

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA BIOLOGIJO

Mateja URBANC

**SEZONSKA DINAMIKA PRIVZEMA KOVIN PRI
BELI GORJUŠICI (*Sinapis alba*)**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2010

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA BIOLOGIJO

Mateja URBANC

**SEZONSKA DINAMIKA PRIVZEMA KOVIN PRI
BELI GORJUŠICI (*Sinapis alba*)**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**SEASONAL DYNAMICS OF METAL
ACCUMULATION IN WHITE MUSTARD
(*Sinapis alba*)**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2010

Senat Biotehniške fakultete je dne 23.5.2008 odobril diplomsko delo:

Naslov dela: Sezonska dinamika privzem kovin pri beli gorjušici (*Sinapis alba*)

Mentorica: doc. dr. Marjana Regvar
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednica: doc. dr. Jasna Dolenc Koce
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Recenzentka: prof. dr. Alenka Gaberšček
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Mentorica: prof. dr. Marjana Regvar
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Somentorica: dr. Paula Pongrac
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo

Datum zagovora:

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

Delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Mateja Urbanc

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- ŠD Dn
- DK sezonska dinamika/ Cd/ Pb/ Zn/ *Sinapis alba*
- KG 581.1:546.3(497.12Mežiška dolina)(043.2)=163.6
- AV URBANC, Mateja
- SA REGVAR, Marjana/ PONGRAC, Paula
- KZ SI – Ljubljana, Večna pot 111
- ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo
- LI 2010
- IN SEZONSKA DINAMIKA PRIVZEMA KOVIN PRI BELI
GORJUŠICI (*Sinapis alba*)
- TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)
- OP VI, 52 str., 7 p., 6 sl., 13 pril.,
- IJ sl
- JI sl/en
- AL Namen raziskave je bil ugotoviti primernost rastlinske vrste bela gorjušica (*Sinapis alba*) za uporabo v prehrani, če rastlina raste na območju, močno onesnaženem s Cd, Pb in Zn. Ker je bila že v predhodnih raziskavah dokazana prisotnost velikih koncentracij Cd, Pb in Zn v rizoferni zemlji na področju Mežiške doline, smo to območje izbrali za našo raziskavo. Na vrtu v Mežiški dolini smo eno rastno sezono (od junija do septembra) gojili rastline izbrane vrste na prostem. Vsak mesec smo naključno vzorčili po 5 rastlin ter v laboratoriju naredili meritve suhe mase rastline, z metodo atomske absorpcijske spektrometrije (ASS) smo izmerili koncentracije Cd, Pb in Zn v posameznih rastlinskih delih ter izračunali njihove vsebnosti in translokacijske faktorje. Ob vsakem vzorčenju rastlin smo hkrati vzorčili tudi rizoferno zemljo, v kateri so rasle rastline ter tudi v vzorcih zemlje določili koncentracije Cd, Pb in Zn. Rezultati so pokazali, da na takem območju vzgojene rastline vrste *S. alba* niso primerne za uporabo v prehrani, saj so predvsem mladi listi, ki se v prehrani uporabljajo za solato ali namaze, presegajo zakonsko določene mejne vrednosti koncentracije Cd, Pb in Zn. Tudi plodovi oziroma semena, ki se uporabljajo kot začimba in kot glavna sestavina za izdelavo gorčice, vsebujejo prevelike koncentracije predvsem Cd.

KEY WORDS DOCUMENTATION

- DN Dn
- DC seasonal dynamics / Cd/ Pb/ Zn/ *Sinapis alba*
- CX 581.1:546.3(497.12Mežiška dolina)(043.2)=163.6
- AU URBANC, Mateja
- AA REGVAR, Marjana/ PONGRAC, Paula
- PP SI – Ljubljana, Večna pot 111
- PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Biology
- LI 2010
- TI SEASONAL DYNAMICS OF METAL ACCUMULATION IN WHITE MUSTARD (*Sinapis alba*)
- DT Graduation Thesis (University studies)
- NO VI, 52 p., 7 tab., 6 fig., 13 ann.,
- LA sl
- AL sl/en
- AB The purpose of the research was to identify suitability of a white mustard (*Sinapis alba*) for food production when the plant is grown in the area, heavily polluted with Cd, Pb and Zn. Since the previous researches established significant concentrations of Cd, Pb and Zn in the rhizosphere soil of the Mežica valley, we choose this area to carry out our research. In a garden in Mežica, we grew the selected plant species in natural environment conditions during one growing season (from June to September). Every month, we performed random sampling of five (5) plants and measured dry mass of plants in a laboratory. With the atomic absorption spectrometry (AAS) method we measured Cd, Pb and Zn concentrations in individual plant pieces and calculated their contents and translocation factors. Simultaneously with each sampling of plants we also sampled the rhizosphere soil in which the plants were growing and measured the Cd, Pb and Zn concentrations in the soil samples. The sampling performed every month enabled us to identify seasonal dynamics of metal accumulation in plants. The results showed that plants species *S. alba* were not suitable for food, since especially the young leaves, which in food production we used for salads and spreads, contained excessive concentrations of Cd, Pb and Zn. Similarly, the seeds/fruits, used for seasoning and also as the main component in production of mustard contain, in particular, excessive concentrations of Cd.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA.....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE.....	V
KAZALO PREGLEDNIC.....	VIII
KAZALO SLIK.....	IX
KAZALO PRILOG	X
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XI
1 UVOD.....	1
2 PREGLED OBJAV	2
2.1 TEŽKE KOVINE V TLEH.....	2
2.2 TEŽKE KOVINE V RASTLINI.....	3
2.3 BELA GORJUŠICA – (<i>Sinapis alba</i>).....	4
2.4 LASTNOSTI Cd, Pb in Zn NJIHOVI VPLIVI NA ŽIVE ORGANIZME.....	5
2.4.1 Kadmij (Cd).....	5
2.4.2 Svinec (Pb)	7
2.4.3 Cink (Zn).....	8
2.5 HIPOTEZE.....	11
2.6 CILJI NALOGE	12
3 MATERIAL IN METODE	13
3.1 VZORČENJE RASTLIN	13
3.2 PRIPRAVA RASTLINSKIH VZORCEV ZA MERJENJE KONCENTRACIJ Cd, Pb in Zn.....	13
3.2.1 Tehtanje in trenje.....	13
3.2.2 Razklop rastlinskega materiala za merjenje vsebnosti Cd, Pb in Zn z metodo atomske absorpcijske spektroskopije (AAS).....	13
3.2.3 Priprava vzorcev tal.....	14
3.3 MERJENJE KONCENTRACIJE Cd, Pb IN Zn V RASTLINSKIH IN TALNIH VZORCIH Z ATOMSKO ABSORBCIJSKO SPEKTROSKOPIJO (AAS).....	14

3.4	STATISTIČNA ANALIZA	15
4	REZULTATI.....	16
4.1	ANALIZA TAL	16
4.1.1	Dostopne koncentracije Cd, Pb in Zn v rizosferni zemlji.....	16
4.2	ANALIZA RASTLIN	16
4.2.1	Suha biomasa posameznih rastlinskih delov	16
4.3	ANALIZA Cd	17
4.3.1	Koncentracije Cd v posameznih rastlinskih delih.....	17
4.3.2	Vsebnost Cd v posameznih rastlinskih delih	18
4.3.3	Translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Cd	19
4.4	ANALIZA Pb.....	20
4.4.1	Koncentracije Pb v posameznih rastlinskih delih	20
4.4.2	Vsebnost Pb v posameznih rastlinskih delih.....	21
4.4.3	Translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Pb.....	22
4.5	ANALIZA Zn.....	23
4.5.1	Koncentracije Zn v posameznih rastlinskih delih.....	23
4.5.2	Vsebnost Zn v posameznih rastlinskih delih	24
4.5.3	Translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Zn	25
4.5.4	Celokupne vsebnosti Cd, Pb in Zn v celih rastlinah v rastni sezoni.....	26
5	RAZPRAVA IN SKLEPI.....	27
5.1	ANALIZA TAL	27
5.2	BIOMASA RASTLIN	27
5.3	KONCENTRACIJE, VSEBNOSTI, TRANSLOKACIJSKI IN BIOAKUMULACIJSKI FAKTORJI ZA Cd, Pb IN Zn V RASTLINI.....	28
5.3.1	Koncentracije, vsebnosti, translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Cd v rastlini.....	28
5.3.2	Koncentracije, vsebnosti, translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Pb v rastlini	30
5.3.3	Koncentracije, vsebnosti, translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Zn v rastlini	32
5.4	UPORABA RASTLINE VRSTE <i>Sinapis alba</i> V PROCESU FITOREMEDIACIJE.....	33

5.5	UPORABA RASTLINE VRSTE <i>Sinapis alba</i> V PREHRANI.....	34
6	SKLEPI.....	36
7	POVZETEK	37
8	VIRI	39

KAZALO PREGLEDNIC

Pregl. 1:	Koncentracije Cd, Pb in Zn v vzorcih rizosferne zemlje.	16
Pregl. 2:	Mejne, opozorilne in kritične vrednosti težkih kovin v tleh za Slovenijo	16
Pregl. 3:	Suha biomasa rastlin vrste <i>S. alba</i>	17
Pregl. 4:	Translokacijski faktorji (TF) in bioakumulacijski faktorji (BAF) za Cd.....	20
Pregl. 5:	Translokacijski faktorji (TF) in bioakumulacijski faktorji (BAF) za Pb	23
Pregl. 6:	Translokacijski faktorji (TF) in bioakumulacijski faktorji (BAF) za Zn.....	26
Pregl. 7:	Celokupne vsebnosti posameznih kovin Cd, Pb in Zn.....	26

KAZALO SLIK

Slika 1:	Koncentracije Cd v posameznih delih rastline vrste <i>Sinapis alba</i>	18
Slika 2:	Vsebnost Cd v posameznih delih rastline vrste <i>Sinapis alba</i>	19
Slika 3:	Koncentracije Pb v posameznih delih rastline vrste <i>Sinapis alba</i>	18
Slika 4:	Vsebnost Pb v posameznih delih rastline vrste <i>Sinapis alba</i>	19
Slika 5:	Koncentracije Zn v posameznih delih rastline vrste <i>Sinapis alba</i>	20
Slika 6:	Vsebnost Zn v posameznih delih rastline vrste <i>Sinapis alba</i>	21

KAZALO PRILOG

- Priloga 1: Suha masa korenin, steblov, listov, cvetov, semen in semenskih ovojníc
- Priloga 2: Koncentracije Zn, Pb in Cd v vzorcih zemlje
- Priloga 3: Koncentracije Cd v posameznih rastlinskih delih po rastni sezoni
- Priloga 4: Koncentracije Pb v posameznih rastlinskih delih
- Priloga 5: Koncentracije Zn v posameznih rastlinskih delih
- Priloga 6: Vsebnosti Cd v posameznih rastlinskih delih
- Priloga 7: Vsebnosti Pb v posameznih rastlinskih delih
- Priloga 8: Vsebnosti Zn v posameznih rastlinskih delih
- Priloga 9: Traslokacijski faktorji Cd v posameznih rastlinskih delih
- Priloga 10: Traslokacijski faktorji Pb v posameznih rastlinskih delih
- Priloga 11: Traslokacijski faktorji Zn v posameznih rastlinskih delih
- Priloga 12: Bioakumulacijski faktorji Cd, Pb in Zn v poganjkih
- Priloga 13: Standardne vrednosti posameznih koncentracij težkih kovin

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

AAS	atomska absorpcijska spektroskopija (Atomic Absorbtion Spektrometry)
Cd	kadmij
Zn	cink
Pb	svinec
Ni	nikelj
Co	kobalt
Cu	baker
Se	selen
rpm	obrati na minuto (revolutions per minute)

1 UVOD

Posledica industrializacije, kot je npr. industrija rudarjenja in taljenja rud, ki je bila močno prisotna v Mežiški dolini, so tla, onesnažena s težkimi kovinami. V primeru Mežiške doline so poglavitna onesnaževala tal predvsem kadmij (Cd), svinec (Pb) in cink (Zn).

Pri rabi tal v namene pridelovanja hrane, so tla onesnažena s težkimi kovinami velik problem, saj lahko kovine vstopajo v prehranjevalno verigo in postanejo nevarne za zdravje ljudi. Poznavanje skupne vsebnosti težkih kovin v tleh je pomemben kriterij za ovrednotenje tveganja za zdravje ljudi (Leštan in sod., 2003). Pomembno pa je tudi poznavanje koncentracij težkih kovin v posameznih rastlinah, ki se jih uporablja v prehrani. Na območju Mežiške doline so bile že narejene analize koncentracij Cd, Pb in Zn v rdečem zelju (*Brassica oleracea* var. *capitata* f. *rubra*), ki so pokazale prekomerne koncentracije kovin v poganjkih (Pavlek in sod., 2008).

Z našo diplomsko nalogo smo želeli ugotoviti primernost gojenja zelenjave za uporabo v človekovi prehrani na območju, kjer je zemlja onesnažena z Cd, Pb in Zn, ki imajo v prekomernih količinah na zdravje ljudi negativne učinke. Rastlino belo gorjušico (*Sinapis alba* L.) smo gojili na onesnaženem vrtu v Mežici ter nato v štirih zaporednih mesecih (junij, julij, avgust, september) izmerili koncentracije Cd, Pb in Zn v posameznih rastlinskih delih (korenine, steblo, listi, semena). Izračunali smo tudi vsebnosti Cd, Pb in Zn ter translokacijske faktorje. Koncentracije Cd, Pb in Zn smo izmerili tudi v vzorcih rizosferne zemlje v kateri so rasle rastline. Dobljene rezultate smo ovrednotili glede na pričakovane vplive na zdravje ljudi.

2 PREGLED OBJAV

2.1 TEŽKE KOVINE V TLEH

Težke kovine so kovine, katerih specifična gostota je večja od 5 g cm^{-3} oziroma imajo atomsko število nad 20 (Barceló in Poschenrieder, 1990). V okolju se pojavljajo v zelo majhnih koncentracijah in predstavljajo manj kot 1% zemeljske skorje. Spadajo med elemente v sledeh.

Naravna vsebnost težkih kovin je posledica preperevanja matične podlage in je odvisna od mineralne sestave kamnine, na kateri se tla nahajajo ter biogeokemičnih procesov v tleh. Poleg naravnega izvora težkih kovin pa so kot vir onesnaženja pomembni številni antropogeni izvori, kot so rudarjenje in taljenje rude (jalovina in žindra (preperevanje in vetrna erozija), izgube pri transportu rud in njenih separatov, železarne in jeklarne, brušenje rude), industrija (plastike, tekstilna, mikroelektronika, zaščita lesa, rafinerije), atmosferski depozit (urbana in industrijska središča skupaj s sežigalnicami, metalurška industrija, avtomobilski izpusti, izgorevanje fosilnih goriv in termoelektrarne), kmetijstvo (mineralna in organska gnojila, apno, fitofarmacevtska sredstva, namakalne vode), odlaganje odpadkov (blata čistilnih naprav, vode, ki odtekajo iz deponij, odlagališča kovin, požari in pepel). (Ross, 1996)

Težke kovine v majhnih koncentracijah niso nevarne za organizme, nekatere so celo nujno potrebne (esencialne) za njihovo rast in razvoj in jih imenujemo mikrohranila. O onesnaženosti okolja s težkimi kovinami govorimo, kadar se koncentracija teh elementov na nekem območju poveča preko določene meje, pri čemer ni pomembno, ali je določen element mikrohranilo ali ne; visoke koncentracije težkih kovin so vedno strupene (Alloway, 1990). Najbolj pogosto najdemo v naravi povečane koncentracije Cd, Pb, Zn in Cu, na določenih območjih tudi As, Be, Cr in Hg (Kabata-Pendias in Pendias, 1984).

