami (White, 2012a). Pri transportu po ksilemu lahko prihaja do (začasne) adsorpcije kationov na celične stene ksilemskih celic. Zaradi interakcij prihaja do zapoznele/prekinjene translokacije elementov, kar lahko zaščiti nadzemne dele pred toksičnimi elementi. Večina vode in topljencev se po ksilemu prenaša do listov, kjer se s pomočjo proteinskih prenašalcev prenesejo v citoplazmo (za metabolizem) ali vgradijo v celične stene (White, 2012b).

Po floemu se prenašajo predvsem organske snovi (saharoza, aminokisline, organske kisline, RNA, proteini, hormoni, sekundarni metaboliti), in se nalagajo v floem v steblih in listih. Floemski sok potuje do ponorov (korenine, plodovi, vršički nadzemnih delov), kjer je pomanjkanje organskih snovi. Mobilnost makrohranil (K, Mg, P, S, organski N) po floemu je visoka, mikrohranil (Fe, Zn, Cu, B, Mo) srednja, z izjemo Ca in Mn, ki sta nemobilna (White, 2012b).

Tekom vegetativne rasti ali v času reprodukcije lahko prihaja do nezadostne oskrbe tkiv z minerali, zato lahko rastlina mobilne elemente prerazporeja po tkivih. Remobilizacija hranil poteka iz zrelih listov v novo rastoča tkiva. Neučinkovita remobilizacija (kot posledica nemobilnosti elementov) se vidi v simptomih pomanjkanja pri mladih listih in apikalnih meristemih (White, 2012b).

2.4.2 Dejavniki, ki vplivajo na privzem hranil

Na privzem biodostopnih hranil v celice vplivajo, poleg lastnosti topljencev, še tla in rastline.

Rastline vplivajo posredno in neposredno na privzem hranil z zgradbo celične stene, integriteto membrane in prisotnostjo membranskih proteinov, regulacijo visoko afinitetnih membranskih proteinov, zmožnostjo izločanja eksudatov za vezavo mikroelementov, zmožnostjo zakisanja rizosfere, prisotnostjo koreninskih laskov... (Puig in Penarrubia, 2009; White, 2012a). Poleg omenjenega je v rizosferi - to je območje tal v bližini korenine, prisotna mikrobna združba, ki lahko ugodno vpliva na privzem hranil. Mikroorganizmi lahko kolonizirajo rastlinske korenine. Mikroorganizmi imajo pomembno vlogo pri kroženju snovi ter sproščanju in pretvorbi anorganskih hranil (npr. z raztapljanjem, oksidoredukcijskimi reakcijami) (Marschner, 2012). Znano

je tudi, da rastline stimulirajo mikrobno rast in njihovo aktivnost z izločanjem različnih izločkov v rizosfero (Beauregard in sod., 2012).

Pomembne lastnosti tal, ki vplivajo na privzem in biodostopnost hranil so: sestava in struktura tal, prisotnost koloidnih delcev in organske snovi, pH tal, kationska izmenjevalna kapaciteta tal in biološka aktivnost v rizosferi. Ob večji gostoti tal prihaja do večjega stika med koreninami in tlemi, kar pozitivno vpliva na privzem hranil. Po drugi strani pa večja gostota oz. zbitost tal zavira rast korenin, saj je penetracija ovirana, pojavljajo pa se tudi cone s pomanjkanjem kisika, ki omejuje rastlinsko dihanje. (Marschner in Rengel, 2012).

2.4.2.1 Vpliv pH

Na privzem hranil pomembno vpliva pH. Za privzem hranil je pomemben predvsem: (White, 2012a)

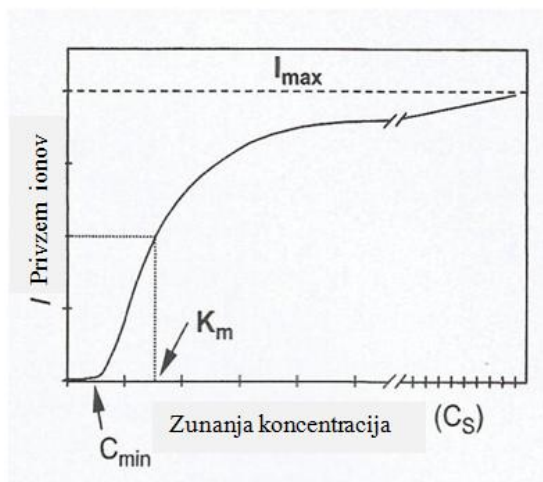
- pH celične stene ima vpliv na naboj vezavnih mest v celični steni. V primeru nižjega pH celične stene se več H^+ protonov veže na vezavna mesta, s tem pa se zmanjša selektivnost privzema. Poleg tega vpliva pH tudi na stabilnost transportnih proteinov v celični membrani.
- pH raztopine vpliva na kemijsko obliko prisotnih raztopljenih hranilnih snovi, po drugi strani pa so membranski proteini specifični za določene kemijske oblike.
- pH rizosfere. pH rizosfere ima vpliv na a) protonski H^+ elektrokemijski gradient, ki je pomembna gonilna sila za aktivni transport topljencev, in na b) topnost nutrientov.
 - a) Zaradi aktivnega transporta hranil v celico prihaja do spremembe v pH rizosfere. Rastline v največji meri privzemajo iz tal N; glede na preferenčno privzeto ionsko obliko dušika, prihaja do spremembe pH rizosfere. Ob nižjem pH je na razpolago veliko H^+ , zato se poveča aktivni transport (simport) anionov (nitrato) v celico; posledično prihaja do zmanjšanja razpoložljivih H^+ v rizosferi in višanja pH. Po drugi strani je ob višjih pH značilen povečan privzem kationov (amonij) z aktivnim transportom (antiport), kot posledica se H^+ sproščajo v rizosfero in prihaja do nižanja pH rizosfere.
 - b) V bazičnih tleh prihaja do večanja negativnega naboja osnovnih delcev, določeni minerali se obarjajo in s tem postanejo nedostopni. Pri bazičnih pH je tako dostopnost Zn, Fe, Mn, Cu in B zelo nizka. V kislih tleh je po drugi strani v splošnem značilna visoka topnost mineralov, vendar je rast rastlin lahko ovirana s toksično koncentracijo Al in Mn.

2.4.2.2 Vpliv metabolne aktivnosti in prehranskega statusa rastline

Za privzem hranil z aktivnim transportom je potrebna energija, zato mora biti rastlina v dobrem energijskem statusu. Rastline pridobivajo energijo z izkoriščanjem sintetiziranih fotosintatov, zato vsi faktorji, ki vplivajo na dihanje, posledično vplivajo tudi na privzem hranil. Na privzem hranil vpliva tudi stopnja rasti. Ob intenzivni rasti je značilna povečana koncentracija saharoze, ki se s floemom transportira v korenine, kar sproži povečano izražanje proteinskih prenašalcev za privzem mineralnih hranil. (White, 2012a).

2.4.2.3 Vpliv razpoložljivosti hranil v rizosferi

Na stopnjo privzema hranil vpliva koncentracija hranil v tleh (slika 2). V tleh mora biti prisotna minimalna koncentracija hranila ($c_{\min}$), da lahko korenine privzemajo ione iz vodne raztopine v tleh. Vrednosti $c_{\min}$ za hranila se med rastlinskimi vrstami razlikujejo (White, 2012a). Pri nižjih koncentracijah hranil je privzem bolj selektiven, pri višjih pa manj.



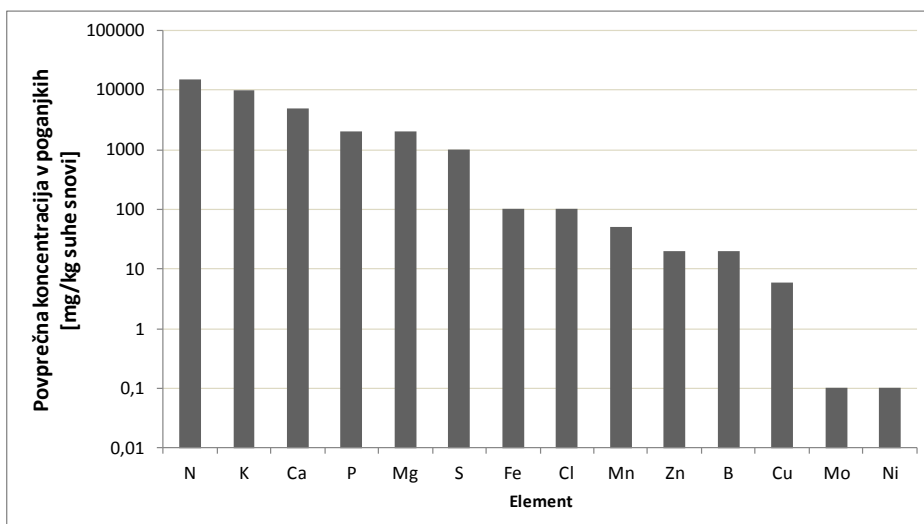
Slika 2: Odvisnost stopnje privzema ionov (I ; ang. *uptake rate*) od zunanje koncentracije hranil (c_s); $c_{\min}$ – stopnja privzema je nič (tok v celico je enak toku iz celice) (prirejeno po White, 2012a: 12).

2.4.2.4 Vpliv interakcije med ioni v rizosferi

Ker vsi membranski proteini niso strogo specifični, lahko prihaja do tekmovanja med ioni, zaradi podobnih fizikalno-kemijskih lastnosti hranil. Korenine zato povečini niso zmožne izločiti nekaterih neesencialnih ali potencialno strupenih ionov, ki potujejo po simplastni poti. Zaradi slabše selektivnosti se velikokrat akumulirajo težke kovine v koreninah, ki se nato s prehrano prenašajo naprej po prehranjevalni verigi (White, 2012a).

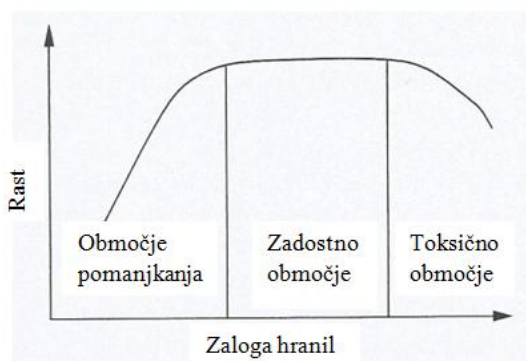
2.5 MINERALNA PREHRANA

Rastlinam predstavljata ogljikov dioksid in voda najpomembnejši vir C, H in O, preostale anorganske elemente (minerale) pa privzemajo iz tal (Hopkins in Hüner, 2008). Povprečno koncentracijo mineralov v suhi masi rastlinskih tkiv (nadzemni deli), ki zadostuje za učinkovito rast, prikazuje slika 3, graf narejen v logaritemski skali (Kirkby, 2012).



Slika 3: Povprečna vsebnost makro in mikrohranil v nadzemnih delih rastlin (prirejeno po Kirkby, 2012).

Za uspešno rast rastlin je potrebna primerna koncentracija hranil v tleh. Slika 4 ponazarja vpliv koncentracije hranil na rast rastlin. Razdeljena je na tri območja: i) območje povečane rasti v odvisnosti od povečevanja koncentracije hranil (t.i. območje pomanjkanja) ii) območje maksimalne rasti (t.i. zadostno območje), kjer se rast v odvisnosti od povečevanja koncentracije hranil ne povečuje iii) območje, kjer rast upada z naraščajočo koncentracijo (t.i. toksično območje) (Römheld, 2012). Toksično območje je v primeru makrohranil težje doseči, v primerjavi z mikrohranili (Hopkins in Hüner, 2008).



Slika 4: Odvisnost rasti od koncentracije hranil (prirejeno po Römheld, 2012).

Elemente, ki jih vse rastline potrebujejo za uspešno rast, metabolizem in zaključen življenjski cikel imenujemo esencialni elementi, ki jih razdelimo na mikro in makrohranila. V primeru pomanjkanja esencialni elementov je rast rastlin omejena ali zavrta (Hopkins in Hüner, 2008). Elemente, ki jih potrebujejo le določene rastlinske vrste, imenujemo koristni elementi. V nizkih koncentracijah ugodno vplivajo na rast rastlin, izboljšujejo odpornost na biotski (patogeni organizmi, rastlinojedci) in abiotski stres (suša, slanost). Znan je večji poudarek znanosti na prevelike koncentracije omenjenih elementov, ki izzovejo toksične učinke, kot pa preučevanje nižjih koncentracij koristnih elementov (Pilon-Smits in sod., 2009). Med najbolj raziskane ugodne elemente prištevamo Na, Al, silicij (Si), selen (Se) in kobalt (Co) (Hopkins in Hüner, 2008; Broadley in sod., 2012b).

Rastline imajo razvite učinkovite mehanizme za uravnavanje homeostaze v svojih tkivih, saj neprimerna koncentracija hranil lahko povzroči strupenost. Pomembno je časovno in prostorsko uravnavanje pridobivanja, razporeditve in izločanja (mikro)elementov, saj se tekom rasti in razvoja različnih tkiv pojavljajo različne potrebe po (mikro)elementih. Raznolikost transporterjev odraža raznolikost rastlinskih potreb po zagotavljanju homeostaze. Vakuole so pomembni organeli, ki služijo razstrupljanju, po drugi strani pa so pomembne kot shramba za kovine, ki jih bodo rastline remobilizirale v času večjih potreb po hranilih (Puig in Penarrubia, 2009). Vakuola zavzema 80-90% celičnega volumna in ima tako kot celična membrana prisotne raznolike transporterje v membrani (White, 2012a).

2.5.1 Določanje pomanjkanja mineralov

Dobra rast rastlin se odraža v izgledu, kemijski sestavi tkiv, zdravih in odpornih rastlinah, visoki produktivnosti in različnih agronomskih spremenljivkah (npr. translokacija elementov ob pomanjkanju, zmanjšan privzem toksičnih snovi...) (Huber in sod., 2012).

Vidni simptomi pomanjkanja esencialnih mineralov se navadno pokažejo ob večjih in akutnih pomanjkanjih. Simptomi pomanjkanja se lahko pojavljajo na mladih ali starih listih, kar je odvisno od mobilnosti elementov (Römheld, 2012). Med tipične simptome pomanjkanja prištevamo kloroze (rumenenje listov zaradi izgube klorofilov), nekroze (odmrli tkiva) in deformacije. Simptomi pomanjkanja mineralov se kažejo na rastlini v obliki simetričnih vzorcev (npr. listi na enaki poziciji na rastlini), po drugi strani pa so simptomi, ki so povzročeni z boleznimi, prisotni v obliki nesimetričnih vzorcev in naključno razporejeni po rastlini (Römheld, 2012).

Za lažje določanje pomanjkanja oz. prisotnosti biodostopnih mineralov se izvaja kemijske analize. Analizirajo se rastlinska tkiva v času intenzivne rasti in visokega privzema mineralov (Römheld, 2012).

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIAL

3.1.1 Sončnica

Za izvedbo poskusa smo uporabili sončnična semena »Bonami«, namenjene krmljenju zunanjih ptic, z rokom uporabe najmanj do konca leta 2016.

3.1.2 Substrat Tonsubstrat

Organski substrat za rože »Tonsubstrat 70 l« je mešanica slabo do srednje razgrajene bele šote (H2 - H5), zelo razgrajene premrznjene črne šote (H6 - H8) in glinenih zrn. Po deklaraciji nemškega proizvajalca Klasmann-Deilmann GmbH ima substrat pH vrednost (v vodni osnovi) 5,5-6,5 in električno prevodnost 40 mS/cm ($\pm 25\%$). Razmerje med gnojili N:P:K znaša 14:10:18. Uporablja se za vzgojo lončnic in za druge balkonske rastline ter enoletnice. Z zatehtanimi količinami substrata Tonsubstrat (360 g) smo napolnili cvetlične lončke s premerom 16 cm (slika 5).



Slika 5: Uporabljen substrat Tonsubstrat in cvetlični lončki.

3.1.3 Njivska tla

Jeseni 2015 smo nabrali večjo količino njivskih tal iz krtin na travniku v bližini Radovljice. Tla z območja nabiranja so evtrična (nakazuje na bazičnost oz. nevtralnost tal) rjava tla, nastala na pretežno karbonatnih ledenodobnih prodnatih in peščenih nasutjih reke Save. Vzorci tal vzeti iz krtin na površju so del A horizonta, ki je humusno akumulativni horizont s peščeno ilovnato teksturo (ARSO, 2016). Tla so bila pred izvedbo poskusov suha in enakomerno premešana. Z zatehtanimi količinami njivskih tal (360 g) smo napolnili cvetlične lončke s premerom 11 cm (slika 6).



Slika 6: Njivska tla in uporabljeni cvetlični lončki.

3.1.4 Mineralna volna v obliki kock in kosmičev

Uporabili smo kocke in kosmiče mineralne volne brez dodanih veziv, ki so razviti izključno za vrtnarjenje in rastlinsko pridelavo. Izdelki so namenjeni mešanju s peščeno ali ilovnato vrtno zemljo, v priporočenem razmerju 1:5 (mineralna volna:zemlja).

3.2 METODE DELA

Sončnična semena smo posadili v lončke z rastnim substratom. Uporabili smo dva različna rastna substrata - substrat Tonsubstrat in njivska tla iz krtin.

Poskus s posameznim rastnim substratom je bil razdeljen na sedem različnih izpostavitvev. V izpostavitvi je bilo pet ponovitev ($n = 5$). Skupno smo za posamezni rastni substrat posadili 35 sončnic. Preglednica 2 prikazuje mase dodanih tal in kock oz. kosmičev, pri posameznem rastnem substratu.

Preglednica 2: Zasnova poskusa, za posamezni rastni substrat.

Izpostavitev	Masa tal [g]	Masa kock ali kosmičev [g]
Kontrola	360	/
Kocke 20 v/v %	360	10
Kocke 40 v/v %	360	20
Kocke 60 v/v %	360	30
Kosmiči 20 v/v %	360	10
Kosmiči 40 v/v %	360	20
Kosmiči 60 v/v %	360	30

Izpostavitve z različnimi volumskimi odstotki dodanih kock ali kosmičev mineralne volne (20 v/v %, 40 v/v % ali 60 v/v %) in kontrola (rastni substrat brez mineralne volne) predstavljajo različne rastne pogoje za rast sončničnih semen. Odstotki dodanih kock ali kosmičev vedno predstavljajo volumske deleže rastnega substrata, četudi je oznaka zgolj %.

Na cvetlični lonček smo z merilnim valjem odmerili 400 ml njivskih tal in jo stekali. Masa je znašala 360 g. Za dodajanje različnih odstotkov mineralne volne smo v merilni

valj dodali kocke, 60 % volumna zemlje (240 ml) in stehali vsebino (30 g). Za izpostavitve z 20 v/v% in 40 v/v% dodanih kock ali kosmičev smo glede na maso odmerjenih kock zatehtali preostale dodatke mineralne volne (kocke ali kosmiče) in jih primešali rastnemu substratu. Substratu z 20 v/v% mineralne volne smo dodali 10 g dodatkov mineralne volne (kocke ali kosmiči), substratu z 40 v/v% pa 20 g dodatkov mineralne volne (kocke ali kosmiči) (preglednica 2). Pred polnjenjem cvetličnih lončkov z mešanico tal in dodatkov kock ali kosmičev smo mešanico dobro premešali.

Prvi del poskusa, kjer je bil za rastni substrat uporabljen substrat Tonsubstrat, je potekal v času med 1.4. in 9.5.2016. Drugi del poskusa, z uporabljenjo njivsko zemljo, je potekal med 6.5. in 13.6.2016. V obeh primerih smo sončnice gojili skupno 39 dni, v kontroliranem okolju v rastnih komorah Oddelka za biologijo, Biotehniške fakultete. V rastnih komorah je bila zagotovljena konstanta temperatura 21,2 °C, 53 % vlažnost in fotoperioda 16/8 z jakostjo osvetlitve 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Sončnice smo zalivali po potrebi, običajno dvakrat tedensko, z vodovodno vodo.

3.2.1 Merjenje fotokemične učinkovitosti fotosistema II

Tekom poskusa smo pomerili fotokemično učinkovitost rastlin. Meritve smo izvedli z modulacijskim fluorometrom (tip OS-500, Opti-Sciences). Merili smo potencialno fotokemično učinkovitost fotosistema II (FS II) na zatemnjenih delih lista in dejansko na osvetljenih delih lista. Pred merjenjem potencialne fotokemične učinkovitosti smo na liste pritrdili ščipalke za ustvarjanje zatemnjenih predelov lista. Po 20 minutah adaptacije smo list osvetlili s pulzom bele svetlobe in izmerili potencialno fotokemično učinkovitost fotosistema II. Dejansko fotokemično učinkovitost smo merili pri danih pogojih v rastnih komorah.

3.2.2 Priprava rastlin za izvedbo analiz

Po zaključenem poskusu smo sončnice odstranili iz rastnega substrata in korenine sprali z vodovodno in destilirano vodo. Ločili smo nadzemne dele od korenin in stehali svežo maso. Rastlinski material smo zavili v aluminijasto folijo in ga zamrznili v tekočem dušiku. Zamrznjene rastline smo nato posušili v liofilizatorju (SCANVAC). Sončnice smo liofilizirali 5 dni, pri pogojih -95 °C in tlaku 0,003 mBar. Posušen rastlinski material (nadzemne dele in korenine) smo stehali (t.i. suha masa). Po zaključenem poskusu smo shranili tudi del substrata in ga posušili za kasnejše analize.

