

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA BIOLOGIJO

Renata ROZMAN

**FITOREMEDIACIJA SEDIMENTOV IN DRUGIH
KONTAMINIRANIH ZEMLJIN**

DIPLOMSKO DELO
Univerzitetni študij

**PHYTOREMEDIATION OF SEDIMENTS AND OTHER
CONTAMINATED SUBSTRATS**

GRADUATION THESIS
University studies

Ljubljana, 2008

Rozman, R. Fitoremediacija sedimentov in drugih kontaminiranih zemljin.

Dipl.delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo, 2008

Diplomsko delo je zaključek Univerzitetnega študija biologije. Poljski poskusi so bili opravljeni na odlagališču Rakovnik v Šmartnem pri Litiji. Laboratorijski poskusi in kemične analize so bili opravljeni v Centru za pedologijo in varstvo okolja in Zavodu za zdravstveno varstvo Maribor.

Diplomsko delo je potekalo ob sodelovanju naslednjih ustanov:

- Katedra za ekologijo in varstvo okolja, Oddelek za biologijo, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta
- Limnos, Podjetje za aplikativno ekologijo
- Center za pedologijo in varstvo okolja, Oddelek za agronomijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani
- Inštitut za fizikalno biologijo

Študijska komisija Oddelka za biologijo je za mentorja imenovala prof. dr. Alenko Gaberščik, za somentorja pa doc. dr. Tjašo Griessler Bulc.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik: doc. dr. Barbara Vilhar
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo
Recenzent: prof. dr. Mihael J. Toman
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo
Mentor: prof. dr. Alenka Gaberščik
Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo
Somentor: doc. dr. Tjaša Griessler Bulc
Limnos, Podjetje za aplikativno ekologijo

Datum zagovora: 20.11.2008

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.

Renata Rozman

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA (KDI)

ŠD Dn**DK** UDK 504.054:675.088(043.2)=163.6**KG** Ekoremediacija, fitoremediacija, usnjarsko odlagališče, krom**AV** ROZMAN, Renata**SA** GABERŠČIK, Alenka / GRIESSLER BULC, Tjaša**KZ** Večna pot 111, SI-1000, Ljubljana, Slovenija**ZA** Biotehniška fakulteta**LI** 2008**IN** FITOREMEDIACIJA SEDIMENTOV IN DRUGIH KONTAMINIRANIH ZEMLJIN**TD** Diplomsko delo (Univerzitetni študij)**OP** X, 77 str., 20 pregl., 39 sl., 3 pril., 42 vir.**IJ** sl**JI** sl / en

AI Namen diplomske naloge je bil oceniti primernost različnih rastlinskih vrst za remediacijo usnjarskih odpadkov, onesnaženih s kromom, in raziskati možnosti ozelenitve odlagališča Rakovnik. Teste smo izvajali na odlagališču Rakovnik v Šmartnem pri Litiji in v rastlinjaku na Oddelku za agronomijo Biotehniške fakultete v letih 2006, 2007 in 2008. Pred začetkom poskusov smo določili nekatere lastnosti biološko obdelanih odpadkov (IUV kompost), v katerih so rasle rastline na odlagališču in v rastlinjaku. Na odlagališču smo vzpostavili testna polja in jih zasadili z lesnatimi rastlinami z visoko transpiracijo in zelnatimi vrstami s povečano akumulacijo kroma. Ocenjevali smo primernost 8 lesnatih in 18 zelnatih rastlinskih vrst. Za oceno uspešnosti rasti smo določili oceniti primernost različnih rastlinskih vrst za remediacijo usnjarskih odpadkov, onesnaženih s kromom, in raziskati možnosti ozelenitve odlagališča Rakovnik., ki smo jo mesečno merili z rastnimi parametri. Primernost rastlin smo ugotavljali tudi z merjenjem fluorescence klorofila *a* in privzema kroma v rastline. V rastlinjaku smo v IUV in kontrolni kompost posadili 9 zelnatih rastlin s povečanim privzemom kroma. Merili smo kalitev, fluorescenco klorofila *a* in privzem kroma v rastline. Rezultati so potrdili, da je ozelenitev odlagališča možna in da v ta namen lahko uporabimo predvsem topole in vrbe. Za remediacijo so primerne tudi blitva, sončnice, bučke, oves in endivija, ki pa naj se jih po končanem poskusu zaradi povečanega privzema kroma ne uporablja za prehrano.

Rozman, R. Fitoremediacija sedimentov in drugih kontaminiranih zemljin.

Dipl.delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo, 2008

KEY WORDS DOCUMENTATION (KWD)

DN Dn

DC UDC 504.054:675.088(043.2)=163.6

CX Ecoremediation, phytoremediation, tannery landfill site, chromium

AU ROZMAN, Renata

AA GABERŠČIK, Alenka / GRIESSLER BULC, Tjaša

PP Večna pot 111, SI-1000, Ljubljana, Slovenija

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Biology

PY 2008

TI PHYTOREMEDIATION OF SEDIMENTS AND OTHER CONTAMINATED SUBSTRATS

DT Graduation Thesis (University studies)

NO X, 77 str., 20 pregl., 39 sl., 3 pril., 42 vir.

LA sl

AL sl / en

AB The aim of graduation thesis was to estimate suitability of different plant species for remediation of tannery waste, which are highly polluted with chromium, and to research the possibility of landfill colonization with plants. Experiments were performed parallelly at the landfill site Rakovnik and in the greenhouse at the Department of agronomy, Biotechnical Faculty in years 2006, 2007 and 2008. Firstly quality of the substrate used in experiments was tested. At landfill site Rakovnik testing polygons were created and planted with woody and herbaceous species with high transpiration rate and ability to accumulate chromium. Suitability of 8 woody and 18 herbaceous species was estimated. The growth efficiency was determinated with high biomass production and measured monthly throughout the growing season with growth parameters. In the greenhouse 9 herbaceous species were sown in the contaminated and control substrate. The inhibition of germination and chronic toxicity to higher plants were tested. In both, landfill and greenhouse, fluorescence of chlorophyll *a* and chromium uptake were measured. Our results showed that colonization of landfill with poplars, willows, beet, sunflowers, zucchini, oats and endive might have remediation effect, but herbaceous species should not be used in nutrition.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA (KDI)	III
KEY WORDS DOCUMENTATION (KWD)	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	IX
SLOVARČEK	X
1. UVOD	1
2. PREGLED OBJAV	1
2.1 PROBLEM INDUSTRIJSKIH ODLAGALIŠČ V SVETU	1
2.2 PROBLEM INDUSTRIJSKIH ODLAGALIŠČ V SLOVENIJI	2
2.3 TEŽKE KOVINE	3
2.4 KROM	4
2.4.1 Naravne vrednosti	4
2.4.2 Kroženje v okolju	5
2.4.3 Uporabnost	5
2.4.4 Dejavniki, ki vplivajo na mobilnost in dostopnost	7
2.4.5 Biološka vloga	8
2.4.6 Absorpcija in privzem	8
2.4.7 Škodljivost	9
2.5 FITOREMEDIACIJA	9
2.5.1 Splošne značilnosti	9
2.5.2 Mehanizmi fitoremediacije	10
2.5.3 Prednosti in pomanjkljivosti fitoremediacije	12
2.5.4 Uporabne rastline in zmožnost akumulacije	12
3 MATERIAL IN METODE	14
3.1 POLJSKI POSKUS NA ODLAGALIŠČU RAKOVNIK	14
3.1.1 Opis odlagališča in izhodiščno stanje	14
3.1.2 Testni poligoni in zasaditev rastlin	17
3.1.3 Analiza komposta IUV uporabljenega kot pokrivni sloj na odlagališču Rakovnik in v lončnem poskusu v rastlinjaku	21
3.1.4 Uspešnost preživetja in rast rastlin	21
3.1.5 Fluorescenza klorofila α	21
3.1.6 Meritve vsebnosti kroma v tkivih rastlin	21
3.1.7 Statistične analize	22
3.2 POSKUS V NADZOROVANIH RAZMERAH V RASTLINJAKU	23
3.2.1 Posajene rastlinske vrste	23
3.2.2 Kakovost substrata in prirastek rastlin	23
3.2.3 Fluorescenza klorofila α	24
3.2.4 Meritve vsebnosti kroma v tkivih rastlin	24
3.2.5 Statistične analize	24
4 REZULTATI	25
4.1 POLJSKI POSKUS NA ODLAGALIŠČU RAKOVNIK	25
4.1.1 Analiza komposta IUV uporabljenega kot pokrivni sloj na odlagališču Rakovnik in v lončnem poskusu v rastlinjaku	25

4.1.2	Rastni parametri.....	26
4.1.3	Vsebnost kroma	40
4.2	POSKUS V NADZOROVANIH RAZMERAH V RASTLINJAKU.....	46
4.2.1	Kaljivost	46
4.2.2	Fluorescencija klorofila <i>a</i>	47
4.2.3	Vsebnost kroma	48
4.2.4	Statistične analize za vsebnosti kroma v koreninah in zelnatih delih rastlin.....	53
5	RAZPRAVA IN SKLEPI.....	55
5.1	POLJSKI POSKUS NA ODLAGALIŠČU RAKOVNIK	55
5.1.1	Rastni parametri.....	55
5.1.2	Fluorescencija klorofila <i>a</i>	56
5.1.3	Vsebnost kroma	56
5.2	POSKUS V NADZOROVANIH RAZMERAH V RASTLINJAKU.....	57
5.2.1	Kaljivost	57
5.2.2	Fluorescencija klorofila <i>a</i>	57
5.2.3	Vsebnost kroma	58
6	VSEBINA (SUMMARY)	59
6.1	VSEBINA.....	59
6.2	SUMMARY	60
7	VIRI.....	62
	ZAHVALA.....	65
	PRILOGE	1

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Nastale količine industrijskih odpadkov in ravnanje z njimi po statističnih regijah, Slovenija, letno (Vir: Statistični urad Republike Slovenije, 2008)	2
Preglednica 2: Mejne, opozorilne in kritične vrednosti TK v tleh (Uredba o mejnih, opozorilnih in kritičnih imisijskih vrednosti nevarnih snovi v tleh (Ur.l. RS, št. 68/1996))	3
Preglednica 3: Vsebnost kroma v različnih elementih okolja (Vir: Handa, 1988; Pacyna in Nriagu, 1988; Nieborer in Jusys, 1988; WHO, 1993; Zayed in Terry, 2002)	4
Preglednica 4: Industrijske panoge, kjer se krom uporablja in njegova vloga (Vir: Nriagu, 1988)	6
Preglednica 5: Prednosti in pomanjkljivosti fitoremediacije (Vir: Glass, 2000; Kališová-Špirochová s sod., 2001)	12
Preglednica 6: Količina in vrsta odloženih odpadkov do konca leta 2006 (Vir: Dokumentacija v postopku izdaje odločbe za zaprtje odlagališča, IUV, 2007a)	15
Preglednica 7: Količina in vrsta odloženih odpadkov do konca odlaganja do leta 2007 (Vir: IUV, 2007a)	15
Preglednica 8: Analiza komposta in izcedne vode (Vir: Kemski inštitut Ljubljana, 2006; IUV, 2007b)	15
Preglednica 9: Analiza komposta iz kompostarne Ligonja (IUV, 2008)	16
Preglednica 10: Analiza izlužka biološko obdelanega blata (IUV, 2008)	16
Preglednica 11: Metode dela na odlagališču Rakovnik v letih 2006, 2007 in 2008	17
Preglednica 12: Kemski analiza komposta IUV uporabljenega na testni lokaciji na deponiji Rakovnik in v rastlinjaku	25
Preglednica 13: Model linearne regresije hitrosti rasti v višino lesnatih rastlin v letu 2007 in 2008	29
Preglednica 14: Model linearne regresije hitrosti rasti v premeru debla lesnatih rastlin v letu 2007 in 2008	31
Preglednica 15: Model linearne regresije hitrosti rasti v premeru lista lesnatih rastlin v letu 2007 in 2008	34
Preglednica 16: Model linearne regresije hitrosti povečevanja števila pogankov lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008	36
Preglednica 17: Fluorescanca klorofila <i>a</i> lesnatih vrst rastlin v letih 2007 in 2008	39
Preglednica 18: Fluorescanca klorofila <i>a</i> zelnatih rastlin v letih 2006 in 2007	39
Preglednica 19: Kaljivost rastlin v letih 2006 in 2007	46
Preglednica 20: Fluorescanca klorofila <i>a</i> v letih 2006 in 2007	47

KAZALO SLIK

Slika 1: Lokacije industrijskih odlagališč in odlagališč nevarnih odpadkov (Vir: ARSO, 2000).....	2
Slika 2: Kroženje kroma v tleh in vodi (prirejeno po Bartlett in James, 1988, str. 299).....	5
Slika 3: Testni poligoni in zasadnja rastlin na odlagališču Rakovnik v letu 2006	18
Slika 4: Zasadnja rastlin v letih 2007 in 2008	19
Slika 5: Deponija Rakovnik v letu 2006.....	20
Slika 6: Poskusno polje na deponiji Rakovnik 06	20
Slika 7: Poskusno polje na deponiji Rakovnik 08	20
Slika 8: Lončni poskus v rastlinjaku v letu 2007	23
Slika 9: Stopnja preživetja lesnatih rastlin v letu 2006	26
Slika 10: Stopnja preživetja lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008	27
Slika 11: Višina lesnatih rastlin v letu 2006 ($\bar{x} \pm SN$, n = 3 - 12)	28
Slika 12: Višina lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008, ($\bar{x} \pm SN$, n = 8 - 32)	29
Slika 13: Premer debla lesnatih rastlin v letu 2006, ($\bar{x} \pm SN$, n = 3 -12).....	30
Slika 14: Premer debla lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008, ($\bar{x} \pm SN$, n = 7 - 32)	31
Slika 15: Premer lista lesnatih rastlin v letu 2006 ($\bar{x} \pm SN$, n = 2 - 12).....	32
Slika 16: Premer lista vrba v letih 2007 in 2008 ($\bar{x} \pm SN$, n = 17 - 32).....	33
Slika 17: Premer lista topolov v letih 2007 in 2008 ($\bar{x} \pm SN$, n = 9 - 32).....	33
Slika 18: Število poganjkov lesnatih vrst v letu 2006 ($\bar{x} \pm SN$, n = 3 - 12).....	35
Slika 19: Število poganjkov lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008 ($\bar{x} \pm SN$, n = 9 - 32)	36
Slika 20: Višina zelnatih rastlin v letu 2006.....	37
Slika 21: Višina zelnatih rastlin v letu 2007.....	38
Slika 22: Povprečni bioakumulacijski faktor korenin, listov in lesa lesnatih vrst.....	40
Slika 23: BAF v koreninah lesnatih vrst v letih 2007 in 2008	41
Slika 24: BAF v lesu lesnatih vrst v letih 2007 in 2008	41
Slika 25: BAF v listih lesnatih vrst v letu 2008.....	42
Slika 26: Povprečni BAF zelnatih vrst rastlin na odlagališču	43
Slika 27: BAF zelnatih vrst in podvrst rastlin na Rakovniku	44
Slika 28: Primerjava BAF zelnatih in lesnatih vrst iz odlagališča Rakovnik	44
Slika 29: Teoretični privzem kroma na hektar lesnatih vrst v letu 2008	45
Slika 30: Povprečni bioakumulacijski faktor v koreninah in zelnatih delih rastlin.....	48
Slika 31: BAF v koreninah in zelnatih delih rastlin v letu 2006	49
Slika 32: BAF v koreninah in zelnatih delih rastlin v letu 2007	49
Slika 33: Bioakumulacijski faktor kroma v korenine v letih 2006 in 2007.....	50
Slika 34: Bioakumulacijski faktor kroma v zelnate dele rastlin v letih 2006 in 2007.....	51
Slika 35: Teoretični privzem kroma (g/ha) zelnatih delov rastlin v letih 2006 in 2007.....	51
Slika 36: Primerjava BAF testiranih vrst na odlagališču Rakovnik (O) in rastlinjaku (R) .	52
Slika 37: Porazdelitev vrednosti za kroma v koreninah v letu 2007	53
Slika 38: Porazdelitev vrednosti za kroma v zelnatih delih blitve, endivije in špinače v letu 2007	54
Slika 39: Porazdelitev vrednosti za kroma v zelnatih delih kolerabe, ohrovta, ovsa, sončnic in zelja v letu 2007	54

Rozman, R. Fitoremediacija sedimentov in drugih kontaminiranih zemljin.