V Sloveniji so tla sorazmerno neonesnažena s težkimi kovinami, vendar imamo nekaj žarišč: s Cd in Zn onesnaženo območje Celje (Lobnik in sod., 1994), s Pb, Ni in Cr

onesnaženo območje Jesenic, s Pb, Zn in Cd obremenjeno Mežiško dolino ter onesnažena območja ob prometnicah.

2.2 TEŽKE KOVINE V RASTLINI

Privzem elementov v rastlino je odvisen od njihove biodostopnosti, lastnosti tal, količine padavin, lastnosti rastlin in prisotnosti gliv. Biodostopnost je definirana kot zmožnost elementov, da se prenašajo iz substrata v organizme (Joner in Leyval, 2001). Občutljivost oziroma toleranca rastline na privzete kovine je odvisna od vrste rastline in njenega genotipa. Veliko vrst iz družine Brassicaceae spada med najbolj tolerantne na privzete kovine. V splošnem lahko rastline razdelimo na tri skupine glede privzema težkih kovin v poganjke, in sicer na tiste, ki njihov privzem močno omejujejo, na indikatorske in na akumulacijske, med katerimi, pa se pojavlja tudi ekstremni fenotip, in sicer hiperakumulacija (Adriano, 1986).

Privzem kovin se začne pri koreninah, kar pomeni, da morajo biti kovine prisotne v plasti tal okoli korenin, ki jo imenujemo rizosfera. Kovine se privzemajo v korenine preko njihove površine, kjer rastlina lahko vzpostavi tudi koreninsko bariere in lahko privzem regulira (Adriano, 1986). Za sprejem kovin iz tal v korenine so ključnega pomena koreninski laski in stranske korenine, ki rastlinam omogočajo neposreden stik s substratom in močno povečajo sprejemno površino korenin (Dermastia, 2007). Sprejem kovin pri rastlinah poteka v dveh fazah, in sicer kot pasivni sprejem, ki poteka preko apoplasta, in aktivni sprejem preko simplasta (Alloway, 1990; Kabata-Pendias in Pendias, 2001). Pri pasivnem sprejemu se raztopljeni kationi gibljejo skozi celično steno skorje korenine na osnovi koncentracijskega gradienta z difuzijo. Pasivni transport se odvija tako pri mrtvih kot pri živih celicah. Mejno plast, kjer pasivni transport ni več mogoč, pa predstavlja endodermis. To pomeni, da se ioni kovin lahko vključijo v metabolni proces le v primeru prehoda preko plazmatske membrane, kar omogoča aktivni transport. Ta poteka pogosto v nasprotju s koncentracijskim gradientom in s pomočjo t.i. nosilcev lipidnega značaja oziroma preko ionskih črpalk. Na principu aktivnega transporta se v celicah višjih rastlin odvija tudi nadaljnji transport preko membran celičnih organelov (vakuol, kloroplastov, mitohondrijev). Toksične kovine lahko poškodujejo strukturo in vplivajo na funkcijo

plazmatske membrane, kar lahko spremeni potek sprejema kovin. (Kabata-Pendias in Pendias, 2001).

Rastline lahko sprejemajo kovine tudi skozi listno površino. Epidermalne celice listov prekriva na zunanji strani kutikula, ki sestoji iz voščene plasti na površini, debelejšje plasti kutina, vložnega v vosek in spodnje plasti iz kutina in voska, povezane s celičnimi substancami pektina in celuloze. Prehod preko kutikule je mogoč le z difuzijo (Ziegler, 1988), pri tem je predel z listnimi režami še posebej propusten (Markert, 1993). Kovinski ioni, prisotni v raztopini na površini listov, lahko prehajajo v celice listov ali se vežejo na kutikulo oziroma celično steno. V listnem tkivu namreč ni endodermisa, ki bi reguliral difuzijo kovin iz apoplasta celic v tkiva žil (Ross, 1996).

Kot izvori kovin v zraku se pojavljajo aerosoli reda velikosti $< 1 \mu\text{m}$, ki so v večji meri prisotni v mokrih raztopinah (Ross, 1996). Nizka topnost kovin v suhih usedlinah (plinasti in trdni delci) omogoča akumulacijo na listni površini, dokler dež fizično ne odplavi depozita, ki s tem postane sekundarni depozit na površini tal. Raziskave so pokazale, da sta tako Cd kot Pb močno topna v padavinah (mokre usedline), medtem ko je topnost v suhih usedlinah (trdni delci) bistveno manjša, še posebej to velja za Pb (Rochbock v Ross, 1996, str. 203). Raziskave tudi kažejo, da je 73 do 95% celotne vsebnosti Pb pri listnati zelenjavi mogoče pripisati sprejemu preko listov, od koder se prenaša v ostale organe rastline (Kabata-Pendias in Pendias, 2001).

2.3 BELA GORJUŠICA – (*Sinapis alba*)

Bela gorjušica (*Sinapis alba* L.) je enoletnica iz družine križnic (Brassicaceae), njena druga imena pa so beli ženof, gorušica, goršica. Doma je v Sredozemlju, kot kulturno rastlino pa se jo goji v srednji in južni Evropi, severni Afriki, Aziji, Avstraliji in v Ameriki. Odlikuje jo hitra rast, saj doseže v zelo kratkem času ob primernem gnojenju 2 m višine. Ima močan koreninski sistem s številnimi koreninskimi laski, ki ji omogočajo odpornost proti suši oz. pomanjkanju padavin. Vlakinasto okroglo steblo in poraščeni listi z dlačicami odvrčajo živino, zato se v praksi uporablja predvsem za zeleni podor. Za prehrano se uporablja predvsem seme, ki je sestavljeno iz 22-36% maščobnega olja, 25% beljakovin, 25% sluzi,

2,5% glikozida sinalbozida (encim). Seme se uporablja kot začimba in za konzerviranje živil, največ pa za proizvodnjo gorčice. Iz njega iztiskajo tudi jedilno olje, užitni pa so tudi mladi listi. Olje, pridobljeno iz semen, se uporablja tudi za izdelavo mil in pridobivanje stearina. Bela gorjušica je tudi zelo dobra medonosna rastlina, vendar pa ta med ni primeren za prezimitev čebel (Petauer, 1993).

2.4 LASTNOSTI Cd, Pb in Zn NJIHOVI VPLIVI NA ŽIVE ORGANIZME

2.4.1 Kadmij (Cd)

Cd je zelo razširjena težka kovina, ki jo v okolje sproščajo elektrarne, grelni sistemi, kovinska industrija, urbani promet in cementarne. V okolje se lahko sprošča tudi z mineralizacijo matične kamnine (Sanità di Toppi in Gabrielli, 1999). Cd se pogosto pojavlja kot stranski produkt v industriji Zn, s katerim se tudi sicer pogosto skupaj pojavlja v naravi (Adriano, 2001). V naravi, kjer se pojavlja v dveh oksidativnih stanjih, Cd najdemo v prsti, vodi in rastlinah, ki ga privzemajo iz prsti (Adriano, 2001). Povprečne koncentracije Cd v zemeljski skorji so med 0,1 in 0,5 mg kg⁻¹, medtem ko se večje količine kopičijo v sedimentnih kamninah in morskih fosfatih, kjer dosežejo tudi do 500 mg kg⁻¹ (Cook and Morrow 1995, WHO 1992).

Cd je zelo strupen element za vse vrste organizmov že pri zelo majhnih koncentracijah. Cd pri rastlinah nima pomembne metabolne vloge Cd v metabolizmu, kljub temu pa ga nekatere rastline kopičijo v ogromnih količinah (več kot 100 µg/g sveže mase) (Schulze in sod., 2005).

Vpliv Cd se pri rastlinah odraža predvsem na njihovi rasti, in sicer na inhibiciji rasti, ki je posledica delovanja Cd na celične delitve preko upočasnjene metabolizma, direktne vezave na DNK in loma mikrotubularnega sistema. Cd pa naj bi povzročal tudi zgodnjo senescenco. (Schulze in sod., 2005)

Privzem in bioakumulacija Cd pri ljudeh potekata preko rastlinskih delov, kar tudi povzroča največjo zaskrbljenost, saj Cd preko pridelkov vstopa v prehranjevalno verigo. Obstajajo štiri glavni načini vstopa oziroma kontaminacije hrane s Cd (Adriano, 2001):

- agrikulturne tehnike preko uporabe pesticidov, fosfatnih gnojil;
- industrijsko onesnaževanje, ki je tudi glavni vir Cd v Mežiški dolini;
- geološki izvor;
- postopek priprave hrane preko uporabe dodatkov (aditivov) in fizičnih kontaktov z opremo in posodami.

Raziskave izpostavljenosti Cd pri živalih in ljudeh so pokazale, da je Cd vključen pri razvoju raka ledvic, pljuč, sečnega mehurja in prostate. Vpliv ima tudi na hepatične in reproduktivne disfunkcije (Jarüp in sod., 1998; WHO, 1992). Cd proizvaja tudi več različnih citotoksičnih in metabolnih vplivov, kot je vpliv na aktivnosti encimov (Webb, 1979) in na ekspresijo genov (Beyersmann, 2002), na delovanje esencialnih kovin (Task Group on Metal Interactions, 1978), induciranje oksidativnega stresa (Shaikh in sod., 1999), sprožitev apoptoze (Pulido in Parrish, 2003) ter prekinitev E-kadherinsko odvisnih celičnih povezav v epitelnih celicah (Prozialeck, 2000).

Izpostavljanje Cd lahko poveča tudi motnje v metabolizmu Ca, vitamina D, kolagena in v degeneraciji kosti, kot sta osteoporoza in mehčanje kosti, kar so pozne posledice zastrupitve s Cd. Tudi izpostavljenost kronično manjšim koncentracijam Cd lahko povzroči izgubljanje Ca preko izločanja urina. Cd poveča demineralizacijo skeleta (okostja), kar lahko pripelje do lomljivosti kosti, kar povzroči zlome kosti pri posameznikih (Adriano, 2001).

Po raziskavah svetovne zdravstvene organizacije (WHO) je sprejemljiv tedenski vnos Cd v telo 7 µg/kg telesne mase, kar pomeni v dnevnem vnosu 49 µg za moškega, ki ima v povprečju 70 kg, ter 42 µg za ženske s 60 kg telesne teže.

V Sloveniji je določena zgornja mejna vrednost onesnaževalcev v pravilniku o onesnaževalcih v živilih (Ur.l. RS št. 69/03), in sicer za Cd:

- zelenjava in sadje, razen listnate zelenjave, svežih zelišč, gojenih gob, stebelne zelenjave, korenovk in krompirja – 0,05 µg/g
- listnata zelenjava, sveža zelišča, gomoljna zelena in gojene gobe – 0,2 µg/g
- stebelna zelenjavna, korenovke, razen gomoljne zelene in krompir (olupljeni krompir) – 0,1 µg/g

Mejna vrednost koncentracij Cd v tleh je za Slovenijo postavljena na 1 µg/g, opozorilna vrednost na 2 µg/g, kritična pa na 12 µg/g (Ur.l. RS 68/96).

2.4.2 Svinec (Pb)

Pb se nahaja v večini kamnin zemeljske skorje. Več ga je v kislih vrstah magmatskih kamnin in ilovnatih sedimentih (Kabata-Pendias in Pendias, 1984). Pb je izmed težkih kovin v tleh najmanj mobilan. Močno se veže na absorpcijski kompleks tal, zato večinoma ostaja v vrhnjih slojih tal, vezan na netopne stabilne mineralne oblike (Imperato in sod., 2003). Biološka dostopnost Pb je odvisna od pH tal, deleža organske snovi in deleža glinenih delcev v tleh.

Za rastline Pb ni esencialni element, po nekaterih raziskavah pa naj bi svinčene soli v nizkih koncentracijah (2-6 µg/kg tal) pozitivno vplivale na rast rastlin. V rastlinskih tkivih lahko Pb zaradi biološkega antagonizma zamenja Ca in nekatere druge elemente. Toksični učinki Pb na rastline se kažejo kot inhibicija respiracije in fotosinteze. Sprejem Pb v rastline je pasiven, stopnja sprejema pa odvisna od pH tal. Absorpcija poteka večinoma preko koreninskih laskov, Pb se v koreninah tudi kopiči, premeščanje v nadzemne dele pa je omejeno in počasno. Na onesnaženih območjih lahko pride do nalaganja Pb iz atmosfere na nadzemne dele rastlin. (Kabata-Pendias in Pendias, 1984). Po nekaterih podatkih lahko rastline zaradi zmanjšane translokacije Pb v nadzemne dele tolerirajo tudi 500-1000 µg/kg tal Pb (Adriano, 1986).

Prisotnost Pb v telesu je nevarna že v majhnih količinah. Hrana prispeva 60 % svinca v krvi, vdihavanje z zrakom 30 % in voda 10 % (Likar, 1998). Po podatkih WHO je zmerno zaužitje 20-282 µg/dan Pb, za nevarno se šteje, če zaužijemo več kot 500 µg/dan Pb

(WHO, 1996a). Posebno ogrožena skupina so otroci, ki 50% Pb zaužijejo direktno z geofagijo iz onesnaženih tal in ga 40-50% sprejetega njihovo telo zadrži. Odrasli zadržijo 10-50 % sprejetega Pb (Leštan, 2002).

Pb pri človeku povzroča presnovne, krvne in ledvične bolezni, ovira vezavo Fe na protoporfirin, povzroča anemijo, pri odraslih hipertenzijo. Povzroča tudi motnje v reprodukciji in sorazmerno neovirano prehaja skozi placento. Pri otrocih, ki še nimajo popolnoma razvite bariere med krvjo in možgani, lahko prehaja direktno v možgane in jih poškoduje, kar se odraža kot hiperaktivnost, izpad motoričnih funkcij, encefalopatije, zaostalosti. Zastrupljanje s Pb je eden glavnih zdravstvenih problemov v številnih delih sveta. Zlasti velja to za dolgotrajno uživanje Pb v koncentracijah, ki naj ne bi bile sicer strupene (Leštan, 2002).

Mejna vrednost koncentracij Pb v tleh za Slovenijo je postavljena na 85 $\mu\text{g/g}$, opozorilna vrednost na 100 $\mu\text{g/g}$, kritična pa na 530 $\mu\text{g/g}$ (Ur.l.RS, 68/96).

V Sloveniji je določena zgornja mejna vrednost nekaterih onesnaževalcev v živilih v prilogi pravilnika o onesnaževalcih v živilih (Ur.l. RS št. 69/2003) in sicer za Pb velja:

- zelenjava, razen kapusnic, listnate zelenjave in gojenih gob. Pri krompirju velja ZMV za olupljeni krompir 0,1 $\mu\text{g/g}$
- kapusnice, listnata zelenjava in gojene gobe 0,3 $\mu\text{g/g}$.

2.4.3 Cink (Zn)

Prisotnost Zn v naravi je običajno posledica geoloških procesov. V manjši meri se pojavlja v metamorfnih in magmatskih kamninah, ponavadi pa kot sestavni del kamninskih mineralov, ki so bogati z Fe. Približno 60% topnega Zn se v tleh pojavlja vezanega na komplekse iz amino, organskih in fulvičnih kislin (Hagemeyer, 1999). Vir Zn so tudi raznolike človeške dejavnosti, predvsem rudarstvo, mikroelektronika, tekstilna in pirometalurgična industrija, odpadne vode, pesticidi ipd. (Adriano, 2001).