3.2.3 Analiza mineralov z rentgensko fluorescenčno spektrometrijo (XRF)

Liofiliziran rastlinski material smo strli v terilnicah z dodatkom tekočega dušika in s pomočjo stiskalnega bata naredili tablete s premerom 1 cm za analizo vsebnosti mineralov. Del analize tablet je bil izveden na Biotehniški fakulteti, z uporabo naprave XRF (PDZ-02T, Institut Jožef Štefan, Ljubljana, Slovenija). Preostal del analize je

potekal na Inštitutu Jožef Štefan, na enaki napravi. Analize vsebnosti Si so bile opravljene z izvorom Fe-55 (Nečemer in sod., 2008; Klančnik in sod., 2014).

3.2.4 Analiza vsebnosti fotosinteznih pigmentov

Del rastlinskega materiala (nadzemni deli) smo uporabili za analizo vsebnosti fotosinteznih pigmentov. V centrifugirke smo zatehtali 30 mg uprašenih, liofiliziranih nadzemnih delov, dolili 5 ml 80 % acetona (BDH Prolabo, VWR chemicals) ter dobro premešali. Centrifugirke smo zatesnili z gumijastimi zamaški, označili nivo acetona in jih čez noč shranili v hladilniku na 7 °C. Naslednji dan smo izhlapeli aceton dopolnili do označene črte. Vzorce smo premešali in jih nato dve minuti centrifugirali na 2000 obratih/min pri sobni temperaturi. S spektrofotometrom (UV-1800 SHIMADZU) smo izmerili absorbance pri valovnih dolžinah 470 nm, 647 nm in 664 nm. Kot slepi vzorec smo uporabili 80 % aceton (Monni in sod., 2001). Iz dobljenih absorbanc smo preračunali koncentracije pigmentov (klorofil *a*, klorofil *b* in karotenoidi) v nadzemnih delih sončnic (Graan in Ort, 1984).

Za izračun koncentracije pigmentov v $\mu\text{mol/L}$ smo uporabili naslednje enačbe:

$$chl_a \left(\frac{\mu\text{mol}}{l} \right) = 13,19 \times A_{664} - 2,57 \times A_{647} \quad \dots (1)$$

$$chl_b \left(\frac{\mu\text{mol}}{l} \right) = 22,10 \times A_{647} - 5,26 \times A_{664} \quad \dots (2)$$

$$\Sigma \text{karotenoidov} \left(\frac{\mu\text{mol}}{l} \right) = \frac{1000 \times A_{470} - 1,82 \times chl_a - 85,02 \times chl_b}{198} \quad \dots (3)$$

Za preračun vsebnosti pigmentov v nadzemnih delih v mg/g smo uporabili naslednjo enačbo:

$$\times \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{konc}_{\text{pigmenta}} \times V_{\text{ekstrakta}}}{m_{\text{poganjkov}}} \quad \dots (4)$$

3.2.5 Analiza tal

Po zaključenem poskusu smo vzeli vzorce tal iz vseh izpostavitvev in jih posušili na zraku. Posušenim tlem smo izmerili pH, določili skupno organsko snov in zadrževalno kapaciteto.

Za merjenje pH smo v centrifugirke zatehtali 1 g tal in dodali 10 ml bidestilirane vode. pH smo merili s pH metrom (SevenEasy, METTLER TOLEDO).

Vsebnost skupne organske snovi v tleh smo določali s kromovo metodo in merjenjem absorbance pri 570 nm (Kandeler, 1995). Zatehtali smo 0,2 g posušenih tal, dodali 2 ml

$K_2Cr_2O_7$ (Merck, Nemčija) in 1,5 ml H_2SO_4 (Merck, Nemčija). Vzorce smo pustili v digestoriju dve uri in nato dolili destilirano vodo do skupnih 10 ml. Naslednji dan smo iz vzorcev odvzeli 1 ml raztopine in razredčili s 24 ml destilirane vode. Izmerili smo absorbanco pri 540 nm s spektrofotometrom (UV-1800 SHIMADZU). Iz umeritvene krivulje smo izračunali odstotek skupne organske snovi v tleh.

Zadrževalno kapaciteto tal smo izmerili s pomočjo merilnega valja in znane količine dodane vode. Zatehtali smo 15 g substrata Tonsubstrat oz. 100 g njivskih tal v merilni valj in dodali 200 ml dodane vode. Po eni uri smo odlili vodo, ki se ni vpila v tla in odčitali volumen. Glede na dodano maso tal smo preračunali poljsko kapaciteto tal (g vode/ g tal). Izvedbo meritev smo povzeli po Phytotoxkit, 2016.

3.2.6 Analiza mineralne volne

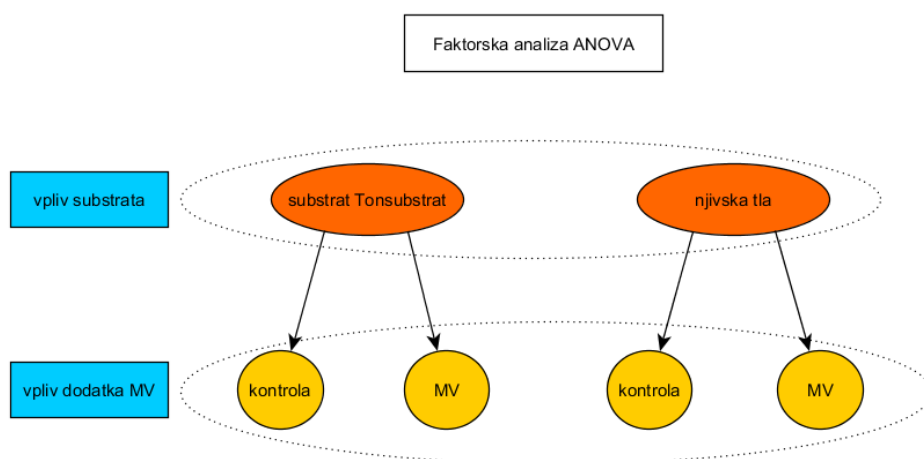
Iz kock in kosmičev mineralne volne smo naredili tablete za analizo vsebnosti mineralov z XRF. Za določanje biodostopnih mineralov iz kock ter kosmičev (masa: 4,0 g) smo naredili izlužke v bidestilirani vodi (volumen: 100 ml), s pH vrednostima 7,5 in 5,0. Za analizo izlužkov smo v epico zamešali 100 μ l vzorca in 50 μ l galija (Merck, Nemčija) s koncentracijo 0,1 g/l. Raztopino smo dobro premešali. Za vsako izpostavitev smo na stekelce nanесли trikrat po 10 μ l pripravljene raztopine. Analiza izlužkov je bila izvedena z napravo TXRF (rentgenska fluorescenčna spektrometrija s popolnim odbojem, *angl. total reflection X-ray spectrometry*) na Inštitutu Jožef Štefan. S konduktometrom (EUTECH Instruments PCD650, Rew: 3000) smo izmerili tudi prevodnost tekočine, v kateri so se izluževali minerali kock in kosmičev.

3.2.7 Statistična analiza

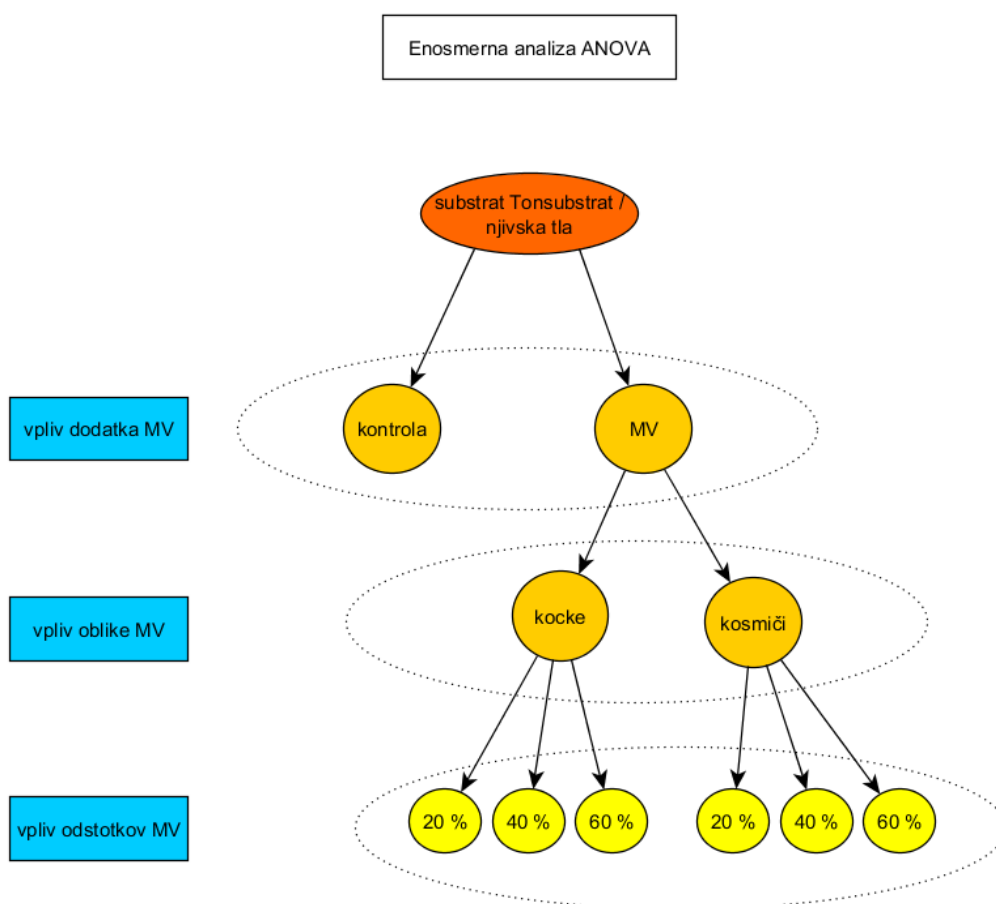
Za analizo podatkov smo uporabili standardne statistične metode. Podatke smo obdelali v programu MS Excel 2007 in programu Statistica (Statsoft 7.0.61.0). Statistično značilne razlike smo določili z Duncanovim testom ali Unequal N HSD testom v programu enosmerna in faktorska analiza ANOVA.

3.2.7.1 Potek statistične obdelave rezultatov

Za statistično analizo pridobljenih rezultatov smo naredili faktorske in enosmerne analize ANOVA. Različni vplivi in postavitve skupin za statistično obdelavo podatkov so predstavljeni na sliki 7 in sliki 8.



Slika 7: Preučevani dejavniki pri faktorski analizi ANOVA – vpliv substrata in vpliv dodatka mineralne volne (MV). Uporabljeni so vsi podatki.



Slika 8: Preučevani dejavniki pri enosmerni analizi ANOVA – vpliv dodatka mineralne volne (MV), vpliv oblike MV in vpliv odstotkov MV. Uporabljeni so podatki iz določenega rastnega substrata.

Za preučevanje, ali na razlike v variabilnosti izmerjenih rezultatov vpliva substrat, dodatek mineralne volne (MV) ali oblika mineralne volne, smo uporabili faktorsko analizo ANOVA. Za faktorsko analizo ANOVA smo uporabili rezultate vseh izpostavitvev, tako iz njivskih tal kot iz substrata Tonsubstrat (slika 7). Če je faktorska analiza ANOVA pokazala na vpliv substrata, smo nato za posamezni substrat naredili še analizo enosmerno ANOVA, kjer smo preverjali statističen vpliv dodatka mineralne volne (slika 8). Pod skupino »MV« smo združili rezultate iz izpostavitvev z dodanimi kockami in kosmiči. V primeru, da je imel dodatek mineralne volne statistično značilen vpliv na določeno spremenljivko, smo naredili analizo enosmerno ANOVA, kjer smo preverjali razlike med izpostavitvami z dodanimi kockami ali kosmiči (slika 8). V primeru, da je na spremenljivko vplivala oblika mineralne volne, smo nato z analizo enosmerno ANOVA preverili še statistične razlike med dodanimi odstotki izbrane oblike mineralne volne (slika 8). Naredili smo dva različna statistična testa – Duncanov test ali Unequal N HSD test.

4 REZULTATI

4.1 LASTNOSTI TAL

V poskusih smo uporabili dva različna substrata, organski substrat za rože (Tonsubstrat) in njivska tla. Substrata sta se razlikovala predvsem v vsebnosti skupne organske snovi, teksturi delcev in pH vrednosti.

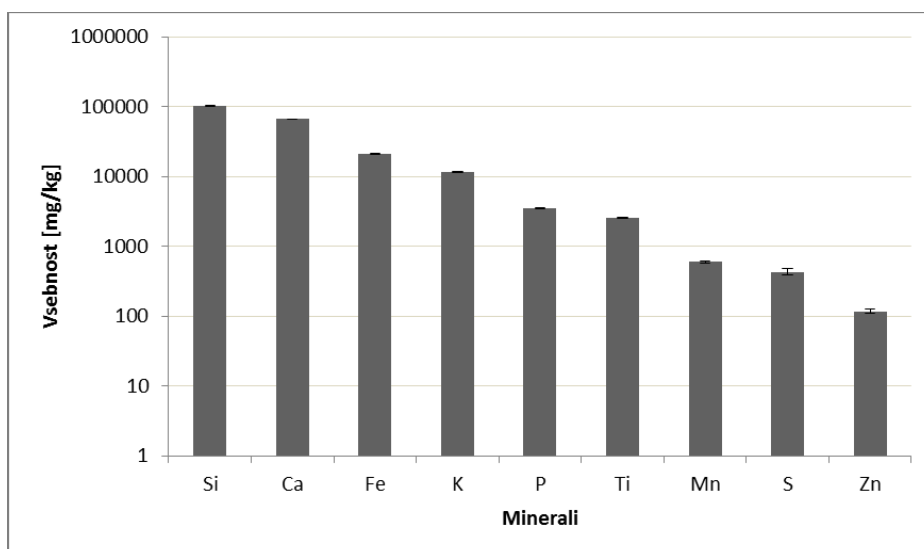
Organski substrat za rože (Tonsubstrat) je bil bogatejši v organski snovi (9,1 %), imel je optimalnejši pH (5,5), vseboval je šotna vlakna in glinena zrna. Drugi substrat, njivska tla, je vseboval nižje odstotke skupne organske snovi (4,7 %) in imel višji pH (7,3). Substrata sta se razlikovala tudi v poljski kapaciteti. Ta je bila pri substratu Tonsubstrat skoraj 7 x večja kot pri njivskih tleh, predvsem zaradi prisotnosti organske snovi in glinenih delcev strukture tal (preglednica 3).

Preglednica 3: Izmerjene karakteristike uporabljenih substratov za izvedbo poskusa.

Substrat	pH	Skupna organska snov [%]	Zadrževalna kapaciteta tal [g/g]
Tonsubstrat	5,5	9,1	5,4
Njivska tla	7,3	4,7	0,8

Analize vsebnosti mineralov v njivskih tleh z napravo XRF so pokazale na visoko vsebnost silicija (Si, 103000 mg/kg), kalcija (Ca, 66000 mg/kg), železa (Fe, 21000 mg/kg) in kalija (K, 12000 mg/kg). Prisotni so tudi elementi v nižjih koncentracijah: fosfor (P, 3500 mg/kg), titan (Ti, 2600 mg/kg), mangan (Mn, 600 mg/kg), žveplo (S, 400 mg/kg) in cink (100 mg/kg). Vsebnost aluminija je bila pod mejo detekcije (slika 9).

Preglednici prikazujeta povprečno vrednost pH tal po zaključenem poskusu (preglednica 4, preglednica 5).



Slika 9: Vsebnost mineralov v njivskih tleh, pred izvedbo poskusov.

Preglednica 4: Povprečni pH substrata Tonsubstrat po poskusu.

Izpostavitev	pH
Kontrola	6,5 ± 0,2 a
Dodatek kock	6,0 ± 0,3 b
Dodatek kosmičev	5,9 ± 0,2 b

Preglednica 5: Povprečni pH njivskih tal po poskusu.

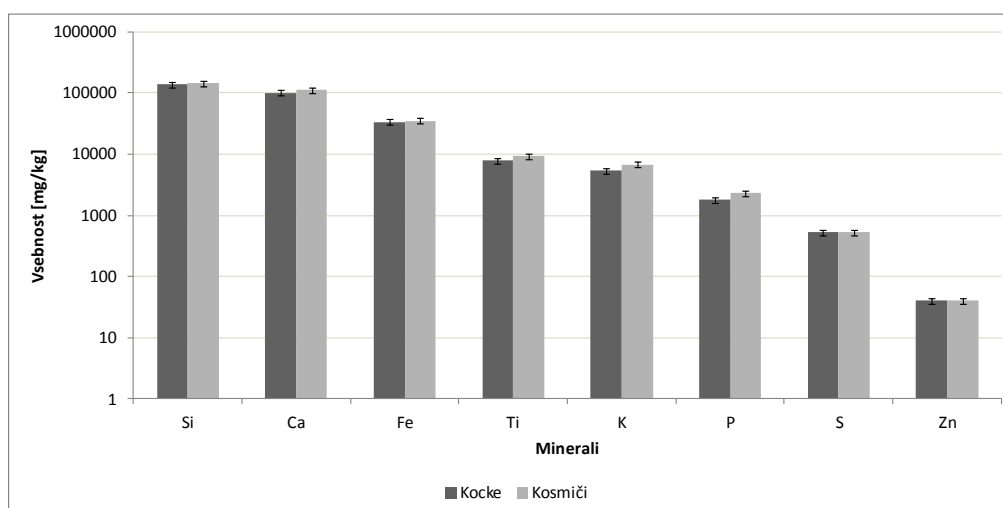
Izpostavitev	pH
Kontrola	7,2 ± 0,1 a
Dodatek kock	7,4 ± 0,2 a
Dodatek kosmičev	7,4 ± 0,1 a

4.2 LASTNOSTI KOCK IN KOSMIČEV

Kocke in kosmiči mineralne volne imajo zelo podobno pH vrednost in poljsko kapaciteto (preglednica 6). Mineralna volna ima bazičen pH (7,8). Najpomembnejši elementi v mineralni volni so silicij, kalcij, železo in titan. Ostali elementi so prisotni v nižjih koncentracijah (kalij, fosfor, žveplo). Vsebnost aluminija je bila pod mejo detekcije (slika 10). Izmerjene vrednosti mineralov v mineralni volni z XRF so v podobnih območjih kot pa podatki o mineralni sestavi volne iz literature.

Preglednica 6: Izmerjene karakteristike uporabljenih dodatkov mineralne volne, v obliki kock ali kosmičev.

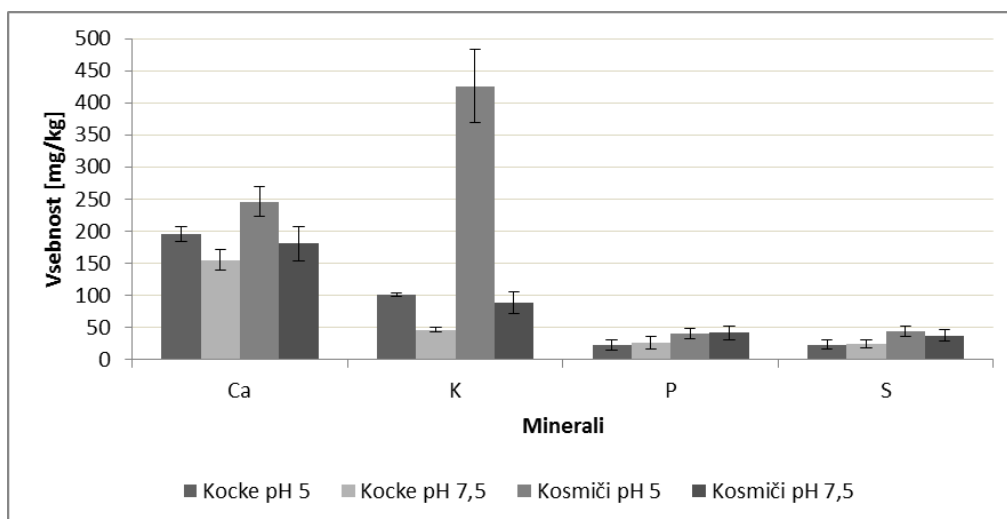
Dodatek	pH	Zadrževalna kapaciteta [g/g]
Kocke	7,8	6,2
Kosmiči	7,8	6,0



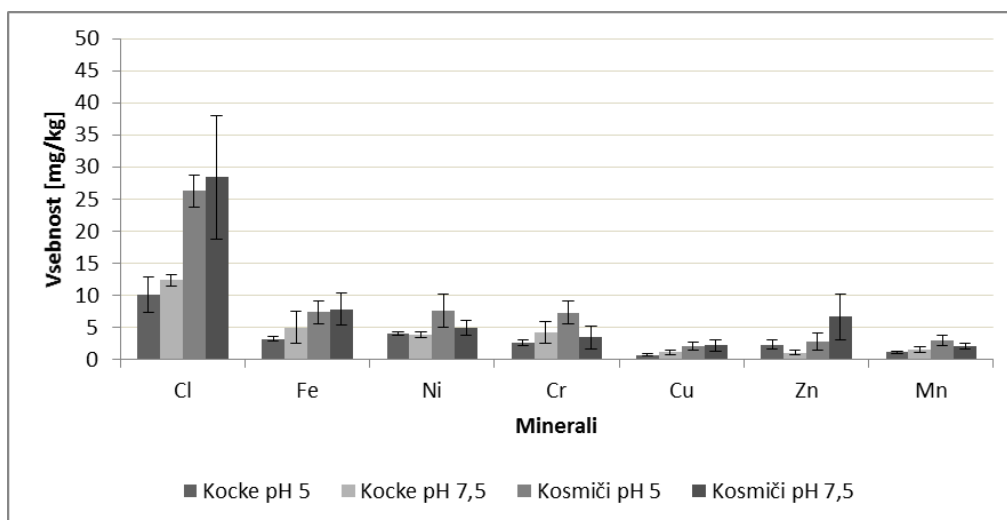
Slika 10: Vsebnost elementov v mineralni volni v obliki kock in kosmičev.