Dipl.delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo, 2008

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

Cr (III) – trivalentni krom

Cr (VI) – šestivalentni krom

IUV – Industrija usnja Vrhnika

TK – težke kovine

TP – testno polje

DOC – raztopljeni organski ogljik

TOC – celotni organski ogljik

s.s. – suha snov

org.s. – organska snov

EC - elektroprevodnost

SN – standardna napaka

BAF – bioakumulacijski faktor

SLOVARČEK

KOMPOST IUV – biološko obdelano blato iz čistilne naprave IUV zmešano z lesnimi sekanci v razmerju 1:1. Blatu dodajo lesne sekance in ga dva do trikrat tedensko premešajo. Pred odložitvijo na odlagališče Rakovnik ga presejejo.

KONTROLNI KOMPOST – V lončnem poskusu smo uporabiti kontrolni substrat firme Klasmann. Substrat je namenjen gojenju vrtnin, je organski, s pH vrednostjo 6.0 in dodatkom hranil. V lončnem poskusu rastlinskih hranil glede na analize komposta IUV in deklaracijske podatke o kontrolnem substratu Klasmann nismo dodajali.

LIGOJNA – kompostarna IUV, kjer blato iz čistilne naprave biološko obdelajo.

IZLUŽEK – izločene snovi iz komposta z destilirano vodo tako, da se pri tem kemijsko ne spremenijo.

NEVARNI ODPADKI – so odpadki, ki imajo eno ali več nevarnih lastnosti. Mednje štejemo npr. odpadna olja, okside, soli, kisline, luge, koncentrate, odpadke organskih topil, barve, lake, smole, agrokemijske in farmacevtske preparate, specialne odpadke iz bolnišnic ter druge nevarne odpadke organskega in anorganskega izvora (Statistični urad Republike Slovenije, 2008)

UŽITNA ZRELOST – agronomski izraz za zrelost, ko rastlina oziroma njen užitni del dozori tako, da je primeren za uživanje (največkrat imamo v mislih človeka, velja pa tudi za živali). To se lahko zgodi na rastlini ali pa ko je tehnološki del (list, plod, ...) že odstranjen od rastline v času tehnološke zrelosti.

1. UVOD

Od industrijske revolucije dalje predstavlja industrija enega izmed največjih onesnaževalcev okolja. Problem so predvsem odpadki iz različnih industrijskih dejavnosti in njihova odlagališča. Škodljive snovi se izpirajo iz nezaščitenih odlagališč ter prehajajo v okolje in prehransko verigo. Sanacije neprimernih odlagališč odpadkov so tehnološko in finančno zahtevne. Nova okolju prijaznejša alternativa je fitoremediacija. Je cenovno ugodna, enostavna in učinkovita tehnologija za manjšanje neposrednih in posrednih vplivov človeka na okolje (Glass, 2000).

V diplomskem delu smo ocenjevali primernost različnih rastlinskih vrst za remediacijo usnjarskih odpadkov, onesnaženih s kromom, in raziskovali možnosti ozelenitve odlagališča Rakovnik. Odlagališče Rakovnik je namenjeno predvsem odpadkom Industrije usnja Vrhnika (IUV), ki je bila še pred petdesetimi leti največja usnjarna v Evropi. Usnjarski odpadki vsebujejo visoke vsebnosti kroma. Trivalentni krom (Cr(III)) je neobhodno potreben za ljudi in živali. Šestivalentni krom (Cr(VI)) pa je močno škodljiv karcinogen. Krom je potreben za normalno rast rastlin, a v mnogo manjših količinah kot esencialni elementi ($0,02 - 0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s.). V prevelikih koncentracijah povzroča poškodbe rastlinskih organov, zavira rast in povzroča smrt (Zayed in Terry, 2002).

Fitoremediacijsko kapaciteto in možnost ozelenitve odlagališča oz. odpadkov smo ugotavljali na odlagališču Rakovnik in v rastlinjaku na Oddelku za agronomijo Biotehniške fakultete na osnovi uspešnosti preživetja rastlin, proizvedene biomase, fluorescence klorofila *a*, kakovosti substrata in privzema kroma v rastlinska tkiva.

Naše delovne hipoteze so bile:

- Različne rastline imajo različen fitoremediacijski potencial za krom.
- Lesnate in zelnate rastline so primerne za remediacijo kontaminiranih zemljišč in substratov.

2. PREGLED OBJAV

2.1 PROBLEM INDUSTRIJSKIH ODLAGALIŠČ V SVETU

Značilnosti industrijskih odpadkov so njihova količina, velika vsebnost strupenih snovi in vedno večja produkcija, ki zahteva nove površine za odlaganje. Neobdelane odpadke so v preteklih desetletjih po vsem svetu odlagali na neustrezne lokacije (opuščene rudnike, jame, gramoznice, gomile) brez tesnjenga podlage in brez vseh ostalih tehničnih ukrepov za varovanje okolja. Odlagališča so odpirali na priročnih, lahko dostopnih območjih brez upoštevanja geološke podlage ali možnih vplivov na okolje. Odlagališča so pogosto v neposredni bližini zajetij pitne vode, zaščitenih vodnih virov in otroških igrišč (Schreck, 1996). Vodna in vetrna erozija odnašata TK (težke kovine) in druge strupene snovi iz odlagališč v atmosfero, tla in površinske vode, kjer ustvarjajo nenadzorovano ekološko tveganje za organizme (Tulupov, 2003).

2.2 PROBLEM INDUSTRJSKIH ODLAGALIŠČ V SLOVENIJI

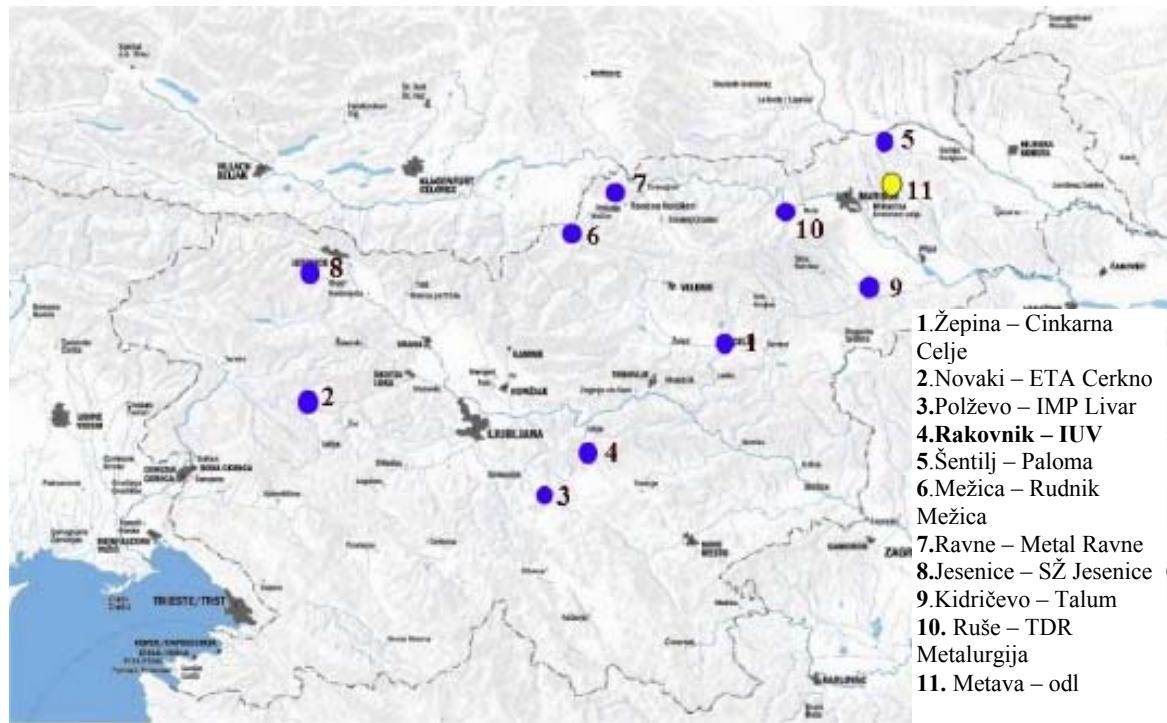
V Sloveniji je evidentiranih 83 velikih industrijskih obratov, ki letno proizvedejo več ton odpadkov (Preglednica 1; Statistični urad Republike Slovenije, 2008).

Preglednica 1: Nastale količine industrijskih odpadkov in ravnanje z njimi po statističnih regijah, Slovenija, letno (Vir: Statistični urad Republike Slovenije, 2008)

		2001	2002	2003	2004	2005	2006
		SLOVENIJA	SLOVENIJA	SLOVENIJA	SLOVENIJA	SLOVENIJA	SLOVENIJA
Letna količina - SKUPAJ (t)	Nevarni, nenevarni odpadek - SKUPAJ	3.135.088	4.089.604	4.686.134	5.981.378	5.669.138	6.031.088

V Sloveniji imamo 10 aktivnih industrijskih odlagališč odpadkov (Slika 1; ARSO, 2000) in številna opuščena odlagališča, nastala zaradi neustreznega odlaganja industrijskih odpadkov.

Predmet naše raziskave je bilo odlagališče usnjarskih odpadkov Rakovnik v Šmartnem pri Litiji.



Slika 1: Lokacije industrijskih odlagališč in odlagališč nevarnih odpadkov (Vir: ARSO, 2000)

2.3 TEŽKE KOVINE

Težke kovine (TK) so heterogena skupina elementov, ki imajo specifično težo večjo od 4 g cm⁻³ in relativno visoko gostoto nad 5 g cm⁻³. So zelo obstojna, nevarna in razširjena onesnaževala (Kasassi s sod, 2007).

Ločimo esencialne in neesencialne TK. Živi organizmi v majhnih količinah za življenje nujno potrebujejo Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Sr, V in Zn. Te esencialne TK so pomembne komponente metaloproteinov in različnih kofaktorjev v bioloških reakcijah. Neesencialne TK kot so Cd, Cr, Hg, Pb in Ag nimajo biološke funkcije in lahko predstavljajo velik okoljski problem. Koncentracije kovin v tleh so od 1 mg kg⁻¹ do 100 000 mg kg⁻¹, odvisno od matične podlage in antropogenih virov. V tleh so prisotne v različnih oblikah, na katere vplivajo značilnosti tal, pH, kationska izmenjalna kapaciteta, delež organske snovi, fosfat in sulfat v tleh ter biotski dejavniki. Mejne, opozorilne in kritične vrednosti za posamezne TK so različne, odvisne od vpliva na zdravje ljudi in ekološkega tveganja in sekundarnih poti izpostavljanja (Preglednica 2). Rastline lahko privzemajo TK, če se te nahajajo kot topne komponente v talni raztopini ali če jih s svojimi koreninskimi izločki ali drugimi snovmi v tleh pretvorijo v topne. Dostopnost kovin v tleh se povečuje, ko pH pada pod 5,5. TK v rastline vstopajo predvsem skozi korenine preko kationske absorpcije. V plazmatski membrani koreninskih celic je velik elektrokemični potencialni gradient, ki vodi TK v celice. Količina kovin v citoplazmi koreninskih celic mora biti majhna, zaradi kemičnih značilnosti citoplazme. Negativni membranski potencial in nizka intracelularna vsebnost kovin lahko povzročita velik vtok TK v celice. V koreninski plazmatski membrani so kanalčki, preko katerih Pb, Cd in drugi divalentni kationi vstopajo v celice. Rastline kopičijo TK večinoma v koreninah, manj v steblih in listih, najmanj pa v plodovih in semenih. Ljudje in živali lahko sprejemajo TK preko rastlin (prehranjevalna veriga), neposredno z vdihovanjem s TK bogatih prašnih delcev in zaužitjem onesnaženih talnih delcev. TK se s časom v telesu nalagajo, saj njihov vnos v telo poteka hitreje kot razgradnja in izločanje iz telesa (Blaylock in Huang, 2000).

Preglednica 2: Mejne, opozorilne in kritične vrednosti TK v tleh (Uredba o mejnih, opozorilnih in kritičnih imisijskih vrednostih nevarnih snovi v tleh (Ur.l. RS, št. 68/1996))

Kovina	Mejna vrednost (mg kg ⁻¹)	Opozorilna vrednost (mg kg ⁻¹)	Kritična vrednost (mg kg ⁻¹)
As	20	30	55
Cd	1	2	12
Co	20	50	240
Cr	100	150	380
Cu	60	100	300
Hg	0,8	2	10
Mo	10	40	200
Ni	50	70	210
Pb	85	100	530
Zn	200	300	720

2.4 KROM

2.4.1 Naravne vrednosti

Naravne vrednosti kroma v tleh so odvisne od tipa kamnin in naravnih (vulkani in prenos z vetrom) emisij (Pacyna in Nriagu, 1988). Navadno je prisoten v trivalentni obliki. Mobilnost je odvisna od vsebnosti in tipa organskih snovi, pH ter tekture tal. Cr(III) je v tleh zelo stabilen. Ob dodatku v tla se hitro imobilizira, le majhne količine se oksidirajo. Nasprotno je Cr(VI) v tleh nestabilen in dobro mobilen tako v bazičnih kot kislih tleh (Cary, 1982).

Naravne vsebnosti kroma v vodah so zelo nizke. V rekah je prisoten v topni in netopni obliku. Večina topne oblike je Cr(VI), ki pa predstavlja le majhen delež celotnega Cr. Cr(III) je raztopljen v mineralih, organskih in absorbiranih oksidih. Dejanska koncentracija kroma je odvisna od kraja izvira vodotoka in prisotnih snovi v vodi (Cary, 1982).

Krom v zraku izvira iz vulkanizma, zračnih aerosolov, zemlje in organskih delcev. Naravne koncentracije so minimalne in so v obliki Cr(III). Zrak je nebitven vir razpoložljivega kroma za rastline. Večji del onesnaženja zraka s kromom predstavlja Cr(VI), ki se delno reducira z organsko snovjo v zraku in odlaga v rastline, tla in vodo. Blizu izvora onesnaženja lahko krom, prisoten v zraku, poškoduje rastline (Cary, 1982).

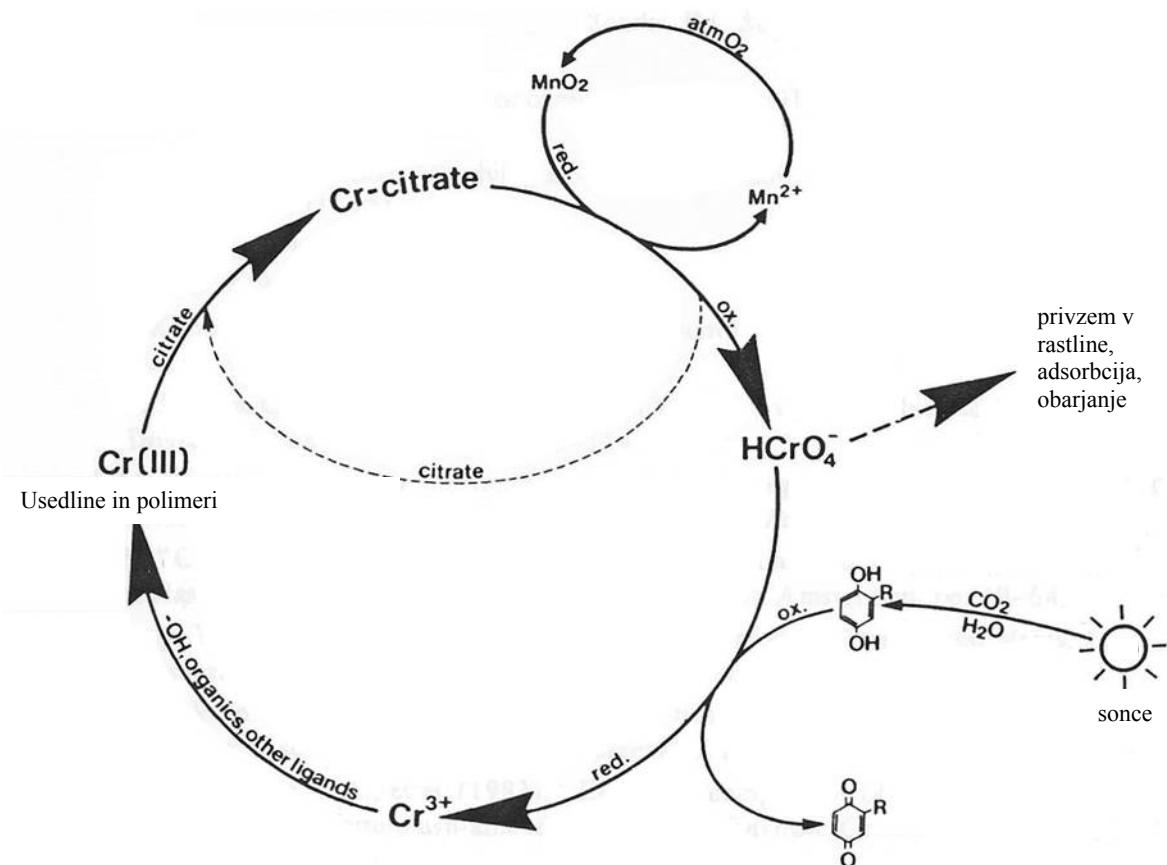
Koncentracija kroma v rastlinah in hrani je navadno nizka. Problematično je že majhno povečanje, ker je prehranska potreba nizka. Manj kot 1% kroma je biološko dostopnega, zato je majhna verjetnost, da bi bil krom toksikant v rastlinski hrani. Ni dokazov, da se strupeni Cr(VI) prenaša po rastlini (Cary, 1982).