Zn spada med esencialne rastlinske mikronutriente, saj sodeluje v mnogih encimskih reakcijah v rastlinah, kot je biosinteza klorofila, ter ima pomembno vlogo v dušikovem metabolizmu. Pomanjkanje Zn pri rastlinah povzroči zmanjšano sintezo proteinov ter povzroča krajše internodije ter medžilne kloroze (Adriano, 2001). Glavni simptomi prekomerne koncentracije Zn pa so izguba turgorja, nekroze na starih listih in reducirana rast (Hagemeyer, 1999). Začetna faza privzema Zn predstavlja hiter vstop Zn^{2+} v medcelične prostore parenhimske skorje in vezavo na celične stene. Sprejem Zn v rastlino je odvisen predvsem od rastlinske vrste, od reakcije tal in prisotnosti antagonističnih ionov v tleh, kot so Ca^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , PO_4 in Ni. Pozneje sledi počasna faza, kjer poteka simplastni in transmembranski transport znotraj koreninskega sistema in transport v ksilem, transport preko membrane listnih celic in skladičenje v listnih vakuolah (Lasat in sod., 1996). Zn je v rastlinah največ v koreninah, v nadzemnih delih, predvsem v starejših listih, najmanj ga je v plodovih. Kadar je koncentracija Zn v tleh velika, je tudi transport po rastlini večji in obratno (Kabata-Pendias in Pendias, 1984)

Tako kot za rastline je Zn esencialen element tudi za človeka. Kot katalitična ali strukturna komponenta ima pomembno vlogo v številnih encimih, ki so povezani z energijskim metabolizmom – na primer pri sintezi in razgradnji ogljikovih hidratov, lipidov, proteinov in nukleinskih kislin. Ima vlogo pri ekspresiji genov. Povečane količine Zn v organizmu so predvsem posledica zaužitja s Zn onesnažene prsti, vstopa Zn v prehranjevalno verigo preko rastlinske in živalske hrane ter vdihavanje onesnaženega zraka (inhalacija Zn vezanega na aerosole) (Leštan, 2002).

Pomanjkanje in presežek Zn v organizmu nakazujejo značilni simptomi. Pri človeku se pomanjkanje kaže kot pomanjkanje apetita, zaostalost v rasti, kožne rane in spolna nedozorelost (Kiekens, 1990). Akutna zastrupitev s Zn se kaže kot bolečina v predelu trebuha, diareja, slabost in bruhanje. To izzovejo odmerki, višji od 200 mg. Posledica kronične strupenosti pa se kaže v poslabšani krvni sliki zaradi anemije in nevtropenije. (Kiekens, 1990).

Priporočena varna in zadostna količina zaužitega Zn je za odraslo osebo približno 15 $\mu\text{g}/\text{dan}$ (Alloway, 1990). Najvišja priporočena količina za odraslo osebo približno 45

$\mu\text{g}/\text{dan}$. Koncentracije, višje od $150 \mu\text{g}/\text{dan}$, so strupene ter povzročajo poškodbe in spremembe, ki jih lahko opazimo na organizmu (Oliver, 1997)

Mejna vrednost koncentracij Zn v tleh za Slovenijo je postavljena na $200 \mu\text{g}/\text{g}$, opozorilna vrednost na $300 \mu\text{g}/\text{g}$, kritična pa na $720 \mu\text{g}/\text{g}$ (Ur.l.RS, 68/96)

2.5 HIPOTEZE

Z merjenjem koncentracij Cd, Pb in Zn v različni delih rastline *S. alba* smo testirali sledeče hipoteze:

1. V poganjkih vrste *S. alba*, ki raste v tleh s povišanimi koncentracijami Cd, Pb in Zn, se kovine kopičijo.
2. Cd in Zn se aktivno transportirata v poganjke iz korenin, Pb pa ostaja v koreninah.
3. V semenu in mladih listih vrste *S. alba* koncentracije Cd, Pb in Zn presegajo z zakonom določene minimalne koncentracije v rastlinah, ki se jih uporablja za prehrano.
4. Vrsta *S. alba*, gojena na s Cd, Pb in Zn onesnaženem območju, ni primerna za uporabo v prehrani.
5. Vrsta *S. alba* je primerna za uporabo v fitoremediaciji.

2.6 CILJI NALOGE

Cilji naloge so bili:

1. Vzgojiti rastlino vrste *S. alba* na s Cd, Pb in Zn onesnaženem vrtu v Zg. Mežiški dolini.
2. Izmeriti koncentracije Cd, Pb in Zn v rizosferni zemlji in v posameznem rastlinskem tkivu (korenine, steblo, listi, cvetovi, semena in semenske ovojnice).
3. Ugotoviti sezonsko dinamiko privzema Cd, Pb in Zn pri vrsti *S. alba*.
4. Ugotoviti primernost vrste *S. alba* glede na koncentracije Cd, Pb in Zn za uporabo v prehrani, če raste na onesnaženem območju.
5. Oceniti breme Cd, Pb in Zn na človeka, če uživa hrano, ki je pridelana iz rastlin vzgojenih na onesnaženem območju.
6. Oceniti primernost vrste *S. alba* za uporabo v namene fitoremediacije.

3 MATERIAL IN METODE

3.1 VZORČENJE RASTLIN

Seme bele gorjušice (*Sinapis alba*) smo posejali na onesnaženem vrtu v Mežici v Mežiški dolini. Tekom rastne sezone smo rastline povzorčili, in sicer tako, da smo vedno nabrali po pet rastlin. Poleg rastlin smo vedno vzorčili tudi rizosferna tla. Vzorčenje je potekalo v mesecih juniju, juliju, avgustu in septembru 2007. V laboratoriju smo rastline oprali in posušili ter jih nato pripravili za merjenje vsebnosti Cd, Pb in Zn.

3.2 PRIPRAVA RASTLINSKIH VZORCEV ZA MERJENJE KONCENTRACIJ Cd, Pb in Zn

3.2.1 Tehtanje in trenje

Rastline smo posušili v sušilniku do konstantne mase pri 60°C. Popolnoma suh rastlinski material smo ločili na korenine, stebila, liste, cvetove in, kjer so bili prisotni, tudi na plodove, ki smo jih dodatno ločili na seme ter osemenje. Ves material smo stehali (suha masa). V čistih terilnicah smo s pomočjo tekočega dušika material zamrznili in strli v prah ter ga shranili v označene plastične posodice. Do nadaljne obdelave smo rastlinski material hranili na sobni temperaturi.

3.2.2 Razklop rastlinskega materiala za merjenje vsebnosti Cd, Pb in Zn z metodo atomske absorpcijske spektroskopije (AAS)

Za meritve koncentracij Cd, Zn in Pb moramo rastlinski material mineralizirati s kislino, zato smo zatehtali po 50 mg vsakega vzorca suhega rastlinskega materiala v 16 cm epruvete. V tako pripravljene epruvete smo v digestoriju s steklenimi pipetami odpipetirali po 3 ml kislinske mešanice $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4$ (Merck) = 7:1, premešali ter pustili stati čez noč v digestoriju, da se material dobro prepoji s kislino (Vogel-Mikuš in sod., 2006).

Naslednji dan smo epruvete najprej dobro premešali ter jih postavili v termoblok. Vzorce smo postopno segrevali ter s tem povzročili razklop materiala. Med segrevanjem smo bili pozorni na to, da je razklop potekal na primerni temperaturi (ob previsoki temperaturi bi se vzorci lahko zažgali, ob premočnem vrenju pa lahko z vrenjem kisline iz epruвет izgubljamo zatehtani rastlinski material). Razklop je potekal toliko časa, da je kislina popolnoma izparela (približno 8 ur). V zadnji fazi smo termoblok izolirali z aluminijasto folijo v obliki tulca, ki je segal do zgornjega roba epruвет. Izolacija je preprečila kondenzacijo kisline na zgornjem robu epruвет in omogočila, da je le-ta popolnoma odparela. Suhe vzorce smo prestavili v stojalo za epruvete, jih pokrili s folijo ter shranili do meritev v hladilniku.

3.2.3 Priprava vzorcev tal

Za določanje dostopnih koncentracij Cd, Pb in Zn smo suhe in presejane (sito z 2 mm porami) vzorce rizosfernih tal ekstrahirali z 1 M amonijevim acetatom kot je opisano v Baker in sod. (1994). V čiste steklene čaše so zatehtali 1 g tal, dodali 20 ml 1 M amonijevega acetata (pH=7), jih pokrili s plastično vrečko in zatesnili z elastiko. Tako pripravljene čaše smo zložili na stresalnik in stresali dve uri pri 200 rpm. Po stresanju smo počakali toliko časa, da so se rizosferna tla posedla na dno čaše, nato smo supernatant s pomočjo siring prefiltrirali skozi filter z 0,45 μm porami v že prej označene epruvete, ki smo jih zatesnjene s pokrovčki shranili do meritev z AAS v hladilniku.

3.3 MERJENJE KONCENTRACIJE Cd, Pb IN Zn V RASTLINSKIH IN TALNIH VZORCIH Z ATOMSKO ABSORBCIJSKO SPEKTROSKOPIJO (AAS)

Atomska absorbcija (Atomic Absorbtion, AA) je proces pri katerem atom po absorpciji svetlobe določene valovne dolžine preide iz najbolj stabilne orbitalne konfiguracije, ki se imenuje 'osnovno stanje', v manj stabilno konfiguracijo - 'vzbujeno stanje' (PerkinElmer Instruments, 2000). Pri metodi plamenske atomske absorpcijske spektroskopije (Flame Atomic Absorbtion Spectrometry, FAAS) se vzorec v obliki aerosola v plamenu (mešanica zraka in acetilena) pretvori v paro atomov. Atomi absorbirajo svetlobo pri določeni valovni

dolžini. Višja ko je njihova koncentracija v svetlobnem žarku, večja je količina absorbirane svetlobe (PerkinElmer Instruments, 2000).

En dan pred merjenjem vsebnosti Cd, Pb in Zn z metodo AAS smo razklopljeni material razredčili v 5 ml 0,2% HNO₃ in raztopino dobro premešali, zaprli s plastičnim pokrovčkom ter čez noč shranili v hladilniku. Pred merjenjem vzorcev smo za vsako kovino posebej naredili umeritveno krivuljo s pomočjo standardnih vzorcev, ki je tudi osnova za določanje neznanih koncentracij atomov kovin v vzorcih preko zveze med količino absorbirane svetlobe in znano koncentracijo atomov v standardih (PerkinElmer Instruments, 2000). Če je bilo potrebno, smo vzorce še dodatno redčili (5 ali 10-krat) z 0,2% HNO₃, tako da je izmerjena vrednost ležala v območju umeritvene krivulje.

3.4 STATISTIČNA ANALIZA

Translokacijske faktorje smo izračunali kot razmerje koncentracij v zemlji in koreninah rastline (TF_{kor}), v steblih in koreninah (TF_{ste}), v listih in steblih (TF_{lis}), v semenih in listih (TF_{seme}). Vsebnosti kovin (μg) v koreninah pa kot produkt biomase korenine (g) in koncentracije kovin v koreninah (μg/g). Po istem postopku smo izračunali tudi vsebnosti kovin v steblih, listih, semenih in osemenjih. Bioakumulacijske faktorje smo izračunali iz razmerja koncentracij kovin v poganku rastline (skupne koncentracije v steblih in listih rastline) in v rizosfernih tleh (BAF_{pog}).

Vpliv časa vzorčenja na vse preučevane parametre smo ovrednotili z enosmerno ANOVO in posthoc Tukey-evim testom ($p < 0,05$), pri čemer smo za neodvisni faktor uporabili mesec vzorčenja (junij, julij, avgust, september). V primeru, ko smo imeli le dva niza podatkov (npr. podatki za semena so bili na voljo le v mesecih avgust in september) smo uporabili Studentov t-test ($p < 0,05$). Za statistične analize smo uporabili računalniški program StatSoft 6.0. Grafe smo izrisali v programu Microsoft Office Excel 2003.

4 REZULTATI

4.1 ANALIZA TAL

4.1.1 Dostopne koncentracije Cd, Pb in Zn v rizosferni zemlji

Dostopne koncentracije Cd na vrtu v Mežici presegajo z zakonom določeno mejno vrednost v tleh za Slovenijo, medtem ko dostopne koncentracije Pb in Zn te meje ne presegajo (Preglednica 1, Preglednica 2). Cd, Pb in Zn so v tleh prisotni v različnih oblikah in frakcijah, pri katerih ločimo rastlinam dostopne in nedostopne oblike. V zakonu določene vrednosti vključujejo vse oblike Cd, Pb in Zn, ki so prisotne v tleh, medtem ko smo mi določili le dostopne, ki so manjše od celokupnih koncentracij, ki jih obravnava zakon.

Pregl. 1: Koncentracije Cd, Pb in Zn v vzorcih rizosfernih tal, v kateri so rasle rastline vrste *S. alba* na onesnaženem vrtu v Mežici v Mežiški dolini. Prikazane so povprečne vrednosti \pm standardna napaka ($n=5$). Različne črke v tabeli opisujejo statistično značilne razlike med posameznimi meseci, v primeru Cd statistično značilnih razlik ni bilo (enosmerna ANOVA, Tukeyjev posthoc test pri $p<0,05$).

	junij	julij	avgust	september
Cd [$\mu\text{g/g}$]	1,92 \pm 0,23	1,81 \pm 0,1	1,81 \pm 0,06	1,63 \pm 0,03
Pb [$\mu\text{g/g}$]	12,12 \pm 0,2 c	11,42 \pm 0,17 b	10,93 \pm 0,11 b	10,11 \pm 0,41 a
Zn [$\mu\text{g/g}$]	90,93 \pm 0,84 b	87,28 \pm 1,99 b	88,29 \pm 1,91 b	80,54 \pm 0,73 a

Pregl. 2: Mejne, opozorilne in kritične vrednosti težkih kovin v tleh za Slovenijo (Ur.l. RS 68/96).

	mejna vrednost	opozorilna vrednost	kritična vrednost
Cd [$\mu\text{g/g}$]	1	2	12
Pb [$\mu\text{g/g}$]	85	100	530
Zn [$\mu\text{g/g}$]	200	300	720

4.2 ANALIZA RASTLIN

4.2.1 Suha biomasa posameznih rastlinskih delov

Biomasa korenin se je povečala v mesecu avgustu, biomasa stebela je v celotnem teku rastne sezone naraščala (Preglednica 3). Biomasa listov je bila največja v mesecu juliju in najmanjša v mesecu septembru, ko so listi z rastlin že odpadali, saj je rastlina že

zaključevala svoj življenjski cikel. Biomasa semen in semenskih ovojnic je bila največja ob koncu rastle sezone v mesecu septembru.