Za določanje biodostopnosti elementov iz mineralne volne smo naredili izlužke v bidestilirani vodi, s pH 7,5 in 5,0. Izlužke smo analizirali s pomočjo TXRF. Rezultati analiz so pokazali, da med kockami in kosmiči mineralne volne, kot tudi pri različnih pH vrednostih, v večini primerov ni prišlo do razlik v luženju mineralov. Do razlik je prišlo edino pri izpostavitvi s kosmiči (pH 5), ki je imela statistično značilno višjo koncentracijo kalija v izlužkih (426 mg/kg), od preostalih izpostavitvev. V splošnem lahko rečemo, da se je iz mineralne volne pri danih pogojih v največji koncentraciji lužil Ca (v povprečju 194 mg/kg), sledil je K (165 mg/kg), P in S (oba 32 mg/kg) in Cl (19 mg/kg). Železo se je izlužilo v nizkih koncentracijah (5 mg/kg). Vsebnost Al in Si nismo izmerili (slika 11, slika 12).

S primerjavo izmerjenih koncentracij vsebnosti mineralov v mineralni volni (slika 10) in biodostopnih mineralov v izlužkih (slika 11, slika 12) je možno opaziti, da je večina mineralov v mineralni volni nedostopna (pri luženju v bidestilirani vodi, s pH vrednostima 7,5 in 5,0).



Slika 11: Prisotnost izluženih mineralov (makrohranila) iz mineralne volne, po dvodnevem luženju v bidestilirani vodi, s pH 7,5 in 5,0.



Slika 12: Prisotnost izluženih mineralov (mikrohranila) iz mineralne volne, po dvodnevem luženju v bidestilirani vodi, s pH 7,5 in 5,0.

Nizko biodostopnost mineralov smo potrdili tudi z izmerjenimi prevodnostmi izlužkov (preglednica 7).

Preglednica 7: Prevodnost mineralne volne v obliki kock in kosmičev (odšteta prevodnost bidestilirane vode) po 48 urah izluževanja.

Vzorec	pH izluževanja	Prevodnost [μ S]	Negotovost meritve
kocke	7,5	41	10 %
kocke	5	41	10 %
kosmiči	7,5	37	10 %
kosmiči	5	46	10 %

4.3 BIOMASA RASTLIN

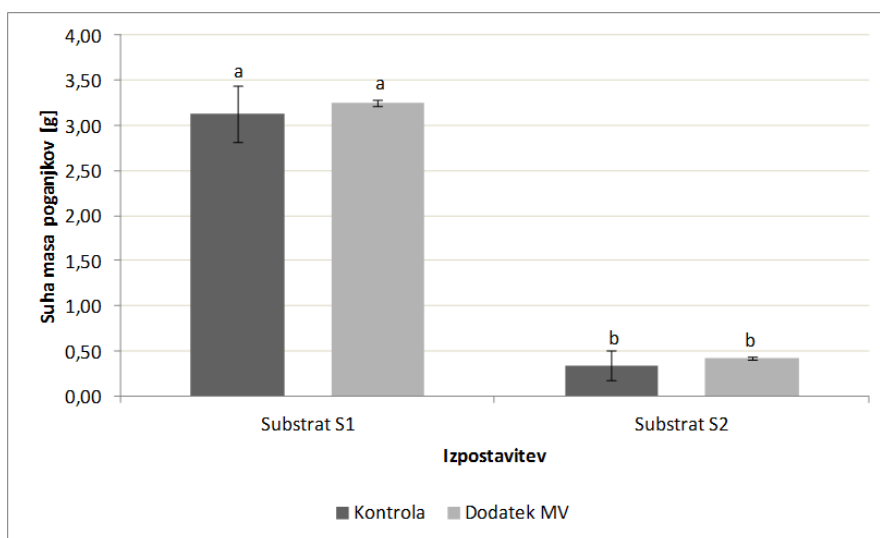
4.3.1 Nadzemni deli

Faktorska analiza ANOVA je pokazala statistično značilen vpliv tal (substrata) na suho maso nadzemnih delov vseh sončnic. Vpliv dodatka mineralne volne (MV) v različne rastne substrate na suho maso nadzemnih delov ni statistično značilen (preglednica 8).

Preglednica 8: Rezultati factorske ANOVA za suho maso nadzemnih delov. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	108,5701	1	108,5701	272,4038	0,000000
substrat	67,0466	1	67,0466	168,2209	0,000000
dodatek MV	0,0924	1	0,0924	0,2317	0,631875
substrat*dodatek MV	0,0049	1	0,0049	0,0123	0,912212
Napaka	25,5080	64	0,3986		

Povprečna suha masa vseh nadzemnih delov sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, je bila 8 x večja od suhe mase vseh nadzemnih delov sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Povprečna suha masa vseh nadzemnih delov v substratu Tonsubstrat je znašala 3,23 g, v njivskih tleh pa 0,41 g (slika 13).



Slika 13: Suha masa nadzemnih delov sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 30. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Duncanov test in Unequal N HSD test, $p < 0,05$).

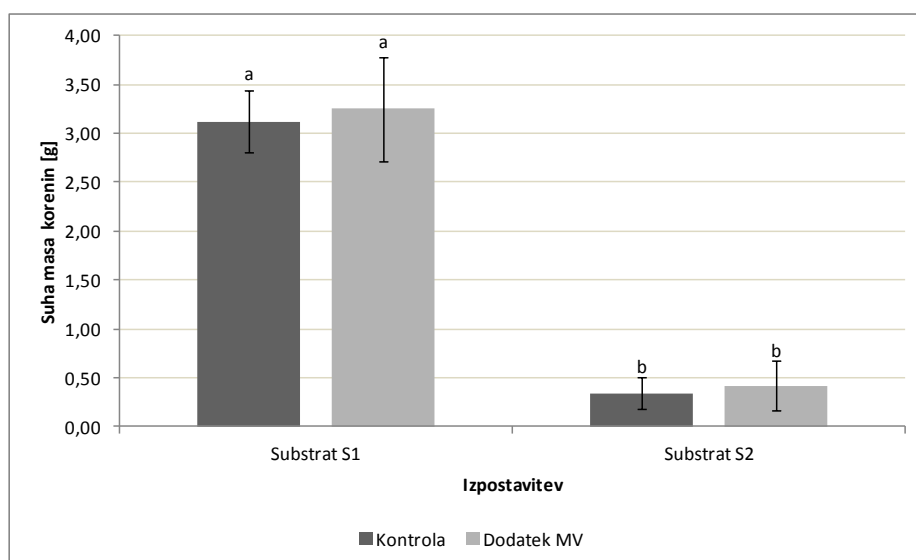
4.3.2 Korenine

Faktorska analiza ANOVA je pokazala statistično značilen vpliv tal (substrata) na suho maso korenin vseh sončnic. Vpliv dodatka mineralne volne (MV) v različne rastne substrate na suho maso korenin ni statistično značilen (preglednica 9).

Preglednica 9: Rezultati faktorske ANOVA za suho maso korenin. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	6,338194	1	6,338194	145,1482	0,000000
substrat	3,579723	1	3,579723	81,9777	0,000000
dodatek MV	0,088538	1	0,088538	2,0276	0,159324
substrat*dodatek MV	0,060327	1	0,060327	1,3815	0,244198
Napaka	2,794691	64	0,043667		

Povprečna suha masa vseh korenin sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, je 7 x večja od suhe mas vseh korenin sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Povprečna suha masa vseh korenin v substratu Tonsubstrat je znašala 0,69 g, v njivskih tleh pa 0,10 g (slika 14).



Slika 14: Suha masa korenin sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsustrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 28. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Duncanov test in Unequal N HSD test, $p < 0,05$).

4.3.3 Fotografije sončnic

Sončnice smo gojili v dveh različnih rastnih substratih (tla bogata z organsko snovjo in tla revna z organsko snovjo), z dodatkom mineralne volne v različnih oblikah (kocke in kosmiči) in v različnih volumskih odstotkih (20, 40, 60 v/v %).

4.3.3.1 Kontrolne izpostavitve

V poskusih uporabljena substrata (substrat Tonsustrat in njivska tla) sta se razlikovala v pomembnih lastnostih in sta tako pomembno vplivala na rast sončnic. Tekom poskusa in ob zaključenem poskusu (po 39. dnevu rasti) smo vizualno opazili, da je bila rast sončnic v substratu Tonsustrat veliko boljše kot pa v njivskih tleh. Sončnice so bile višje, steblo je bilo močno, dlakavi listi so imeli veliko listno ploskev, temna barva je bila izrazita, koreninski sistem je bil razvejan in močan (slika 32). Po drugi strani so bile sončnice, ki so rasle v njivskih tleh, nižje in šibkejšje, steblo je bilo ožje in manj čokato, listi so imeli manjše ploske, korenine so bile šibkejšje in ob dotiku bolj občutljive na poškodbe (slika 34).



Slika 15: Kontrolna izpostavitve sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti). V ozadju je fotografirano merilo.



Slika 16: Kontrolna izpostavitve sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat; sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).



Slika 17: Kontrolna izpostavitve sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti). V ozadju je fotografirano merilo.



Slika 18: Kontrolna izpostavitve sončnic, ki so rasle v njivskih tleh; sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).

4.3.3.2 Izpostavitve z dodatkom kock mineralne volne

Z dodajanjem mineralne volne v različne rastne substrate smo želeli preučiti vpliv mineralne volne na rast sončnic. Želeli smo določiti ali obstajajo razlike v rasti sončnic zaradi oblike dodatka mineralne volne.

Vizualna primerjava rasti sončnic iz kontrolne izpostavitve (slika 32) in izpostavitve z dodatkom 60 % kock (slika 36) v substrat Tonsubstrat se bistveno ne razlikuje. Sončnice so podobno visoke in razvite, podobno velja tudi za koreninski sistem. S poskusi smo pokazali, da dodatek mineralne volne v obliki kock v tla bogata z organsko snovjo vizualne ni izboljšal rasti sončnic.

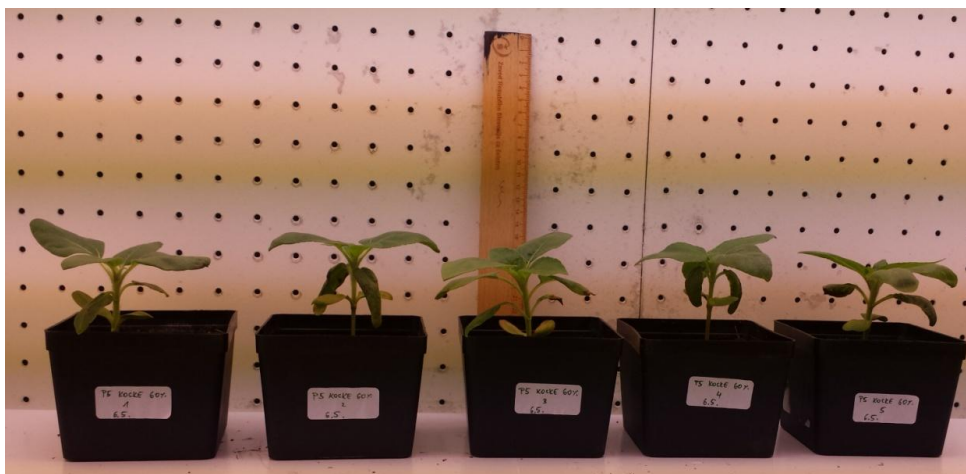


Slika 19: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat s 60 v/v % kock mineralne volne. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).



Slika 20: Izpostavitev sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat s 60 v/v % kock mineralne volne. Sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).

Rast sončnic je vizualno podobna tudi med kontrolno izpostavitvijo (slika 34) in izpostavitvijo z dodatkom 60 v/v % kock v njivska tla (slika 38); pri obeh izpostavitvah so prisotni naključni suhi oz. rumeni listi, rast sončnic in koreninskega sistema je vizualno podobna. S poskusi smo pokazali, da dodatek mineralne volne v obliki kock v tla revna z organsko snovjo vizualne ni izboljšal rasti sončnic.



Slika 21: Izpostavitev sončnic, ki so rasle v njivskih tleh s 60 v/v % kock mineralne volne. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).



Slika 22: Izpostavitev sončnic, ki so rasle v njivskih tleh s 60 v/v % kock mineralne volne. Sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).

Zaključimo lahko, da v našem poskusu dodatek mineralne volne v tla (bogata ali revna z organsko snovjo) v obliki kock na rast sončnic vizualno ni vplival.

4.3.3.3 Izpostavitve z dodatkom kosmičev mineralne volne

Rast sončnic v substratu Tonsubstrat z dodatkom 60 % kosmičev (slika 40) se na videz ne razlikuje od kontrolne izpostavitve v enakih tleh (slika 32), sončnice so podobno visoke in čokate. S poskusi smo pokazali, da dodatek mineralne volne v obliki kosmičev v tla bogata z organsko snovjo vizualno ni izboljšal rasti sončnic.

Pri izpostavitvi sončnic, ki so rasle v njivskih tleh z dodatkom 60 % kosmičev (slika 42), je opazna slabša rast dveh ponovitev znotraj izpostavitve. Dve ponovitvi sta vizualno izrazito slabše rasli, tako da ju nismo uporabili v analizah; preostale tri ponovitve omenjene izpostavitve pa so rasle podobno kot kontrolne sončnice v njivskih tleh (slika 34). V poskusih se je izkazalo, da je dodatek kosmičev v tla revna z organsko snovjo, vizualno vplival na rast sončnic.

V našem poskusu se je pokazalo, da je vpliv dodatka mineralne volne v obliki kosmičev na vizualno rast sončnic odvisen od vrste substrata (bogat oz. reven z organsko snovjo). Vendar bi morali za natančnejše rezultate vpliva mineralne volne v odvisnosti od substrata poskus ponoviti z večjim številom sončnic.



Slika 23: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat s 60 v/v % kosmičev mineralne volne. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).



Slika 24: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat s 60 v/v % kosmičev mineralne volne. Sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).



Slika 25: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v njivskih tleh s 60 v/v % kosmičev mineralne volne. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).



Slika 26: Izpostavitve sončnic, ki so rasle v njivskih tleh s 60 v/v % kosmičev mineralne volne. Sončnice so razdeljene na poganjke in korenine. Fotografirano zadnji dan poskusa (na 39. dan rasti).

4.4 VSEBNOST VODE V NADZEMNIH DELIH

Faktorska analiza ANOVA ni pokazala statistično značilnih vplivov tal (substrata) in dodatka mineralne volne v obliki kock ali kosmičev v različne rastne substrate na vsebnost vode v nadzemnih delih sončnic (preglednica 10).

Preglednica 10: Rezultati factorske ANOVA za vsebnost vode v nadzemnih delih sončnic Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	1368,031	1	1368,031	871,5848	0,000000
substrat	0,114	1	0,114	0,0726	0,788604
dodatek MV	0,011	1	0,011	0,0069	0,934221
substrat*dodatek MV	0,032	1	0,032	0,0206	0,886499
Napaka	83,188	53	1,570		

4.5 ANALIZA FOTOSINTEZNIH PIGMENTOV

4.5.1 Rezultati obeh rastnih substratov (substrat Tonsubstrat in njivska tla)

Faktorska analiza ANOVA je pokazala statistično značilna vpliva substrata in dodatka mineralne volne v različne rastne substrate na koncentracijo klorofila *a*, klorofila *b* in karotenoidov v nadzemnih delih sončnic (preglednica 11, preglednica 12, preglednica 13).

Preglednica 11: Rezultati factorske ANOVA za vsebnost klorofila *a* v nadzemnih delih sončnic. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	568,4191	1	568,4191	1086,899	0,000000
substrat	16,7301	1	16,7301	31,990	0,000000
dodatek MV	3,5518	1	3,5518	6,792	0,011417
substrat*dodatek MV	0,9391	1	0,9391	1,796	0,185055
Napaka	32,9473	63	0,5230		

Preglednica 12: Rezultati factorske ANOVA za vsebnost klorofila *b* v nadzemnih delih sončnic. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	108,3206	1	108,3206	341,2409	0,000000
substrat	3,3700	1	3,3700	10,6165	0,001808
dodatek MV	1,5006	1	1,5006	4,7273	0,033451
substrat*dodatek MV	0,6531	1	0,6531	2,0573	0,156420
Napaka	19,9982	63	0,3174		

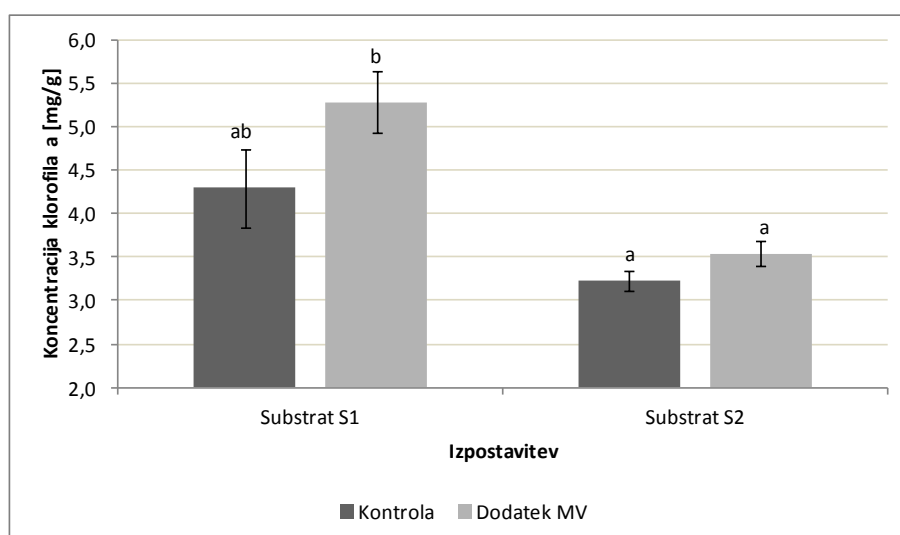
Preglednica 13: Rezultati faktorske ANOVA za vsebnost karotenoidov v nadzemnih delih sončnic. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	14,50321	1	14,50321	1045,032	0,000000
substrat	0,13580	1	0,13580	9,785	0,002664
dodatek MV	0,09570	1	0,09570	6,896	0,010833
substrat*dodatek MV	0,01260	1	0,01260	0,908	0,344403
Napaka	0,87433	63	0,01388		

4.5.1.1 Klorofil *a*

Koncentracije klorofila *a* v sončnicah, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, so statistično večje od koncentracij klorofila *a* v sončnicah, ki so rasle v njivskih tleh. Povprečna vsebnost klorofila *a* vseh izpostavitvev sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat (5,1 mg/g), je 1,5 x večja kot vsebnost klorofila *a* vseh izpostavitvev iz njivskih tal (3,5 mg/g).

Največje koncentracije klorofila *a* smo izmerili v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, pri izpostavitvi z dodano mineralno volno (5,3 mg/g). Koncentracija klorofila *a* omenjenih izpostavitvev se statistično razlikuje od kontrolne izpostavitve v njivskih tleh (3,2 mg/g) in od izpostavitve z dodatkom mineralne volne v njivska tla (3,6 mg/g). Najnižje koncentracije klorofila *a* smo izmerili v nadzemnih delih kontrolne izpostavitve iz njivskih tal (slika 15).

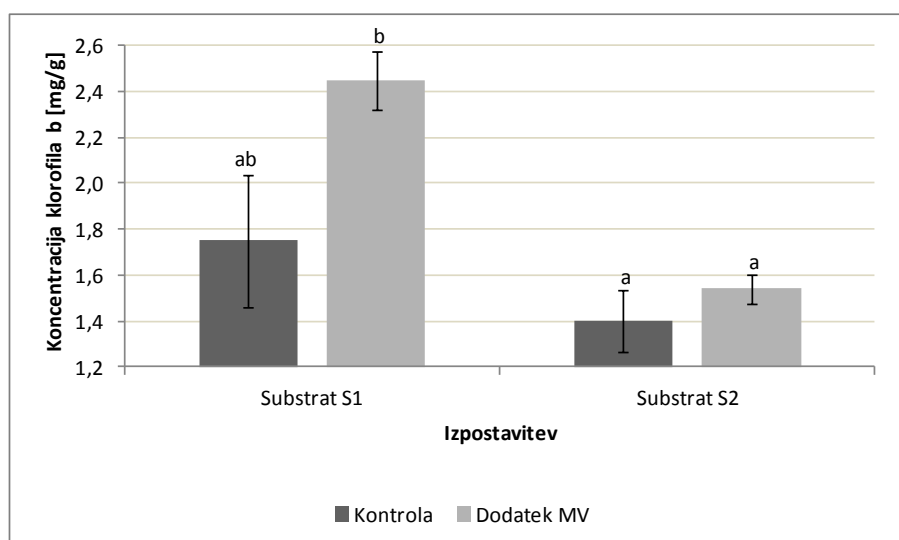


Slika 27: Koncentracija klorofila *a* v nadzemnih delih sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla.. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 29. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).

4.5.1.2 Klorofil *b*

Koncentracije klorofila *b* v sončnicah, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, so statistično večje od koncentracij klorofila *b* v sončnicah, ki so rasle v njivskih tleh. Povprečna vsebnost klorofila *b* vseh izpostavitvev sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat (2,3 mg/g), je 1,5 x večja kot vsebnost klorofila *b* vseh izpostavitvev iz njivskih tal (1,5 mg/g).

Vsebnost klorofila *b* je statistično največja pri izpostavitvah z dodano mineralno volno (2,4 mg/g) v substrat Tonsubstrat in se statistično razlikuje od preostalih izpostavitvev – kontrolna izpostavitvev v njivskih tleh (1,4 mg/g) in izpostavitvev z dodano mineralno volno v njivska tla (1,5 mg/g). Najnižje koncentracije klorofila *b* smo izmerili v nadzemnih delih kontrolne izpostavitve iz njivskih tal (slika 16).