Preglednica 3: Vsebnost kroma v različnih elementih okolja (Vir: Handa, 1988; Pacyna in Nriagu, 1988; Nieborer in Jusys, 1988; WHO, 1993; Zayed in Terry, 2002)

Nahajališče	Povprečna koncentracija
Zemeljska skorja	125 mg kg ⁻¹
Vulkanske kamnine	198 mg kg ⁻¹
Peščenjak	120 mg kg ⁻¹
Skrilavec	423 mg kg ⁻¹
Karbonatne kamnine	7,1 mg kg ⁻¹
Atmosfera	0,1·10 ⁻⁶ – 1,3 ·10 ⁻⁶ mg m ⁻³
Celinske vode	0,001 mg L ⁻¹ Cr(VI), 0,008 mg L ⁻¹ Cr(III)
Morska voda	0,001 mg L ⁻¹ Cr(VI), 0,05 mg L ⁻¹ Cr(III)
Pitna voda	0,05 mg L ⁻¹
Dnevna potreba	0,05 – 0,2 mg dan ⁻¹
Rastline	0,02 – 0,2 mg kg ⁻¹ s.s.

2.4.2 Kroženje v okolju

Razporeditev kroma v okolju je odvisna od treh reakcij: oksidacija-redukcija, sedimentacija- raztpljanje in absorpcija- desorpcija (Zayed in Terry, 2002). HCrO_4^- anion se lahko absorbira, obori, izpere v vodotoke in podtalnico ali ga privzamejo organizmi. V krog se vrne v reducirani obliki. Sledi dekromifikacija ali Cr(VI) redukcija z ogljikom in sončno energijo v procesu fotosinteze. Fe^{2+} in S^{2-} sta donorja elektronov. Dekromifikacija je najpomembnejši proces kromovega kroženja. Brez nje bi teoretično ves atmosferski O_2 končal v kromatu. Cr(III) se lahko nato veže z številnimi ligandi in postane netopen, nemobiljen in nereaktiv. Mobilni ligandi, kot je citrat, izločijo Cr(III) in ga izpostavijo oksidiranim manganovim površinam, kjer se krom in ligand oksidirata. Kromov krog se odvija v vseh tleh, ki vsebujejo krom v bioloških conah (Bartlett in James, 1988).



Slika 2: Kroženje kroma v tleh in vodi (prirejeno po Bartlett in James, 1988, str. 299)

2.4.3 Uporabnost

Ocena svetovnih zalog kromita je več kot 1,5 milijard ton, kar pomeni 600 milijonov ton kroma. Leta 1904 je bila celotna produkcija 1 milijon ton. Med prvo, drugo svetovno in vietnamesko vojno se je produkcija kroma močno povečala, leta 1984 je znašala več kot 9 milijonov. Krom lahko delno nadomestijo druge kovine, a zadovoljivega nadomestka še niso našli.

Rozman, R. Fitoremediacija sedimentov in drugih kontaminiranih zemljin.

Dipl.delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo, 2008

Različne industrijske panoge izkoriščajo različne oblike kroma: kromit, ferokrom, refrakcijske kromove opeke, livarski kromov pesek, kromovo kislino, itd. Deset milijonov ton letno pridobljenega kroma porabijo predvsem kovinarska (76%), refrakcijska (13%) in kemična (11%) industrija. Več kot 70 kromovih sestavin je komercialno uporabnih, v večjih količinah pa proizvajajo le natrijev kromat, kalijev kromat, kalijev dikromat, amonijev dikromat, kromovo kislino in kromov sulfat (Nriagu, 1988)

Preglednica 4: Industrijske panoge, kjer se krom uporablja in njegova vloga (Vir: Nriagu, 1988)

Uporaba	Uporabljene komponente	Vloga
Metalurgija	(Cr ₂ O ₃), magnezijev kromit MgCr ₂ O ₄	Preprečuje korozijo in oksidacijo, izboljša mehanske lastnosti jekla in železa, močno poveča temperaturno odpornost, trdnost in čvrstost jekla.
Galvaniziranje in lakiranje kovin	natrijev kromat, kalijev kromat, kalijev dikromat, amonijev dikromat, kromova kislina, kromov sulfat	Preprečuje korozijo, izboljša obstojnost aluminija, železa, jekla, brona, kositra, barv in drugih apretur; plastiki, tekstilijam, steklenim vlaknom izboljšajo vodooodpornost in odpornost proti oljem.
Usnjarska industrija	(Hidratiran) kromov klorid CrCl ₃ ·6H ₂ O, kromov sulfat Cr(OH)SO ₄	Strojenje in obdelava usnja; Tvorji stabilne komplekse s proteini, barvami in sintetičnimi polimeri, povečuje odpornost usnja proti bakterijskim razpadom in okoljskimi vplivom. Omogoča barvanje s široko paletjo barv, daje dobre čistilne lastnosti usnja. S kromom obdelano usnje je mehko in trpežno.
Industrija pigmentov, barvil in sorodnih produktov	Svinčev kromat, cinkovo natrijev kromat Na ₂ O·4ZnO·4CrO ₃ ·3H ₂ O, kromov fosfat CrPO ₄	Preprečuje korozijo, izboljša delovanje pigmentov, daje atraktiven barvni odtenek, varovalno sredstvo in pesticid; reagira z lepili, želatino, kazeinom in ligninom in zagotavlja oljno nepropustnost tapetam in papirju za printanje; z želatino tvori tudi hidrofilen gel za obdelavo papirja, tekstilij, zemlje, cestnih površin; dodan je barvam za printanje;
Fotografska industrija	Kalijev dikromat	Utrjuje fotografske filme, potreben je pri razvijanju le-teh in njihovih premazih.
Tekstilna industrija	Kromov acetat Cr(OCOCH ₃) ₃ ·xH ₂ O, Kromov nitrat Cr(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	Oksidant, ki izboljša pralne lastnosti bombaža; uporaben za beljenje volne in sintetičnih vlaken.
Petrokemična industrija	Kromov acetilaceonat Cr(CH ₃ COCHOCH ₃), Kromov fluorid CrF ₃ , Bakrov kromit CuCrO ₄ , cinkov kromit ZnCr ₂ O ₄	Katalizator mnogih kemičnih reakcij, uporaba v sintezi saharina, benzoinske kisline, kafre, sintetičnih vlaken, ...

2.4.4 Dejavniki, ki vplivajo na mobilnost in dostopnost

Krom se nahaja v različnih oksidacijskih oblikah: od Cr(-II) do Cr(+VI). Najbolj stabilni oblici sta trivalentna Cr(III) in šestivalentna Cr(VI). Njegova mobilnost je odvisna od reakcije in tekture tal, deleža organske snovi v tleh, manganovih železovih in aluminijevih oksidov ter redoks potenciala (Bartlett in Kimble, 1976).

2.4.4.1 pH

Reakcija tal (pH) vpliva na topnost različnih kromovih oblik, adsorpcijo v tla in dostopnost kroma za rastline. V bazičnem okolju se Cr(III) oksidira v Cr(VI), v kislem poteka redukcija Cr(VI) v Cr(III). Cr(VI) se adsorbira na mineralne delce kot so glineni koloidi, železovi in aluminijevi oksidi. Cr(III) se adsorbira 30 – 300 krat močneje na glinene delce kot Cr(VI). Z višanjem pH se adsorpcija Cr(III) povečuje, medtem ko se adsorpcija Cr(VI) zmanjšuje (Zayed in Terry, 2002). Krom je za rastline bolj dostopen v nevtralnih do bazičnih kot v kislih tleh (Cary s sod, 1977a).

2.4.4.2 Oksidacijsko stanje

Oksidacijsko stanje vpliva na mobilnost kroma in njegovo vlogo v rastlinski in človeški prehrani. Šestivalentna oblika kroma je bolj strupena in mobilna kot trivalentna. Odlaganje Cr(III) na odlagališčih naj ne bi predstavljalo nevarnosti za okolje. Problematična je le oksidacija Cr (III) v Cr(VI) ob prisotnosti Mg (IV) oksidov, ki pa je malo verjetna, saj usnjarski odpadki vsebujejo veliko organskih snovi in anoksične razmere (Bartlett in James, 1988).

2.4.4.3 Organske snovi in elektronski donorji, akceptorji

Redukcija Cr(VI) v Cr(III) lahko poteče spontano pri določenih talnih razmerah. Prisotni morajo biti donorji elektronov kot sta organska snov ali Fe(II). Oksidacija Cr(III) v Cr(VI) je počasen proces in zanjo so potrebni Mn, vlaga, aerobne razmere in pH nad 5 (Bartlett in Kimble, 1976b). Nizko molekularne organske kisline so lahko donorji ali akceptorji elektronov. Povečujejo topnost in mobilnost Cr(III) ter pospešujejo njegovo oksidacijo (Bartlett in James, 1988).

2.4.4.4 Redoks potencial

Pri nizkem redoks potencialu, še posebno v kombinaciji z nizkim pH, se krom nahaja v trivalentni oblici. Cr(VI) dominira v oksidacijskih razmerah (visok redoks potencial). Oksidacija Cr(III) v Cr(VI) naj bi bila v anoksičnih razmerah na odlagališčih zelo počasna, zaradi pomanjkanja akceptorjev elektronov v reducirajočih razmerah (Artiole in Fuller, 1979). V neporaslih tleh je vsebnost Cr(IV) večja kot v z rastlinami zaraslih tleh, saj korenine s svojimi izločki vplivajo na redukcijo Cr(VI) v Cr(III), oblikovanje Cr(III) organskih kompleksov in njihov lažji privzem v korenine (Bartlett in James, 1988).

2.4.5 Biološka vloga

Krom je esencialen element človeške in živalske prehrane. Pomemben je v presnovi glukoze in maščob. Sestavlja glukozni tolerančni faktor (GTF), ki je kofaktor v vezavi inzulina na receptorsko mesto na membrani. Povečuje učinkovitost inzulina (Zayed in Terry, 2002). Pomanjkanje kroma povzroča diabetes, kardiovaskularne bolezni, izgubo telesne mase, motnje v rasti, skalitev očesnih leč, poveča se možnost koronarnih obolenj (Nieborer in Jusys, 1988).

Krom je potreben za normalno rast rastlin, a v mnogo manjših količinah kot esencialni elementi. Cr(III) povečuje rast z vplivom na nivo rastnih hormonov, na interakcije z nukleinskimi kislinami, kompetitivno inhibira vezavo spermina na DNK (Zayed in Terry, 2002).

2.4.6 Absorpcija in privzem

Obstajajo trije osnovni načini privzema kroma: preko dihalnih poti, želodčno-črevesne poti in skozi kožo. Absorpcija kroma je navadno majhna in povezana s prehrano ter kemijsko obliko kroma. Prisotnost drugih težkih kovin, npr. Zn, in pomanjkanje hrane (post) povečajo privzemanje kroma. V prehrani je najpogosteje v trivalentni obliki. Cr(III) se v živalih in ljudeh nahaja v krvi, jetrih, vranici, ledvicah, v mehkih tkivih in kosteh (Nieborer in Jusys, 1988).

Krom pasivno prehaja skozi epidermis in dermis ter vstopa v sistemsko cirkulacijo. Penetracija se poveča s povečano difuzivnostjo in s stanjšano plastjo stratum corneum-a. Folikli dlak so prav tako mesto vstopa. Kromatni ion prosto prehaja skozi epidermis, nadaljnje gibanje Cr(III) pa je onemogočeno, ker se močno veže na dermalna tkiva. Prehajanje Cr(III) je odvisno tudi od vrste raztopljene soli in naboja hidratiranega iona. Cr(III) je topen pri bioloških pH in ob prisotnosti nizko molekularnih organskih snovi, zato njegove trdne oblike ne prehajajo preko membran. Cr(VI) kot dobro topen anion hitro penetrira sesalče celice in je strupen oksidant. Njegovo prehajanje se poveča z zvišanjem pH (Bartlett in James, 1988).

Privzem kroma v rastline je majhen, ker ga je malo biološko dostopnega in je slabo mobilen. Navadno se kopiči v koreninah, prenos v liste je neznaten. Ovira za prenos je celična stena. Krom v koreninah se v raztopljeni obliki nahaja v vakuolah koreninskih celic. Rastline nimajo razvitih posebnih mehanizmov za privzem kroma. Cr(III) prehaja v celice pasivno, Cr(VI) pa aktivno prek sulfatnega prenašalca. Privzem Cr(VI) zavirajo metabolni inhibitorji. Privzem kromata zavirajo SO_4^{2-} in drugi anioni iz skupine VI, pospešuje pa ga Ca^{2+} . Topnost in privzem Cr(III) povečujejo izločki korenin (Zayed in Terry, 2002).

Vsebnost kroma v rastlinah je $0,02 - 0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s. Koncentracije kroma v rastlinah, ki so rasle na kontaminiranih tleh pa znašajo 170 mg kg^{-1} s.s. (korenine) in $1,7 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s. (poganjki) v primeru Cr(VI) ter 110 mg kg^{-1} s.s. (korenine) in $1,1 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s. (poganjki) v primeru Cr(III). Obe oblici kroma naj bi bili rastlinam enako dostopni. Večje sposobnosti akumulacije kroma imajo rastline iz družine *Brassicaceae*: cvetača, ohrovtt in zelje (Zayed

in Terry, 2002). Cary s sodelavci je odkril, da so listnate rastline, ki akumulirajo Fe (špinača, blitva), bolj učinkovite pri prenašanju kroma v poganjke. Nizka translokacija kroma iz korenin v poganjke predstavlja oviro pri uporabi rastlin za fitoremediacijo. Vrbe dokazano kopijo krom v koreninah, translokacija v druga tkiva je nizka. Lesnate rastline so tako najbolj uporabna za stabilizacijo kroma v tleh. (Shanker s sod., 2005).

2.4.7 Škodljivost

V industriji usnja se uporablajo zgolj manj škodljive Cr(III) komponente, kljub temu pa lahko produkti vsebujejo sledi strupnega Cr(VI). Viri Cr(VI) so lahko kontaminirane usnjarske soli, barve, alkalna lepila. Cr(VI) se lahko tvori ob shranjevanju z oljem prepojenega usnja pri vlažnosti pod 35 % ali pri odlaganju ob prisotnosti Mn oksidov. Cr(VI) slej ko prej zaide v podtalnico, saj je izredno topen. Cr(III) je manj problematičen zaradi omejenih možnosti migriranja (Cary, 1982).