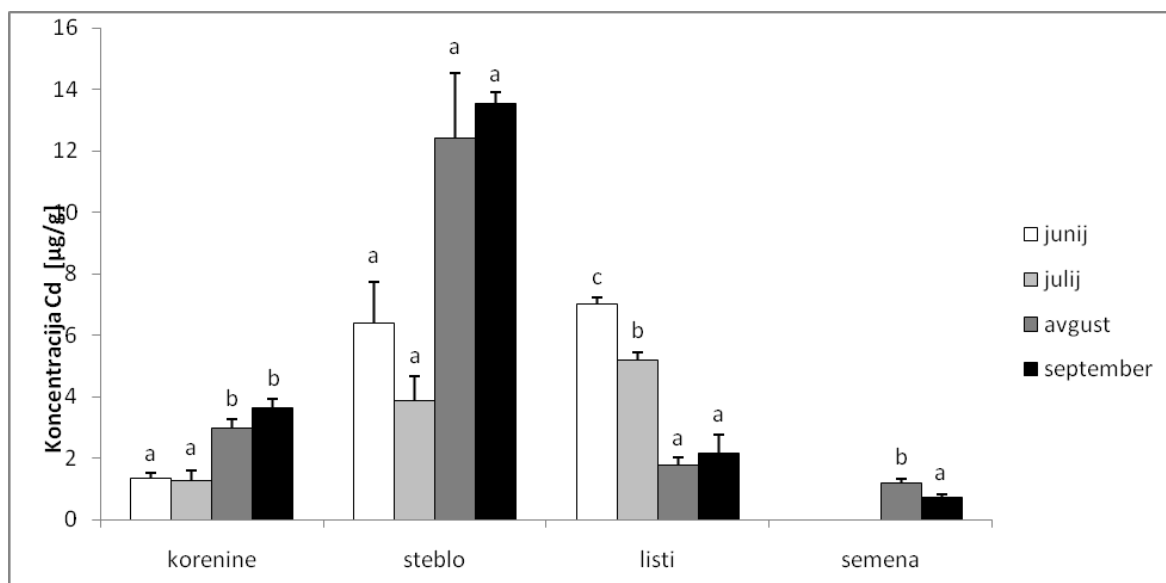
Pregl. 3: Suha biomasa rastlin vrste *S. alba*, ki so bile nabrane na onesnaženem vrtu v Mežici v Mežiški dolini. Vsak mesec je bilo vzorčenih 5 rastlin, podana pa je skupna masa vseh petih rastlin.

	junij	julij	avgust	september
korenine [g]	2,08 ± 0,21 a	2,85 ± 0,29 a	4,22 ± 0,42 b	4,14 ± 0,41 b
steblo [g]	10,67 ± 1,07 a	18,41 ± 1,84 b	35,32 ± 3,53 c	40,63 ± 4,06 c
listi [g]	10,9 ± 1,09 b	15,49 ± 1,55 c	7,67 ± 0,77 b	0,26 ± 0,03 a
semena [g]	-	-	2,33 ± 0,233 a	1,18 ± 0,79 b
osemenje [g]	-	-	7,87 ± 0,19 a	3,84 ± 0,38 b

4.3 ANALIZA Cd

4.3.1 Koncentracije Cd v posameznih rastlinskih delih

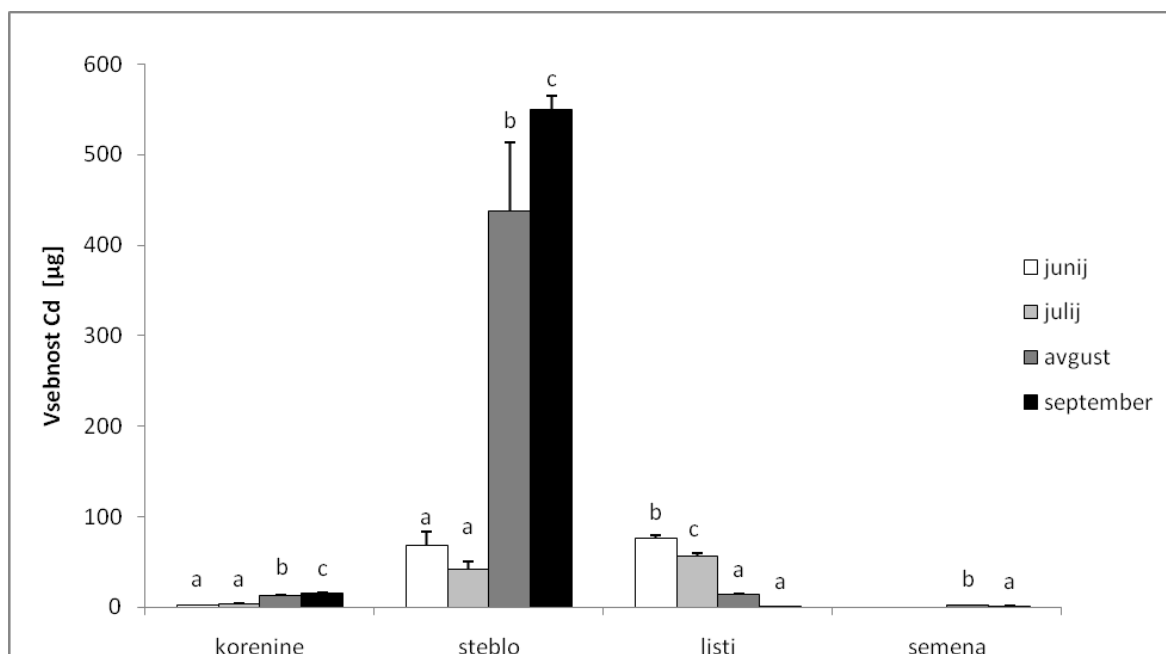
Največja koncentracija Cd je bila izmerjena v steblih rastlin vrste *S. alba*, najmanjša pa v semenih v mesecu septembru (Slika 1). Koncentracija Cd v koreninah se je povečala v mesecih avgustu in septembru, v steblih se ni spreminjala, v listih pa je z rasto sezono padala. V semenih je bila koncentracija Cd septembra manjša kot avgusta, za koncentracije Cd v osemenju pa imamo le dva podatka v mesecu avgustu (povprečje 0,62 µg/g), sicer so bile koncentracije pod mejo detekcije.



Slika 1: Koncentracije Cd v suhi masi posameznih delov rastline vrste *Sinapis alba*, ki je rasla na onesnaženem vrtu v Mežici. Prikazane so povprečne vrednosti \pm standardna napaka (n=5). Različne črke nad stolpci opisujejo statistično značilne razlike med posameznimi meseci (enosmerna ANOVA, Tukeyjev posthoc test pri $p < 0,05$).

4.3.2 Vsebnost Cd v posameznih rastlinskih delih

Največja vsebnost Cd v rastlinskih delih je bila v mesecu septembru v steblih, ki so imela tudi najvišjo biomaso, najmanjša pa v semenih meseca septembra (Slika 2). Vsebnost Cd v semenih sledi tako biomasii semen kot izmerjeni koncentraciji Cd v teku rastne sezone. Vsebnost Cd je v koreninah v času rastne sezone rahlo naraščala, v steblu je močno narasla v mesecu avgustu in septembru. V listih je vsebnost Cd v teku rastne sezone upadala in tudi pri semenih je bila v mesecu septembru manjša kot v mesecu avgustu.



Slika 2: Vsebnost Cd v suhi masi posameznih delov rastline vrste *Sinapis alba*, ki je rasla na onesnaženem vrtu v Mežici. Prikazane so povprečne vrednosti \pm standardna napaka (n=5). Različne črke nad stolpci opisujejo statistično značilne razlike za vsako tkivo posebej (enosmerna ANOVA, Tukeyjev posthoc test pri $p < 0,05$).

4.3.3 Translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Cd

Iz razmerij koncentracij v posameznem tkivu smo izračunali translokacijske faktorje, ki opisujejo transport elementa po rastlini. Če je vrednost večja od 1, gre za intenzivni transport, medtem ko vrednosti pod 1 opisujejo omejeno sposobnost transporta iz enega v drug organ. Naše izračunane vrednosti kažejo, da transport Cd poteka med koreninami in stebлом ter med stebлом in listi, kjer je aktivni transport prisoten v času intenzivne rasti rastline (Preglednica 4). Najvišje vrednosti translokacijskih faktorjev so bile izračunane na prenosu med koreninami in stebлом v teku celotne sezone z maksimalno vrednostjo v mesecu juniju. Transport Cd rastlina omejuje na prehodu iz listov v semena, kjer so bile izračunane vrednosti manjše od 1. Bioakumulacijski faktor je v celotnem teku rastne sezone nad vrednostjo 1, kar določa hiperakumulacijske rastline, ki aktivno privzemajo in kopičijo Cd.

Pregl. 4: Translokacijski faktorji (TF) in bioakumulacijski faktorji (BAF) za Cd pri rastlinah vrste *Sinapis alba*, ki je rasla na onesnaženem vrtu v Mežici v Mežiški dolini. Prikazane so povprečne vrednosti \pm standardna napaka (n=5). Različne črke v tabeli opisujejo statistično značilne razlike za vsak TF posebej (enosmerna ANOVA, Tukeyjev posthoc test pri $p < 0,05$).

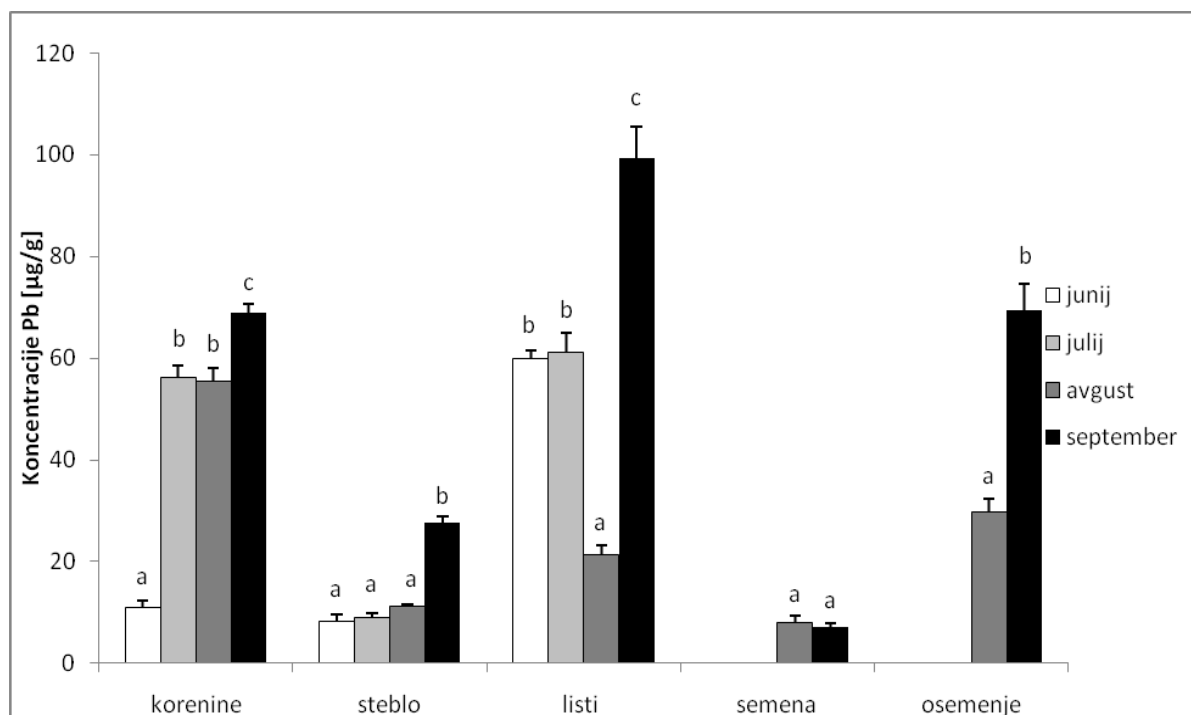
Pomen oznak v tabeli: TF_{kor} = korenine/zemlja, TF_{ste} = steblo/korenine, TF_{lis} = listi/steblo, TF_{seme} = seme/listi, BAF_{pog} = poganjek/zemlja.

	junij	julij	avgust	september
TF _{kor}	0,75 \pm 0,1 a	0,71 \pm 0,17 a	1,65 \pm 0,74 b	2,23 \pm 0,18 b
TF _{ste}	4,97 \pm 1,04 a	2,92 \pm 0,44 a	4,33 \pm 1,93 a	3,79 \pm 0,22 a
TF _{lis}	1,37 \pm 0,27 c	1,47 \pm 0,19 bc	0,27 \pm 0,12 ab	0,16 \pm 0,04 a
TF _{seme}	-	-	0,82 \pm 0,36 b	0,41 \pm 0,08 a
BAF _{pog}	6,98 \pm 0,91 ab	4,58 \pm 0,6 a	7,83 \pm 1,18 b	9,36 \pm 0,56 c

4.4 ANALIZA Pb

4.4.1 Koncentracije Pb v posameznih rastlinskih delih

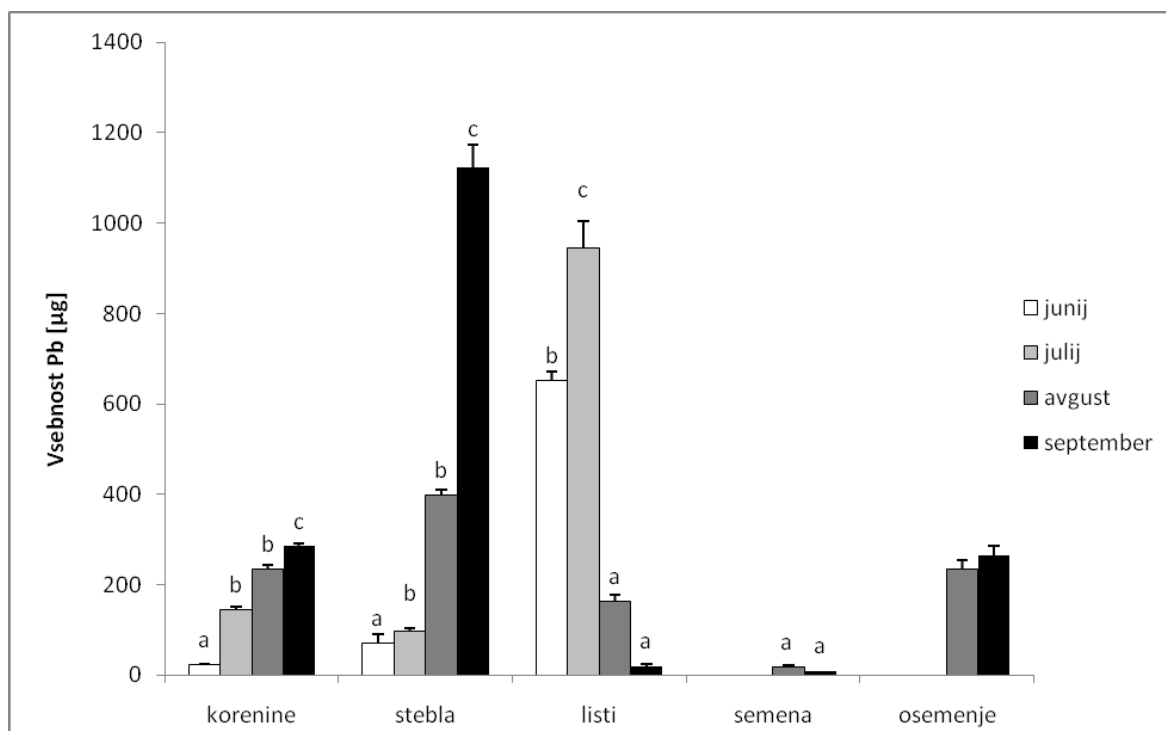
Največjo koncentracijo Pb smo izmerili v mesecu septembru v listih, najmanjšo pa v semenih (Slika 3). Koncentracija Pb v koreninah se je močno povečala v mesecih od julija in septembra, v steblih pa se povečala v mesecu septembru. V listih je v mesecu avgustu koncentracija Pb upadla, znova pa se je povečala v mesecu septembru. V semenih je bila koncentracija Pb statistično enaka v obeh mesecih, ko so bila semena prisotna, medtem ko je bila v osemenju v mesecu septembru statistično večja kot v avgustu.



Slika 3: Koncentracije Pb v suhi masi posameznih delov rastline vrste *Sinapis alba*, ki je rasla na onesnaženem vrtu v Mežici. Prikazane so povprečne vrednosti \pm standardna napaka ($n=5$). Različne črke nad stolpci opisujejo statistično značilne razlike za vsako tkivo posebej (enosmerna ANOVA, Tukeyjev posthoc test pri $p<0,05$).

4.4.2 Vsebnost Pb v posameznih rastlinskih delih

Največja vsebnost Pb je bila v steblih v mesecu septembru, najmanjša pa v semenih (Slika 4). V času rastne sezone je vsebnost Pb v koreninah naraščala in bila največja v mesecu septembru, kar velja tudi za stebela. V listih je bila vsebnost Pb največja v mesecu juliju, v mesecih avgustu in septembru pa se je močno zmanjšala. V semenih se izmerjene koncentracije statistično niso razlikovale med mesecema, obratno pa je bilo pri osemenju, kjer je bila v mesecu septembru večja kot v mesecu avgustu.