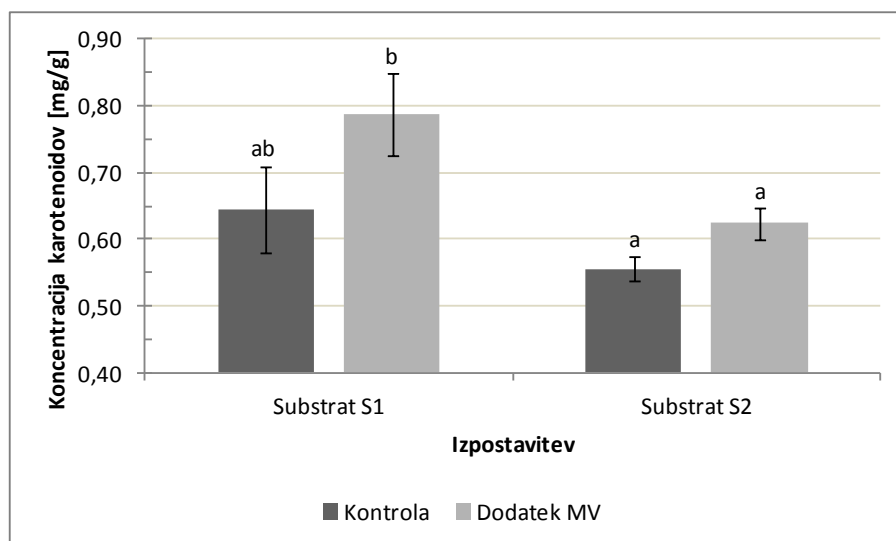
Slika 28: Koncentracija klorofila *b* v nadzemnih delih sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla.. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 29. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).

4.5.1.3 Karotenoidi

Koncentracije karotenoidov v sončnicah, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, so statistično večje od koncentracij karotenoidov v sončnicah, ki so rasle v njivskih tleh. Povprečna vsebnost karotenoidov vseh izpostavitvev sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat (0,8 mg/g), je 1,3 x večja kot vsebnost karotenoidov vseh izpostavitvev iz njivskih tal (0,6 mg/g).

Najvišje koncentracije karotenoidov smo izmerili v nadzemnih delih sončnic iz substrata Tonsubstrat v izpostavitvah z dodano mineralno volno (0,8 mg/g) in se je statistično razlikovala od koncentracij karotenoidov od preostalih izpostavitvev -

kontrolna izpostavitve v njivskih tleh (0,6 mg/g) in izpostavitve z dodano mineralno volno v njivska tla (0,6 mg/g). Najnižje koncentracije karotenoidov smo izmerili v nadzemnih delih kontrolne izpostavitve iz njivskih tal (slika 17).



Slika 29: Koncentracija karotenoidov v nadzemnih delih sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 29. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).

4.5.2 Rezultati iz substrata Tonsubstrat

Enosmerna analiza ANOVA je pokazala statistično značilen vpliv dodatka mineralne volne v substrat Tonsubstrat na koncentracijo klorofila *a* in karotenoidov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat (preglednica 14, preglednica 15). Enosmerna analiza ANOVA ni pokazala statistično značilnega vpliva dodatka MV v substrat Tonsubstrat na koncentracijo klorofila *b* (preglednica 16).

Preglednica 14: Enosmerne ANOVA za koncentracijo klorofila *a* v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	391,1166	1	391,1166	918,7373	0,000000
dodatek MV	4,0824	1	4,0824	9,5896	0,004052
Napaka	13,6228	32	0,4257		

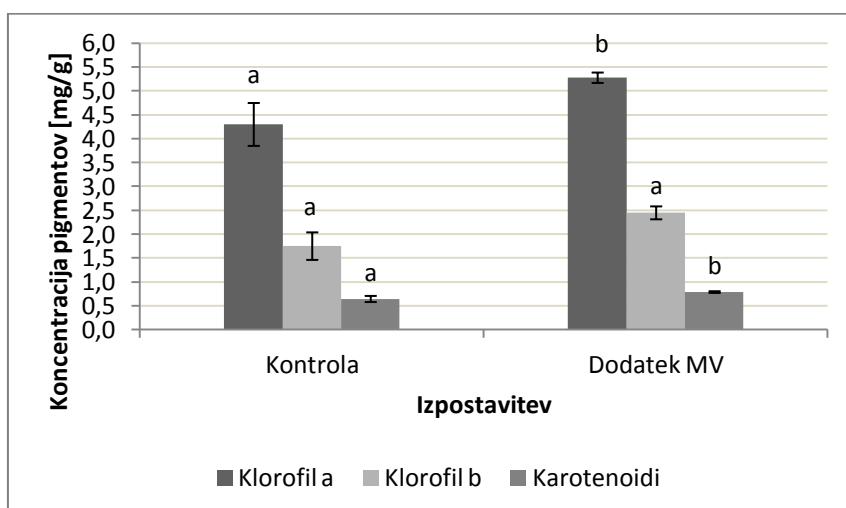
Preglednica 15: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo karotenoidov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	8,745787	1	8,745787	815,9021	0,000000
dodatek MV	0,089100	1	0,089100	8,3123	0,006984
Napaka	0,343013	32	0,010719		

Preglednica 16: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo klorofila b v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	75,14824	1	75,14824	145,7745	0,000000
dodatek MV	2,07221	1	2,07221	4,0197	0,053492
Napaka	16,49632	32	0,51551		

Koncentracija klorofila *a* v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat z dodatkom mineralne volne (5,3 mg/g), je statistično večja od koncentracije klorofila *a* v nadzemnih delih sončnic iz kontrolne izpostavitve v substratu Tonsubstrat (4,3 mg/g). Koncentraciji klorofila *b* se statistično ne razlikujeta med kontrolno izpostavitvijo (1,8 mg/g) in izpostavitvijo z dodatkom mineralne volne (2,4 mg/g). Koncentracija karotenoidov je v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat z dodatkom mineralne volne (0,8 mg/g), statistično večja od koncentracije karotenoidov v nadzemnih delih sončnic iz kontrolne izpostavitve istih tal (0,6 mg/g) (slika 18).



Slika 30: Koncentracije klorofila *a*, klorofila *b* in karotenoidov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 29. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).

Nadalje smo preverjali statističen vpliv oblike mineralne volne (kocke ali kosmiči). Enosmerna analiza ANOVA ni pokazala statistično značilnega vpliva oblike mineralne volne na koncentracijo klorofila *a* in karotenoidov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat (preglednica 17, preglednica 18).

Preglednica 17: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo klorofila *a* v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	806,4410	1	806,4410	2276,047	0,000000
oblika MV	0,0229	1	0,0229	0,065	0,801065
Napaka	9,5665	27	0,3543		

Preglednica 18: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo krotenoidov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	17,95492	1	17,95492	2038,048	0,000000
oblika MV	0,02297	1	0,02297	2,608	0,117975
Napaka	0,23787	27	0,00881		

4.5.3 Rezultati iz njivskih tal

Enosmerna analiza ANOVA ni pokazala statistično značilnega vpliva dodatka mineralne volne v njivska tla na koncentracijo fotosinteznih pigmentov (preglednica 19, preglednica 20, preglednica 21).

Preglednica 19: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo klorofila *a* v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	194,5474	1	194,5474	312,0881	0,000000
dodatek MV	0,4180	1	0,4180	0,6706	0,419095
Napaka	19,3246	31	0,6234		

Preglednica 20: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo klorofila *b* v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	36,64326	1	36,64326	324,3816	0,000000
dodatek MV	0,08666	1	0,08666	0,7672	0,387832
Napaka	3,50187	31	0,11296		

Preglednica 21: Rezultati enosmerne ANOVA za koncentracijo karotenoidov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	5,900669	1	5,900669	344,2784	0,000000
dodatek MV	0,019379	1	0,019379	1,1307	0,295846
Napaka	0,531316	31	0,017139		

4.6 FOTOKEMIČNA UČINKOVITOST FOTOSISTEMA II

4.6.1 Rezultati obeh rastnih substratov (substrat Tonsubstrat in njivska tla)

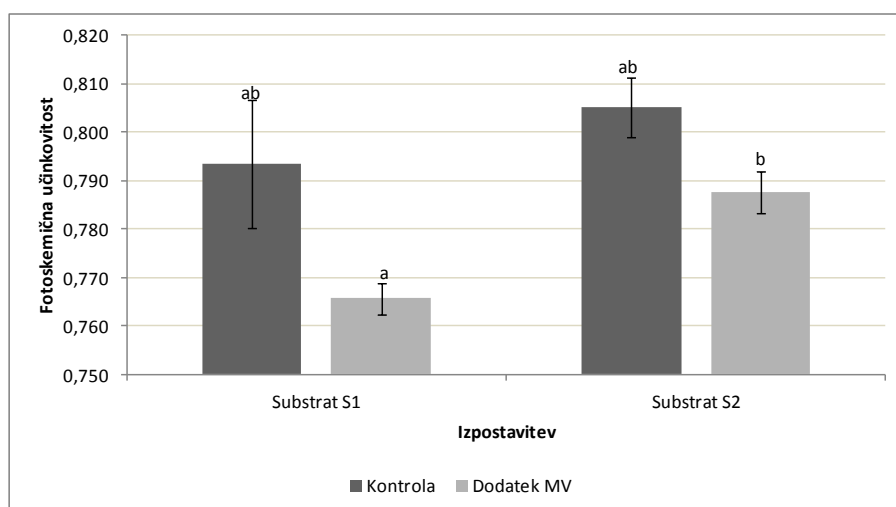
4.6.1.1 Dejanska fotokemična učinkovitost

Faktorska analiza ANOVA je pokazala statistično značilen vpliv dodatka mineralne volne v različne rastne substrate na dejansko fotokemično učinkovitost v nadzemnih delih vseh sončnic (preglednica 22).

Preglednica 22: Rezultati faktorске ANOVA za dejansko fotokemično učinkovitost v nadzemnih delih sončnic. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	19,09350	1	19,09350	24027,85	0,000000
substrat	0,00216	1	0,00216	2,72	0,104260
dodatek MV	0,00395	1	0,00395	4,98	0,029344
substrat*dodatek MV	0,00021	1	0,00021	0,27	0,608234
Napaka	0,04927	62	0,00079		

Na statistične razlike med vrednostmi dejanske fotokemične učinkovitosti statistično je vplival le dodatek mineralne volne v tla. Največjo dejansko fotokemično učinkovitost smo izmerili v kontrolni izpostavitvi (0,805) iz njivskih tal, najnižjo dejansko fotokemično učinkovitost pa pri izpostavitvi sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, z dodatkom mineralne volne (0,766). Statistično sta se razlikovali dejanski fotokemični učinkovitosti izpostavitve z dodatkom mineralne volne v substrat Tonsubstrat (0,766) in z dodatkom mineralne volne v njivska tla (0,788). Med ostalimi izpostavitvami ni bilo statističnih razlik (slika 19).



Slika 31: Dejanska fotokemična učinkovitost nadzemnih delov sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsustrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, $n = 4$ do 30. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).

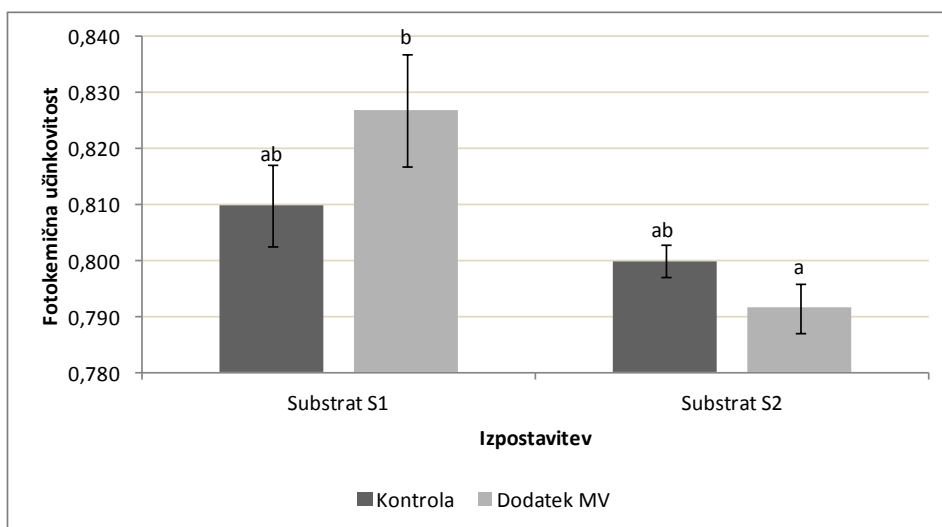
4.6.1.2 Potencialna fotokemična učinkovitost

Faktorska analiza ANOVA je pokazala statistično značilen vpliv tal (substrata) na potencialno fotokemično učinkovitost v nadzemnih delih vseh sončnic. Vpliv dodatka mineralne volne v različne rastne substrate na potencialno fotokemično učinkovitost ni statistično značilen (preglednica 23).

Preglednica 23: Rezultati faktorske ANOVA za potencialno fotokemično učinkovitost v nadzemnih delih sončnic. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	19,98915	1	19,98915	52253,26	0,000000
substrat	0,00391	1	0,00391	10,23	0,002194
dodatek MV	0,00014	1	0,00014	0,38	0,542343
substrat*dodatek MV	0,00123	1	0,00123	3,23	0,077421
Napaka	0,02334	61	0,00038		

Največjo potencialno fotokemično učinkovitost smo izmerili v sončnicah, ki so rasle v substratu Tonsustrat z dodatkom mineralne volne (0,827) in se je statistično razlikovala od najnižje potencialne fotokemične učinkovitosti izpostavitve, kjer so sončnice rasle v njivskih tleh z dodatkom mineralne volne (0,791). Ostale izpostavitve se med seboj statistično niso razlikovale (slika 20).



Slika 32: Potencialna fotokemična učinkovitost nadzemnih delov sončnic pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, $n = 3$ do 5. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).

4.6.2 Rezultati iz substrata Tonsubstrat

4.6.2.1 Dejanska fotokemična učinkovitost

Enosmerna analiza ANOVA ni pokazala statistično značilnega vpliva dodatka mineralne volne v substrat Tonsubstrat na dejansko fotokemično učinkovitost sončnic (preglednica 24).

Preglednica 24: Rezultati enosmerne ANOVA za dejansko fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	10,42013	1	10,42013	9356,233	0,000000
dodatek MV	0,00334	1	0,00334	2,999	0,092655
Napaka	0,03675	33	0,00111		

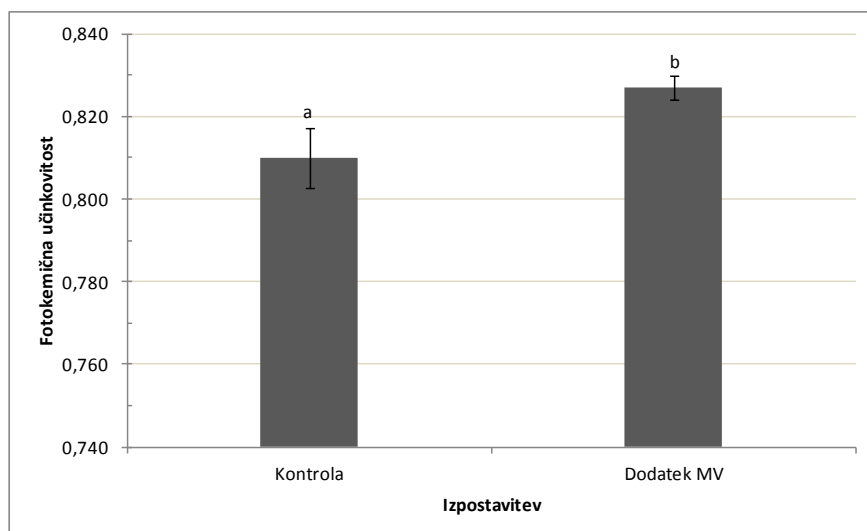
4.6.2.2 Potencialna fotokemična učinkovitost

Enosmerna analiza ANOVA je pokazala statistično značilen vpliv dodatka mineralne volne v substrat Tonsubstrat na potencialno fotokemično učinkovitost sončnic (preglednica 25).

Preglednica 25: Rezultati enosmerne ANOVA za potencialno fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	11,36609	1	11,36609	47331,81	0,000000
dodatek MV	0,00123	1	0,00123	5,11	0,030924
Napaka	0,00744	31	0,00024		

Vrednosti potencialnih fotokemičnih učinkovitosti med kontrolno izpostavitvijo in izpostavitvami z dodatkom mineralne volne v substrat Tonsubstrat se med seboj statistično razlikujejo. Izpostavitve z dodatkom mineralne volne (0,827) v tla so imeli višjo vrednost potencialne fotokemične učinkovitosti kot pa kontrolna izpostavitev (0,810) (slika 21).



Slika 33: Potencialna fotokemična učinkovitost nadzemnih delov sončnic pri različnih izpostavitvah, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 28. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Duncanov test, $p < 0,05$).

Nadaljnja statistična analiza ni pokazala statistično značilnega vpliva oblike (kocke in kosmiči) mineralne volne na potencialno fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat (preglednica 26).

Preglednica 26: Rezultati enosmerne ANOVA za potencialno fotokemično učinkovitost sončnic (in vpliv oblike mineralne volne), ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	19,04138	1	19,04138	78769,74	0,000000
Oblika MV	0,00012	1	0,00012	0,49	0,488381
Napaka	0,00629	26	0,00024		

4.6.3 Rezultati iz njivskih tal

Enosmerna analiza ANOVA ni pokazala statistično značilnega vpliva dodatka mineralne volne v njivska tla na dejansko in potencialno fotosintetsko učinkovitost sončnic (preglednica 27, preglednica 28).

Preglednica 27: Rezultati enosmerne ANOVA za dejansko fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	8,838735	1	8,838735	20480,86	0,000000
dodatek MV	0,001060	1	0,001060	2,46	0,127977
Napaka	0,012515	29	0,000432		

Preglednica 28: Rezultati enosmerne ANOVA za potencialno fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	8,866644	1	8,866644	16739,07	0,000000
dodatek MV	0,000244	1	0,000244	0,46	0,502140
Napaka	0,015891	30	0,000530		

4.7 KONCENTRACIJE ELEMENTOV V NADZEMNIH DELIH IN KORENINAH SONČNIC

Z XRF smo analizirali vsebnost devetih elementov v nadzemnih delih in koreninah sončnic: silicij (Si), fosfor (P), žveplo (S), kalij (K), kalcij (Ca), titan (Ti), mangan (Mn), železo (Fe) in cink (Zn).

4.7.1 Skupni podatki

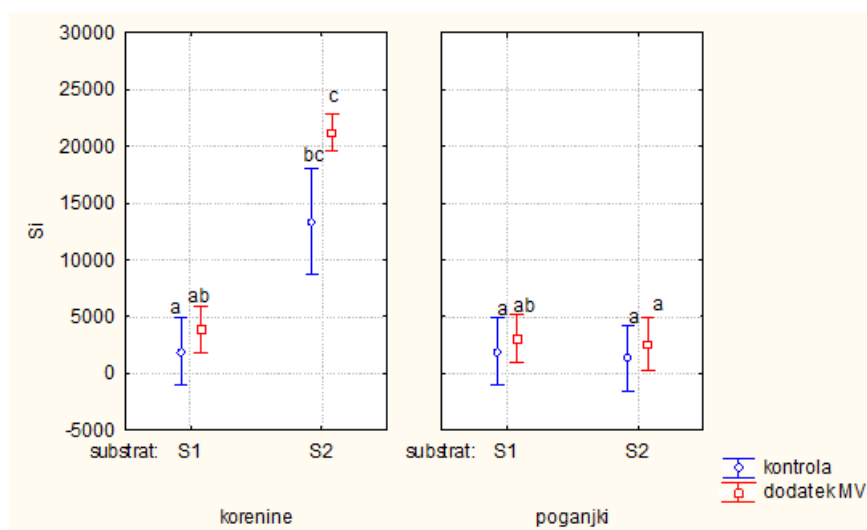
Za predstavbo o razporejenosti mineralov med različna rastlinska tkiva sončnic, ki so rasle v različno bogatih tleh, smo naredili statistično in grafično analizo vseh mineralov naenkrat (skupni podatki iz obeh tal in iz nadzemnih delov ter korenin skupaj).

4.7.1.1 Silicij

Faktorska analiza ANOVA je pokazala statistično značilne vplive substrata, dodatka mineralne volne v tla, dela rastline (nadzemni deli/korenine, v preglednici imenovano »pog/kor«) in interakcije med tlemi in deli rastlin (nadzemni del/korenine) na vsebnost silicija v tkivih sončnic, ki so rasle v različnih tleh (preglednica 29). Vsebnost Si v sončnicah je prikazana na sliki 22.