Toksičnost kroma je odvisna od njegove speciacije. Cr(VI) je 10 – 100 krat bolj škodljiv kot Cr(III), ker laže prehaja sesalčje celice. Izpostavljenost Cr(VI) povzroča pljučnega raka, akutne nekroze renalnih tubulov in dermatitis. Ob zaužitju večje količine povzroči celo smrt. Letalna doza pri podganah je $1900 - 3300 \text{ mg kg}^{-1}$ za Cr(III) in $50 - 100 \text{ mg kg}^{-1}$ za Cr(VI) (Zayed in Terry, 2002).

Tudi za rastline je Cr(VI) bolj toksičen kot Cr(III). Kot močan oksidant povzroča poškodbe korenin, motnje v privzemanju mineralnih snovi in v celicah tvori proste radikale, zaradi česar lahko vstopa pasivno. Simptomi toksičnosti se izrazijo prej in pri nižjih koncentracijah kot pri Cr(III). Znaki škodljivosti kroma so še: zavrta rast, slabo razvit koreninski sistem, zaviti, razbarvani in slabo razviti listi, nižja vsebnost vode v listih, zmanjšano delovanje listne hitinaze, kloroze na plodovih in smrt (Zayed in Terry, 2002).

Visoke vsebnosti organskih snovi (5%) in/ali nizek pH tal zmanjšata vpliv kroma na kalitev, saj je v takih razmerah biološko nedostenen. Elementarni in anorganski Cr(III) nista toksični okoljski onesnažili in sta relativno nedosteni rastlinam. Cr(III) je škodljiv za rastline v koncentraciji nad 5 ppm, ki pa ni možna, razen v peščenih tleh in blizu izvora onesnaženja. Cr(VI) je topen v vodi in močan oksidant, zato je vpliv na okolje večji. V bazičnih tleh ali tistih z nizko vsebnostjo organskih spojin lahko ostane v Cr(VI) obliki dolgo časa (Cary, 1982).

2.5 FITOREMEDIACIJA

2.5.1 Splošne značilnosti

Fitoremediacija je metoda za fiksacijo ali odstranjevanje onesnaževal iz kontaminiranih sedimentov in zemljin s pomočjo rastlin in z njimi povezanih mikroorganizmov. Glede na dosedanje raziskave na področju remediacijskih metod, ki so relativno nove in potekajo v zadnjih desetih letih, predstavlja fitoremediacija aktualno in inovativno metodo za čiščenje onesnaženih sedimentov z uporabo različnih organizmov. Možnost uporabe fitoremediacije je postala prepoznavna tudi z raziskavami naravnih močvirskih ekosistemov. Danes se fitoremediacijo raziskuje in uporablja za namene dekontaminacije sedimentov in različnih

tal ter za čiščenje odpadnih voda. V svetu se metodo uporablja predvsem za večja plitvo onesnažena območja, z nižjo koncentracijo onesnaževal, za sanacijo območij, ki so namenjena sekundarni rabi ali ki ogrožajo zdravje ljudi. Privzem težkih kovin lahko namreč dosega 5 % teže rastlin (1000-10 000 ppm). Očitno je, da lahko fotoremediacijski sistemi, ob poglobljenem razumevanju procesov z namenom nadziranja ter intenziviranja, izjemno pripomorejo k zaščiti ali izboljšanju kakovosti tal. Zaradi svoje dolgoročnosti, trajnosti, učinkovitosti, stroškovne zmernosti in krajinske privlačnosti postaja ta metoda vse bolj aktualna tako v svetu (Dushenkov s sod., 1997) kot tudi v Sloveniji (ARRS raziskovalno razvojni projekt »Fitoremediacija kontaminiranih sedimentov, 2005-2008).

2.5.2 Mehanizmi fitoremediacije

Fitoremediacija vključuje različne mehanizme: fitotransformacijo, fitostabilizacijo, fitoekstrakcijo, rizofiltracijo, fitovolatilizacijo, fitostimulacijo ter rizosferno bioremediacijo.

2.5.2.1 Fitoekstrakcija

Fitoekstrakcija je uporaba rastlin za prenos in zadrževanje TK v nadzemnih delih rastlin, ki jih lahko odstranimo s splošno uporabnimi kmetijskimi tehnikami. Prednostno se uporablajo akumulacijske rastline z veliko produkcijo biomase, s poznano in enostavno tehniko gojenja in z znanimi genetskimi značilnostmi (Ensley, 2000). Če so izbrane vrste rastlin dobri akumulatorji in imajo tudi velik prirastek, se lahko iz zemlje odstrani velika količina TK. Rastlinski material se odstrani z uveljavljenimi kmetijskimi tehnikami. Biomaso se lahko reciklira in se pridobi ekonomsko pomembne TK. Odpadnega materiala je mnogo manj kot pri drugih oblikah remediacije, npr. izkopavanju (Blaylock in Huang, 2000)

2.5.2.2 Rizofiltracija

Rizofiltracija je privzemanje, koncentriranje inobarjanje TK iz odpadnih voda s pomočjo korenin. Privzemanje različnih kovinskih ionov je splošna značilnost rastlin, ki pa varira med vrstami. Sončnice so uporabne za rizofiltracijo Pb, U, Sr, Cs, Co in Zn. Rizofiltracijo se lahko uporablja za odstranjevanje tarčnih TK (Ensley, 2000). Mehanizmi odstranjevanja strupenih TK s koreninami vključujejo izvencelično obarjanje, obarjanje in absorbcijo v celično steno ter celični privzem, ki mu sledi nalaganje v celičnih organelih, predvsem vakuoli. Celični privzem poteka kot privzem esencialnih ionov. Prenos preko membran je lahko aktiven ali pasiven preko vodnih por, ionskih črpalk, ionsko selektivnih kanalov ali anion-protonskega kontraporta. Biofilter iz biološko aktivnih, veliko površinskih rastlinskih korenin, je lahko neverjetno učinkovit sistem privzemanja onesnaževal iz vode. Izbrane rastline naj bi imele maksimalen privzem TK, minimalen ostanek po odmrtvu, čim večji koreninski sistem in bile naj bi enostavne za vzdrževanje (Dushenkov s sod., 1997).

2.5.2.3 Fitostabilizacija

Fitostabilizacija je uporaba rastlin za zadrževanje onesnaževal v tleh in zmanjševanje tveganja za zdravje ljudi in okolja. Je stabilizacijska metoda, ki je okolju prijaznejša alternativa dragemu procesu izkopavanja, cementiranja, deponiranja in izpiranja onesnaženih tal. TK niso razgradljive in iz tal jih praktično ne moremo popolnoma odstraniti, zato je imobilizacija na mestu onesnaženja pogosto najboljša rešitev. Onesnažena območja se velkokrat ne zarastejo sama od sebe, zato so izpostavljenja eroziji, ki odnaša polutante in ogroža ekosistem. Rastlinski pokrov spreminja kemijske in fizikalne parametre tal s čimer poveča biodostopnost onesnaževal, preprečuje erozijo, zmanjša pronicanje vode, izluževanje onesnaževal, zagotavljajo površine za privzem in obarjanje TK ter preprečuje direkten kontakt s tlemi. Tlem se lahko dodajajo dodatki kot so apno, fosfatna gnojila, organske snovi, Fe ali Mn oksidi, ki dolgotrajno inaktivirajo TK v tleh, preprečujejo izluževanje, privzem v rastline in zmanjšajo biološko dostopnost (Berti in Cunningham, 2000). V nasprotju s fitoekstrakcijo naj bi bile izbrane rastline slab prenašalci TK iz korenin v poganjke in se jih lahko uporablja v človeški in živalski prehrani. Rastline naj bi bile odporne na visoke koncentracije TK, talni pH, slanost, strukturo tal in vsebnost vode. Imeti morajo hitro rast, gost koreninski sistem in visoko stopnjo transpiracije za učinkovito odstranjevanje talne vode. Izbrane rastline naj bi bile enostavne za gojitev in oskrbo ter dolgožive (Berti in Cunningham, 2000).

2.5.2.4 Fitovolatilizacija

Fitovolatilizacija je uporaba rastlin za privzemanje in izločanje onesnaževal v hlapni obliki. Rastline lahko nekatera onesnaževala pretvorijo v manj škodljive pline in jih v prosecu transpiracije sproščajo v atmosfero (Schnoor, 1997).

2.5.2.5 Fitodegradacija

Fitodegradacija je uporaba rastlin v povezavi z mikroorganizmi za odstranjevanje organskih onesnaževal. Rastlinski encimi ali kofaktorji v procesu rastlinskega metabolizma razgradijo organska onesnaževala v manj škodljive ali neškodljive snovi (Kališová-Špirochová s sod., 2001).

2.5.3 Prednosti in pomanjkljivosti fitoremediacije

Preglednica 5: Prednosti in pomanjkljivosti fitoremediacije (Vir: Glass, 2000; Kališová-Špirochová s sod., 2001)

Prednosti	Pomanjkljivosti
Poceni kmetijsko osnovana tehnika z nizkimi postavitveni in operativni stroški.	Sezonsko odvisen proces, ki se izven rastne sezone upočasni.
Opremsko in tehnično nezahtevna.	Časovno zahteven proces zaradi počasne rasti mnogih hiperakumulatorjev.
Ob uporabi in situ (na lokaciji) ni potrebno izkopavanje. Motnje ekosistema so minimalne.	Fitoremediacija podtalnice in odpadnih voda zahteva veliko površino.
Zgornje plasti tal ostanejo nepoškodovane in primerne za kmetijsko rabo.	Omejena navadno na zgornje sloje prsti - do globine korenin.
Uporabna za različna onesnaževala in področja onesnaženja. Deluje tako na industrijskih in rudarskih območjih kot na vrtovih z manjšo vsebnostjo TK.	Neuporabna za mešane odpadke.
Tla po končanem postopku lahko ostanejo na mestu, ni jih potrebno deponirati ali izolirati.	Prevelike koncentracije onesnaževal so lahko za fitormediatorje strupene, posledično se zmanjša učinkovitost.
Manj sekundarnih odpakov kot pri drugih oblikah remediacije.	Onesnaževala lahko vstopijo v prehransko verigo preko herbivornih žuželk in ptic.
Možno je pridobivanje TK iz rastlin po žetvi.	Širjenje onesnaževal z jesenskim odpadanjem listov.
Možna je kombinacija z drugimi remediacijskimi tehnikami in uporaba dodatkov ter transgenih rastlin za hitrejši proces.	
Estetska tehnologija. Rastlinski pokrovi niso tujki v okolju in se zlahka zlijejo z obstoječo krajino.	

2.5.4 Uporabne rastline in zmožnost akumulacije

Fitoremediacija temelji na dejstvu, da so rastline solarne črpalki, ki lahko ob procesih fotosinteze in evapotranspiracije iz okolja privzemajo določene elemente. Z evapotranspiracijo se spreminja vodna bilanca. Nekatere lesnate rastline (npr. topoli) dnevno izčrpajo od 200 do 1100 L vode in povečajo prezračenost tal. Učinkovitost solarne črpalke je odvisna od globine in gostote korenin, hidravlične prevodnosti odpadkov in tal, stopnje rasti rastlin, vlage, osončenosti, hitrosti vetra in količine padavin. Fitoremediacija je tako možna na vseh onesnaženih mestih s primerno sezonsko razporeditvijo padavin, globokimi koreninami in relativno nepropustnimi tlemi (Schnoor, 2000).

Variabilnost v zmožnosti akumulacije in premeščanja TK v nadzemne dele je med rastlinskimi vrstami zelo velika. Vzrok so razlike v zadrževanju TK v koreninah in razlike v mobilnosti TK po rastlini. TK v rastlini se lahko vežejo v celično steno, na površino plazmaleme, vakuolo, organske kisline in anorganske komplekse. Rastline, ki so zmožne kopičiti elemente visoko nad fiziološkimi potrebami, imenujemo hiperakumulatorji. Hiperakumulatorske rastline lahko iz onesnaženih tal privzamejo velike količine TK brez kemijskih dodatkov. V naravnem okolju obstaja le majhno število hiperakumulatorjev, ki lahko privzemajo več kot 0,1 % Pb, Co, Cr ali več kot 1 % Mn, Ni, Zn v nadzemne dele. V

svetu je poznanih okoli 400 hiperakumulatorskih rastlin, vendar pa je remediacijski potencial mnogih majhen, zaradi počasne rasti in majhne biomase (Blaylock in Huang, 2000). Naravni hiperakumulatorji so pogosto endemiti na s kovinami bogatih tleh. Hiperakumulatorstvo se je v evoluciji najverjetneje razvilo zaradi interferenčne kompeticije z drugimi rastlinami, obrambe ter odpornosti pred herbivori in patogeni (Goncalves s sod., 2006).

Za fitoremediacijo so uporabne tudi nizko rastline z nizko stopnjo akumulacije, vendar z veliko produkcijo biomase in globokimi koreninami. Zelo pogosto se pri fitoremediaciji uporablja predstavnike družine vrb (*Salicaceae*). Hitro rastoči, kozmopolitski, hibridni topoli so uporabni v različnih klimatskih pasovih za stabilizacijo tal, zmanjšanje vtrne erozije in vertikalne migracije polutantov. Z visoko stopnjo evapotranspiracije in globokimi koreninami so zelo učinkoviti pri zmanjšanju količine izcedne vode in stabilizaciji onesnaževal, ki jih vsebuje. Potaknjence topov se posadi 2 m globoko, da poženejo gost koreninski preplet. Lesnate rastline lahko zrastejo več kot 2 m že v prvi rastni sezoni in dosežejo višino 6-8 m v 3 letih, če posadimo 4000 rastlin na hektar in z letno vezavo ogljika $2,5 \text{ kg m}^2$. Vsakih 6 let se jih lahko celo poseka in uporabi za gorivo, celulozo in papir. Lesnate rastline se bodo zelo hitro obnovile (Schnoor, 2000).

3 MATERIAL IN METODE

Pri poskusu smo ocenjevali primernost različnih rastlinskih vrst za remediacijo usnjarskih odpadkov, onesnaženih s kromom, in raziskovali možnost ozelenitve odlagališča. Teste smo izvajali na odlagališču Rakovnik in v rastlinjaku na Oddelku za agronomijo Biotehniške fakultete. S poskusom smo začeli leta 2006, v letih 2007 in 2008 pa smo ga izpopolnili in ponovili.

3.1 POLJSKI POSKUS NA ODLAGALIŠČU RAKOVNIK

3.1.1 Opis odlagališča in izhodiščno stanje

Odlagališče usnjarskih odpadkov Rakovnik obratuje od leta 1969. Upravljavec, Industrija usnja Vrhnika (IUV), je odložil že preko 58 699 ton odpadkov (Preglednica 6, 7), kar je 2,2 % manj od končne količine, ki je bila določena v programu prilagoditve obstoječega odlagališča po Pravilniku o odlaganju odpadkov že v decembru 2003 (Ur.l. 5/00). IUV je bila še pred petdesetimi leti največja usnjarna v Evropi, kjer so dnevno predelali 40 – 50 t svinjskih kož (Roš in Gantar, 1998).

Odpadki iz proizvodnje usnja in krvna so trdni odpadki iz usnja po strojenju in dodelavi (barvanje, dodelava usnja s folijo ipd.), pretežno v obliki manjših kosov usnja (ostružkov in odrezkov). Po mnenju akreditirane institucije so nenevarni in nimajo nevarnih lastnosti odpadkov, zato se jih lahko odlaga na odlagališčih nenevarnih odpadkov kot to urejata direktiva in odločba Sveta EU.

Odlagališče Rakovnik dosega svojo nosilnost in je v postopku zapiranja. Je ovalno oblikovano, na severnem delu globoko 10 m, na južnem 5 m in ograjeno iz severne, južne in zahodne in vzhodne strani. Odpadke so odlagali mešano. Njihova stabilnost se je zagotavljala s prekrivanjem blata s suhimi odpadki usnja in krvna, nato se je prekrilo z jalovino iz kamnoloma. Biološko obdelano blato, ki je v diplomskem delu imenovano tudi IUV kompost, se je uporabilo za rekultivacijsko plast. Odlaganje odpadkov se je zaključilo v avgustu 2007. Kompost se bo dovažal do konca leta 2008 (IUV, 2007a).