Slika 4: Vsebnost Pb v suhi masi posameznih delov rastline vrste *Sinapis alba*, ki je rasla na onesnaženem vrtu v Mežici. Prikazane so povprečne vrednosti \pm standardna napaka (n=5). Različne črke nad stolpci opisujejo statistično značilne razlike za vsako tkivo posebej (enosmerna ANOVA, Tukeyjev posthoc test pri $p < 0,05$).

4.4.3 Translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Pb

Podatki o izračunanih translokacijskih faktorjih za Pb nam kažejo, da aktivna translokacija Pb poteka med rizosfernimi tlemi, v kateri so rasle rastline vrste *S. alba* in njihovimi koreninami (Preglednica 5). Aktivni transport Pb poteka tudi v sami rastlini, in sicer tako med koreninami in stebli, med stebli in listi rastline. Rastlina omejuje translokacijo le na nivoju med listi in semeni. Bioakumulacijski faktorji so bili v teku celotne sezone nad 1, kar tudi kaže na aktivno kopičenje Pb v poganjku rastline.

Pregl. 5: Translokacijski faktorji (TF) in bioakumulacijski faktorji (BAF) za Pb pri rastlinah vrste *Sinapis alba*, ki je rasla na onesnaženem vrtu v Mežici v Mežiški dolini. Prikazane so povprečne vrednosti \pm standardna napaka (n=5). Različne črke v tabeli opisujejo statistično značilne razlike za vsak TF posebej (enosmerna ANOVA, Tukeyjev posthoc test pri $p < 0,05$).

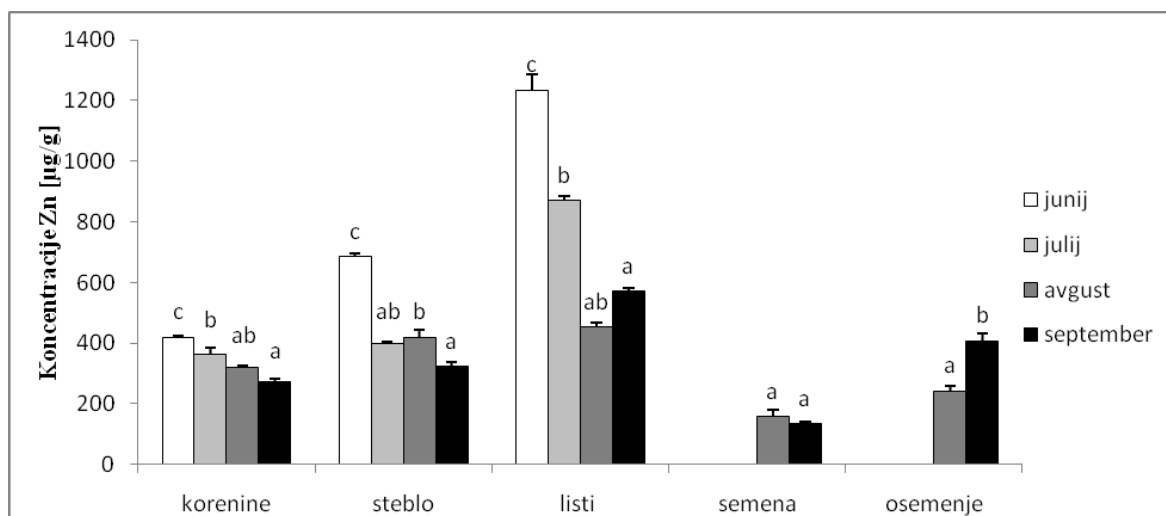
Pomen oznak v tabeli: TF_{kor} = korenine/zemlja, TF_{ste} = steblo/korenine, TF_{lis} = listi/steblo, TF_{seme} = seme/listi, BAF_{pog} = poganjek/zemlja.

	junij	julij	avgust	september
TF _{kor}	0,9 \pm 0,12 a	4,92 \pm 0,2 b	5,08 \pm 0,22 b	6,82 \pm 0,17 c
TF _{ste}	0,84 \pm 0,18 b	0,17 \pm 0,02 a	0,2 \pm 0,01 a	0,4 \pm 0,03 a
TF _{lis}	8,59 \pm 1,41 c	7,03 \pm 0,59 b	1,89 \pm 0,16 a	3,72 \pm 0,3 a
TF _{seme}	-	-	0,38 \pm 0,08 a	0,07 \pm 0,01 b
BAF _{pog}	5,49 \pm 0,21 b	5,98 \pm 0,33 b	2,99 \pm 0,2 a	12,5 \pm 0,64 c

4.5 ANALIZA Zn

4.5.1 Koncentracije Zn v posameznih rastlinskih delih

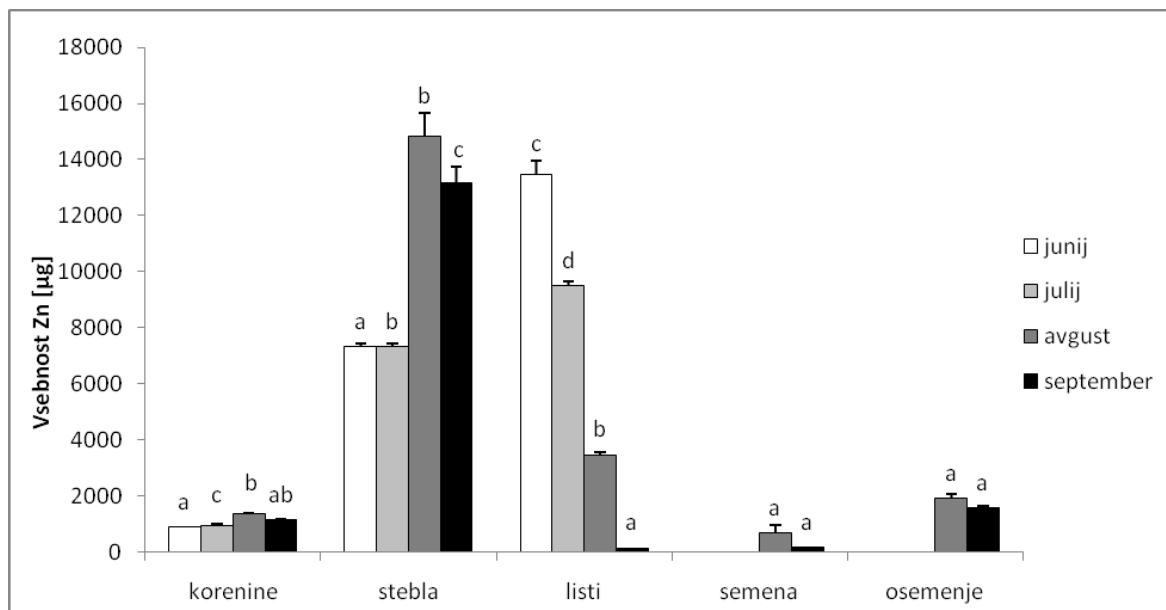
Največje koncentracije Zn so bile izmerjene v listih v mesecu juniju, najmanjše pa v semenih (Slika 5). Koncentracija Zn v koreninah je z rastno sezono ves čas upadala, kar velja tudi za stebela in liste. V semenih statistično značilne razlike med koncentracijami v mesecu avgustu in septembru ni. V osemenjih pa je bila izmerjena koncentracija v mesecu septembru statistično značilno večja kot v mesecu avgustu.



Slika 5: Koncentracije Zn v suhi masi posameznih delov rastline vrste *Sinapis alba*, ki je rasla na onesnaženem vrtu v Mežici. Prikazane so povprečne vrednosti \pm standardna napaka ($n=5$). Različne črke nad stolpci opisujejo statistično značilne razlike za vsako tkivo posebej (enosmerna ANOVA, Tukeyjev posthoc test pri $p<0,05$).

4.5.2 Vsebnost Zn v posameznih rastlinskih delih

Največja vsebnost Zn je bila v mesecu avgustu v steblih, medtem ko je bila najmanjša vsebnost v mesecu septembru v listih in semenih rastline vrste *S. alba* (Slika 6). Vsebnost Zn v koreninah je bila največja v mesecu avgustu, ravno tako kot v steblih. V listih je vsebnost Zn iz meseca v mesec upadala in bila tako največja v mesecu juniju in najmanjša v mesecu septembru. V semenih pri izmerjenih koncentracijah ni bilo značilne statistične razlike.



Slika 6: Vsebnost Zn v suhi masi posameznih delov rastline vrste *Sinapis alba*, ki je rasla na onesnaženem vrtu v Mežici. Prikazane so povprečne vrednosti \pm standardna napaka ($n=5$). Različne črke nad stolpci opisujejo statistično značilne razlike za vsako tkivo posebej (enosmerna ANOVA, Tukeyjev posthoc test pri $p<0,05$)

4.5.3 Translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Zn

Aktivna translokacija Zn iz rizosferne zemlje v korenine rastline vrste *S. alba* v mesecu juniju ni bila prisotna, medtem ko je bila v preostalih mesecih aktivna (Preglednica 6). Aktivna translokacija Zn ni bila prisotna skozi celotno rastno sezono med koreninami in stebлом, medtem ko je bila v listih ves čas prisotno močno aktivna translokacija. Rastlina omejuje translokacijo Zn tudi med listi in semeni. Bioakumulacijski faktorji za Zn so zelo visoki in kažejo na aktivno kopičenje Zn v poganjkih rastline.

Pregl. 6: Translokacijski faktorji (TF) in bioakumulacijski faktorji (BAF) za Zn pri rastlinah vrste *Sinapis alba*, ki je rasla na onesnaženem vrtu v Mežici v Mežiški dolini. Prikazane so povprečne vrednosti \pm standardna napak (n=5). Različne črke v tabeli opisujejo statistično značilne razlike za vsak TF posebej (enosmerna ANOVA, Tukeyjev posthoc test pri $p < 0,05$).

Pomen oznak v tabeli: TF_{kor} = korenine/zemlja, TF_{ste} = steblo/korenine, TF_{lis} = listi/steblo, TF_{seme} = seme/listi, BAF_{pog} = poganjek/zemlja.

	junij	julij	avgust	september
TF _{kor}	4,62 \pm 0,06 c	4,17 \pm 0,24 bc	3,62 \pm 0,07 ab	3,4 \pm 0,1 a
TF _{ste}	1,63 \pm 0,02 b	1,16 \pm 0,06 a	1,31 \pm 0,07 ab	1,19 \pm 0,05 ab
TF _{lis}	1,78 \pm 0,09 a	2,19 \pm 0,02 a	1,1 \pm 0,08 a	1,79 \pm 0,11 a
TF _{seme}	-	-	0,67 \pm 0,29 a	0,24 \pm 0,02 a
BAF _{pog}	21,2 \pm 0,6 c	14,51 \pm 0,31 bc	9,88 \pm 0,36 a	11,08 \pm 0,31 a

4.5.4 Celokupne vsebnosti Cd, Pb in Zn v celih rastlinah v rastni sezoni

Največje celokupne vsebnosti Pb in Zn so vsebovale rastline v mesecu juliju, medtem ko so bile največje celokupne vsebnosti Cd v mesecu septembru (Preglednica 7), ko so bile rastline tudi največje v biomasi, saj je za rastline vrste *S. alba* značilna zelo hitra in bujna rast. Najmanjše vsebnosti so bile v mesecu juniju, ko so bile rastline šele na začetku svoje rasti ter proti koncu rastne sezone, ko je biomasa zlasti listov in s tem tudi vsebnosti kovin pričela upadati.

Pregl. 7: Celokupne vsebnosti posameznih kovin Cd, Pb in Zn v vseh rastlinah skupaj po rastni sezoni. Podane so povprečne vrednosti \pm standardna napaka (n=5). Različne črke opisujejo statistično značilne razlike (enosmerna ANOVA, Tukeyjev posthoc test pri $p < 0,05$).

	junij	julij	avgust	september
Cd				
[μ g]	149,03 \pm 17,71 a	271,11 \pm 36,88 ab	396 \pm 61,87 b	763 \pm 22,4 c
Pb				
[μ g]	731,29 \pm 24,23 a	2285,95 \pm 93,37 b	848,8 \pm 35,28 a	2240,11 \pm 69,31 b
Zn				
[μ g]	18988,5 \pm 2469,65 a	38662,5 \pm 2576,2 c	18435,4 \pm 560,73 a	21414,1 \pm 764,03 b

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 ANALIZA TAL

Pri analizi tal (Preglednica 1), kjer smo določali dostopne koncentracije Cd, Pb in Zn v rizosfernih tleh, v katerih so rasele rastline vrste *S. alba* in predstavlja dostopno koncentracijo Cd, Pb in Zn, smo ugotovili, da koncentracije Cd presegajo z zakonom določeno mejno vrednost v tleh za Slovenijo, medtem ko dostopne koncentracije Pb in Zn te meje ne presegajo (Ur.l.RS, 68/96). Mejna vrednost, določena v zakonu, je gostota nevarne snovi v tleh, ki pomeni takšno obremenitev tal, da se zagotavljajo življenjske razmere za rastline in živali. Pri tej vrednosti so učinki ali vplivi na zdravje človeka ali okolje še sprejemljivi (Ur.l. RS, 68/96). V našem primeru smo določili dostopne koncentracije Cd, Pb in Zn v rizosfernih tleh, medtem ko določene vrednosti v zakonu obsegajo vse frakcije Cd, Pb in Zn, ki so prisotne v tleh, tako dostopne kot nedostopne. Zato bi bilo za zanesljivejšo oceno tveganja potrebno izmeriti celotne vsebnosti kovin v tleh.

Težke kovine se v tleh nahajajo v različnih ionskih oblikah, topnih v talni raztopini, in v različnih oblikah trdne faze tal. To porazdelitev težkih kovin v tleh med posamezne talne frakcije imenujemo frakcionacija težkih kovin. Oblike težkih kovin, ki so topne v talni raztopini in izmenljive s talnih koloidov, so mobilne in dostopne za rastline. Kovine, vezane v kristalne rešetke glinenih mineralov, so nedostopne. Na splošno je v tleh le majhen del kovin v sledovih v rastlinam dostopnih oblikah (Kabala in Singh, 2001). Pri našem poskusu že dostopne koncentracije Cd presegajo z zakonom določeno mejno vrednost Cd v tleh, kar pomeni, da v tleh prisotne celokupne koncentracije Cd na tem območju močno presegajo z zakonom določene vrednosti.

5.2 BIOMASA RASTLIN

V našem poskusu se biomasa rastlin v teku rastne sezone povečuje in največja skupna biomasa rastlin je bila v mesecu avgustu (Preglednica 3). Zn je esencialni element za rastlino, zato na rastlino bolj vpliva njegovo pomanjkanje kot prekomerne koncentracije,

saj se pomanjkanje Zn odraža na reducirani rasti rastline (Hagemeyer, 1999). Privzem Pb je v rastlino predvsem pasiven in ga rastlina privzema le toliko, kot ga za svojo rast potrebuje, zelo omejen pa je tudi njegov transport po rastlini, zato na samo rast rastline ne vpliva (Kabata-Pendias in Pendias, 1984). Glede na to, da so rastline uspešno zaključile življenjski cikel, sklepamo, da prisotnost Cd, Pb in Zn v tleh rastlin ni omejeval. Da bi to še boljše potrdili, bi morali hkrati na neonesnaženem vrtu istočasno gojiti kontrolne rastline ter nato primerjati biomase rastlin na obeh vrtovih. Zmanjšanje biomase proti koncu rastne sezone (meseca avgust in september) je posledica staranja rastline, saj je za vrsto *S. alba* značilna intenzivna hitra in bujna začetna rast. Rastline so v mesecu avgustu že tvorile semena in so svoj življenjski cikel že zaključevale, saj ta rastlina spada med enoletnice, kar pomeni, da so že bile v senescenci, kar dokazuje predvsem manjša biomasa listov. V primerjavi z začetnimi meseci rasti je bilo na koncu rastne sezone na rastlini zelo malo listov, kar pomeni, da so že odpadali z rastline. Listi, ki so bile še prisotni, pa so bili tudi precej manjši kot listi na višku rasti.