Preglednica 29: Rezultati faktorske ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih in koreninah sončnic, ki so rasle v obeh rastnih substratih. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	1,628909E+09	1	1,628909E+09	149,4295	0,000000
substrat	5,185102E+08	1	5,185102E+08	47,5660	0,000000
dodatek MV	1,002574E+08	1	1,002574E+08	9,1972	0,003747
pog/kor	6,617541E+08	1	6,617541E+08	60,7066	0,000000
substrat*dodatek MV	2,508078E+07	1	2,508078E+07	2,3008	0,135249
substrat*pog/kor	5,991873E+08	1	5,991873E+08	54,9670	0,000000
dodatek MV*pog/kor	3,679852E+07	1	3,679852E+07	3,3757	0,071772
substrat*dodatek MV*pog/kor	2,189186E+07	1	2,189186E+07	2,0083	0,162296
Napaka	5,777454E+08	53	1,090086E+07		



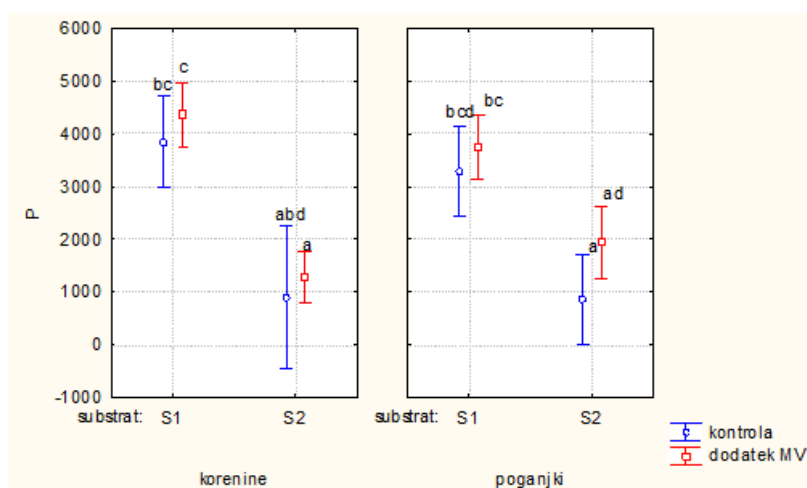
Slika 34: Vsebnost silicija v koreninah in nadzemnih delih sončnic, pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 30. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal NHSD test, $p < 0,05$).

4.7.1.2 Fosfor

Faktorska analiza ANOVA je pokazala statistično značilna vpliva substrata in dodatka mineralne volne v tla na vsebnost fosforja v tkivih sončnic, ki so rasle v različnih tleh (preglednica 30). Vsebnost fosforja v sončnicah je prikazana na sliki 23.

Preglednica 30: Rezultati faktorske ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih in koreninah sončnic, ki so rasle v obeh rastnih substratih. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	276165637	1	276165637	302,8910	0,000000
substrat	71070394	1	71070394	77,9481	0,000000
dodatek MV	3987712	1	3987712	4,3736	0,041309
pog/kor	211210	1	211210	0,2316	0,632285
substrat*dodatek MV	174523	1	174523	0,1914	0,663522
substrat*pog/kor	2085942	1	2085942	2,2878	0,136335
dodatek MV*pog/kor	283062	1	283062	0,3105	0,579747
substrat*dodatek MV*pog/kor	375019	1	375019	0,4113	0,524069
Napaka	48323580	53	911766		



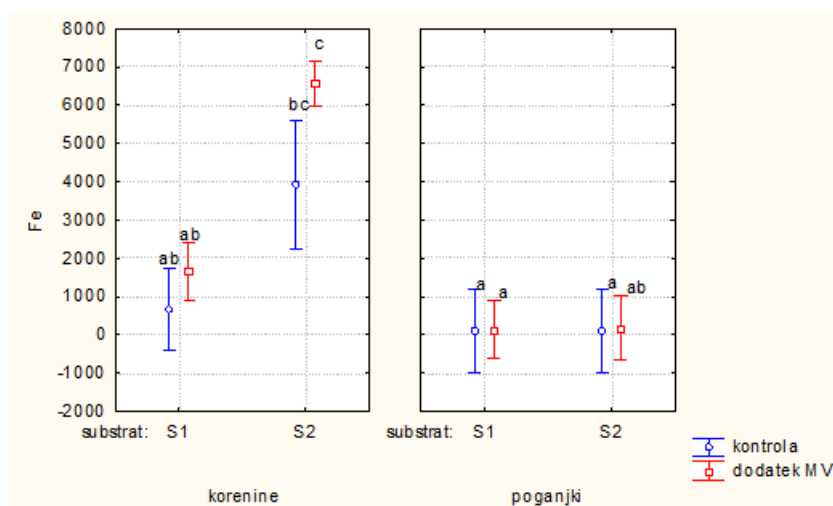
Slika 35: Vsebnost fosforja v koreninah in nadzemnih delih sončnic, pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsustrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, $n=5$ do 30. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).

4.7.1.3 Železo

Faktorska analiza ANOVA je pokazala statistično značilne vplive substrata, dodatka mineralne volne v tla, dela rastlin (nadzemni deli/korenine; v preglednici imenovano »pog/kor«) ter interakcije med substratom in deli rastlin (nadzemni del/korenine) in interakcije med mineralno volno in deli rastlin (nadzemni del/korenine) na vsebnost železa v tkivih sončnic, ki so rasle v različnih tleh (preglednica 31). Vsebnost Fe v sončnicah je prikazana na sliki 24.

Preglednica 31: Rezultati faktorske ANOVA za vsebnost železa v nadzemnih delih in koreninah sončnic, ki so rasle v obeh rastnih substratih. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	118990976	1	118990976	83,25201	0,000000
substrat	45366461	1	45366461	31,74063	0,000001
dodatek MV	9232736	1	9232736	6,45968	0,013996
pog/kor	101873836	1	101873836	71,27601	0,000000
substrat*dodatek MV	2024194	1	2024194	1,41623	0,239329
substrat*pog/kor	44419261	1	44419261	31,07793	0,000001
dodatek MV*pog/kor	8206378	1	8206378	5,74159	0,020129
substrat*dodatek MV*pog/kor	1858155	1	1858155	1,30006	0,259329
Napaka	75752184	53	1429286		



Slika 36: Vsebnost železa v koreninah in nadzemnih delih sončnic, pri različnih izpostavitvah. Legenda: substrat S1 – substrat Tonsustrat, substrat S2 – njivska tla. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 30. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (faktorska analiza ANOVA, Unequal N HSD test, $p < 0,05$).

Preglednica 32 vsebuje povzetke statistično značilnih vplivov na posamezne elemente za vse podatke skupaj.

Preglednica 32: Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost mineralov v vseh sončnicah (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 S2).

Vsi podatki skupaj			Vsebnost mineralov								
Stat. analiza	Substrat	Statistično značilni vplivi	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn
Faktorska ANOVA	S1 in S2	Vpliv substrata	*	*		*	*	*		*	*
		Vpliv dodatka MV	*	*			*	*		*	
		Vpliv nadzemnih delov/korenin	*		*	*	*	*	*	*	

4.7.2 Nadzemni deli

4.7.2.1 Rezultati obeh rastnih substratov (substrat Tonsubstrat in njivska tla)

Faktorske analize ANOVA so pokazale statističen vpliv substrata na vsebnost P, S, K, Ca in Mn v nadzemnih delih sončnic. Faktorske analize ANOVA so pokazale statističen vpliv dodatka mineralne volne v tla na vsebnost Si, P, S in Fe v nadzemnih delih sončnic.

4.7.2.2 Rezultati iz substrata Tonsubstrat

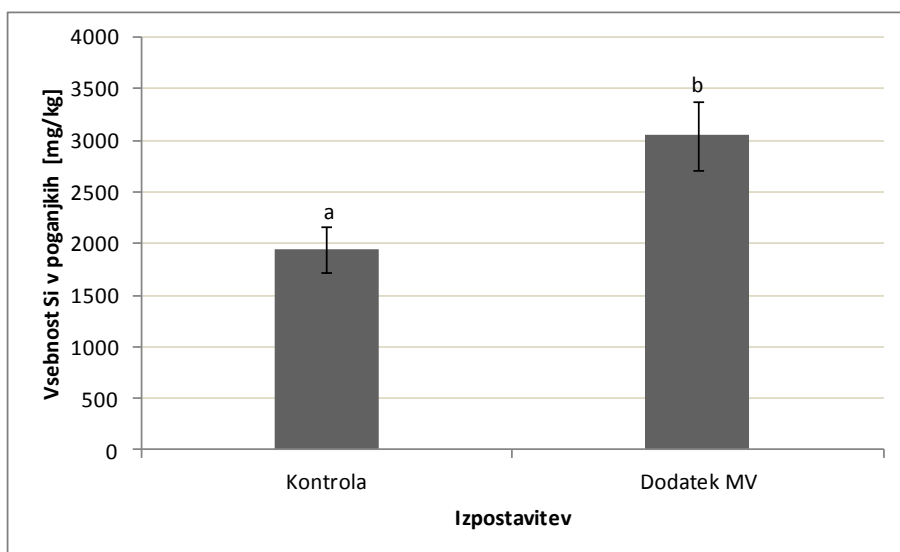
Enosmerne analize ANOVA so pokazale statistično značilen vpliv dodatka mineralne volne v substrat Tonsubstrat na vsebnost Si in Fe v nadzemnih delih sončnic (preglednica 33, preglednica 34).

Preglednica 33: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat in vpliv dodatka mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

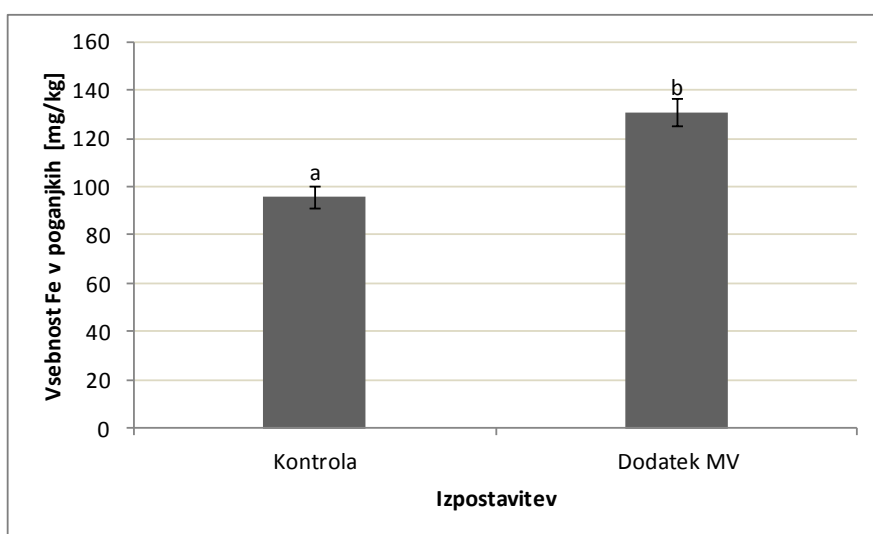
	SS	df	MS	F	p
Intercept	82767630	1	82767630	102,7285	0,000000
dodatek MV	4055363	1	4055363	5,0334	0,042918
Napaka	10474010	13	805693		

Preglednica 34: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost železa v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat in vpliv dodatka mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	171702,8	1	171702,8	688,7754	0,000000
dodatek MV	4046,1	1	4046,1	16,2306	0,001433
Napaka	3240,7	13	249,3		



Slika 37: Vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 10. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncan test, $p < 0,05$).



Slika 38: Vsebnost železa v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 10. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, $p < 0,05$).

Nadaljnja statistična analiza ni pokazala statistično značilnega vpliva oblike dodane mineralne volne na vsebnost Si (preglednica 35) in vsebnost Fe (preglednica 36) v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat.

Preglednica 35: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat in vpliv oblike mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	92598490	1	92598490	96,36491	0,000010
oblika MV	1789290	1	1789290	1,86207	0,209530
Napaka	7687320	8	960915		

Preglednica 36: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost železa v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat in vpliv oblike mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

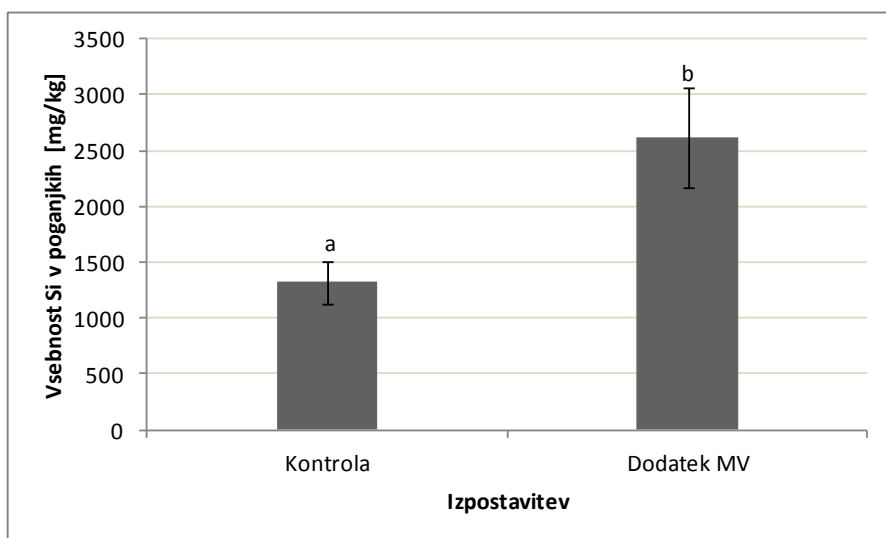
	SS	df	MS	F	p
Intercept	171348,1	1	171348,1	581,6297	0,000000
oblika MV	476,1	1	476,1	1,6161	0,239352
Napaka	2356,8	8	294,6		

4.7.2.3 Rezultati iz njivskih tal

Enosmerne analize ANOVA so pokazale statistično značilen vpliv dodatka mineralne volne v njivska tla na vsebnost Si, P, S in Fe v nadzemnih delih sončnic (preglednica 37, preglednica 38, preglednica 39, preglednica 40).

Preglednica 37: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh in vpliv dodatka mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

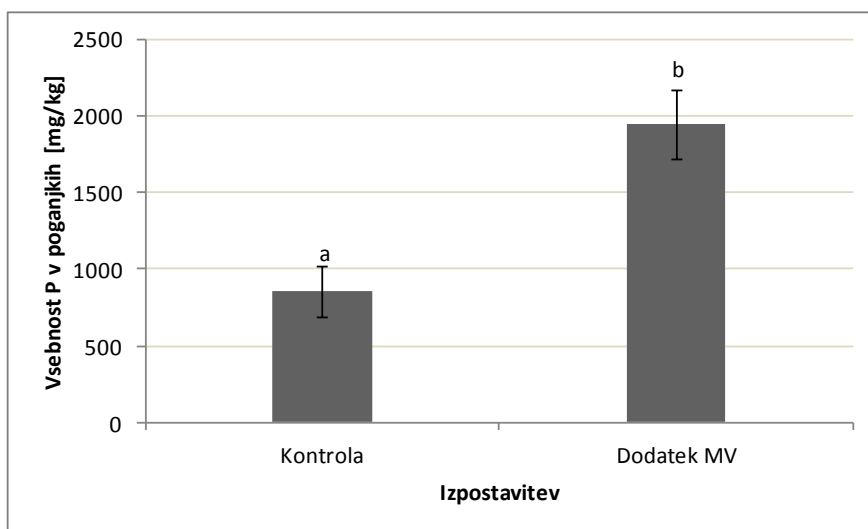
	SS	df	MS	F	p
Intercept	47807363	1	47807363	44,40587	0,000035
dodatek MV	5230043	1	5230043	4,85793	0,049731
Napaka	11842602	11	1076600		



Slika 39: Vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 8. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, $p < 0,05$).

Preglednica 38: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost fosforja v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh in vpliv dodatka mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

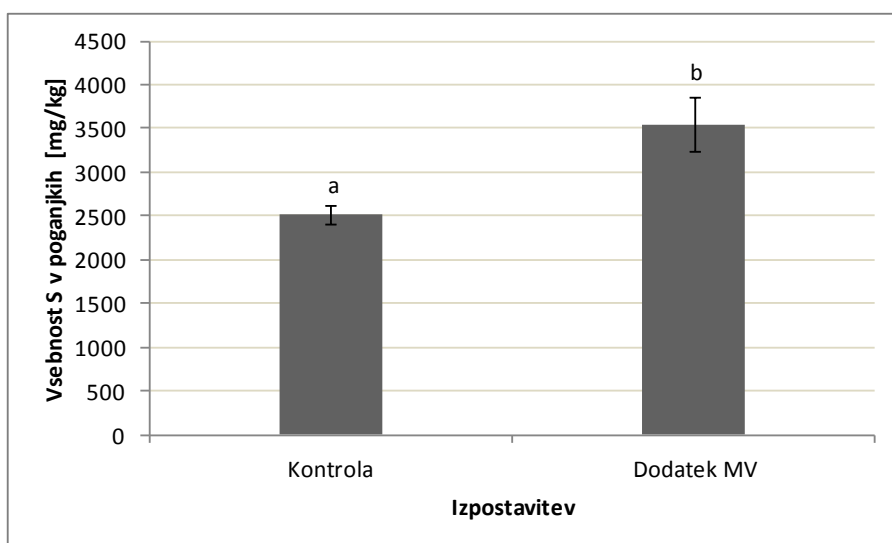
	SS	df	MS	F	p
Intercept	24067970	1	24067970	78,56031	0,000002
dodatek MV	3623566	1	3623566	11,82769	0,005533
Napaka	3369993	11	306363		



Slika 40: Vsebnost fosforja v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 8. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, $p < 0,05$).

Preglednica 39: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost žvepla v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh in vpliv dodatka mineralne volne. Z Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

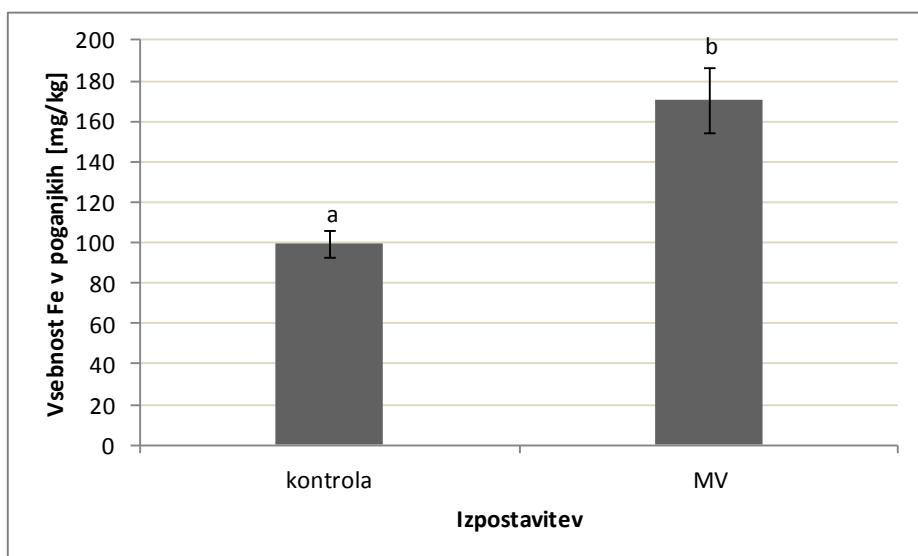
	SS	df	MS	F	p
Intercept	113172900	1	113172900	215,6194	0,000000
dodatek MV	3281762	1	3281762	6,2525	0,029480
Napaka	5773608	11	524873		



Slika 41: Vsebnost žvepla v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 8. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, $p < 0,05$).

Preglednica 40: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost železa v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh in vpliv dodatka mineralne volne. Z Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	224415,7	1	224415,7	162,3659	0,000000
dodatek MV	15591,7	1	15591,7	11,2807	0,006379
Napaka	15203,8	11	1382,2		



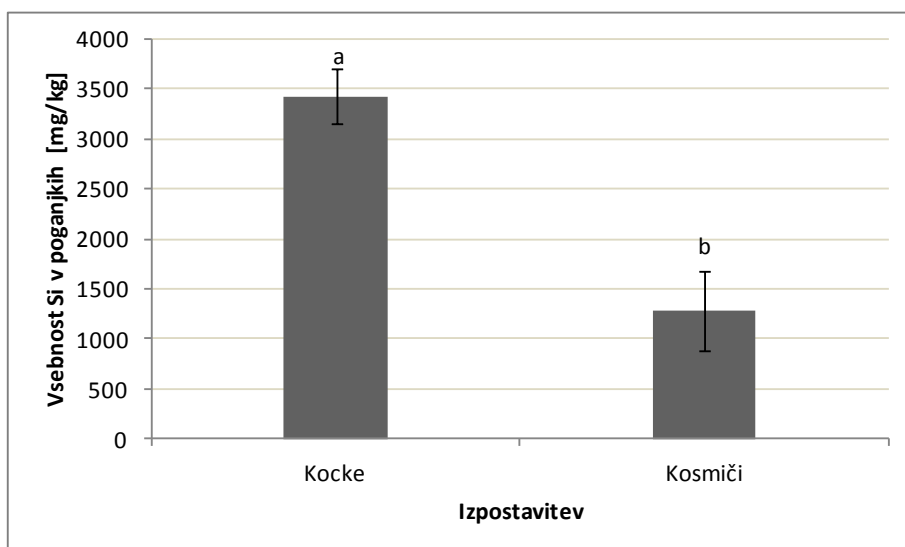
Slika 42: Vsebnost železa v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, $n = 5$ do 8. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, $p < 0,05$).

Nadaljnja statistična analiza je pokazala statistično značilen vpliv oblike mineralne volne na vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh (preglednica 41).

Preglednica 41: Rezultati enosmerne ANOVA za vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh in vpliv oblike mineralne volne. Z odebeljenimi črkami so označeni vzorci s statistično značilnim vplivom ($p < 0,05$). Simboli: SS – vsota kvadratov, df – stopnja prostosti, MS – povprečje kvadratov, F – F-test.

	SS	df	MS	F	p
Intercept	41571641	1	41571641	101,3744	0,000056
oblika MV	8645701	1	8645701	21,0830	0,003725
Napaka	2460481	6	410080		

Vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic v izpostavitvah z dodanimi kockami v njivska tla (3430 mg/kg) je bila statistično večja od vsebnosti silicija v izpostavitvah z dodanimi kosmiči v njivska tla (1280 mg/kg) (slika 31).



Slika 43: Vsebnost silicija v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh, pri različnih izpostavitvah. Povprečje $\pm$ se, $n = 3$ do 5. Različne črke označujejo statistično značilno razliko med izpostavitvami (enosmerna analiza ANOVA, Duncanov test, $p < 0,05$).