Odlagališče Rakovnik se nahaja približno 1 km jugozahodno od Šmartnega pri Litiji, v grapi potoka Rakovnik. Hudourniška grapa je zapolnjena z aluvialnimi naplavinami, ki skupaj z meteornimi vodami odtekajo iz zaledja hribov Tičnica in Veliki ter Mali Puščavnik. Aluvialni zasip je odprt vodonosnik z nihanjem vodostaja v odvisnosti od napajanja. Okolica odlagališča je rahlo zamočvirjena, poraščena z gozdom in nenaseljena. Potok Rakovnik je na območju odlagališča speljan v betonske cevi, 300 m severno pod odlagališčem se izlije v potok Reka. Dolina potoka Reka je poseljena z vasmi Zavrstnik, Grmače, Šmartno pri Litiji in obraščena s travniki, kjer se pase živila KZ Litija (Geo-hidro d.o.o, 2007).

Izcedna voda odlagališča odteka po drenažnem sistemu v zbiralni bazen za izcedne vode Monitoring podzemnih vod in potoka Rakovnik, ki se zadnji dve leti izvaja 2x letno, je pokazal, da ima odlagališče Rakovnik zaznaven vpliv tako na podzemne vode kot na potok Rakovnik.

Rozman, R. Fitoremediacija sedimentov in drugih kontaminiranih zemljin.

Dipl.delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo, 2008

Betonski zbiralni bazen za izcedno vodo se nahaja na spodnjem delu odlagališča. Njegove dimenzijs so 14 m x 10 m x 2 m. Maksimalna dnevna količina izcednih vod je 230 m³, maksimalna letna pa ne preseže 10 000 m³. Izcedne vode iz zbirальнega bazena se odvajajo na mehansko, kemijsko in biološko čistilno napravo IUV na Vrhniki. Meritve so pokazale, da v odlagališču nastajajo minimalne količine plina. Odvajajo se preko vgrajenih perforiranih in pocinkanih cevi v biofiltersko plast prekrivke iz komposta, kjer se razgrajujejo (IUV, 2007a).

Preglednica 6: Količina in vrsta odloženih odpadkov do konca leta 2006 (Vir: Dokumentacija v postopku izdaje odločbe za zaprtje odlagališča, IUV, 2007a)

Zap.št.	Klasifikacijska številka						Naziv odpadka	Celotna količina odloženih odpadkov (t)	
Nenevarni odpadki									
	0	4	0	1	0	1	Mezdra in odpadni luženi cepljenec	2 417	
	0	4	0	1	0	8	Odpadno strojeno usnje, ki vsebuje Cr	16 808	
	0	4	0	1	0	9	Odpadki iz obdelave krvna in usnja	2 445	
	0	4	0	1	0	6	Mulj iz čiščenja odpadnih vod, ki vsebuje Cr	34 470	
	2	0	0	3	0	1	Mešani komunalnim podobni odpadki	1 661	
Skupna količina (odloženih odpadkov iz IUV, d.d.)								57 801	

Preglednica 7: Količina in vrsta odloženih odpadkov do konca odlaganja do leta 2007 (Vir: IUV, 2007a)

Zap.št.	Klasifikacijska številka						Naziv odpadka	Celotna količina odloženih odpadkov (t)	
Nenevarni odpadki									
	0	4	0	1	0	8	Odpadno strojeno usnje, ki vsebuje krom	700	
	0	4	0	1	0	6	Mulj iz čiščenja odpadnih vod, ki vsebuje krom	60	
Skupna količina (odloženih odpadkov iz IUV, d.d.)								760	

Odpadke na deponiji so prekrili s približno 1 m debelo plastjo komposta IUV. Kakovost komposta povzemamo iz zadnjega poročila IUV (IUV, 2007).

Preglednica 8: Analiza komposta in izcedne vode (Vir: Kemijski inštitut Ljubljana, 2006; IUV, 2007b)

parameter	leto	izlužek komposta IUV		izcedna voda	
		vrednost (mg/kg s.s.)	mejna vrednost (mg/kg s.s.)	vrednost (mg/L)	mejna vrednost (mg/L)
celotni Cr	2006	6	0,5	9,5	
	2007	3,6		11,8	0,5*

*0,5 mg/L je mejna vrednost za izpust, vendar ni sporna, ker se izcedna voda odvaja na ČN Vrhnika (Ur.l. 07/00).

V Preglednici 8 so prikazane analize izlužka komposta in izcedne vode iz deponije Rakovnik. Po 38. členu 4. odstavka *Uredbe o odlaganju odpadkov na odlagališčih* (Ur.l. RS 32/06,) se za rekultivacijsko plast lahko uporabijo komposti in drugi biološko obdelani odpadki, ki po sestavi sicer ne izpolnjujejo pogojev iz predpisa, ki ureja vnos v tla, vendar noben od parametrov njihovih izlužkov, razen celotnih raztopljenih snovi in DOC, ne sme

presegati vrednosti parametrov izlužka, ki veljajo za odlaganje na odlagališča za inertne odpadke. Ne glede na določbe prejšnjega odstavka lahko ministrstvo v 5. členu upravljavcu odlagališča dovoli uporabo komposta ali drugih biološko obdelanih trdnih odpadkov, pri katerih največ 2 parametra njegovega izlužka presegata vrednosti, ki veljajo za odlaganje na odlagališča za inertne odpadke, pri tem pa ne presegata vrednosti, ki veljajo za odlaganje za odlagališča za nenevarne odpadke. (Ur. RS 32/06), zato je bila kljub preseganju mejne vrednosti za krom, možna uporaba komposta za rekultivacijski sloj.

Preglednica 9: Analiza komposta iz kompostarne Ligojna (IUV, 2008)

datum	čas kompostiranja (dnevi)	suha snov (%)	žarilni ostanek (% v s.s.)	Cr (% v s.s.)	N (% v s.s.)	pH (1:10)
12.5.06	38	61,4	71,9	1,47	1,34	7,25
30.11.06	35	65	70	1,17	1,34	7,3
9.7.07	38	64	69	0,88	1,3	7,25
4.8.08	40	61	74	0,56	1,35	7,8

Preglednica 10: Analiza izlužka biološko obdelanega blata (IUV, 2008)

datum	suha snov (mg/L)	žarilni ostanek (mg/L)	KPK (mg O ₂ /L)	Cr (mg/kg s.s.)	N (mg/L)	EC (mS/cm)	klorid (mg/L)	amonijev dušik (mg/L)
12.5.06	1482	810	800	7,1	131,7	1,62	500	64,4
30.11.06	1403	7900	800	7,7	125,4	1,8	600	66,4
9.7.07	1347	770	750	5	120	1,75	520	54
4.8.08	1280	690	690	3,7	122,3	1,77	580	63

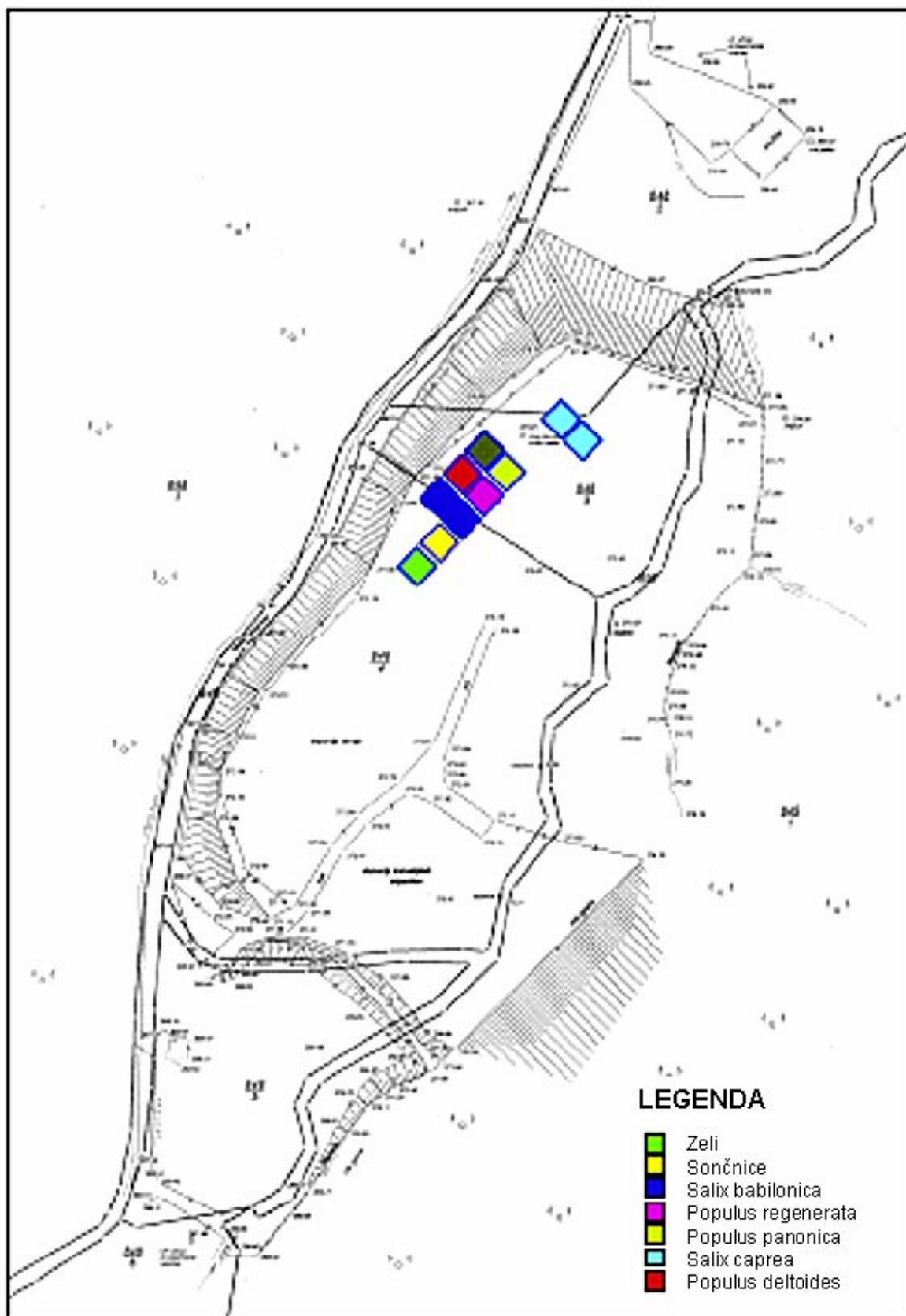
V Preglednicah 9 in 10 sta prikazani analizi biološko obdelanega blata iz čistilne naprave IUV in njegovega izlužka. Vrednosti kroma v izlužku v letih 2006 in 2007 presegajo mejne vrednosti izlužka za celotni krom, vendar se je blato po tedaj veljavnih normativih (Ur.l. RS 32/06) lahko uporabilo kot rekultivacijska plast na odlagališču Rakovnik.

3.1.2 Testni poligoni in zasaditev rastlin

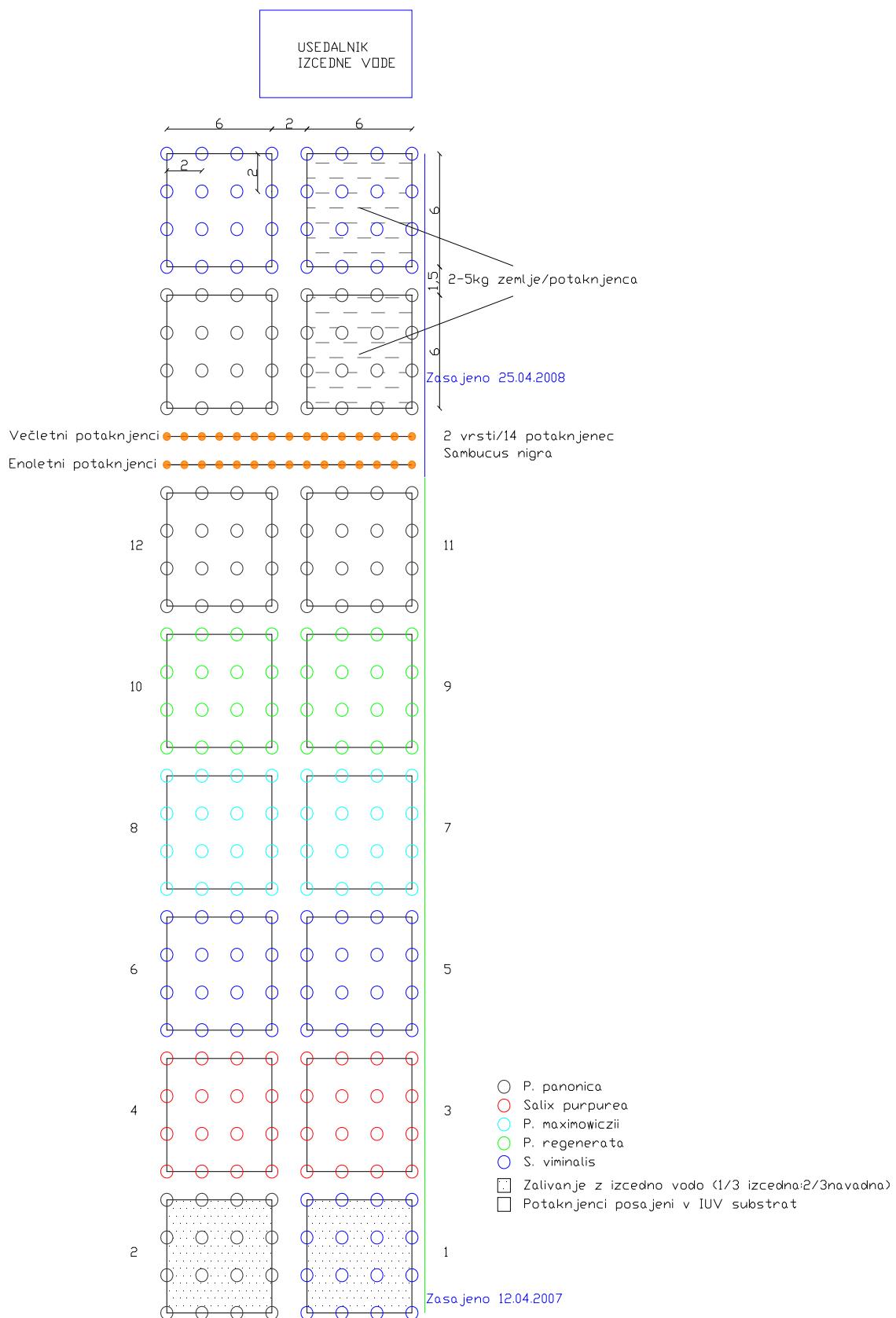
Vzpostavili smo testna polja in jih zasadili z lesnatimi vrstami z visoko transpiracijo in zelnatimi vrstami z zmožnostjo akumulacije kroma (Preglednica 11). Potaknjenci lesnatih vrst so bili veliki 25 cm in pridobljeni iz enoletnih poganjkov rastlin, rastočih v nasadih na Ljubljanskem barju.