5.3 KONCENTRACIJE, VSEBNOSTI, TRANSLOKACIJSKI IN BIOAKUMULACIJSKI FAKTORJI ZA Cd, Pb IN Zn V RASTLINI

5.3.1 Koncentracije, vsebnosti, translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Cd v rastlini

Določena zgornja vrednost koncentracije Cd v rastlinah, ki se uporabljajo v prehrani, je v Sloveniji določena na 0,2 µg/g ((Ur.l. RS št. 69/2003). Izmerjene koncentracije Cd pri rastlini vrste *S. alba* v našem poskusu to mejo presegajo v celotni rastlini. Največja koncentracija Cd je bila izmerjena v steblih rastline v mesecu septembru, ko je bila izmerjena vrednost okoli 13 µg/g. V prehrani se največkrat kot začimba uporabljajo semena te vrste, ki so v našem poskusu presegala z zakonom določeno zgornjo vrednost koncentracije, in sicer so vsebovala največjo koncentracijo Cd v mesecu avgustu, ko je le – ta znašala 1,21 µg/g.

Po raziskavah WHO, je sprejemljiv dnevni vnos Cd 49 µg za moškega, ki ima v povprečju 70 kg, ter 42 µg Cd za ženske s 60 kg telesne teže. Pri našem poskusu semena, ki se v

glavnem uporabljajo v prehrani, vsebujejo v povprečju 1,06 μg Cd, kar pomeni, da dnevni vnos presežemo pri vnosu 47 g semen v enem dnevu pri moških oziroma 40 g pri ženskah. V prehrani se lahko uporabljajo tudi zelo mladi listi, kar pomeni uporaba listov v mesecu juniju, kjer pa je bila povprečna vsebnost Cd 75 μg , kar pa že pri enem gramu zaužitih listov presega dnevni vnos Cd v telo. Zato zaključujemo, da listi rastline *S. alba*, ki uspeva na tako onesnaženih tleh, niso primerni za uporabo v prehrani. V prehrani se pod pogojem, da jih zaužijemo manj kot je dovoljeni dnevni vnos, lahko uporabljajo le semena, saj jih kot začimbe uporabljamo v manjši količini.

Cd pri rastlinah nima pomembne metabolne vloge in ne spada v skupino esencialnih elementov ter za rastline predstavlja strupen element že v majhnih koncentracijah (Schulze in sod., 2005). V naši raziskavi smo izračunali translokacijske faktorje za Cd, da bi ugotovili dinamiko prenosa Cd po rastlini. Ker rastlina Cd ne potrebuje za rast oziroma delujejo na rast celo inhibitorno, je v začetni fazi rasti privzem Cd iz rizosfernih tal v korenine pasivni proces in ga rastlina omejuje (Preglednica 4). Rastlina Cd premešča in kopiči predvsem v poganjkih. Če primerjamo rastlinske organe med seboj ugotovimo, da rastlina večino privzetega Cd kopiči v steblih v primerjavi s koreninami in listi, kjer z rastno sezono koncentracije upadajo. Upadanje koncentracij v teku rastne sezone je lahko tudi posledica redčitvenega efekta, ko rastlina privzema več vode v primerjavi z minerali zaradi rasti. Vsebnosti Cd v posameznih rastlinskih organih sledijo tako biomasi rastlin kot tudi koncentracijam, saj so bile izračunane največje vsebnosti v steblih v mesecu avgustu in septembru. Ravno tako pada vsebnost v teku rastne sezone pri listih, kot padajo tudi koncentracije. Za Cd pri višjih rastlinah še ni bilo odkrite nobene pomembne vloge v rastlinskem metabolizmu, kar bi lahko bil vzrok, da rastlina Cd kopiči v steblih in ne v listih, kjer potekajo glavni procesi metabolizma in rastlina glavne procese na ta način zaščiti pred strupenimi vplivi Cd. Skozi sezonsko dinamiko se spreminja tudi privzem Cd iz tal ter prenos po rastlini. Dinamika privzema in prenosa sledita sezonski dinamiki in koncentracijam izmerjenega Cd v posameznih rastlinskih organih, saj so bile največji translokacijski faktorji izračunani na prenosu med koreninami in stebлом, medtem ko na nivoju med stebлом in listi v teku rastne sezone upadajo. Če bi rastline vrste *S. alba* želeli uporabiti v namen fitoremediacije, da bi z njimi iz okolja odstranili Cd, bi glede na naše izračunane celokupne vsebnosti Cd v rastlini, morali rastline požeti v mesecu septembru,

ko so vrednosti največje (Preglednica 7). Za ocenjevanje potencialne vrednosti za fitoremediacijo so še bolj pomembni bioakumulacijski faktorji kot koncentracije kovin v poganjkih (Zhao s sod., 2003). Bioakumulacijski faktorji nad vrednostjo 1 za Cd so znak hiperakumulacije Cd pri rastlini in v primeru rastline *S. alba* so bili bioakumulacijski faktorji do vrednosti 9, kar pomeni da jo lahko uvrstimo med potencialne hiperakumulacijske rastline. Največji bioakumulacijski faktor je bil izračunana v mesecu septembru, s čimer lahko potrdimo, da je za žetev najprimernejši mesec prav september.

Transport iz poganjkov v semena je zelo omejen (vrednosti translokacijskih faktorjev pod 1), kar lahko razložimo s tem, da rastlina svoje reproduktivne organe zaščiti pred vplivom strupenih elementov. Transport hranil in kovin iz listov v semena poteka preko floema in v predhodnih raziskavah je bilo ugotovljeno, da se transport kovin ustavi na prehodu iz funikulusa ali osemenja, od koder končni transport v semena poteka apoplastno (Patrick, 1997; Patrick and Offler, 2001). Ugotovljeno je bilo tudi, da rastline zaradi apoplastne bariere, ki prepreči prehod kovin v semena, na onesnaženih tleh lahko zaključijo svoj življenjski cikel (Bhatia et al., 2003).

5.3.2 Koncentracije, vsebnosti, translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Pb v rastlini

Določena zgornja vrednost koncentracije Pb v rastlinah, ki se uporabljajo v prehrani, je v Sloveniji določena na 0,3 µg/g ((Ur.l. RS št. 69/2003). Izmerjene koncentracija Pb pri rastlini vrste *S. alba* v našem poskusu to mejo presegajo v celotni rastlini (Preglednica 5). Semena, ki se uporabljajo v prehrani kot začimba, to mejo presegajo za 25-krat, in sicer so bile izmerjene koncentracije okoli 7 µg/g.

Po podatkih WHO je zmerno zaužitje 20-282 µg Pb /dan, za nevarno pa se šteje, če zaužijemo več kot 500 µg Pb/dan. Pri naši raziskavi so bile vrednosti vsebnosti Pb v semenih nižje od predpisanih (Slika 4), močno pa presegajo mejo za nevarni vnos pri steblih in listih. Mladi listi (v našem primeru iz meseca junija), ki se tudi lahko uporabljajo v prehrani, vsebujejo namreč med 600 in 900 µg Pb/suho maso listov.

Sprejem Pb v rastline je pasiven, absorpcija poteka predvsem preko koreninskih laskov, v koreninah pa se Pb tudi kopiči, premeščanje v nadzemne dele pa je omejeno in počasno (Kabata-Pendias in Pendias, 1984). Pri primerjavi koncentracij Pb v posameznih rastlinskih organih opazimo, da so bile največje koncentracije izmerjene pri koreninah in v listih, medtem ko najmanjše v steblih in semenih. Privzem Pb iz tal v korenin se v teku rastne sezone povečuje, kar lahko razložimo z vedno večjim koreninskim sistemom rastline, kar pomeni, da je vedno večja površina korenin v stiku z rizosfernimi tlemi in s tem se poveča absorpcijska površina, ki je dodatno povečana preko koreninskih laskov in stranskih korenin preko katerih poteka glavni privzem. Vedno večja koncentracija Pb in tudi vsebnost Pb v teku rastne sezone v koreninah sledi tudi povečevanju biomase korenin v teku rastne sezone. Pri medsebojni primerjavi koncentracij in vsebnosti Pb v steblih in listih pa opazimo, da so bile večje koncentracije izmerjene v listih, medtem ko pa so bile vsebnosti večje v steblih. Večje vsebnosti v steblih kot listih lahko razložimo s pomočjo spreminjanja biomase skozi rastno sezono, saj je bila biomasa stebela v mesecih avgustu in septembru, kjer so vsebnosti v steblih večje kot v listih, bistveno večja kot pri listih. V začetnih mesecih (junij, julij) biomasa steblov v primerjavi z listi ni bila bistveno večja, precej večje pa so bile koncentracije Pb v listih. Primeren čas za žetev rastlin, če želimo iz okolja odstraniti največje vsebnosti Pb, bi bil mesec julij, ko so bile celokupne vsebnosti v rastlinah največje (Preglednica 7). Mogoče še bolj primeren mesec bi bil september, saj bi z žetvijo v tem mesecu poleg Pb iz okolja odstranili tudi največ Cd, kar bi bilo za čiščenje okolja še bolj primerno.

Predhodne raziskave so pokazale omejen prenos Pb po rastlini (Kabata-Pendias in Pendias, 1984), v našem poskusu pa translokacijski faktorji (Preglednica 5) v nadzemnih delih kažejo na aktiven prenos. Vendar pa se moramo zavedati, da je velika količina Pb v rastlini lahko posledica nalaganja Pb iz atmosfere na nadzemne dele rastline, ki je pogosto zlasti v onesnaženem območju. Pb je v vodni raztopini slabo topen, kar dokazujejo tudi ugotovitve raziskav, da je Pb rastlinam težko dostopen, ker se v talni raztopini slabo topi (Kabata-Pendias in Pendias, 1984). Ker je v vodni raztopini slabo topen, ga težko speremo tudi s površine nadzemnih rastlinskih organov, kamor se nalaga iz atmosfere na onesnaženih območjih. Prisotnost zračnega nalaganja Pb bi najbolje dokazali s primerjavo med vsebnostjo Pb v opranih ter neopranih rastlinah, saj ga vsaj delno lahko speremo s

površine. Nalaganje Pb iz atmosfere nakazujejo tudi velike vsebnost Pb v osemenju, ki je lahko posledica dveh različnih mehanizmov, in sicer posledica nalaganja Pb iz atmosfere ali pa kot posledica zaščite semena, tako da se večino Pb transportira in kopiči v osemenjih. Translokacijski faktorji za prenos Pb iz listov v semena so zelo nizki in nakazujejo pasiven in omejen prehod Pb v samo seme, s čimer ga rastlina zaščiti pred strupenimi vplivi Pb. Bioakumulacijski faktorji so bili v našem primeru za Pb izredno visoki, in sicer nad 1 ter so vrednosti znašale do 12 v mesecu septembru. Tako kot pri translokacijskih faktorjih se moramo tudi pri bioakumulacijskih faktorjih zavedati dejstva, da je verjetno prihajalo do nalaganja Pb iz atmosfere. Rastline pred meritvami niso bile oprane z vodo, kar pomeni, da z listne površine nismo odstranili atmosferskega Pb in zato so lahko vrednosti bistveno večje.

5.3.3 Koncentracije, vsebnosti, translokacijski in bioakumulacijski faktorji za Zn v rastlini

V Pravilniku o onesnaževalcih v živilih (Ur.l. RS št. 69/2003) v Sloveniji ni določene zgornje mejne vrednosti Zn za živila, ki se uporabljajo v prehrani. Po priporočilih WHO pa je maksimalna količina za vnos Zn za odrasle 1 mg Zn/kg oziroma 1 μg Zn/g telesne teže na dan. Priporočena varna in zadostna količina zaužitega Zn je na odraslo osebo približno 15 μg /dan (Alloway, 1990). Najvišja priporočena količina za odraslo osebo približno 45 μg /dan. Koncentracije višje od 150 μg /dan, so strupene ter povzročajo poškodbe in spremembe, ki jih lahko opazimo na organizmu (Oliver, 1997).

Največja koncentracija Zn (Slika 5) v našem poskusu je bila izmerjena v mesecu juniju pri listih rastline vrste *S. alba*, in sicer je bila izmerjena koncentracija Zn 1234, 25 μg /g, kar pomeni vsebnost okoli 13000 μg (Slika 6). Ker se mladi listi, kamor spadajo listi v mesecu juniju, lahko uporabljajo v prehrani, taki listi za samo uporabo niso primerni, saj vsebujejo prekomerne količine Zn, ki so za telo strupene, seveda ob predpostavki, da bi zaužili preveliko maso listov. Največja vsebnost Zn v celotni rastlini je bila sicer izmerjena v steblih v mesecu avgustu (vsebnost okoli 15000 μg), vendar pa se stebila v prehrani ne uporabljajo, zato niso nevarna za zastrupitev s Zn. V prehrani se uporabljajo tudi semena te rastline, izmerjena vsebnost Zn v semenih je bila manjša kot pri mladih listih (okoli 1000

µg), vendar še vedno presegajo mejo strupenosti. Rastline vrste *S. albe*, ki rastejo na tleh onesnaženih bogatih s Zn, za uporabo v prehrani niso primerne.

Zn je za rast in razvoj rastlin esencialni mikronutrient, saj bi bila rast brez Zn močno ovirana ali onemogočena. Zn ima pomembno vlogo tudi v sintezni poti klorofila (Adriano, 2001). Največja koncentracija Zn je bila izmerjena v mladih listih in steblih v mesecu juniju, kar nakazuje na njegovo vlogo pri rasti rastline. Pomen Zn pri rasti se kaže tudi pri koncentracijah Zn v koreninah, saj le – ta z rastno sezono upada, kar dokazuje povečano potrebo rastline po Zn v začetnih fazah rasti. Tudi translokacijski faktorji (Preglednica 6) nam kažejo izraziti aktivni transport Zn iz stebela v mlade liste, saj so pri mladih listih (meseca junij in julij) translokacijski faktorji bistveno večji kot pri starejših listih (meseca avgust in september). Zaradi potreb Zn pri biosintezi klorofila, naj bi se po nekaterih raziskavah lahko premeščal tudi nazaj v mlade liste (Kabata-Pendias in Pendias, 1984), kar v našem poskusu dokazujejo zelo majhne koncentracije in precej manjša vsebnost Zn v starejših listih (mesec september). V predhodnih raziskavah je bilo dokazano, da se najmanjše vsebnosti Zn nahajajo v plodovih rastlin (Kabata-Pendias in Pendias, 1984), kar smo pokazali tudi za rastline vrste *S. alba*, saj so bile tako koncentracije Zn kot vsebnosti Zn v plodovih oziroma v semenih najmanjše glede na ostale rastlinske organe. Majhne koncentracije Zn v semenih ter translokacijski faktorji (vrednosti manj kot 1, kar pomeni pasiven in omejen transport) za prenos Zn v semena nakazujejo, da rastlina seme zaščiti pred prekomernimi koncentracijami Zn in s tem pred njegovimi strupenimi vplivi. Bioakumulacijski faktorji za Zn dosegajo vrednosti do 21 v mesecu juniju, ko tudi potreba po Zn v hitri fazi rasti največja.