Preostale analize niso pokazale statistično značilnega vpliva oblike mineralne volne na vsebnost P, S in Fe v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh.

Preglednica 42 vsebuje povzetke statistično značilnih vplivov na posamezne elemente v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v posameznih tleh.

Preglednica 42: Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost mineralov v nadzemnih delih sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2).

Poganjki			Vsebnost mineralov								
Stat. analiza	Substrat	Statistično značilni vplivi	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn
Faktorska ANOVA	S1 in S2	Vpliv substrata		*	*	*	*		*		
		Vpliv dodatka MV	*	*	*					*	
Enosmerna ANOVA	S1	Vpliv dodatka MV	*							*	
		Vpliv oblike MV									
Enosmerna ANOVA	S2	Vpliv dodatka MV	*	*	*					*	
		Vpliv oblike MV	*								

4.8 PREGLED STATISTIČNO ZNAČILNIH VPLIVOV

4.8.1 Biomasa

Preglednica 44: Pregled statistično značilnih vplivov na biomaso sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 in S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla.

Stat. analiza	Substrat	Statistično značilni vplivi	Suha masa	
			Poganjki	Korenine
Faktorska ANOVA	S1 in S2	Vpliv substrata	*	*
		Vpliv dodatka MV		
Enosmerna ANOVA	S1	Vpliv dodatka MV		
		Vpliv oblike MV		
Enosmerna ANOVA	S2	Vpliv dodatka MV		
		Vpliv oblike MV		

4.8.2 Vsebnost vode

Preglednica 45: Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost vode v nadzemnih delih sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 in S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla.

Stat. analiza	Substrat	Statistično značilni vplivi	Suha masa	
			Poganjki	Korenine
Faktorska ANOVA	S1 in S2	Vpliv substrata		
		Vpliv dodatka MV		

4.8.3 Fotosintezni pigmenti

Preglednica 46: Preglednica. Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost fotosinteznih pigmentov v nadzemnih delih sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 in S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla.

Stat. analiza	Substrat	Statistično značilni vplivi	Fotosintezni pigmenti		
			Klorofil a	Klorofil b	Karotenoidi
Faktorska ANOVA	S1 in S2	Vpliv substrata	*	*	*
		Vpliv dodatka MV	*	*	*
Enosmerna ANOVA	S1	Vpliv dodatka MV	*		*
		Vpliv oblike MV			
Enosmerna ANOVA	S2	Vpliv dodatka MV			
		Vpliv oblike MV			

Preglednica 47: Pregled statistično značilnih vplivov na fotokemično učinkovitost fotosistema II (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 in S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla.

			Fotokemična učinkovitost	
Stat. analiza	Substrat	Statistično značilni vplivi	Dejanska	Potencialna
Faktorska ANOVA	S1 in S2	Vpliv substrata		*
		Vpliv dodatka MV	*	
Enosmerna ANOVA	S1	Vpliv dodatka MV		*
		Vpliv oblike MV		
Enosmerna ANOVA	S2	Vpliv dodatka MV		
		Vpliv oblike MV		

Preglednica 48: Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost mineralov v nadzemnih delih sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla.

Poganjki			Vsebnost mineralov								
Stat. analiza	Substrat	Statistično značilni vplivi	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Zn
Faktorska ANOVA	S1 in S2	Vpliv substrata		*	*	*	*		*		
		Vpliv dodatka MV	*	*	*					*	
Enosmerna ANOVA	S1	Vpliv dodatka MV	*							*	
		Vpliv oblike MV									
Enosmerna ANOVA	S2	Vpliv dodatka MV	*	*	*					*	
		Vpliv oblike MV	*								

Preglednica 49: Pregled statistično značilnih vplivov na vsebnost mineralov v koreninah sončnic (označeno z *), analizirano s faktorsko ANOVA (analiza S1 S2) in enosmerno ANOVA (substrat S1, substrat S2). Legenda: substrat S1 – substrat Tonsubstrat, substrat S2 – njivska tla.

[illegible]

5 DISKUSIJA

5.1 LASTNOSTI TAL

V poskusih smo uporabili dva različna substrata, organski substrat za rože (substrat Tonsubstrat) in njivska tla. Substrata sta se razlikovala predvsem v vsebnosti skupne organske snovi, teksturi delcev in pH vrednosti. Zaradi razlik v lastnostih uporabljenih substratov smo želeli določiti njihov vpliv na rast sončnic. Zanimalo nas je tudi, ali je vpliv dodatka mineralne volne v tla na rast in mineralno sestavo sončnic odvisen od vrste substrata. Znano je namreč, da na privzem hranil vplivajo, poleg lastnosti rastlin in lastnosti topljencev, tudi lastnosti tal. Struktura tal, koloidni delci, pH, kationska izmenjevalna kapaciteta in biološka aktivnost v rizosferi lahko neposredno vplivajo na vezavo ali sproščanje mineralov (Marschner in Rengel, 2012).

S poskusi smo ugotovili, da je bil substrat Tonsubstrat optimalnejši za rast in razvoj sončnic. Boljšo rast sončnic vseh izpostavitvev smo opazili že vizualno. Pomembni lastnosti, ki sta odražali izrazito boljšo rast sončnic, sta bili večja vsebnost organske snovi (9,1 %) in manjša vrednost pH (5,5). Njivska tla so imela po drugi strani manjšo vsebnost organske snovi (4,7 %) in večjo vrednost pH (7,3). Občutna razlika med substratoma je bila tudi v teksturi; substrat Tonsubstrat je imel zaradi dodatkov šote vlaknasto in rahlo strukturo, njivska tla pa so imela peščeno ilovnato strukturo. Posledica strukture tal se je pokazala tudi v vodo-zadrževalnih lastnostih. Saturacija odraža vsebnost vode, pri kateri so vse pore v tleh zapolnjene z vodo; posredno predstavlja torej informacijo o poroznosti tal. Večja poroznost substrata (večje število por) je lahko za rast rastlin ugodnejše, saj je substrat bolj prezračen in posledično zmanjšuje tveganje, da bi prišlo do neugodnih anoksičnih pogojev (FAO, 2016; World agro forestry, 2016). Substrat Tonsubstrat je imel skoraj 7 x večjo zadrževalno kapaciteto kot njivska tla. Zadrževalna kapaciteta za substrat Tonsubstrat je znašala 5,4 g/g, za njivska tla pa 0,8 g/g.

Z analizo XRF vzorcev njivskih tal smo ugotovili, da je v njivskih tleh prisotno veliko silicija (10,3 %), kalcija (6,6 %), železa (2,2 %) in kalija (1,2 %); aluminij je bil pod mejo detekcije. Vpliv mineralov iz tal smo izničili s kontrolno izpostavitvijo, kjer v tla nismo dodali mineralne volne.

Po zaključenem poskusu smo izmerili pH tal, odvzetih iz treh ponovitev posamezne izpostavitve. Po polurnem luženju v bidestilirani vodi smo izmerili pH. Pri substratu Tonsubstrat je pri kontrolni izpostavitvi povprečni pH narastel do 6,5; pri izpostavitvah z dodano mineralno volno pa do 6,0. Pri njivskih tleh je pH po poskusu ostal več ali manj enak, kot pred poskusom, saj smo pri kontrolni izpostavitvi izmerili 7,2, pri izpostavitvah z dodano mineralno volno pa 7,4.

5.2 LASTNOSTI KOCK IN KOSMIČEV MINERALNE VOLNE

Mineralna volna velja za kemijsko inerten anorganski material, z rahlo alkalnim pH (7,5) in nizko električno prevodnostjo (EC znaša med 50-100 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (De Rijck in Schrevens, 1998). Podobne fizikalne lastnosti smo izmerili tudi mi. Pomembno je tudi dejstvo, da ima mineralna volna zelo nizko kationsko izmenjevalno kapaciteto, zato hranil ne zadržuje v svoji strukturi, razen v kombinaciji s tlemi in vermikulitom (Hannah, 1983).

Z analizami XRF smo določili sestavo kock in kosmičev mineralne volne. Med oblikama ni bilo opazne razlike v mineralni sestavi, saj je izhodna surovina za izdelavo kock in kosmičev enaka, razlika je le v proizvodnem procesu. Mineralna volna v večjih koncentracijah vsebuje silicij (143 g/kg), kalcij (107 g/kg) in železo (35 g/kg), v nižjih pa titan (9 g/kg) in kalij (6 g/kg); aluminij je bil pod mejo detekcije. Primerjava izmerjenih vrednosti mineralov v mineralni volni z XRF je v podobnih območjih kot vrednosti mineralov iz literature.

Primerjava vsebnosti mineralov v njivskih tleh in mineralni volni je pokazala na 1,4 x večjo vsebnost silicija, 1,6 x večjo vsebnost kalcija in železa ter 3,3 x večjo vsebnost titana v mineralni volni. Njivska tla pa so po drugi strani vsebovala 1,9 x več kalija in 1,7 x več fosforja.

Zaradi inertne narave mineralne volne (Bougoul in sod., 2005) in posledično biološke nedostopnosti mineralov, smo naredili analize o biodostopnosti mineralov. Analizirali smo biodostopne minerale v izlužkih in električno prevodnost izlužkov (oboje po 48 urnem luženju v bidestilirani vodi s pH 7,5 in 5,0). Izmerjena električna prevodnost izlužkov mineralne volne (41 μS) potrjuje teoretično visoko inertnost materiala. Z meritvami biodostopnih mineralov s TXRF smo prav tako dokazali, da je luženje mineralov nizko, v izlužkih so prisotne nizke koncentracije Ca (194 mg/ kg), K (165 mg/ kg), P in S oba 32 (mg/ kg) in Cl (19 mg/ kg). Železo se je izlužilo v nizkih koncentracijah (5 mg/ kg). Vsebnost Al in Si nismo izmerili.

5.2.1 Pomanjkljivosti poskusov in meritev

S primerjavo izmerjenih koncentracij mineralov v mineralni volni in biodostopnih mineralov v izlužkih je možno opaziti, da je večina mineralov v mineralni volni nedostopna (pri pogojih luženja v bidestilirani vodi, s pH vrednostima 7,5 in 5,0). Vendar laboratorijski pogoji luženja, ki smo jih zagotovili ob poskusu, ne odražajo nujno realnih pogojev v tleh, kjer rastlina s svojim metabolizmom vpliva na privzem mineralov in na kemijske pogoje rizosfere (Marschner in Rengel, 2012; Puig in Penarrubia, 2009). Zato smo biodostopnost mineralov in zmožnost sončnice za ekstrakcijo elementov iz mineralne volne ocenili tudi z meritvami mineralov v tkivih rastlin na napravi XRF. Biomasa rastlin

5.3 BIOMASA RASTLIN

S poskusi smo želeli ugotoviti, ali dodatek mineralne volne v različne rastne substrate vpliva na rast sončnic. Učinek mineralne volne kot tudi vpliv posameznega substrata na rast sončnic smo spremljali vizualno tekom poskusa, vpliv obeh dejavnikov pa smo še dodatno statistično ovrednotili z analizami suhih mas nadzemnih delov in korenin sončnic.

Faktorska analiza ANOVA je pokazala, da na razliko v biomasi vseh nadzemnih delov in korenin sončnic statistično vplivajo izbrana tla. Povprečna suha masa nadzemnih delov vseh sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, je bila 8 x večja od suhe mase nadzemnih delov sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Prav tako je bila suha masa vseh korenin sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, 7 x večja od suhe mase korenin sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Statistična analiza je pokazala, da dodatek mineralne volne v katera koli uporabljena tla nima statistično značilnega vpliva na suho maso nadzemnih delov in korenin. Z ozirom na naše poskuse lahko zaključimo, da ne glede na tla, v katera smo dodali mineralno volno, mineralna volna ne vpliva na boljšo rast sončnic.

Vpliv tal na biomaso nadzemnih delov in korenin sončnic je bil izrazito velik, zato bi se morebitni minimalni vpliv dodane mineralne volne v tla ob statističnih analizah lahko izničil. Zato smo se odločili za nadaljnje statistične analize, kjer smo obdelovali podatke o rasti za vsaka tla posebej.

Statistična analiza suhih mas sončnic, ki so rasle v tleh bogatih z organsko snovjo (substrat Tonsubstrat), je pokazala, da dodatek mineralne volne v tla nima statistično značilnega vpliva na suho maso nadzemnih delov in korenin sončnic. Pri tem velja še poudariti, da je ob čiščenju korenin sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat kot tudi pri njivskih tleh, prišlo do izgubljanja korenin, podrobneje opisano spodaj. Enako tudi dodatek mineralne volne v tla revna z organsko maso (njivska tla) nima statistično značilnega vpliva na suho maso nadzemnih delov in korenin sončnic.

Rezultati naših poskusov se skladajo z ugotovitvami Šušek in sod. (2015). Preučevali so vpliv različnih dodatkov mineralne volne (koluti in kocke) v tla na zadrževanje vode v substratu in na rast pelargonij. Ugotovili so, da dodatek mineralne volne v substrat ni imel statistično značilnega vpliva na svežo in suho maso nadzemnih delov in korenin pelargonij.

Iz poskusov lahko povzamemo, da dodatek mineralne volne v tla, ki so bogata ali pa revna z organsko snovjo, ni statistično vplival na biomaso nadzemnih delov in korenin sončnic.

5.3.1 Pomanjkljivosti poskusov in meritev

Poudariti je potrebno, da je bilo pridobivanje in čiščenje korenin sončnic iz tal po zaključenem poskusu zahtevno. Dejavniki, ki so nam oteževali delo in prispevali k variabilnosti rezultatov, so predvsem razraščanost koreninskega sistema, tanjši in krhkejši koreninski sistem pri sončnicah iz njivskih tal, prisotnost šotnih vlaken (predvsem pri substratu Tonsubstrat) in prisotnost ostankov mineralne volne v tleh. Omenjeno vpliva na variabilnost rezultatov.

5.3.2 Fotografije sončnic

5.3.2.1 Kontrolne izpostavitve

Občutno razliko v boljši rasti sončnic v substratu Tonsubstrat, kot pa v njivskih tleh, pripisujemo predvsem večji vsebnosti organske snovi, saj je znano, da potrebuje sončnica za rast veliko dušika. Razlika v nižji in šibkejši rasti sončnic v njivskih tleh je predvsem posledica pomanjkanja makrohranil. Pomanjkanje makrohranil je glavni omejujoči dejavnik za rast rastlin in razvoj v normalnih rastnih pogojih (Cantamutto in Poverene, 2007; Hopkins in Hüner, 2018). Dodatno bi na boljšo rast v substratu Tonsubstrat lahko vplival tudi nižji pH tal. Znano je, da so v kislih tleh minerali rastlinam dostopnejši in ne prihaja do njihovega obarjanja, kot je to pogosto v tlaeh z bazičnim pH (White, 2012).

5.3.2.2 Izpostavitve z dodatkom kock mineralne volne

Rast sončnic je vizualno podobna med kontrolno izpostavitvijo (slika 34) in izpostavitvijo z dodatkom 60 v/v % kock v njivska tla (slika 38). V poskusih se je pokazalo, da dodatek mineralne volne v obliki kock v tla revna z organsko snovjo vizualno ni izboljšal rasti sončnic. Enako velja tudi za primerjavo med kontrolno izpostavitvijo substrata Tonsubstrat in izpostavitvijo z dodatkom 60 v/v% kock v enaka tla. Rast sončnic je vizualno zelo podobna, sončnice so močne in zdrave. Zaključimo lahko, da v našem poskusu dodatek mineralne volne v obliki kock v tla (bogata ali revna z organsko snovjo) na rast sončnic vizualno ni vplival.

5.3.2.3 Izpostavitve z dodatkom kosmičev mineralne volne

Rast sončnic v substratu Tonsubstrat z dodatkom 60 % kosmičev (slika 40) se na videz ne razlikuje od kontrolne izpostavitve v enakih tleh (slika 32), sončnice so podobno visoke in čokate. V poskusih se je pokazalo, da dodatek mineralne volne v obliki kosmičev v tla bogata z organsko snovjo vizualno ni izboljšal rasti sončnic. Pri izpostavitvi sončnic, ki so rasle v njivskih tleh z dodatkom 60 % kosmičev (slika 42), je bila opažena slabša rast dveh ponovitev znotraj izpostavitve; preostale tri ponovitve omenjene izpostavitve pa so rasle podobno kot kontrolne sončnice v njivskih tleh (slika 34). V naših poskusih se je pokazalo, da je vpliv dodatka mineralne volne v obliki

kosmičev na vizualno rast sončnic odvisen od vrste substrata (bogat oz. reven z organsko snovjo). Vendar bi morali za natančnejše rezultate vpliva mineralne volne v odvisnosti od substrata poskus ponoviti z večjim številom sončnic.

5.4 VSEBNOST VODE V NADZEMNIH DELIH SONČNIC

Mineralna volna velja za hidrofilen anorganski material, ki se hitro omoči in ima zmožnost zadrževanja vode, po drugi strani pa omogoča tudi odtekanje vode (Bougoul in sod., 2005). Dannehl in sod. (2015) navajajo, da ima mineralna volna nizko kapaciteto zadrževanja vode, okrog 1,1-3,5 v/v %. Po drugi strani Olle in sod. (2015) navajajo, da kamena volna proizvajalca Grodan po drenaži (posledica gravitacijske sile) vsebuje 80 % raztopine, 15 % zračnih por in 5 % vlaken pri poljski kapaciteti. Razmerje med vsebnostjo raztopine in zraka vpliva na razraščanje korenin in posledično na biomaso rastlin.

Dodatek mineralne volne v tla lahko torej izboljša vodno-zračni režim tal, saj omogoča zadrževanje vode ter zagotavlja zračnost v tleh (Urbanscape, 2016). Mineralna volna ohranja obliko (se ne razgrajuje) (Dannehl in sod., 2015), kar ohranja volumen zraka v mineralni volni. V primeru gojenja rastlin v rastnem mediju, ki je sestavljen le iz kock mineralne volne, je zračnost izrazito povečana zaradi prostora zraka med kockami, kar se uporablja predvsem pri gojenju orhidej, hortenzij in flamingov (Dowgert, 2016). Do drugačnih ugotovitev glede zbitosti mineralne volne je prišel Nowak (2010). Po 6 mesečni kultivaciji vrtnic v hidroponiki z uporabljenno mineralno volno je namreč prišlo do prvih znakov posedanja in zbitosti mineralne volne, ki se je s časoma le povečevala (do dveh let in pol trajanja poskusa). Posledično se je zmanjšala poroznost materiala in povečala gostota. Podatkov o kompaktnosti in zbitosti mineralne volne v tleh nismo zasledili.

S podatki o vsebnosti vode v nadzemnih delih sončnic smo želeli preučiti, ali dodatek mineralne volne izboljša vodni režim rastlin. Faktorska analiza ANOVA je pokazala, da niti vrsta substrata niti dodatek mineralne volne v različna uporabljena tla ni imel statistično značilnega vpliva na vsebnost vode v nadzemnih delih sončnic. Vsebnost vode v nadzemnih delih sončnic se tako ni razlikovala med kontrolno izpostavitvijo in izpostavitvami z dodatki mineralne volne v rastni substrat.

5.4.1 Pomanjkljivosti poskusov in meritev

Omeniti je potrebno dejstvo, da smo sončnice gojili v kontroliranih pogojih in jih zalivali dvakrat tedensko, tako da so imele rastline ves čas optimalne pogoje za rast. Potrebno bi bilo preučiti še vpliv mineralne volne na vsebnost vode v rastlinah, če jih gojimo v sušnih pogojih. V tem primeru bi bilo možno, da bi prišlo do razlik v vsebnosti vode v izpostavitvah z dodano mineralno volno.

Tekom poskusa bi lahko spremljali tudi vsebnost vode v rastnem substratu z merilnimi sondami, da bi ugotovili, ali je vsebnost vode v substratu v primeru dodatka mineralne vode povečana. Izmerili smo le zadrževalno kapaciteto njivskih tal in substrata Tonsubstrat. Zadrževalne kapacitete rastnih substratov po zaključenem poskusu (primešana mineralna volna) nismo izmerili zaradi nehomogenosti substrata – spodnja stranica lončkov in tla so bila preraščena s koreninami, med katere so bile ujete kocke in kosmiči mineralne volne, v zgornjem delu pa v večini primerov korenin ni bilo (slika 44). Poleg omenjenega bi za nadaljnje poskuse predlagali merjenje zadrževalne kapacitete rastnih substratov (tla s primešano mineralno volno) večjih količin.



Slika 44: Sončnica v substratu Tonsubstrat.

5.5 ANALIZA FOTOSINTEZNIH PIGMENTOV

Fotosinteza je eden izmed najpomembnejših metabolnih procesov v rastlinah. Rastline so zmožne pretvarjati svetlobno energijo v kemijsko energijo (v obliko ATP in redukcijsko moč NADPH). Oba produkta fotosinteze, ATP in NADPH, se nato porabljata za sintezo sladkorjev, ki jih rastline sintetizirajo iz anorganskega CO_2 in vode. Za absorpcijo svetlobe so pomembni fotosintezni pigmenti, med katere prištevamo klorofile in karotenoide (Boyer, 2002). Klorofil *a* je glavni asimilacijski pigment v reakcijskem centru klorofila, ostali klorofili in karotenoidi pa so antenski asimilacijski pigmenti (Likar in sod., 2010). Klorofilni status je eden ključnih pokazateljev fotosintezne učinkovitosti in vpliva okoljskega stresa.