Preglednica 11: Metode dela na odlagališču Rakovnik v letih 2006, 2007 in 2008

	2006	2007	2008
Število testnih polj (TP)	10	11	10
Velikost TP	6 m X 6 m	6 m X 6 m	6 m X 6 m
Število potaknjencev / TP	4 in 9 (vrbe), 35 (topoli)	16	16
Število TP z zelnatimi rastlinami	2	1	0
Topoli	<i>Populus panonica</i>	<i>P. panonica</i>	<i>P. panonica</i>
	<i>Populus regenerata</i>	<i>P. regenerata</i>	<i>P. regenerata</i>
	<i>Populus maximowizii</i>	<i>P. maximowiczii</i>	<i>P. maximowiczii</i>
	<i>Populus deltoides</i>		
Vrbe	<i>Salix caprea</i>	<i>S. purpurea</i>	<i>S. purpurea</i>
	<i>Salix babylonica</i>	<i>S. viminalis</i>	<i>S. viminalis</i>
Sončnice	<i>Helianthus annuus</i>	<i>Helianthus annuus</i>	
Endivija	<i>Cichorium endivia L.</i>		
Špinaca	<i>Spinacia oleracea L. var. Matador</i>		
	<i>Spinacia oleracea L. var. Norwak</i>	<i>Spinacia oleracea L. var. Norwak</i>	
Blitva	<i>Beta vulgaris L. subsp. Cicla</i>	<i>Beta vulgaris L. subsp. Rhubarb chard</i>	
		<i>Beta vulgaris L. subsp. Bionda da taglio</i>	
Bučke	<i>Cucurbita pepo L. var. Greyzini F1</i>	<i>Cucurbita pepo L. var. Elite F1</i>	
	<i>Cucurbita pepo var. Cigal</i>	<i>Cucurbita pepo L. var. Vegetable marrow</i>	
Lubenice	<i>Citrullus lanatus</i> (Thunb.) Mansf. var. <i>Crimson sweet</i>		
Brstični ohrov	<i>Brassica oleracea L. var. Gemmifera</i>		
Glavni ohrov	<i>Brassica oleracea L. var. Sabauda</i>		
Zelje	<i>Brassica oleracea L. convar. Capitata var. Capitata</i>	<i>Brassica oleracea L. convar. Capitata var. Capitata f. rubra</i>	
		<i>Brassica pekinensis</i> Rupr.	
Cvetača	<i>Brassica oleracea L. var. Botrytis</i> subvar. <i>Cultiflora</i>		
Trpotec	<i>Plantago holosteum</i>		



Slika 3: Testni poligoni in zasadnja rastlin na odlagališču Rakovnik v letu 2006



Slika 4: Zasadnja rastlin v letih 2007 in 2008



Slika 5: Deponija Rakovnik v letu 2006



Slika 6: Poskusno polje na deponiji Rakovnik 06



Slika 7: Poskusno polje na deponiji Rakovnik 08

3.1.3 Analiza komposta IUV uporabljenega kot pokrivni sloj na odlagališču Rakovnik in v lončnem poskusu v rastlinjaku

Pred zasaditvijo rastlin smo na območju testenega polja odvzeli povprečni vzorec prekrivnega substrata - komposta IUV in opravili analizo vsebnosti kroma, suhe snovi, rastlinskih hranil (izmenljivi in celokupni P, K ter celokupni N in izmenljive oblike NO_3^- , NH_4^+), organske snovi in meritev elektroprevodnosti in pH.

3.1.4 Uspešnost preživetja in rast rastlin

Skozi vse rastne sezone smo redno, 1x mesečno, merili rastne parametre: višina rastline, število poganjkov, število preživelih in odmrlih rastlin, premer debla, premer listov. Število poganjkov, število preživelih in odmrlih rastlin smo prešteli. Višino rastline smo izmerili z metrom od podlage do najvišjega poganjka. Premer debla smo merili vedno na isti višini 15 (10, 5) cm, odvisno od velikosti lesnate vrste ob prvi meritvi, s kljunastim merilom. Premer lista smo merili v najširšem delu povprečno velikega lista s kljunastim merilom.

3.1.5 Fluorescenza klorofila *a*

Meritve fluorescence klorofila *a* nam dajejo informacije o stanju fotosinteznega sistema FS II. Fluorescenza klorofila *a* (razmerje Fv/Fm) je merilo fotokemične učinkovitosti FS II. Parameter Fv/Fm je zanesljiv pokazatelj učinkovitosti fotosinteznih reakcij in fiziološkega stanja rastlin, saj je FS II zelo občutljiv za različne vplive iz okolja. Pri vitalnih rastlinah fluorescenza klorofila *a* dosega vrednost 0.83. Kadar je rastlina izpostavljena stresnim razmeram, se razmerje zmanjša. Variabilna fluorescenza (Fv) je izračunana kot Fm-Fo. Fo je minimalna fluorescenza klorofila *a* temotno prilagojenega vzorca, Fm pa maksimalna fluorescenza zatemnjene vzorca. (Trošt-Sedej, 2002).

Meritve fluorescence klorofila *a* smo izvajali s prenosnim PAM fluorometrom OptiSciences OS 5 (ZDA). Pred meritvami parametra Fv/Fm smo na liste nataknili priponke za temotno adaptacijo listov. Po 10-15 minutah temotne adaptacije smo izmerili minimalno fluorescenco Fo ter po saturacijskem pulzu (trajanje 0,8 sekunde, jakost 7.500 - 10.000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{PAR}$) maksimalno fluorescenco Fm. Na posameznem vzorčnem mestu smo opravili 3-5 meritev na različnih listih, prikazano (Preglednice 17, 18 in 20) je povprečje teh meritev s standardno napako.

3.1.6 Meritve vsebnosti kroma v tkivih rastlin

Konec rastne sezone smo nabrali vzorce rastlin. Nabранe rastline smo razdelili na posamezne rastlinske organe, ki smo jih v laboratoriju skrbno očistili, jim stehtali svežo maso in jih sušili 7 dni na 105°C. Suhe vzorce smo stehtali in zmleli v mlinčku. Sledil je mikrovalovni razklop vzorcev v zaprtem mikrovalovnem sistemu z nastavljivo mikrovalovno moči do 630 W. V teflonske posode smo zatehtali 0,3 - 0,4 g vzorca in mu dodali 4 ml HNO_3 . Zaprte posode smo segrevali v štirih stopnjah (1. 80% moči 9 min, 2. 90% moči 6 min, 3. 100% moči 15 min, 4. 90% moči 9 min) tako, da so vzorci v 6 minutah dosegli temperaturo 200°C in nato ostali pri tej temperaturi še nadaljnjih 20 minut. Po

končanem razkroju smo vzorcem odparili kislino do približno 1 ml. Vzorce smo nato kvantitativno prenesli v 25 ml bučke in razredčili z vodo, dvakrat destilirano v kremenu, do značke. Spleti vzorec za kontrolo čistosti smo pripravili na enak način, le da nismo dodali vzorca. Krom smo določili z elektrotermično atomsko absorpcijsko spektrometrijo (ETAAS). Analizirali smo pri optimalnih pogojih merjenja in rezultate podali na suho maso vzorca.

Izračunali smo bioakumulacijski faktor (BAF) po formuli:

$$\text{BAF} = \text{vsebnost kroma v rastlinskih tkivih} / \text{vsebnost kroma v substratu}$$

Bioakumulacijski faktor je razmerje med koncentracijami kroma v rastlinah in celokupnimi koncentracijami kroma v tleh. BAF pokaže, za koliko se koncentracije kroma v rastlinah razlikujejo od koncentracije kroma v tleh (Svetina, 1999).

3.1.7 Statistične analize

Za statistično primerjavo rastnih parametrov smo uporabili metode klasične statistike (standardna napaka) in regresije. Hitrost rasti lesnatih vrst v letih 2007 in 2008 smo ponazorili z modelom linearne regresije, ki pravi, da je v opazovani populaciji vrednost odvisne spremenljivke vsota treh členov:

$$Y = \alpha + \beta x + \varepsilon$$

α – konstanta, odsek na ordinati. Če je vrednost neodvisne spremenljivke 0, je vrednost odvisne spremenljivke α . V določenih primerih nima vsebinskega pomena.

βx – večkratna neodvisna spremenljivka, tangens naklonskega kota premice. Če se x poveča za eno enoto, se Y spremeni za β enot.

ε – slučajni vplivi

Odkloni točk od premice naj bi bili čim manjši. Kakovost modela lahko izrazimo s koeficientom determinacije (R^2), ki izraža odstotek variabilnosti odvisne spremenljivke. (Košmelj, 2001)

Vse statistične analize so bile opravljene s programom Excel.

3.2 POSKUS V NADZOROVANIH RAZMERAH V RASTLINJAKU

Vzperedno s testiranjem na odlagališču Rakovnik smo fitoremediacijski potencial zelnatih rastlin testirali tudi v rastlinjaku. Uporabili smo kompost IUV, ki se uporablja za prekrivanje odlagališča na Rakovniku, kontrolni kompost in lonce volumna 20 L.



Slika 8: Lončni poskus v rastlinjaku v letu 2007

3.2.1 Posajene rastlinske vrste

V rastlinjaku smo izvajali poskuse v letih 2006 in 2007 na naslednjih rastlinskih vrstah:

- okrogl repa (*f. Brassicaceae, Brassica rapa* subsp. *rapa*),
- ohrov vertus (*f. Brassicaceae, Brassica oleracea* var. *acephala*),
- sončnice (*f. Asteraceae, Helianthus annuus* L.),
- špinača matador (*f. Chenopodiaceae, Spinacia oleracea* L. var *matador*),
- blitva mangold srebrnolistna (*f. Chenopodiaceae, Beta vulgaris* L. subsp. *cicla*),
- oves (*f. Poaceae, Avena sativa* L.),
- endivija eksariol rumena (*f. Cichoriaceae, Cichorium endivia* L.),
- kolerabica dunajska bela (*f. Brassicaceae, Brassica oleracea* var. *gongylodes*)
- zelje (*f. Brassicaceae, Brassica oleracea* L. convar. *capitata* var. *capitata*).

3.2.2 Kakovost substrata in prirastek rastlin

Tako leta 2006 kot leta 2007 smo analizirali kvaliteto tal po mednarodnem standardu ISO/DIS 22030. To je rastlinski test, kjer se meri kalitev in stopnjo prirastka rastlinskih vrst. Za vsako rastlinsko vrsto smo pripravili 6 loncev: 4 s kompostom iz Rakovnika (IUV), 2 kontrolna (K). Vanje smo posadili 10 semen. Po tednu dni smo določili stopnjo

kaljivosti, po dveh tednih pa smo število kalic zmanjšali na 4 in jih vzgojili do užitne zrelosti. Populjenim kalicam smo izmerili svežo in suho maso.

3.2.3 Fluorescencija klorofila *a*

Merili smo fluorescenco klorofila *a* po enakem postopku kot na odlagališču Rakovnik.

3.2.4 Meritve vsebnosti kroma v tkivih rastlin

Konec rastne sezone smo vse rastline pobrali in jih obdelali po enakem postopku kot vzorce iz odlagališča Rakovnik. Prav tako smo izračunali bioakumulacijski faktor po formuli:

$$\text{BAF} = \text{vsebnost kroma v rastlinskih tkivih} / \text{vsebnost kroma v substratu}$$

3.2.5 Statistične analize

Za statistično primerjavo vsebnosti kroma v tkivih rastlin iz rastlinjaka smo naredili analizo variance, za primerjavo kaljivosti in takojšnje fluorescence klorofila *a* med substratoma in med leti smo izračunali t-test. Statistične analize smo izvedli s programoma Excel in Statgraphics 4.1.

4 REZULTATI

4.1 POLJSKI POSKUS NA ODLAGALIŠČU RAKOVNIK

Analize komposta IUV so prikazane v Preglednici 12. Stopnja preživetja izbranih lesnatih rastlin je prikazana v Slikah 9 in 10. Prirast lesnatih rastlin je prikazana v Slikah 11 - 19. Prirast izbranih zelnatih rastlin je prikazana v Slikah 20 in 21. V Preglednicah 13 – 16 so prikazani modeli linearne regresije za rastline. Vrednosti takojšne fluorescence klorofila *a* so prikazani v Preglednici 17 in 18. Vsebnost kroma so prikazane v Slikah 22-29.

4.1.1 Analiza komposta IUV uporabljenega kot pokrivni sloj na odlagališču Rakovnik in v lončnem poskusu v rastlinjaku

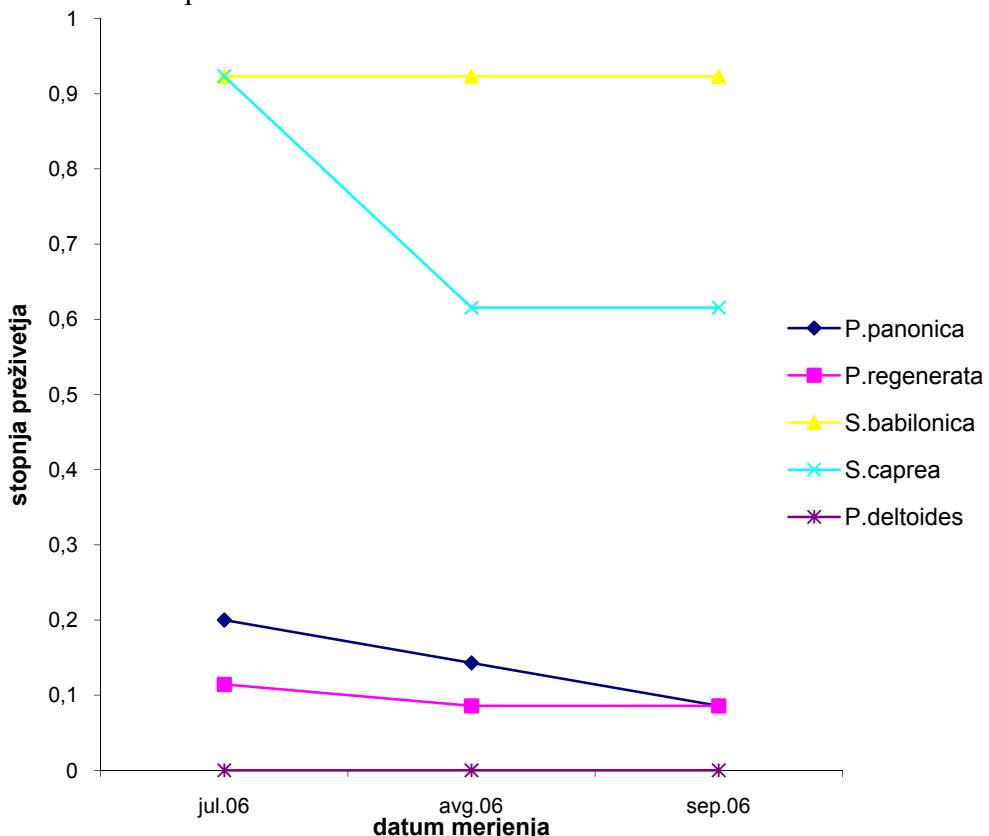
Preglednica 12: Kemijska analiza komposta IUV uporabljenega na testni lokaciji na deponiji Rakovnik in v rastlinjaku

Kompost IUV	s.s.	pH	EC	org.s.	C	N	C/N	P	K	Cr	izmenljivi (mg/kg s.s.)		
	%	(CaCl ₂)	mS/cm	%	%	-	%	%	%	P ₂ O ₅	K ₂ O	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
	57,1	7,7	0,63	35,9	19,3	1,0	19,3	0,14	0,067	0,875	144	146	12,9

V Preglednici 12 so prikazane analize IUV komposta, ki je bil uporabljen kot pokrivni sloj na odlagališču Rakovnik in kot testni substrat v lončnem poskusu v rastlinjaku. Vsebnosti kroma močno presegajo tako mejne in opozorilne kot tudi kritične vrednosti kroma v tleh (Preglednica 2). Kompost ima primerno C/N razmerje, majhno elektroprevodnost in visok pH, ki naj ne bi bila omejujoč faktor za uporabo v kmetijski proizvodnji, za sajenje lončnic ali sadik. Kompost vsebuje dovolj dušika in fosforja, pramanjuje pa kalija. Za dodatno ugotavljanje primernosti komposta smo izvedli test kaljivosti.