5.4 UPORABA RASTLINE VRSTE *Sinapis alba* V PROCESU FITOREMEDIACIJE

Fitoremediacija je definirana kot uporaba zelenih rastlin za odstranjevanje onesnažil iz okolja (Cunningham in sod., 1995). Po zaključenem življenjskem ciklu rastlin, lahko pobrane dele rastlin, v katerih so nakopičene težke kovine odstranimo iz okolja, npr. z odlaganjem na deponije kot kontaminiran material ali s sežiganjem. Koncentracije kovin so odvisne od sposobnosti akumuliranja kovin v posamezni rastlini (Brooks in sod., 1998). Željene lastnosti fitoekstrakcijskih rastlin so hitra rast, velika nadzemna rastlinska biomasa

in sposobnost akumulacije velikih količin težkih kovin v nadzemnih delih ter globok koreninski sistem (Salt in sod., 1998). Rastlinska vrsta *S. alba* ustreza nekaterim lastnostim za fitoremediacijsko rastlino, saj jo odlikuje intenzivna hitra rast, ima močan razvejan koreninski sistem ter doseže dokaj veliko rastlinsko biomaso, ne spada pa med hiperakumulatorje, kar pomeni, da nima izredno velike sposobnosti privzema težkih kovin. Sposobnost privzemanja visokih koncentracij predvsem Cd, smo dokazali tudi z izračunom bioakumulacijskega faktorja, ki za Cd znaša do vrednosti 9. Koncentracije Cd, Pb in Zn bi iz okolja preko rastlin vrste *S. alba* odstranili iz okolja, če bi rastline pobrali v mesecu septembru, ko so bile vsebnosti privzetih kovin največje. Ker te rastline odlikuje predvsem hitra rast in so za gojenje zelo nezahtevne, bi jih lahko uporabili za čiščenje okolja.

5.5 UPORABA RASTLINE VRSTE *Sinapis alba* V PREHRANI

Pri rastlinski vrsti *S. alba* se v prehrani uporabljajo predvsem semena kot začimbe, predvsem pa kot surovina za proizvodnjo gorčice, užitni pa so tudi mladi listi (Petauer, 1993). Mlade liste, ki zrastejo v primerno velikost za uživanje že po desetih dneh po vzkalitvi, se v prehrani uporablja kot solato, namaz ali marinado, saj je v listih gorčice prisotnega veliko vitamina C, karotenoidov (vključno z beta karotenom), rudnin z vonjem po žveplu (http://www.dnevnik.si/tiskane_izdaje/zdravje/225688). V naši raziskavi smo ugotovili, da rastline vrste *S. alba*, ki rastejo v tleh, onesnaženih s Cd, Pb in Zn, niso primerne za uporabo v prehrani. Ker je njena značilnost predvsem hitra rast v zelo kratkem času, privzame iz rizosferne zemlje velike količine Zn, mladi listi, ki se uporabljajo v prehrani, niso najbolj primerni zaradi prevelike količine Zn in kot smo ugotovili v naši raziskavi tudi prevelike količine Pb. Mladi listi vsebujejo tudi prevelike količine Cd.

Prekomerne količine Zn in Cd so bile dokazane tudi pri semenih, ki se največ uporabljajo v prehrani, zato ta semena za uporabo kot surovina za izdelavo gorčice ali kot začimba ne bi bile primerne. Osnovni recept za pripravo 200 g gorčice naprimer vsebuje 60 g gorčičnih semen, ki jih zavremo v 1/8 l vode in zmeljemo v električnem mešalniku ter nato dodamo še druge sestavine (kis, sladkor, začimbe) (vir: www.umetnostna-obrt.com). V naši raziskavi smo ugotovili, da dnevni vnos Cd prekoračimo pri zaužitju med 40 in 50 g semen, kar pomeni, da 200 g gorčice pripravljene iz tega semena, vsebuje prekomerno

količino Cd, ki je med najbolj strupenimi težkimi kovinami. Z vsakodnevno uporabo take gorčice bi lahko povzročili kronično zastrupitev s Cd, saj tudi kronična izpostavljenost manjšim koncentracijam Cd lahko povzroči znake zastrupitve (Adriano, 2001).

6 SKLEPI

1. V poskusu na prostem na onesnaženem vrtu nam je uspelo vzgojiti rastline vrste *Sinapis alba*.
2. Izmerjene dostopne koncentracije Cd v rizosfernih tleh so presegale z zakonom določeno mejno vrednost za tla v Sloveniji, ki se uporabljajo v namene gojitve pridelkov za uporabo v prehrani.
3. Izmerjene dostopne koncentracije Pb in Zn v rizosfernih tleh z zakonom določene mejne vrednosti v tleh za Slovenijo ne presegajo.
4. Prekomerne koncentracije Cd, Pb in Zn v rizosferni zemlji rastline ne ovirajo pri rasti, saj je uspešno zaključila svoj življenjski cikel.
5. Koncentracije Cd v mladih listih in v semenih, ki se uporabljajo v prehrani, presegajo z zakonom določeno zgornjo vrednost koncentracijo v zelenjavi, ki se uporablja v prehrani.
6. Koncentracije Pb v mladih listih in v semenih, ki se uporabljajo v prehrani, presegajo z zakonom določeno zgornjo vrednost koncentracijo v zelenjavi, ki se uporablja v prehrani.
7. Koncentracije Zn v mladih listih in v semenih, ki se uporabljajo v prehrani, presegajo priporočeno vrednost in tako za uporabo niso varni.
8. Rastline vrste *S. alba* po naših rezultatih za uporabo v prehrani niso primerne, če rastejo na območju, ki je onesnaženo s Cd Pb in Zn, saj v svojih nadzemnih delih kopičijo prevelike koncentracije omenjenih kovin.
9. Rastline vrste *S. alba* bi bile primerne za uporabo v fitoremediaciji, saj imajo lastnosti hiperakumulacijskih rastlin.

7 POVZETEK

V preteklosti je na mnogih območjih v Sloveniji zaradi industrializacije, predvsem rudarjenja in z njim povezane industrije metalurgije, prihajajo do močnega onesnaženja okoliškega območja. Kot posledica se na takih območjih pojavljajo tla, ki so izjemno bogata s težkimi kovinami, kamor spadajo tudi Cd, Pb in Zn, ki so tudi glavni onesnaževalci tal v primeru Mežiške doline. Ker se tla uporabljajo tudi v namene pridelovanja hrane, so tla, onesnažena s temi kovinami, velik problem, saj le-te preko prehranjevalne verige vstopajo v ljudi, kjer povzročajo zastrupitve in negativno vplivajo na zdravje.

Na onesnaženem območju Mežiške doline smo na onesnaženem vrtu v v poskusu na prostem vzgojili rastline bele gorjušice (*Sinapis alba*), ki se uporablja v prehrani ljudi. Za prehrano se uporabljajo predvsem semena, ki se uporabljajo kot začimbe in so tudi glavna sestavina za izdelavo gorčice. Mlade liste rastlin pa se lahko uporablja v solati, namazih ali marinadi. Rastline smo v teku ene rastne sezone (od junija do septembra) vsak mesec vzorčili ter v rastlinskem materialu (korenine, steblo, listi, semena, o semenja) in rizosfernih tleh izmerili koncentracije Cd, Pb in Zn z metodo atomske absorpcijske spektroskopije (ASS) ter izračunali vsebnosti in translokacijske faktorje. Ob vsakem vzorčenju smo določili tudi suho maso rastlin tako, da smo rastline najprej posušili, ločili na posamezne rastlinske dele ter jih posamično tehtali.

Rezultati so pokazali, da rastline niso primerne za uporabo v prehrani, saj v svojih nadzemnih delih, predvsem v mladih listih ter tudi v semenih, kopičijo prekomerne koncentracije Cd, Pb in Zn. Iz dobljenih rezultatov smo ugotovili sezonsko dinamiko privzema kovin, saj je rastlina v začetnih fazah rasti privzemala večje koncentracije predvsem Zn iz rizosferne zemlje, ki ga potrebuje za uspešno začetno rast in razvoj listov. Izmerjene prekomerne koncentracije Cd, Pb in Zn v rizosferni zemlji na samo rast rastline niso vplivale, saj je rastlina uspešno zaključila svoj življenjski cikel. Na osnovi rezultatov pa tako onesnažena zemlja ni primerna za gojenje rastlin za uporabo v prehrani. Rastline bi bile uporabne za čiščenje tal, saj jih odlikuje hitra rast in velika rastlinska biomasa, kar pomeni, da bi z njimi lahko iz tal odstranili določeno količino težkih kovin.

SUMMARY

The environment is polluted in many Slovenia's areas due to industrialisation, in particular, mining and related metallurgical industry. This resulted in excessive accumulation of heavy metals including Cd, Pb and Zn in the soil. These heavy metals are also the main soil pollutants in the Mežica valley. Since the soil is used also for food production purposes, the soil polluted with these metals is a serious problem, since through a food chain the metals enter the human body where they cause poisoning and have a negative impact on health.

In a garden in a polluted area of the Mežica valley, in natural environment conditions, we grew white mustard (*Sinapis alba*) plants, which may also be used for human food. In food, seeds are primarily used for seasoning; they are also the main component in production of mustard. Young plant leaves may be used in salads, spreads or marinades. During a period of one growing season (from June to September) we sampled plants and measured Cd, Pb and Zn concentrations in plant and rhizosphere soil material with the atomic absorption spectrometry (AAS) method and calculated the contents and translocation factor. In each sampling we determined dry mass of plants so that we initially dried the plants, cut them to individual parts and weighted them separately.

The results showed the plants are not suitable for food, since above ground parts, in particular, in young leaves and also seeds, excessive concentrations of Cd, Pb and Zn were accumulated. On the basis of the obtained results we established a seasonal dynamics of metal accumulation, since in the initial phases of its growth the plant accumulated higher concentrations from the rhizosphere soil, in particular Zn, which is needed for a successful initial growth and leaf development. The excessive concentrations of Cd, Pb and Zn in the rhizosphere soil had no impact on the growth of the plant, since the plant successfully completed its life cycle. According to the results, the soil polluted to such an extent is not suitable for growing plants for food.

8 VIRI

Adriano D.C., 1986. Trace Elements in the Terrestrial Environment. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, Tokyo

Adriano, 2001. Trace elements in terrestrial environments; Biochemistry, bioavailability and risk of metals, 2nd edition, Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg

Alloway B. J. 1990. Heavy metals in soil. London, Blackie, John Wiley & Sons: 339 str.

Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrometry, 2000. PerkinElmer Instruments. Analyst 100/300. Atomic Absorption Spectrometers, 2000. Hardware Guide. PerkinElmer Instruments.

Baker A. J. M. 1981. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. Journal of plant nutrition 3: 643 – 654.

Barcelo J., Poschieder C. 1990. Plant water relations as affected by heavy metal stress: A review. Journal of Plant Nutrition, 13, 1: 1-37

Basic N., Keller C., Fontanillas P., Vittoz P., Besnard G., Galland N., 2006. Cadmium hyperaccumulation and reproductive traits in natural *Thlaspi caerulescens* population. Plant Biology 8: 64-72.

Bathia N. P., Orlic I., Siegele R., Ashwath N., Baker A. J. M., Walsh K. B., 2003. Elemental mapping using PIXE shows the main pathway of nickel movement is principally symplastic within the fruit of the hyperaccumulator *Stackhousia tryonii*. Functional Biology 31: 1-14.

Beyersmann D., 2002. Effects of carcinogenic metals on gene expression. Toxicol Lett 127:63-68

Boyd R. S., 1998. Hyperaccumulation as a plant defensive strategy. V: Plants that hyperaccumulate heavy metals. Their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining. Brooks R. R. (ur.). CAB International. 1998.

Brooks R. R., 1998. Geobotany and hyperaccumulators. V: Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals. Their Role in Phytoremediation, Microbiology, Archaeology, Mineral Exploration and Phytomining. Brooks R. R. (ur.). NY, USA, CAB International.: 55 – 95.

Cunningham S. D., Berti W. R., Huang J. W., 1995. Phytoremediation of contaminated soils. *Tibtech*, 13: 393 – 397

Dermastia M., 2007. Pogled v rastline. Ljubljana, Nacionalni inštitut za biologijo: 237 str.

Greger M., 1999. Metal availability and bioconcentration in plants. V: Heavy metal stress implants. From molecules to ecosystems. Prasad M. N. V., Hagemeyer J. (ur.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Hall J. L., 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Biology* 53: 1 – 11.

Hagemeyer, 1999. Heavy metal stress in plants: from molecules to ecosystems, Springer Verlag, Berlin

Järup L., Berglund M., Elinder C. G., Nordberg G., Vahter M., 1998. Health effects of cadmium exposure – a review of the literature and a risk estimate, *Scand J Work Environ & Health* 24(Suppl 1):1-51

Joner E. J., Leyval C., 2001: Time course of heavy metal uptake in maize and clover as affected by root density and different mycorrhizal inoculation regimens. *Biology and Fertility of soils* 33: 351 – 357.

Kabata-Pendias A., Pendias H., 1984. Trace elements in soil and plants. Boca Raton, Florida, CRC Press: 315 str.

Kiekens L., 1990. Zinc V: Heavy metals in soils. Alloway B.J (ed.) London, Blackie, New York, John Wiley & Sons: 261-279

Lasat M. M., Baker A. J. M., Kochian L. V., 1996. Physiological Characterization of Root Zn²⁺ Absorption and Translocation to Shoots in Zn Hyperaccumulator and Nonaccumulator Species- of *Thlaspi*. Plant Physiology 112: 1715-1722

Leštan D., 2002 Študijsko gradivo za dodiplomski študij ekopedologije, Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za agronomijo, 268 str.

Likar M., 1998. Vodnik po onesnaževalcih okolja. Ljubljana: Zbornica sanitarnih tehnikov in inženirjev Slovenije;

Lobnik F., Zupan M., Hudnik V., Vidic N. J., 1994. Soil and Plant Pollution Case study in Industrial Areas of slovenia, Biogeochemistry of trace elements. Environmental Geochemistry and Health, 16: 287-300

Markert B., 1993. Plants as Biomonitors – Indicators for Heavy Metals in the Terrestrial Environment. Weinheim, New York, Basel, Cambridge, 642 str.

Oliver M. A., 1997. Soil in human health: a review. European Journal of Soil Science, 48: 573-592.

Patrick J. W., 1997. Phloem unloading: sieve elemental unloading and post-sieve elemental transport. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 48: 191-222.

Patrick J. W., Offer C. E., 2001. Compartmentation of transport and transfer events in developing seeds. Journal of Experimental Biology 52: 551-564.

Pavlek T., Rački N., Resman K., Starček N., Tkalec K., Tudja K., Turnšek J., Vukanović L., 2008. Sezonska dinamika privzema kovin v rdeče zelje. *Collectanea Studentium Physiologiae Plantarum* 2008. Vol. 3. Št. 1

Prozialeck W. C., 2000. Evidence that E-cadherin may be a target for cadmium toxicity in epithelial cells. *Toxicol Appl Pharmacol* 164:231-249

Pulido M. D., Parrish A. R., 2003. Metal-induced apoptosis: mechanisms. *Mutat Res* 533:227-241

Ross S., 1996 *Toxic metals in Soil-Plant Systems*, John Wiley & Sons, Chichester, New York, John Wiley and Sons, 469 str.