V poskusih smo preučevali vpliv dodatka mineralne volne v različnih tleh na koncentracijo klorofila *a*, klorofila *b* in karotenoidov v nadzemnih delih sončnic. Faktorska analiza podatkov je pokazala, da je na koncentracije klorofila *a*, klorofila *b* in

karotenoidov v nadzemnih delih sončnic iz njivskih tal in substrata Tonsubstrat statistično vplival substrat kot tudi dodatek mineralne volne. V nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, so koncentracije vseh opazovanih fotosinteznih pigmentov vsaj enkrat višje od koncentracij v nadzemnih delih sončnic iz njivskih tal.

Nadaljnje smo vpliv mineralne volne na koncentracijo fotosinteznih pigmentov preučevali za posamezni substrat posebej. Sončnice, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, so kazale statistično višjo koncentracijo klorofila *a* in karotenoidov, če smo v tla dodali mineralno volno, kot pa sončnice, ki smo jih gojili v enakih tleh brez dodatkov mineralne volne.

Zanimalo nas je tudi, ali na višjo vsebnost klorofila *a* in karotenoidov v nadzemnih delih sončnic iz substrata Tonsubstrat statistično vpliva tudi oblika dodatkov mineralne volne (kocke ali kosmiči), ki smo jo primešali v tla. Statistična obdelava podatkov takšnega vpliva ni potrdila. Po drugi strani na koncentracijo fotosinteznih pigmentov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v tleh revnih z organsko snovjo, dodatek mineralne volne ni imel statistično značilnega vpliva.

Če povzamemo, poskusi so pokazali, da je dodatek mineralne volne v tla vplival na višjo vsebnost fotosinteznih pigmentov (klorofila *a* in karotenoidov) v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v tleh bogatih z organsko snovjo. Vpliv oblike mineralne volne (kocke ali kosmiči) na vsebnost fotosinteznih pigmentov ni bil statistično različen. Analiza po drugi strani ni pokazala statistično značilnega vpliva na višjo vsebnost fotosinteznih pigmentov v sončnicah, ki so rasle v tleh revnih z organsko snovjo.

5.6 FOTOKEMIČNA UČINKOVITOST

S poskusi smo želeli preučiti, ali dodatek mineralne volne v tla vpliva na fotokemično učinkovitost sončnic. Znano je, da večja dostopnost hranil vpliva na večjo stopnjo fotosinteze, kar se odraža v večji rasti rastlin (Dannehl in sod., 2015). Z meritvami fluorescence klorofila v fotosistemu II, po vzburjanju s svetlobo, dobimo informacije o stanju fotosinteznega aparata, oz. učinkovitosti fotokemičnih reakcij pri fotosintezi. Fotokemično učinkovitost izrazimo s potencialno in dejansko fotokemično učinkovitostjo. Če je rastlina vitalna, dosega potencialna fotokemična učinkovitost pri večini rastlinskih vrst vrednosti 0,83 in se zmanjša, kadar je rastlina izpostavljena stresu. Potencialno fotokemično učinkovitost se meri na temotno adaptiranih rastlinah. Dejanska fotokemična učinkovitost je manjša od potencialne in odraža trenutno aktivnost fotosinteznega aparata, ki je odvisna tudi od svetlobnih razmer. Rastline so adaptirane na svetlobo (Vodnik, 2001).

Dejansko in potencialno fotokemično učinkovitost sončnic smo izmerili tekom rasti sončnic. Faktorska analiza ANOVA je pokazala, da na dejansko fotokemično

učinkovitost vseh sončnic statistično vpliva dodatek mineralne volne, na potencialno fotokemično učinkovitost pa substrat. Večje vrednosti dejanske fotokemične učinkovitosti smo izmerili pri sončnicah, ki so rasle v tleh revnih z organsko snovjo, po drugi strani pa smo večje vrednosti potencialne fotokemične učinkovitosti izmerili pri sončnicah, ki so rasle v tleh z večjo vsebnostjo organske snovi.

Naredili smo tudi statistične analize podatkov o dejanskih in potencialnih fotokemičnih učinkovitostih sončnic, ki so rasle le v njivskih tleh oz. v substratu Tonsubstrat. Analize so pokazale, da je dodatek mineralne volne v substrat Tonsubstrat statistično vplival na potencialno fotokemično učinkovitost sončnic. Nadaljnje nas je zanimalo, ali na potencialno fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v omenjenih tleh, vpliva tudi oblika dodatkov mineralne volne (kocke ali kosmiči), ki smo jo primešali v tla. Statistična analiza je pokazala, da oblika ni imela statistično značilnega vpliva.

Dodatek mineralne volne po drugi strani ni imel statistično značilnega vpliva na dejansko in potencialno fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v njivskih tleh in na dejansko fotokemično učinkovitost sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat.

Iz poskusov lahko povzamemo, da je bila, kot posledica večjih koncentracij klorofila *a* in karotenoidov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v tleh bogatih z organsko snovjo in primešano mineralno volno, tudi potencialna fotokemična učinkovitost statistično večja od kontrolne izpostavitve v substratu Tonsubstrat.

5.7 KONCENTRACIJE MINERALOV V NADZEMNIH DELIH IN KORENINAH SONČNIC

Z meritvami mineralov v tkivih sončnic smo želeli preučiti vpliv dodatka mineralne volne v različna uporabljena tla na mineralno sestavo sončnic. Zanimalo nas je, ali je sončnica zmožna sprejemanja (ekstrakcije) in akumulacije elementov iz mineralne volne ter ali mineralna volna predstavlja vir mineralov za sončnice v danih pogojih. Meritve vzorcev sončnic smo izvedli s pomočjo XRF. Analizirali smo vsebnost devetih elementov v nadzemnih delih in koreninah sončnic: silicij (Si), fosfor (P), žveplo (S), kalij (K), kalcij (Ca), titan (Ti), mangan (Mn), železo (Fe) in cink (Zn). Aluminij (Al) je bil pod mejo detekcije.

Koncentracije mineralov se med kontrolnimi izpostavitvami sončnic, ki so rasle v njivskih tleh ali substratu Tonsubstrat, razlikujejo. Omenjeno nazorno prikazujejo slike 22, 23 in 24. Različne koncentracije v tkivih sončnice odražajo predvsem posledico uporabljenih tal, ki so različno bogata z minerali. Nadaljnje smo naredili statistične analize in primerjave za posamezna tla posebej, ločili smo tudi rezultate iz nadzemnih delov in korenin. S primerjavo rezultatov kontrolnih izpostavitv sončnic, kjer v tla nismo primešali mineralne volne, smo izničili vpliv tal (zaradi prisotnih mineralov tudi

v zemlji, ne samo v mineralni volni) na vsebnost mineralov v tkivih sončnic, ki so se akumulirali kot posledica dodane mineralne volne.

Njivska tla so bila bogata s Si, Ca, Fe, K (analize za substrat Tonsubstrat nam ni uspelo narediti), mineralna volna pa je bila bogata z enakimi elementi in titanom. V mineralni volni so bile vsebnosti Si, Ca Fe in Ti višje kot v njivskih tleh; po drugi strani pa so bile vsebnosti K in P višje v njivskih tleh. Z analizo izlužkov v smo ugotovili, da se je pri laboratorijskih pogojih iz mineralne volne izlužilo malo elementov: Ca (194 mg/kg), K (165 mg/kg), P in S (oba 32 mg/kg) in Cl (19 mg/kg). Železo se je izlužilo v nizkih koncentracijah (5 mg/kg), Al in Si nismo izmerili. Omejeno inertnost materiala smo potrdili tudi z meritvami električne prevodnosti, ki je bila nizka.

Meritve vsebnosti mineralov v nadzemnih delih sončnic z XRF, smo zaradi obsežnega dela, naredili le za izpostavitve z dodatkom 60 v/v % kock, 60 % v/v % kosmičev in za kontrolno izpostavitve. Enake analize elementov smo naredili za korenine sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat. Analize elementov v koreninah sončnic, ki so rasle v v njivskih tleh, smo naredili za izpostavitve z dodatkom 20, 40 in 60 v/v % kock ter 20, 40 in 60 v/v % kosmičev.

Rezultati (absolutne vrednosti) vsebnosti mineralov v nadzemnih delih sončnic so bolj »nepristranski« in bolj zanesljivi, kot pa rezultati meritev mineralov v koreninah sončnic – razlogi so opisani spodaj.

5.7.1 Analiza vseh rezultatov

Naredili smo faktorsko analizo ANOVA za vsebnosti mineralov v nadzemnih delih in koreninah sončnic, ki so rasle v tleh bogatih ter v tleh revnih z organsko snovjo. Analize so pokazale na statističen vpliv substrata, dodatka mineralne volne v tla in vpliv nadzemnih delov oz. korenin na vsebnost mineralov v sončnicah. Grafi izdelani s pomočjo programa Statistica (slika 22, slika 23, slika 24) nazorno prikazujejo vsebnost elementov v koreninah in nadzemnih delih (poganjkih), pri različnih tleh in izpostavitvah (kontrolna izpostavitve in izpostavitve z dodano mineralno volno).

Zaradi statistično značilnega vpliva substrata ter nadzemnih delov oz. korenin, smo naredili nadaljnje statistične analize, kjer smo analizirali rezultate posebej za nadzemne dele in za korenine. Pri nadzemnih delih smo analizirali podatke posebej za njivska tla in za substrat Tonsubstrat, enako smo naredili analize tudi pri koreninah.

5.7.2 Analiza nadzemnih delov

Statistična analiza vsebnosti mineralov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v tleh bogatih z organsko snovjo, je pokazala na višjo vsebnost Si in Fe v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat z dodatkom mineralne volne. Nadaljnja

statistična analiza ni pokazala značilnega vpliva oblike dodane mineralne volne na višjo vsebnost omenjenih mineralov.

Naslednja statistična analiza vsebnosti mineralov v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v tleh revnih z organsko snovjo, je pokazala na višjo vsebnost Si, Fe, P in S pri izpostavitvah z dodano primešano mineralno volno v njivska tla. Na višjo vsebnost Si v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh z dodatkom mineralne volne, je statistično vplivala tudi oblika mineralne volne. Sončnice, ki so imele dodane kocke mineralne volne v tla, so imele v nadzemnih delih prisotne statistično višje koncentracije Si kot pa poganjki, ki so rasli v njivskih tleh z dodatkom kosmičev. Za ostale elemente (Fe, P, S) dodatek oblike mineralne volne v tla ni imel statistično značilnega vpliva na koncentracijo.

Če povzamemo, koncentraciji Si in Fe v nadzemnih delih sončnic sta bili pri izpostavitvah z dodatkom primešane mineralne volne večji tako v mešanici mineralne volne s tlemi revnimi v organski snovi kot s tlemi bogatimi v organski snovi. Koncentraciji P in S pa sta bili večji le v nadzemnih delih sončnic, ki so rasle v njivskih tleh z dodatkom mineralne volne.

Rezultati nakazujejo, da so sončnice v danih pogojih zmožne sprejeti Si in Fe iz rastnega substrata (mehanizmi privzema nam niso znani), v katerega je primešana mineralna volna v obliki kock ali kosmičev v različnih volumskih odstotkih in da so sončnice zmožne omenjena elementa akumulirati v nadzemnih tkivih.

Ker nam mehanizmi privzema mineralov v sončnicah, ki so bili prisotni v nadzemnih delih v povečanih koncentracijah – Si, Fe, P in S, niso znani, bi bilo potrebno v nadaljnjih poskusih preučiti mehanizme privzema omenjenih mineralov. Njihovo poznavanje bi razjasnilo, ali privzema sončnica minerale direktno iz mineralne volne, ali pa dodatek mineralne volne v rastni substrat le stimulira sončnico za boljši privzem mineralov iz rastnega substrata (tal). Sedaj lahko le trdimo, da dodatek mineralne volne v tla pozitivno vpliva na povečan privzem nekaterih mineralov iz rastnega substrata in akumulacijo le-teh v nadzemnih delih sončnice.

Na zmožnost sprejemanja mineralov iz rastnega substrata očitno vpliva tudi substrat, oz. interakcija substrata z dodatkom mineralne volne – višje koncentracije P in S v izpostavitvah z dodano mineralno volno so statistično značilne le za nadzemne dele sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Najverjetneje pa na zmožnost sprejemanja (ekstrakcije) mineralov in akumulacije v tkivih sončnice vplivajo tudi številni drugi dejavniki, na katere nismo bili pozorni: fiziološko stanje in metabolizem, prisotnost mikroorganizmov v tleh, prisotnost biofilma v mineralni volni v tleh, drugačni kemijski pogoji v tleh, vpliv volumna in velikosti cvetličnih lončkov... (White, 2012; Marschner, 2012; Marschner in Rengel, 2012).

Skladnost povišanih mineralov v tkivih sončnic z izmerjenimi biodostopnimi minerali z analizo TXRF je težko oceniti. Silicija, ki je bil povečano prisoten v nadzemnih delih sončnic iz obeh tal, v izlužkih s TXRF nismo mogli določiti. Povečana koncentracija železa v nadzemnih delih sončnic bi se lahko skladala z biodostopnimi izlužki, vendar ne moremo oceniti, kaj nam predstavlja nizka izlužena koncentracija (5,8 mg/kg) v laboratorijskih pogojih. Enako velja za S in P (izluženi koncentraciji sta znašali 32 mg/kg).

5.7.3 Analiza korenin

Faktorska analiza ANOVA je pokazala statističen vpliv substrata in dodatka mineralne volne na vsebnost elementov v koreninah sončnic, zato smo naredili enosmerno analizo ANOVA za vsebnosti mineralov v koreninah sončnic za vsa tla posebej.

Nadaljnje enosmerne analize ANOVA za vsebnost mineralov v koreninah sončnic, ki so rasle le v njivskih tleh ali substratu Tonsubstrat, niso pokazale statistično značilnih vplivov dodatka mineralne volne v katera koli uporabljena tla. Predvsem zaradi problema v številu ponovitev kontrolne izpostavitve v njivskih tleh ($n = 2$) je prišlo do velikih odstopanj v rezultatih.

5.7.4 Pomanjkljivosti poskusov in meritev

Rezultatov naših poskusov, kjer smo v tla dodajali mineralno volno in preučevali rast sončnic ter zmožnost ekstrakcije in akumulacije mineralov, ne moremo primerjati z nobeno drugo dostopno študijo. Večina raziskovalnih člankov, ki smo jih našli, se nanaša na uporabo in preučevanje mineralne volne v hidroponiki. Po besedah Dannehl in sod. (2015) je uporaba sistemov gojenja rastlin brez tal (hidroponika) najbolj intenzivna in učinkovita metoda v sodobnem kmetijstvu za pridelovanje zelenjave. Ker področje dodajanja mineralne volne v tla ni popularno (ni ekonomično, nima visokih izkoristkov, ni možno nadzorovanje mineralnih potreb rastlin in škodljivcev...), tudi raziskav iz omenjenega področja ni mogoče zaslediti.

Problem pri rezultatih o vsebnosti mineralov v koreninah sončnic, ki so rasle v substratu Tonsubstrat, se je pokazal zaradi teksture omenjenih tal. Šotna vlakna so se namreč ujela med korenine in s tem oteževala čiščenje, kar je posledično lahko vplivalo na variabilnost rezultatov v vsebnosti mineralov v (na?!) koreninah. Pri koreninah iz njivskih tal smo ostanke tal lažje odstranili, zato smo naredili meritve mineralov tudi za preostale tretmaje z dodatki 20 in 40 v/v % kock ter 20 in 40 v/v % kosmičev. Poleg omenjenega na variabilnost izmerjenih mineralov v koreninah na splošno (tako v substratu Tonsubstrat, kot tudi njivskih tleh – vendar v slednji manj zaradi lažjega čiščenja) lahko vplivajo tudi delci mineralne volne, ki se lahko odkrušijo iz kock ali kosmičev, in se primejo na površino korenin. Nekaterih delcev mineralne volne, kot tudi šotnih vlaken, ob čiščenju nismo mogli odstraniti. S tem bi dobili lažne »pozitivne«

rezultate (oz. višje koncentracije kot so realno) – prisotnost mineralov, ki pa niso bili nujno akumulirani v tkivih (posledica privzema sončnic), temveč le na površini korenin (posledica gibanja mineralov iz volne po tleh). Če do omenjenega pojava prihaja pri izpostavitvah z dodano mineralno volno, nam primerjava z rezultati iz kontrolne izpostavitve ne koristi, in tako ne moremo podati realnih rezultatov, ali je povečana koncentracija mineralov »v koreninah« posledica akumulacije v koreninah ali na površini korenin. Potrebne bi bile nadaljnje mikroanalize prisotnosti mineralnih hranil v koreninskih tkivih.

Pri statistični obdelavi rezultatov (vsebnost mineralov v koreninah sončnic iz njivskih tal) smo naleteli na problem, saj smo imeli pri kontrolnem tretmaju rezultate o vsebnosti mineralov le iz dveh ponovitev ($n = 2$). Ker je bila rast sončnic v njivskih tleh izrazito slabša kot v substratu Tonsubstrat, smo ob zbiranju korenin sončnic iz omenjenih tal, dobili majhno maso materiala za merjenje vsebnosti mineralov. Tako smo naredili le dve tableti za analizo XRF. Posledično je pri statistični obdelavi rezultatov prišlo, zaradi manjšega števila rezultatov, do velike variance rezultatov kontrolne izpostavitve (velik interval nezaupanja). Po drugi strani, pa ko smo združili podatke iz izpostavitve z dodatkom kock s podatki iz izpostavitve z dodatkom kosmičev v isto skupino (»dodatek mineralne volne«), je število rezultatov naraslo. Problem manjšega števila rezultatov smo delno rešili z uporabo statističnega testa Unequal N HSD, vendar bi bilo potrebno poskus ponoviti z večjim številom ponovitev znotraj izpostavitve (predvsem kontrolna izpostavitve).

5.8 PREDLOGI ZA NADALJNJE RAZISKAVE

Ker smo v poskusih zaznali pozitiven vpliv mineralne volne na nekatere kazalnike fiziološkega stanja sončnic in na privzem nekaterih mineralov iz rastnega substrata predlagamo naslednje:

- **Optimizacija** poskusa z večjim številom ponovitev znotraj posameznih izpostavitvev.
- Preučiti **mehanizme privzema** mineralov (predvsem silicij in železo) iz rastnega substrata (mineralne volne) v sončnicah.
- Ker smo potrdili nizko luženje mineralov iz mineralne volne pod laboratorijskimi pogoji, bi bilo potrebno preučiti, do kakšnega luženja mineralov prihaja v realnih pogojih, v tleh. Sončnice izločajo v rizosfero različne **eksudate** za povečanje biodostopnosti mineralov, ki bi jih bilo potrebno preučiti.
- Zaradi omejenega časa smo poskuse osredotočili le na vegetativno fazo rasti – zanimivo bi bilo preučiti dolgoročni vpliv (tudi na **reprodukcijsko fazo**) na rast in razvoj sončnic. Pomembno predvsem za industrijo, če je biomasa pridelka večja.

- Mineralna volna v zemlji predstavlja potencialno površino, na katero se lahko naselijo mikroorganizmi in tvorijo **biofilme**. Preučiti bi bilo potrebno zmožnost rizosfernih bakterij za tvorbo biofilmov na mineralni volni; poleg tega so poznani tudi mikroorganizmi, ki so zmožni ekstrakcije mineralov iz kamnin (ang. **biomining**).

6 SKLEPI

- Mineralna volna (MV) v večjih koncentracijah vsebuje silicij, kalcij in železo, v nižjih koncentracijah pa titan in kalij; aluminij je bil pod mejo detekcije.
- Izlužki MV v laboratorijskih pogojih so vsebovali predvsem nizke koncentracije kalcija in kalija.
- V poskusih uporabljena substrata, ki sta bila revna oz. bogata z organsko snovjo, sta signifikantno vplivala na rast sončnic. Sončnice, ki so rasle v tleh bogatih z organsko snovjo, so bile višje, močnejše in so imele večjo suho maso nadzemnih delov in korenin, kot pa sončnice, ki so rasle v njivskih tleh.
- Dodatek MV v tla bogata ali revna z organsko snovjo ni imel statistično značilnega vpliva na biomaso nadzemnih delov in korenin in na vsebnost vode v nadzemnih delih sončnic.
- Sončnice, ki so rasle v tleh bogatih z organsko snovjo in primešano MV, so imele statistično večjo koncentracijo klorofila *a* in karotenoidov v nadzemnih delih, kot pa sončnice, ki so rasle v enakih tleh brez dodatka MV. Oblika MV (kocke ali kosmiči), ki smo jo primešali v tla, ni statistično vplivala na večjo vsebnost omenjenih fotosinteznih pigmentov.
- Sončnice, ki so rasle v tleh bogatih z organsko snovjo in primešano MV, so imele statistično večjo potencialno fotokemično učinkovitost, kot pa sončnice, ki so rasle v enakih tleh brez dodatkov mineralne volne.
- Dodatek MV v tla je vplival na mineralno sestavo nadzemnih delov sončnic. Pri danih pogojih je bila sončnica zmožna sprejeti določene elemente iz rastnega substrata in jih akumulirati v svojih tkivih.
- Sončnice, ki so rasle v tleh bogatih z organsko snovjo in primešano MV, so imele statistično večjo koncentracijo silicija in železa v nadzemnih delih, kot pa sončnice, ki so rasle v enakih tleh brez dodatkov MV.
- Sončnice, ki so rasle v tleh revnih z organsko snovjo in primešano MV, so imele statistično večjo koncentracijo silicija, železa, fosforja in žvepla v nadzemnih delih, kot pa sončnice, ki so rasle v enakih tleh brez dodatkov MV. Oblika MV (kocke), ki smo jo primešali v tla revna z organsko snovjo, je vplivala na večjo vsebnost silicija v nadzemnih delih, v primerjavi s primešanimi kosmiči v enaka tla.
- Vpliv dodatka MV v rastni substrat ni znaten, ker ni vpliva na biomaso sončnic. Dodatek MV v rastni substrat tudi ne škoduje sončnicam, saj se kažejo pozitivni vplivi (povečane vsebnosti določenih mineralnih snovi, posledično pa tudi fotosinteznih barvil in fotokemične učinkovitosti). To so blagi vplivi na rast sončnic v vegetativni fazi rasti. Potrebne pa so še dodatne raziskave, ki bi bolj natančno preučevale vpliv dodatka MV v rastni substrat na mineralno sestavo rastlin in mehanizme privzema hranil iz rastnega substrata.