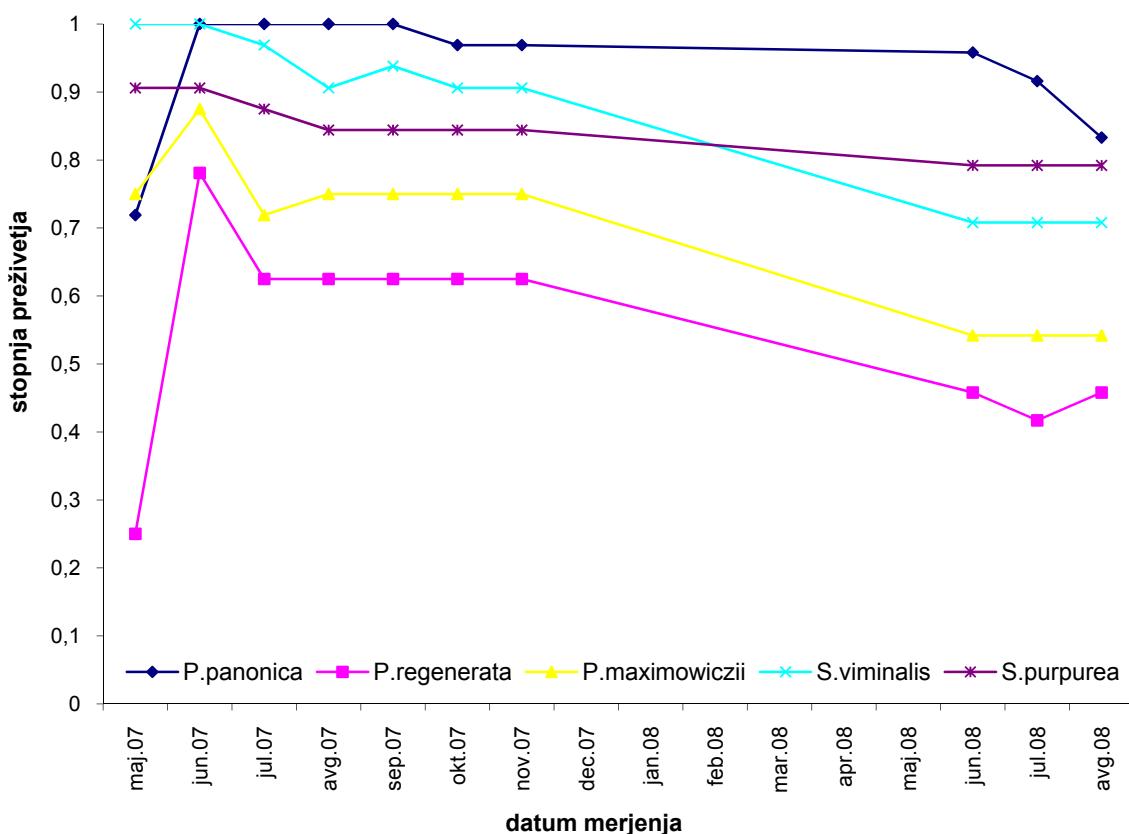
4.1.2 Rastni parametri

4.1.2.1 Rastni parametri lesnatih vrst



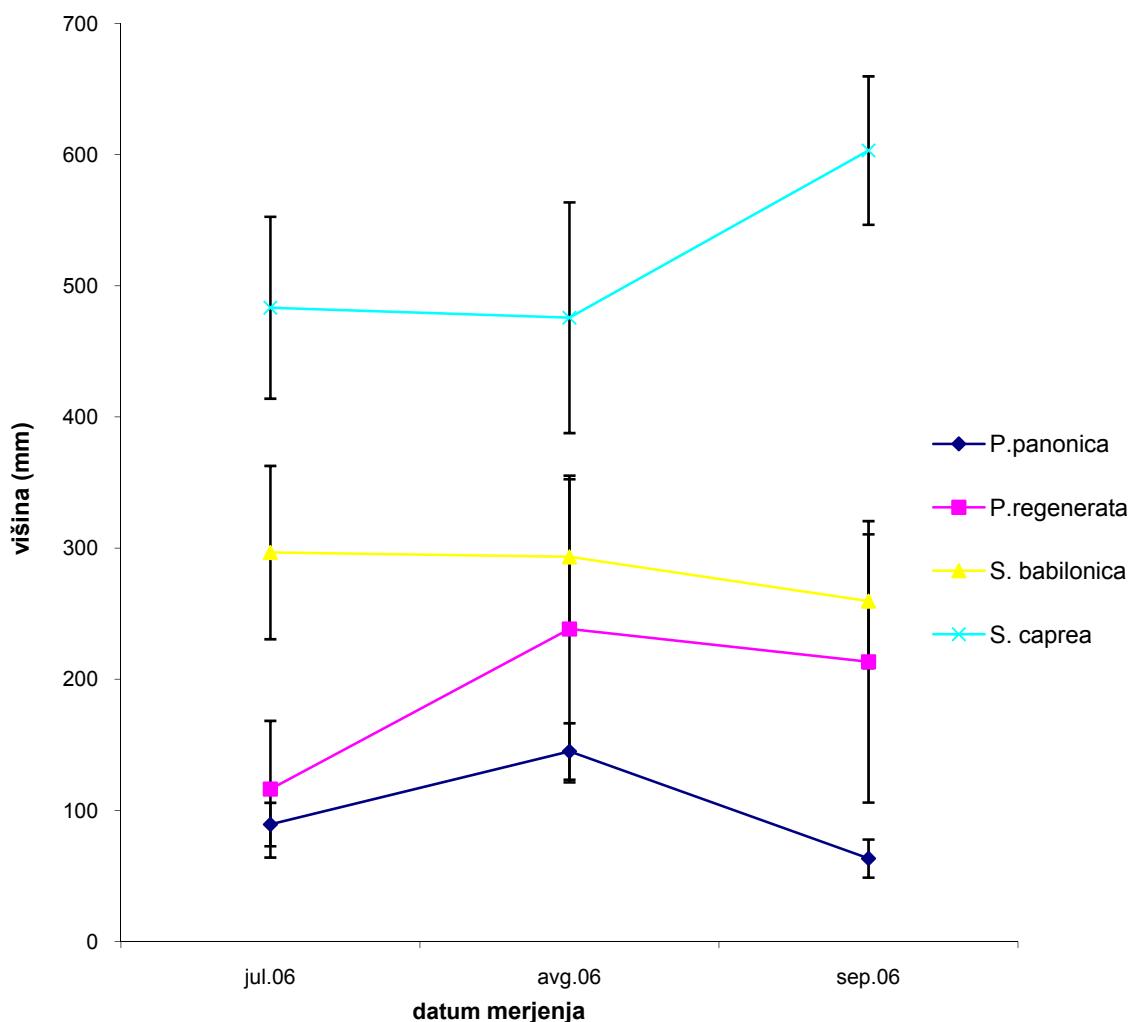
Slika 9: Stopnja preživetja lesnatih rastlin v letu 2006

Na Sliki 9 je prikazana stopnja preživetja lesnatih rastlin na odlagališču Rakovnik v letu 2006. V letu 2006 smo podtaknili pet lesnatih vrst, tri vrste topola in dve vrsti vrb. Posadili smo 13 potaknjencev vrb in 35 potaknjencev topolov. Vrbi sta bili bolj uspešni kot topoli. Vrba *S. babilonica* je imela najvišjo stopnjo preživetja. Večina topolovih potaknjencev je propadla. Najmanjšo stopnjo preživetja je imel topol *P. deltoides*, saj noben potaknjenc ni ozelenel. Stopnja preživetja se je skozi rastno sezono zmanjša pri vseh vrstah, razen pri vrbi *S. babilonica*.



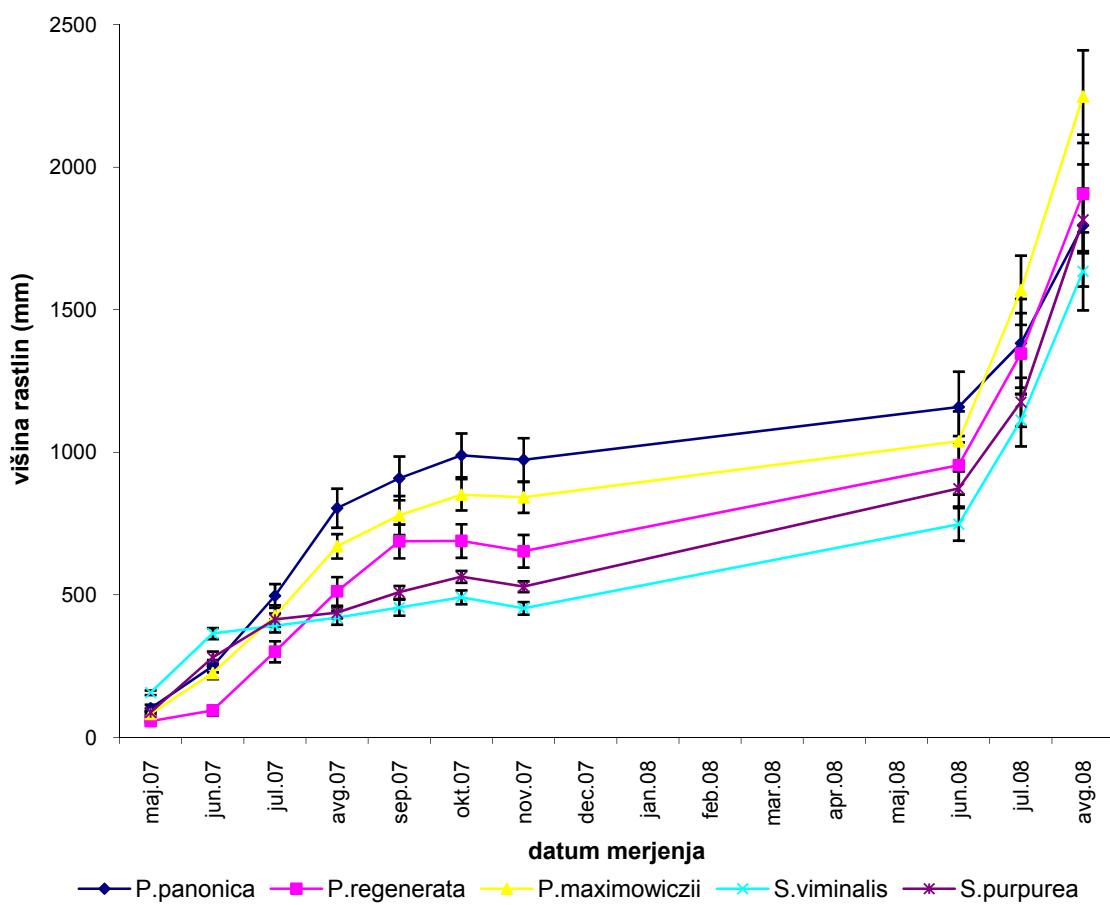
Slika 10: Stopnja preživetja lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008

Na Sliki 10 je prikazana stopnja preživetja lesnatih rastlin na odlagališču Rakovnik v letih 2007 in 2008. V letu 2007 smo prav tako kot leta 2006 posadili tri vrste topolov in dve vrsti vrb, z manjšo razliko v vrstni sestavi. Namesto topola *P. deltoides* smo posadili topol *P. maximowiczii*. Vrbi pa sta bili vrste *S. viminalis* in *S. purpurea*. Število posajenih potaknjencev vseh lesnatih vrst je bilo 32. V nasprotu z letom 2006 je imel topol *P. panonica* v letu 2007 najvišjo stopnjo preživetja. Tudi vrbi, pa čeprav drugi vrsti, sta bili podobno kot v letu 2006 zelo uspešni. Najmanjšo stopnjo preživetja je imel topol *P. regenerata*. V letu 2008 smo nadaljevali z merjenjem lesnatih vrst, posajenih v letu 2007. Iz grafa je razvidno, da je v zimskem obdobju propadlo nekaj rastlin vseh lesnatih vrst (lesnate rastline za merjenje kroma, izruvane na koncu rastne sezone 07, so izvzete), kar je lahko posledica nizkih temperatur, izsušitve in objedanja srnjadi. Uspešnost preživetja v letu 2008 je podobna letu 2007, s to razliko, da je bila vrba *S. purpurea* bolj uspešna kot vrba *S. viminalis*. Za vrbo *S. viminalis* je znano, da je med vrbami najbolj prilagodljiva vrsta in lahko uspeva tako v vlažnih kot bolj suhih razmerah (Brus, 2004). Posledično sklepamo, da poleg okoljskih dejavnikov na rast rastlin vpliva tudi visoka vsebnost kroma v tleh.



Slika 11: Višina lesnatih rastlin v letu 2006 ($\bar{x} \pm SN$, n = 3 - 12)

Na Sliki 11 je prikazana višina lesnatih rastlin v letu 2006. Vrbi sta bili višji od topolov. Najbolj uspešna je bila vrba *S. caprea*, ki je statistično značilno zrasla do največje višine. Vrba *S. babilonica* je statistično značilno višja od topola *P. panonica*, česar pa ne moremo s statistično gotovostjo trditi za topola *P. regenerata*. Najmanjše višine rastlin smo izmerili pri topolu *P. panonica*.



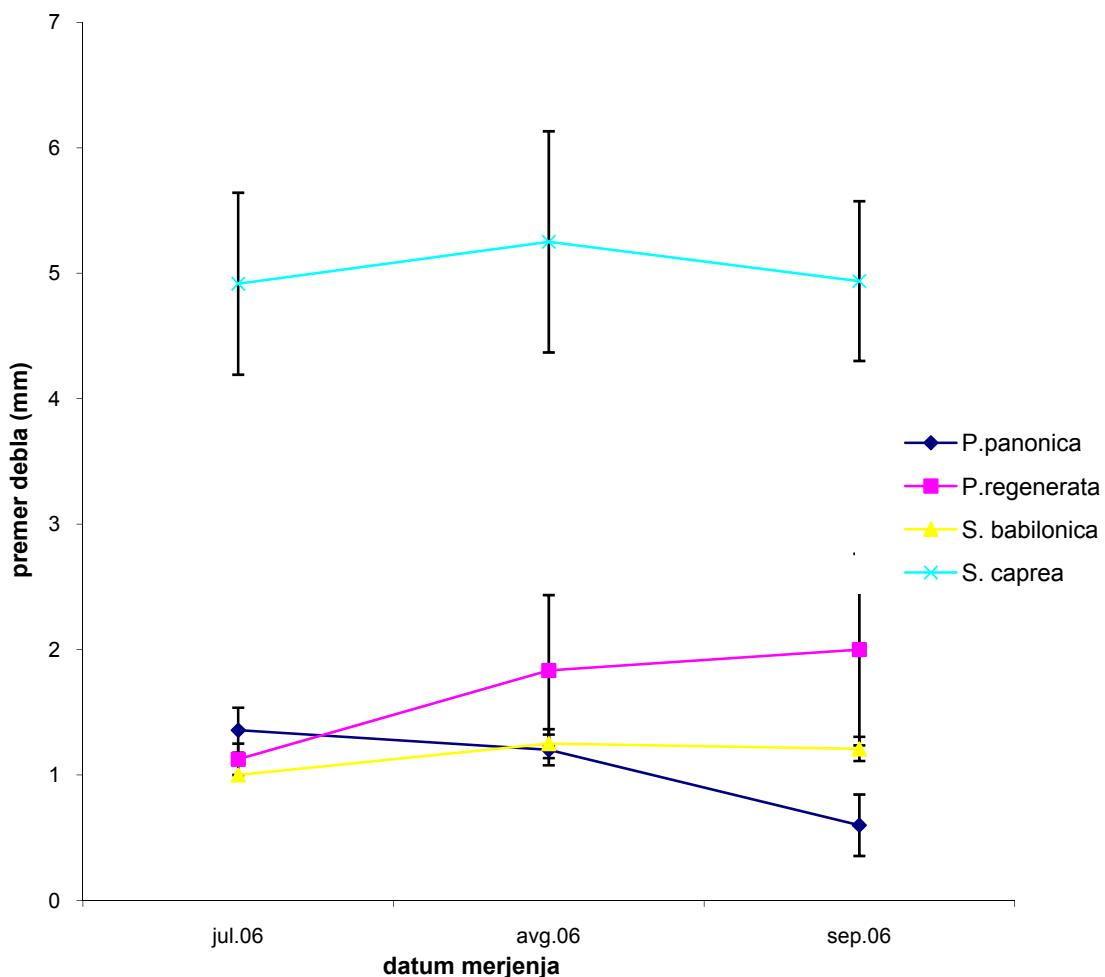
Slika 12: Višina lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008, (\pm SN, n = 8 - 32)

Preglednica 13: Model linearne regresije hitrosti rasti v višino lesnatih rastlin v letu 2007 in 2008

višina	do septembra 2007		2008	
	y	R ²	y	R ²
<i>P. panonica</i>	216,76x - 279109	0,9794	318,39x - 413103	0,9711
<i>P. regenerata</i>	167,9x - 216255	0,9656	475,91x - 618231	0,9896
<i>P. maximowiczii</i>	183,64x - 236464	0,9878	604,62x - 785591	0,9949
<i>S. viminalis</i>	65,269x - 83840	0,7751	443,62x - 576425	0,9898
<i>S. purpurea</i>	100,01x - 128667	0,9045	471,32x - 612365	0,9593