Salt D. E., Smith R.D., Raskin I., 1998. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49: 643-668

Sanità di Toppi, Gabrielli, 1999. *Response to cadmium in higher plants*, review article, Elsevier, *Environmental and Experimental Botany* 41: 105-130

Schulze E. D., Beck E., Müller-Hohenstein K., 2005. *Plant Ecology*. Springer-Verlag

Shaikh ZA., Vu TT., Zaman K., 1999. Oxidative stress as a mechanism of chronic cadmium-induced hepatotoxicity and renal toxicity and protection by antioxidants. *Toxicol Appl pharmacol* 154:256-263

Task Group of Metal Interactions, 1978. Factors influencing metabolism and toxicity of metals: a consensus report. *Environ Health Perspect* 25:3-42

Uradni list RS št. 68/1996 z dne 29.11.1996 Uredba o mejnih, opozorilnih in kritičnih emisijskih vrednostih nevarnih snovi v tleh

Uradni list RS št. 69/2003 z dne 16.07.2003 pravilnik o onesnaževalcih v živilih s prilogo 1: Zgornje mejne vrednosti nekaterih onesnaževalcev v živilih.

Webb M., 1979. The chemistry, biochemistry and biology of cadmium. Elsevier, Amsterdam, pp 285-340

Wenzel W. W., Alge G., Sattler H., 1993. Environmental soil monitoring in Austria: Methodology and results, In: Varallyay, G., (Ed.), Proc. Int. Workshop on Harmonization of Soil Conservation Monitoring Systems, Budapest, pp. 35-48

WHO (World Health Organization), 1992. Environmental Health Criteria 134. Cadmium:IPCS, Geneva

Zhao F. J., Lombi E., McGrath S. P., 2003. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. Plant and Soil 246: 37 - 43

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. Marjani Regvar za hiter pregled diplome, koristne nasvete, potrpežljivost in prilagajanje.

Hvala tebi Paula, za vso pomoč in vodenje skozi praktični del naloge, vse koristne nasvete, pomoč in hitro popravljanje naloge ter za vso potrpežljivost v času pisanja naloge.

Zahvaljujem se Mileni za pomoč pri praktični izvedbi naloge.

Doc. dr. Jasni Dolenc Koce in prof. dr. Alenki Gaberščik se zahvaljujem za hiter pregled naloge.

Hvala tudi Nives Kugonič, ker smo lahko na vrtu po njeni zaslugi vzgajali rastline.

Zahvaljujem se tudi svoji družini za vso podporo, razumevanje in potrpežljivost v času študija.

Posebna zahvala pa gre tebi, Matej, za vso podporo, razumevanje in vzpodbude v času študija ter da si me vedno spravljal v dobro voljo.

PRILOGE

Priloga 1: Suha masa korenin, steblov, listov, cvetov, semen in semenskih ovojníc

št. vzorca	korenine [g]	steblo [g]	listi [g]	cvetovi [g]	semena [g]	osemenje [g]
junij	2,079	10,674	10,895	/	/	/
julij	2,58	18,409	15,491	0,237	/	/
avgust	4,217	35,321	7,666	/	2,326	7,87
september	4,136	40,634	0,255	/	1,177	3,836

Priloga 2: Koncentracije Zn, Pb in Cd v vzorcih zemlje

št. vzorca	konc. Zn [$\mu\text{g/g}$]	konc. Pb [$\mu\text{g/g}$]	konc. Cd [$\mu\text{g/g}$]
junij	90,93	12,12	1,924
julij	87,28	11,42	1,812
avgust	88,29	10,93	1,811
september	80,54	10,11	1,634

Priloga 3: Koncentracije Cd v posameznih rastlinskih delih po rastni sezoni

VZOREC	stebila [µg/g]	korenine [µg/g]	listi [µg/g]	cvetovi [µg/g]	semena [µg/g]	ovojnice semen [µg/g]
junij	3,938	1,239	6,481			
junij	2,657	1,404	6,317			
junij	11,47	1,906	7,481			
junij	7,604	1,476	7,235			
junij	6,245	0,726	7,553			
povprečje	6,3828	1,3502	7,0134			
julij	6,674	2,05	5,45	1,464		
julij	3,044	2,173	5,061	1,468		
julij	2,592	0,74	4,288	1,571		
julij	3,124	0,887	5,505	0,403		
julij	/	0,563	5,709			
povprečje	3,9	1,2826	5,2026	1,2265		
avgust	2,956	2,832	2,687		0,81	0,599
avgust	14,15	2,427	1,973		0,993	0,64
avgust	15,44	2,273	1,177		1,555	**
avgust	15,11	3,569	1,168		1,478	**
avgust	14,35	3,851	1,785		1,229	**
povprečje	12,4012	2,9904	1,758		1,213	
september	14,88	4,749	1,664		0,907	
september	14,07	3,815	3,972		0,883	
september	12,84	3,721	0,713		0,421	
september	12,55	2,978	2,301		0,629	
september	13,27	2,964			0,817	
povprečje	13,5	3,6454	2,1625		0,7314	

** vrednosti pri merjenju so pod mejo detekcije

Priloga 4: Koncentracije Pb v posameznih rastlinskih delih

VZOREC	stebila [µg/g]	korenine [µg/g]	listi [µg/g]	cvetovi [µg/g]	semena [µg/g]	ovojnice semen [µg/g]
junij	8,286	16,02	57,55			
junij	13,44	9,246	57,6			
junij	4,851	6,89	67,29			
junij	6,544	9,81	59,45			
junij		12,69	57,45			
povprečje	8,28025	10,9312	59,868			
julij	8,375	54,97	54,26	1,847		
julij	7,84	57,62	48,6	6,168		
julij	11,8	47,71	63,88	5,781		
julij	8,117	56,99	65,3	2,871		
julij		63,87	73,15			
povprečje	9,0	56,232	61,038	4,16675		
avgust	9,998	53,32	19,98		1,584	18,84
avgust	11,5	47,55	17,58		10,185	32,25
avgust	11,58	63,53	29,18		10,2	34,54
avgust	11,87	59,32	21,95		8,276	33,38
avgust	11,49	54,12	18,03		9,693	30,22
povprečje	11,2876	55,568	21,344		7,9876	29,846
september	22,34	75,71	94,79		9,008	58,38
september	28,33	71,12	101,8		6,549	56,33
september	27,58	65,61	117,5		5,791	69,74
september	29,91	66,23	83,08		**	72,98
september	30,01	66,12			**	89,26
povprečje	27,6	68,958	99,2925		7,116	69,338

** vrednosti pri merjenju so pod mejo detekcije

Priloga 5: Koncentracije Zn v posameznih rastlinskih delih

VZOREC	stebila [$\mu\text{g/g}$]	korenine [$\mu\text{g/g}$]	listi [$\mu\text{g/g}$]	cvetovi [$\mu\text{g/g}$]	semena [$\mu\text{g/g}$]	osemenje [$\mu\text{g/g}$]
junij	695,6	419,7	1090			
junij	657,6	404	1339			
junij	701,2	440,3	1326			
junij	720,8	422,1	1182			
junij	651,8	412,3	/*			
povprečje	685,4	419,68	1234,25			
julij	399,7	355,8	876,5	397,4		
julij	408	380,2	873,9	378,1		
julij	374,9	347,6	814,8	485,1		
julij	406,1	295,5	912,7	366,7		
julij	/	439,7	881,7			
povprečje	397,2	363,76	871,92	406,825		
avgust	516,2	335,5	429		127,3	195,5
avgust	440,3	300,1	433		147	218,7
avgust	392,4	307,8	470,7		236,2	232,1
avgust	382,6	319	504,4		123,1	312,9
avgust	367	336,7	426,3		830,8	254,7
povprečje	419,7	319,82	452,68			242,78
september	265,9	265,5	570,9		112,7	388,6
september	356,6	278,5	595,3		119,9	342,2
september	325,7	278,9	584,4		141,6	397,4
september	339,8	298,6	531,2		160,8	403,5
september	332,7	246,3	/		137,1	505,9
povprečje	324,1	273,56	570,45		134,42	407,52

Priloga 6: Vsebnosti Cd v posameznih rastlinskih delih

VZOREC	vsebnost korenine Cd (μg)	vsebnost stebra Cd (μg)	vsebnost listi Cd (μg)	vsebnost semena Cd (μg)
junij	2,22	44,42	68,96	
junij	2,51	29,97	67,21	
junij	3,41	129,38	79,60	
junij	2,64	85,77	76,98	
junij	1,30	70,44	80,36	
julij	9,33	249,14	157,18	
julij	9,89	113,63	145,96	
julij	3,37	96,76	123,67	
julij	4,04	116,62	158,76	
julij	2,56		164,65	
avgust	11,64	88,06	19,64	0,95
avgust	9,97	421,53	14,42	1,16
avgust	9,34	459,96	8,60	1,82
avgust	14,67	450,13	8,54	1,73
avgust	15,83	427,49	13,05	1,44
september	25,88	815,87	0,98	0,87
september	20,79	771,46	2,34	0,85
september	20,28	704,02	0,42	0,40
september	16,23	688,12	1,36	0,60
september	16,15	727,59	0	0,78

Priloga 7: Vsebnosti Pb v posameznih rastlinskih delih

VZOREC	vsebnost korenine Pb [μg]	vsebnost stebela Pb [μg]	vsebnost listi Pb [μg]	vsebnost semena Pb [μg]	vsebnost osemenja Pb [μg]
junij	28,68	93,47	612,33		
junij	16,56	151,60	612,86		
junij	12,34	54,72	715,97		
junij	17,56	73,82	632,55		
junij	22,72	0	611,27		
julij	250,11	312,64	1564,86		
julij	262,17	292,67	1401,62		
julij	217,08	440,50	1842,30		
julij	259,30	303,01	1883,25		
julij	290,61	0	2109,65		
avgust	219,15	297,84	146,05	1,85	74,98
avgust	195,43	342,59	128,51	11,92	128,36
avgust	261,11	344,97	213,31	11,93	137,47
avgust	243,81	353,61	160,45	9,68	132,85
avgust	222,43	342,29	131,80	11,34	120,28
september	412,61	1224,90	55,93	8,65	251,03
september	387,60	1553,33	60,06	6,29	242,22
september	357,57	1512,21	69,33	5,56	299,88
september	360,95	1639,97	49,02		313,81
september	360,35	1645,45	0		383,82

Priloga 8: Vsebnosti Zn v posameznih rastlinskih delih

VZOREC	vsebnost korenine Zn [µg]	vsebnost stebela Zn [µg]	vsebnost listi Zn [µg]	vsebnost semena Zn [µg]	vsebnost osemenja Zn [µg]
junij	751,26	7846,37	11597,60		
junij	723,16	7417,73	14246,96		
junij	788,14	7909,54	14108,64		
junij	755,56	8130,62	12576,48		
junij	738,02	7352,30			
julij	1618,89	14920,80	25278,26		
julij	1729,91	15230,64	25203,28		
julij	1581,58	13995,02	23498,83		
julij	1344,53	15159,71	26322,27		
julij	2000,64		25428,23		
avgust	1378,91	15377,60	3135,99	148,94	778,09
avgust	1233,41	13116,54	3165,23	171,99	870,43
avgust	1265,06	11689,60	3440,82	276,35	923,76
avgust	1311,09	11397,65	3687,16	144,03	1245,34
avgust	1383,84	10932,93	3116,25	972,04	1013,71
september	1446,98	14579,30	336,83	108,19	1670,98
september	1517,83	19552,39	351,23	115,10	1471,46
september	1520,01	17858,13	344,80	135,94	1708,82
september	1627,37	18631,23	313,41	154,37	1735,05
september	1342,34	18241,94		131,62	2175,37

Priloga 9: Traslokacijski faktorji Cd v posameznih rastlinskih delih

VZOREC	TF korenine Cd	TF steblo Cd	TF listi Cd	TF semena Cd
junij	0,69	3,18	1,65	
junij	0,78	1,89	2,38	
junij	1,06	6,02	0,65	
junij	0,82	5,15	0,95	
junij	0,40	8,60	1,21	
julij	1,13	3,26	0,82	
julij	1,20	1,40	1,66	
julij	0,41	3,50	1,65	
julij	0,49	3,52	1,76	
julij	0,31	0,00	0,00	
avgust	1,56	1,04	0,91	0,30
avgust	1,34	5,83	0,14	0,50
avgust	1,26	6,79	0,08	1,32
avgust	1,97	4,23	0,08	1,27
avgust	2,13	3,73	0,12	0,69
september	2,91	3,13	0,11	0,55
september	2,33	3,69	0,28	0,22
september	2,28	3,45	0,06	0,59
september	1,82	4,21	0,18	0,27
september	1,81	4,48	0,00	0,00

Priloga 10: Traslokacijski faktorji Pb v posameznih rastlinskih delih

VZOREC	TF korenine Pb	TF steblo Pb	TF listi Pb	TF semena Pb
junij	1,32	0,52	6,95	
junij	0,76	1,45	4,29	
junij	0,57	0,70	13,87	
junij	0,81	0,67	9,08	
junij	1,05		8,78	
julij	4,81	0,15	6,48	
julij	5,05	0,14	6,20	
julij	4,18	0,25	5,41	
julij	4,99	0,14	8,04	
julij	5,59	0,00	9,01	
avgust	4,88	0,19	2,00	0,08
avgust	4,35	0,24	1,53	0,58
avgust	5,81	0,18	2,52	0,35
avgust	5,43	0,20	1,85	0,38
avgust	4,95	0,21	1,57	0,54
september	7,49	0,30	4,24	0,10
september	7,03	0,40	3,59	0,06
september	6,49	0,42	4,26	0,05
september	6,55	0,45	2,78	
september	6,54	0,45	0,00	

Priloga 11: Traslokacijski faktorji Zn v posameznih rastlinskih delih

VZOREC	TF korenine Zn	TF steblo Zn	TF listi Zn	TF semena Zn
junij	4,62	1,66	1,57	
junij	4,44	1,63	2,04	
junij	4,84	1,59	1,89	
junij	4,64	1,71	1,64	
junij	4,53	1,58	0,00	
julij	4,08	1,12	2,19	
julij	4,36	1,07	2,14	
julij	3,98	1,08	2,17	
julij	3,39	1,37	2,25	
julij	5,04	0,00	2,17	
avgust	3,80	1,54	0,83	0,30
avgust	3,40	1,47	0,98	0,34
avgust	3,49	1,27	1,20	0,50
avgust	3,61	1,20	1,32	0,24
avgust	3,81	1,09	1,16	1,95
september	3,30	1,00	2,15	0,20
september	3,46	1,28	1,67	0,20
september	3,46	1,17	1,79	0,24
september	3,71	1,14	1,56	0,30
september	3,06	1,35	0,00	0,26

Priloga 12: Bioakumulacijski faktorji Cd, Pb in Zn v poganjkih

VZOREC	BAF Cd	BAF Pb	BAF Zn
junij	5,426563	5,432013	19,63708
junij	4,673958	5,861386	21,95755
junij	9,870313	5,952228	22,29407
junij	7,728646	5,44505	20,92599
junij	7,186458	4,740099	
povprečje	6,977188	5,486155	21,20367
julij	6,698343	5,484676	14,62191
julij	4,477901	4,942207	14,68721
julij	3,801105	6,62697	13,63084
julij	4,767403	6,428809	15,10999
julij	3,154144	6,405429	
povprečje	5,029061	5,977618	14,51249
avgust	3,11768	2,742726	10,70563
avgust	8,907735	2,660567	9,891267
avgust	9,180663	3,729186	9,775739
avgust	8,99337	3,094236	10,04644
avgust	8,914365	2,700823	8,985163
povprečje	7,822762	3,046203	9,880847
september	10,14969	11,58556	10,38987
september	11,06871	12,87141	11,81897
september	8,314724	14,35015	11,29998
september	9,111043	11,17606	10,8145
september	8,141104	2,968348	
povprečje	9,608896	10,59031	11,08083

Priloga 13: Standardne vrednosti posameznih koncentracij težkih kovin

standard	vrednost Cd	vrednost Zn
0,25	0,036	0,061
0,5	0,069	0,124
1	0,129	0,185
2	0,269	0,242

standard	vrednost Pb
5	0,031
10	0,06
15	0,089
20	0,117