7 POVZETEK

Mineralna volna je inerten, anorganski vlaknast material, ki se veliko uporablja v gradbeništvu in industriji kot toplotna in zvočna izolacija. V sodobnem kmetijstvu (hidroponiki) se uporablja t.i. hortikultura mineralna volna, ki nadomešča substrate z zemljo. Mineralna volna izkazuje dobre lastnosti, saj je kemijsko stabilna, sterilna in homogena, z rahlo alkalnim pH, v svoji strukturi zadržuje vodo in zrak, po drugi strani pa omogoča odtekanje vode. Mineralno volno se uporablja v hidroponiki pri propagaciji rastlin in kot rastni substrat, kjer se lahko natančno nadzoruje vodne in mineralne potrebe gojenih rastlin; poleg omenjenega je zmanjšana tudi možnost kontaminacije rastnega substrata z mikroorganizmi. Na trgu je prisotna mineralna volna tudi v oblik kock in kosmičev, ki se jih primeša različnim rastnim substratom (zemlji). Dodatek mineralne volne v tla izboljša prezračevnost substrata in poveča vodno kapaciteto mešanice.

V poskusih smo preverjali, ali dodatek mineralne volne, v obliki kock in kosmičev, vpliva na rast in mineralno sestavo sončnic. Zanimalo nas je, ali so sončnice zmožne sprejeti elemente iz mineralne volne in jih akumulirati v svojih tkivih. Preverjali smo, ali je mineralna volna primešana v tla, lahko vir mineralov za sončnice.

Sončnice smo gojili v dveh različnih tleh (tla bogata z organsko snovjo in tla revna z organsko snovjo), z dodatkom mineralne volne v različnih oblikah (kocke in kosmiči) in v različnih volumskih odstotkih (20, 40, 60 v/v %).

Sončnice smo gojili v njivskih tleh in substratu Tonsubstrat. Njivska tla so bila revnejša v skupni organski snovi, imela so višji pH in peščeno ilovnato teksturo. Druga tla so bila organski substrat za rože (substrat Tonsubstrat) s šotnimi vlakni, nižjim pH in z večjim odstotkom skupne organske snovi. V tla smo primešali 0, 20, 40 in 60 v/v % kock ali kosmičev mineralne volne. Sončnice smo gojili v cvetličnih lončkih, pri kontroliranih rastnih pogojih v komorah. Po 39. dnevih gojenja smo poskuse podrli in ovrednotili različne kazalnike fiziološkega stanja rastlin, kot pokazatelje stresa oz. boljše rasti (zaradi dodatka mineralne volne v tla). Izmerili smo suho maso nadzemnih delov in korenin sončnic, koncentracijo fotosinteznih pigmentov v nadzemnih delih, fotokemično učinkovitost fotosistema II in določili vsebnost mineralov v tkivih sončnice ter mineralni volni z rentgensko fluorescenčno spektrometrijo (XRF). V bidestilirani vodi smo naredili tudi luženje mineralne volne in določili prisotne minerale v izlužkih. S statističnimi analizami smo ovrednotili pridobljene rezultate meritev.

XRF analiza sestave mineralne volne je pokazala na visoko vsebnost silicija, kalcija in železa; vsebnosti aluminija nismo izmerili. Prisotni pa so tudi minerali v manjših koncentracijah – titan, kalij, fosfor, žveplo. Z laboratorijskim poskusom (bidestilirana voda s pH 5,0 in 7,5) smo preverili biodostopnost mineralov v mineralni volni. Z TXRF analizo smo ugotovili, da sta v izlužkih v bistveno nižjih koncentracijah (kot pa v sami

mineralni volni) prisotna zlasti kalcij in kalij; vsebnost aluminija in silicija nismo izmerili. V izlužkih so bili v izredno nizkih koncentracijah prisotni še fosfor, žveplo, klor, železo, nikelj in krom.

Rast sončnic se je značilno razlikovala med uporabljenima rastnima substratom. Sončnice so v substratu Tonsubstrat rasle izrazito bolje kot pa v njivskih tleh. Suha masa nadzemnih delov in korenin sončnic iz substrata Tonsubstrat je bila 8 x oz. 7 x večja od suhe mase nadzemnih delov in korenin sončnic, ki so rasle v njivskih tleh. Podoben vpliv substrata se je pokazal tudi pri koncentraciji fotosinteznih pigmentov in fotokemični učinkovitosti sončnic ter pri vsebnosti nekaterih mineralov v tkivih sončnic.

Dodatek mineralne volne v njivska tla kot tudi v substrat Tonsubstrat ni statistično vplival na suho maso nadzemnih delov in korenin sončnic. S tem smo zavrnili postavljeno hipotezo, da bo rast sončnic ob dodatku mineralne volne v rastni substrat boljša. Prav tako dodatek mineralne volne v oba rastna substrata ni vplival na statistične razlike v vsebnosti vode v nadzemnih delih, v primerjavi s kontrolnimi sončnicami, ki so rasle v tleh brez dodatkov mineralne volne. Vpliv dodatkov mineralne volne v tla na vsebnost vode v nadzemnih delih bi morali preveriti tudi v stresnih pogojih, ob pomanjkanju vode.

Statistična analiza pridobljenih rezultatov je pokazala, da je dodatek mineralne volne v tla bogata z organsko snovjo statistično vplival na večjo koncentracijo klorofila *a* in karotenoidov v nadzemnih delih sončnic. Posledično so imele sončnice, ki so rasle v omenjenih tleh z dodatkom mineralne volne statistično večjo potencialno fotokemično učinkovitost kot pa sončnice, ki so rasle v omenjenih tleh brez dodatkov. Po drugi strani dodatek mineralne volne v tla revna z organsko snovjo ni vplival na višjo vsebnost fotosinteznih pigmentov v nadzemnih delih in na fotokemično učinkovitost sončnic. S tem smo delno potrdili hipotezo, da dodatek mineralne volne v rastni substrat vpliva na boljšo rast rastlin, ki se odraža v omenjenem kazalniku fiziološke rasti.

Dodatek mineralne volne v tla bogata z organsko snovjo je statistično vplival na višje koncentracije silicija in železa v nadzemnih delih sončnic. Sončnice, ki so rasle v omenjenih tleh brez dodatkov mineralne volne, so imele statistično nižje vsebnosti omenjenih elementov v nadzemnih delih. V primeru dodatka mineralne volne v tla revna z organsko snovjo se je izkazalo, da so imele sončnice v nadzemnih delih prisotne statistično večje koncentracije silicija, železa, fosforja in žvepla, v primerjavi s sončnicami, ki so rasle v enakih tleh brez dodatkov. Sončnice, ki so rasle v njivskih tleh z dodatkom kock mineralne volne, so imele statistično večjo vsebnost silicija v nadzemnih delih, kot pa sončnice, ki so rasle v enakih tleh z dodatkom kosmičev mineralne volne. S tem smo potrdili hipotezo, da bo dodatek mineralne volne v rastni substrat vplival na povečano vsebnost nekaterih mineralov v tkivih sončnice. Po drugi strani se vsebnost mineralov v koreninah sončnic, ki so rasle v obeh tleh z dodatkom

mineralne volne, statistično ni razlikovala od vsebnosti mineralov v koreninah kontrolnih sončnic.

Glede na naše poskuse lahko zaključimo, da generalni vpliv dodatka mineralne volne v rastni substrat ni bil znaten, ker ni vpliva na biomaso. Gre za blage vplive mineralne volne na rast sončnic v vegetativni fazi rasti. Dodatek mineralne volne v rastni substrat tudi ne škoduje sončnicam, saj se kažejo pozitivni vplivi (povečane vsebnosti določenih mineralnih snovi, posledično pa tudi fotosinteznih barvil in fotokemične učinkovitosti učinkovitost). Dodatek mineralne volne v rastni substrat je vplival na sončnice, da so iz rastnega substrata lahko bolje asimilirale določene minerale in jih akumulirale v nadzemnih delih, kot pa v primerih, kjer v tla ni bilo dodane mineralne volne. Mehanizmi privzema omenjenih mineralov nam niso znani, zato ne moremo trditi, ali je povečana vsebnost omenjenih mineralov v nadzemnih delih sončnic posledica ekstrakcije mineralov iz mineralne volne, ali pa je dodatek mineralne volne v tla le stimuliral sončnico na boljši sprejem mineralov iz rastnega medija. Potrebni pa so še dodatni poskusi in raziskave, da se razišče mehanizme privzema mineralov iz rastnega substrata z dodatkom mineralne volne.

V primeru, da je povečana koncentracija določenih mineralov v rastlinah posledica dodatka mineralne volne v rastni substrat, bi bilo smiselno uporabiti že uporabljeno mineralno volno iz hidroponike v ljubiteljskem vrtičkarstvu. Razrezana odvečna mineralna volna iz hidroponike (npr. v obliki kock) bi se lahko uporabljala kot dodatek organskim substratom (npr. substrat za rože, mešanica komposta in nadomestek šote), saj izboljša predvsem fizikalne lastnosti substratov. Po drugi strani pa če se dokaže prej omenjeni pozitiven vpliv dodatka mineralne volne v rastne substrate na privzem mineralov (tudi) v (drugih) rastlinah, bi uporaba odslužene mineralne volne predstavljala pomemben ekološki korak, kjer bi iz odpadka dobili dodano vrednost. S tem bi povečali krog uporabe mineralne volne in iz odpadka vzgojili prehranske rastline, ki bi vsebovale večje koncentracije pomembnih mineralov, ki jih v povprečni prehrani človeka primanjkuje. Znano je namreč, da pri tretjini Zemljanov v prehrani primanjkuje vsaj en esencialni element. Za primer, pri več kot 60 % svetovne populacije v prehrani primanjkuje železa (White in sod, 2012). Po drugi strani pa je potrebno nadzorovati vsebnost mineralov v rastlinah, ki so škodljivi za zdravje ljudi. Potrebno je usmeriti raziskave v izkoriščanje že uporabljene mineralne volne za vzgojo rastlin, ki bi vsebovale višje koncentracije mineralov, ki jih običajno primanjkuje v človeški prehrani. Pomembno je preučiti tudi prisotne mikroorganizme v rizosferi rastlin, ki povečujejo biodostopnost mineralov v kombinaciji z izbranimi rastlinami ter preučiti (gensko spremenjene) rastline, ki so zmožne ekstrakcije in akumulacije mineralov v svojih tkivih.

8 VIRI

ARSO, Atlas okolja

http://gis.arso.gov.si/atlasokolja/profile.aspx?id=Atlas_Okolja_AXL@Arso
(20.8.2016)

Aure Agencija za učinkovito rabo energije, Ministrstvo za gospodarske dejavnosti,
Republika Slovenija. Toplotnoizolacijski material

<http://gcs.gi-zrmk.si/Svetovanje/Clanki/PDFknjiznjicaAURE/IL2-03.PDF>
(12.8.2016)

Beauregard P.B., Chai Y., Vlamakisa H., Losickb R., Koltera R. 2012. *Bacillus subtilis* biofilm induction by plant polysaccharides. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110, 17: 1621-1630

Bougoul S., Ruy S., de Groot F., Boulard T. 2005. Hydraulic and physical properties of stonewool substrates in horticulture. Scientia Horticulturae, 104: 391–405

Boyer R. 2002. Temelji biokemije. 2nd (ed). Ljubljana, Študentska založba: 465 str.

Broadley M., Brown P., Cakmak I., Feng Ma. J., Rengel Z., Zhao F. 2012b. Beneficial elements. V: Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 249-269

Broadley M., Brown P., Cakmak I., Rengel Z., Zhao F. 2012a. Function of nutrients: micronutrients. V: Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 191-248

Cantamutto M., Poverene M. 2007. Genetically modified sunflower release: Opportunities and risks. Field Crops Research, 101: 133-144

Costa R., Orriols R. 2012. Man-made mineral fibers and the respiratory tract. Archivos de Bronconeumología, 48, 12: 460-468

De Rijck G., Schrevens E. 1998. Distribution of nutrients and water in rockwool slabs. Scientia Horticulturae, 72: 277–285

Dowgert M.H. Stone Wool as a Growing Substrate for Hydroponic Systems
<http://grodan101.com/knowledge-center/rockwool-growing-substrate-hydroponic-systems> (13.8.2016)

Dubský M., Šrámek F. 2009. The effect of rockwool on physical properties of growing substrates for perennials. Scientia Horticulturae (Prague), 36, 1: 38–43

FAO, Chapter 2 - Soil and water

<http://www.fao.org/docrep/r4082e/r4082e03.htm> (12.8.2016)

- Fonteno W.C., Nelson P.V. 1990. Physical properties of and plant responses to rockwool-amended media. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 115, 3: 375-381
- George E., Horst W.J., Neumann E. 2012. Adaptation of plants on adverse chemical soil conditions. V: *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 409-472
- Graan T., Ort D.R. 1984. Quantitation of the rapid electron donors to P700, the functional plastoquinone pool and the ratio of the photosystems in spinach chloroplasts. *The Journal of Biological Chemistry*, 259: 14003-14010
- Hanan J. J. 1983. Use of rockwool as a potting mixture. Comparison with peatmoss, soil and vermiculite. *Research Bulletin*, 395: 1-5
- Hawkesford M., Horst W., Kichey T., Lambers H., Schjoerring J., Moller S.I., White P. 2012. Functions of macronutrients. V: *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 135-189
- Hopkins W.G., Hüner N.P.A. 2009. *Introduction to plant physiology*. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc: 523 str.
- Huber D., Römheld V., Weinmann M. 2012. Relationship between nutrition, plant diseases and pests. V: *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 283-298
- Kandeler E., 1995. Organic matter by wet combustion. V: *Methods in soil biology*. Schinner F., Öhlinger R., Kandeler E., Margesin R. (ed.). Berlin, Nemčija: Springer-Verlag: 397-398.
- Kirkby E. 2012. Introduction, definition and classification of nutrients. V: *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 3-5
- Knauf Insulation. FAQ.
<http://www.knaufinsulation.si/node/355#ECOSEtechnology> (13.8.2016)
- Kötschau A., Büchel G., Einax J.W., Mirgorodsky D., Meißner R., von Tümpling W., Merten D. 2014. Element contents in shoots of sunflower (*Helianthus annuus*): Prediction versus measuring. *Chemie der Erde*, 74: 385-391
- Likar M., Vogel-Mikuš K., Regvar M. 2010. *Praktikum fiziologije rastlin za študente Biotehnologije*. Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo (interno gradivo, razdeljeno na vajah)

- Lopez-Valdez F., Fernandez-Luqueno F., Ceballos-Ramirez J.M., Marsch R., Olalde-Portugal V., Dendooven L. 2011. A strain of *Bacillus subtilis* stimulates sunflower growth (*Helianthus annuus* L.) temporarily. *Scientia Horticulturae*, 128: 499-505
- Marschner P. 2012. Rhizosphere biology. 2012. V: Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 369-388
- Marschner P., Rengel Z. 2012. Nutrient availability in soils. V: Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 315-330
- Monni S., Uhlig C., Junttila O., Hansen E., Hynynen J. 2001. Chemical composition and ecophysiological responses of *Empetrum nigrum* to above ground element application. *Environmental Pollution*, 112: 417-426
- Neumann G., Römheld V. 2012. Rhizosphere chemistry in relation to plant nutrition. V: Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 347-368
- Öko-Institut. Methodology for the free allocation of emission allowances in the EU ETS post 2012, Sector report for the mineral wool industry. 2009. http://www.ecofys.com/files/files/091102_lime.pdf (1.6.2016)
- Phytotoxkit. Seed germination and early growth microbiotest with higher plants. <http://www.microbiotests.be/SOPs/Phytotoxkit%20SOP%20-%20A5.pdf> (25.9.2016)
- Pilon-Smits E.A.H., Quinn C.F., Tapken W., Malagoli M., Schiavon M. 2009. Physiological functions of beneficial elements. *Current Opinion In Plant Biology*, 12: 267-274
- Puig S., Penarrubia L. 2009. Placing metal micronutrients in context: transport and distribution in plants. *Current Opinion In Plant Biology*, 12: 299-306
- Römheld V. 2012. Diagnosis of deficiency and toxicity of nutrient. V: Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 299-312
- Sončnica
http://www.bf.uni-lj.si/fileadmin/users/1/agronomija/Katedra/POZABLJENE_POLJ%C5%A0%C4%8CINE_soncnica.pdf (13.8.2016)
- Šušek A., Majkovič D., Muršec M. 2015. The impact of rock mineral wool on water retention within a conventional growth medium, and the development of zonal pelargoniums. V: RAMIRAN 2015 – 16th International Conference Rural-Urban Symbiosis, 8th – 10th September 2015, Hamburg, Germany. TuTech Verlag: 81-82

Urbanscape

<https://www.hidro-vlakna.si/> (13.8.2016)

Vantsi O., Karki T. 2014. Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16: 62–72

Vodnik D. 2001. Fiziologija rastlin – praktične vaje. Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo

http://www.bf.uni-lj.si/fileadmin/groups/2711/Gradiva_Vaje/Vodnik_V_AG-UNI-Fiziologija_Fiziologija_rastlin-prakticne_vaje.pdf (9.6.2016)

White P.J. 2012a. Ion uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport. V: Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 7-47

White P.J. 2012b. Long-distance transport in the xylem and phloem. V: Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd edition. Marschner P. (ed). Elsevier: 49-70

World agro forestry. Section : Substrates

<http://www.worldagroforestry.org/NurseryManuals/Research/Substrate.pdf> (12.8.2016)

ZAHVALA

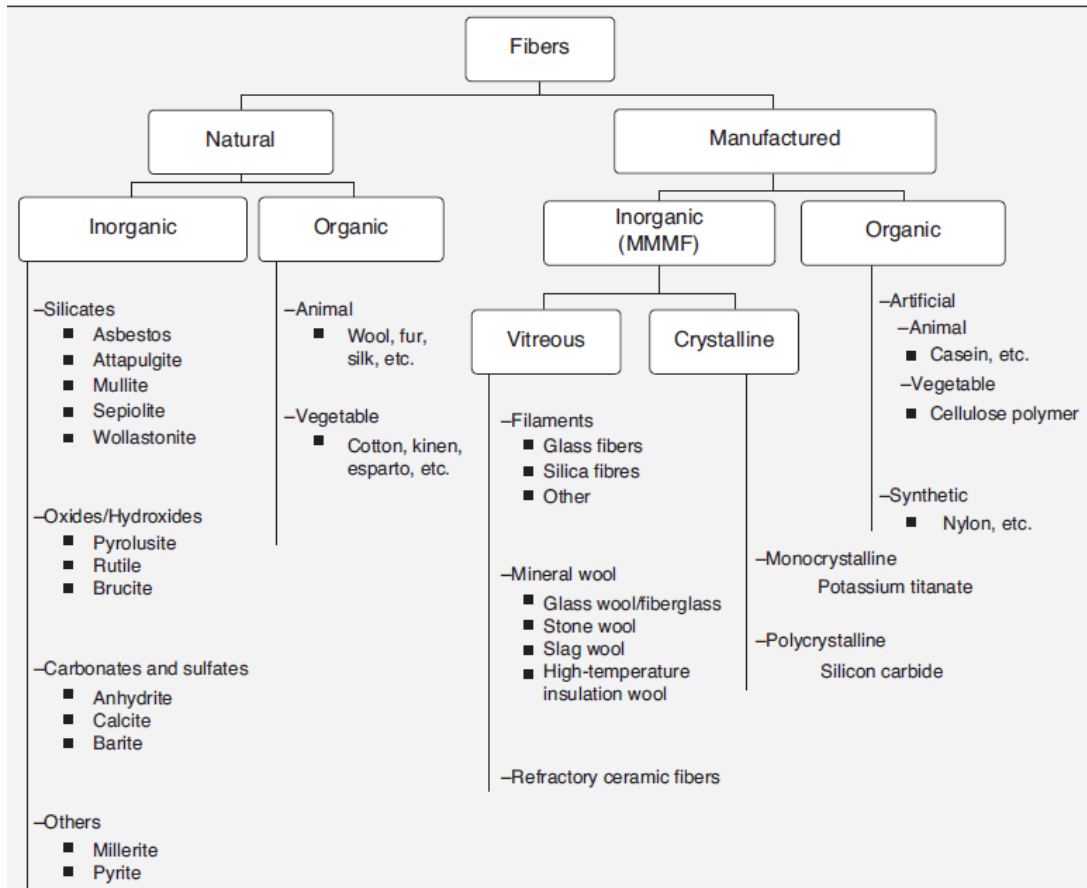
Iz srca se zahvaljujem mentorici prof. dr. Katarini Vogel-Mikuš, mladi raziskovalki Anji Kavčič in kolegici Tanji Murn, ki so mi pomagale pri izvedbi poskusov in analiz, usmeritvah in diskutiranju številnih vprašanj. Hvala vam za nesebično pomoč.

Rada bi se zahvalila gospe Mileni Kubelj za različne nasvete in usmeritve pri izdelavi laboratorijskega dela. Hvala tudi dr. Darji Majkovič za sodelovaje in materialno podporo za izvedbo poskusov. Prav tako hvala recenzentu dr. Dominiku Vodniku za diskusijo in komentarje.

Še posebej pa bi se rada iskreno zahvalila moji družini in bližnjim, ki so mi nudili pomoč, oporo in so verjeli vame.

PRILOGA A

Razdelitev vlaknastih mineralov



(Costa, 2012)