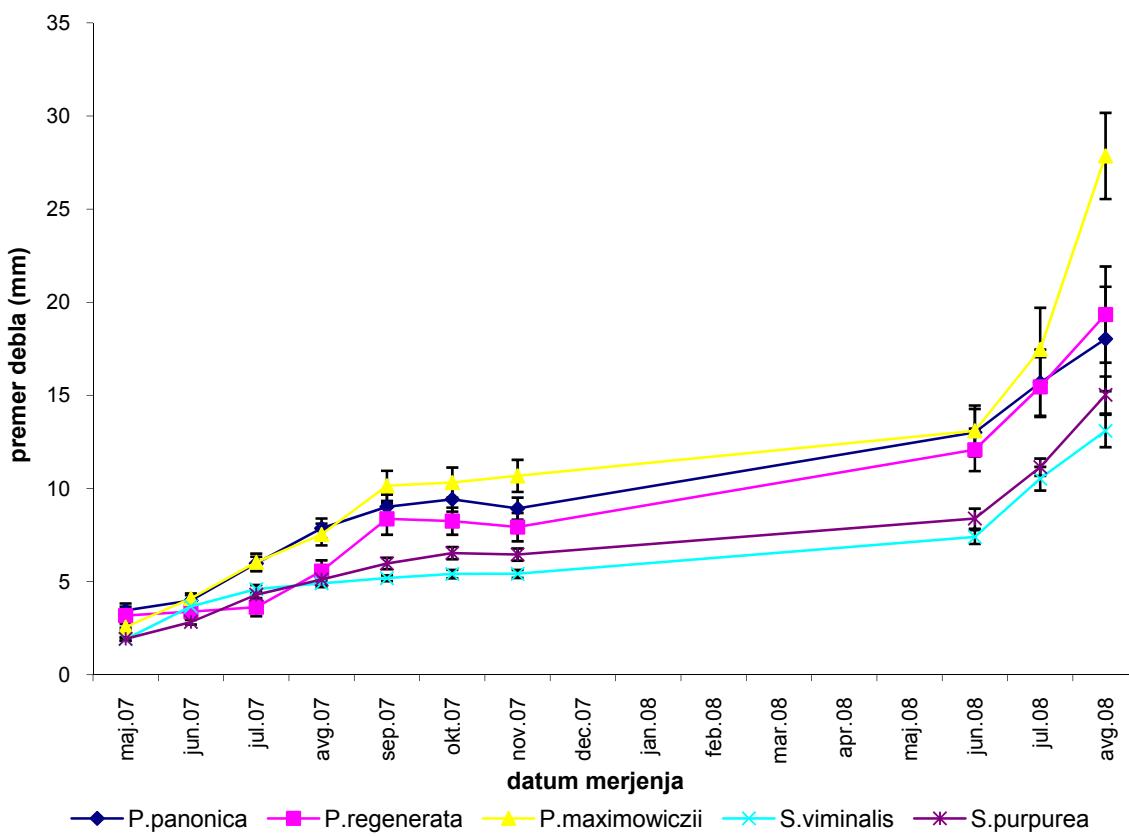
Na Sliki 12 je prikazana višina lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008. Na začetku rasti, v maju 07 in juniju 07, je bila statistično značilno najvišja vrba *S. viminalis*, statistično značilno najmanjši pa topol *P. regenerata*, kar se v fazi rasti spremeni. Topol *P. regenerata* postane v avgustu uspešnejši v rasti in je po višini na tretjem mestu, vrba *S. viminalis* pa začne rasti počasneje in je statistično značilno od avgusta dalje najmanjša. Vrbe so najhitreje pognale in bile višje v začetku rasti, v fazi rasti pa jih topoli v rasti v višino prehitijo. Od julija 07 dalje je najhitreje rasel v višino topol *P. panonica*, najpočasneje pa vrba *S. viminalis*. Različne rastline imajo optimum rasti pri različnih vrednostih okoljskih dejavnikov. Sklepamo, da na višino rastlin poleg okoljskih dejavnikov vpliva tudi visoka vsebnost kroma v tleh.

Preglednica 13 prikazuje linearni model hitrosti rasti lesnatih rastlin od maja 07 do septembra 2007 in od junija 08 do avgusta 08. Razvidno je, da so topoli v letu 07 rasli hitreje od vrba. Najhitreje je svoj prirastek povečeval topol *P. panonica*, sledita mu topola *P. maximowiczii* in *P. regenerata* ter nazadnje vrbi *S. purpurea* in *S. viminalis*. Slednja ima nizek določitveni koeficient, kar pomeni, da se podatki linearnega modela slabše ujemajo z dejanskimi, vendar nam njeno počasno rast pokaže tudi graf višine lesnatih rastlin. V letu 2008 še vedno najhitreje rastejo topoli, vendar topol *P. panonica* raste počasneje v primerjavi z letom 2006. Vrba *S. purpurea* ga je v hitrosti rasti že prehitela, vrba *S. viminalis* pa ga dohitela. Najhitreje je torej svoj prirastek povečeval topol *P. maximowiczii*, sledijo mu topol *P. regenerata*, vrba *S. purpurea*, topol *P. panonica* in vrba *S. viminalis*. Linearni model kaže tudi na vsakoletno povečevanje hitrosti rasti v višino pri vseh lesnatih vrstah.



Slika 13: Premer debla lesnatih rastlin v letu 2006, ($\overline{x} \pm SN$, n = 3 - 12)

Na Sliki 13 je prikazan prirastek v premeru debla lesnatih rastlin v letu 2006. Daleč največji prirast v premeru debla ima vrba *S. caprea*, sledijo ji topol *P. regenerata*, vrba *S. babilonica* in topol *P. panonica*. Pri zadnjem opazimo celo zmanjševanje prirasti v premeru debla.

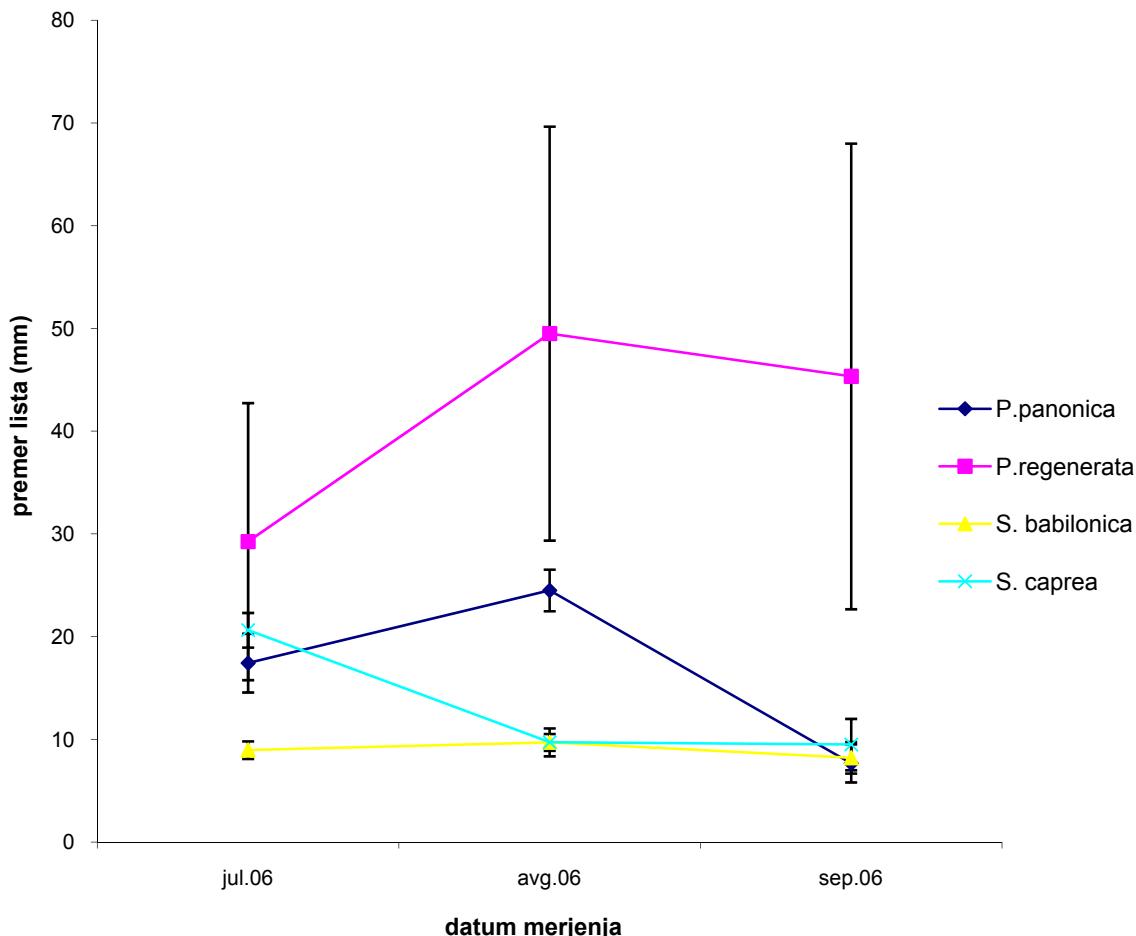


Slika 14: Premer debla lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008, (\pm SN, n = 7 - 32)

Preglednica 14: Model linearne regresije hitrosti rasti v premeru debla lesnatih rastlin v letu 2007 in 2008

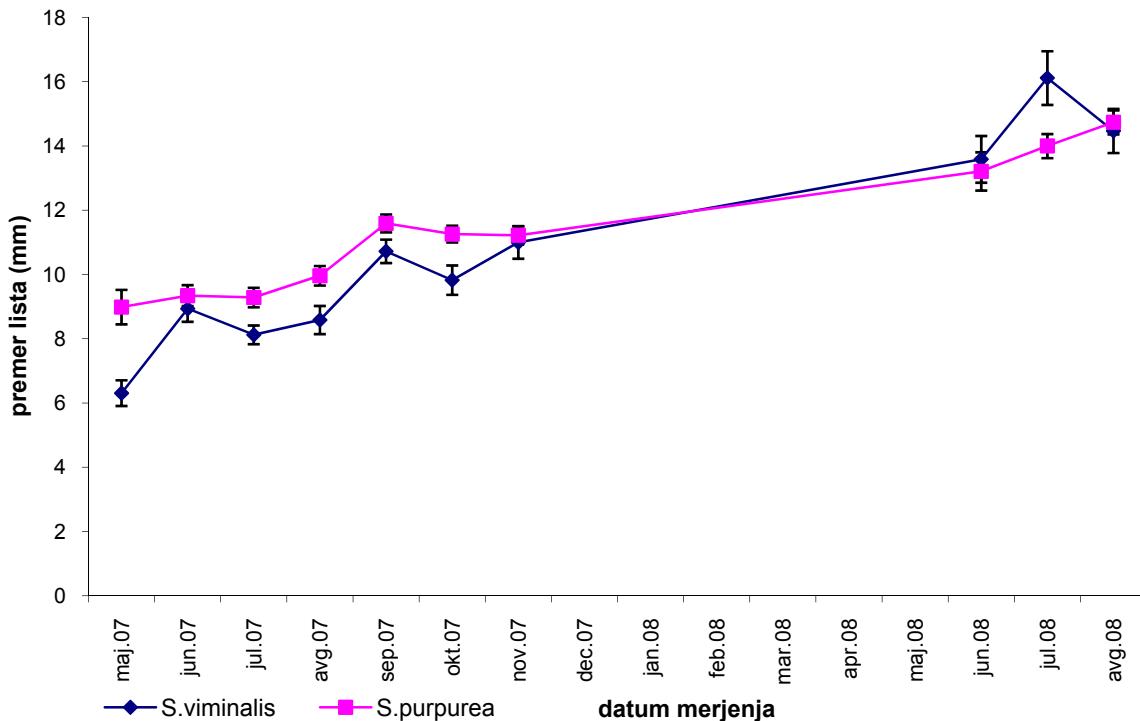
vrsta	do septembra 2007		2008	
	Y	R ²	y	R ²
<i>P. panonica</i>	1,5009x - 1930,2	0,9748	2,5121x - 3255,2	0,9986
<i>P. regenerata</i>	1,2567x - 1616,3	0,8164	3,6318x - 4713	0,9984
<i>P. maximowiczii</i>	1,862x - 2395,9	0,9902	7,3808x - 9590,3	0,9474
<i>S. viminalis</i>	0,7799x - 1002	0,8611	2,8471x - 3696,5	0,9967
<i>S. purpurea</i>	1,0376x - 1334,5	0,9893	3,3184x - 4309,1	0,9908

Na Sliki 14 je prikazan prirastek v premeru debla lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008. Topoli imajo večji prirastek v širini debla kot vrbe. V letu 2007 se statistično značilne razlike pokažejo šele v septembru. Največji premer debla v letu 2007 ima topol *P. maximowiczii*, sledijo topol *P. panonica*, topol *P. regenerata*, vrba *S. purpurea* in vrba *S. viminalis*. Tudi linearni model hitrosti rasti v premeru debla za leto 2007, v Preglednici 14, pokaže enak vrstni red v hitrosti povečevanja premora debla. V letu 2008 je podobna razvrstitev v velikosti premora debla in hitrosti povečevanja le-tega, s to razliko, da topol *P. regenerata* v avgustu zaradi hitrejše rasti prehiti topol *P. panonica*. Model linearne regresije kaže na vsakoletno povečevanje hitrosti rasti v premeru debla pri vseh vrstah rastlin.

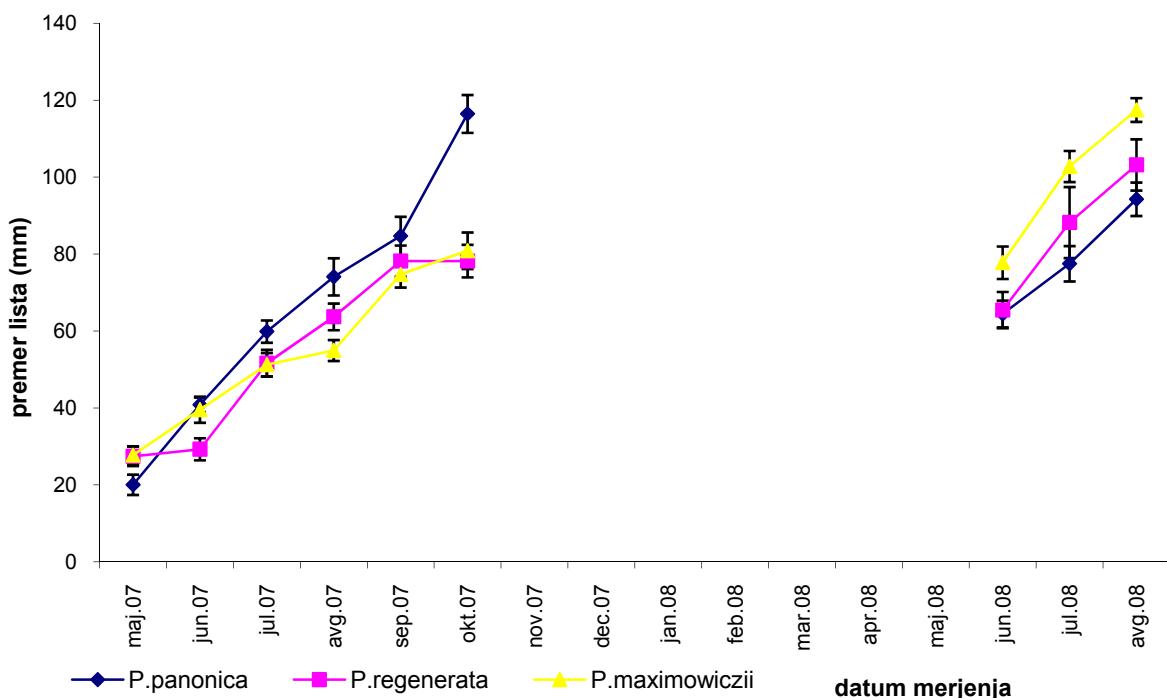


Slika 15: Premer lista lesnatih rastlin v letu 2006 ($\bar{x} \pm SN$, n = 2 - 12)

Slika 15 prikazuje premer lista lesnatih rastlin v letu 2006. Največji premer lista med topoli ima *P. panonica*, ki je avgusta izražena statistično značilno. Največji premer lista med vrbami ima v juliju 2006 *S. caprea*, v avgustu pa se velikosti lista obeh vrb bolj ali manj izenačita.



Slika 16: Premer lista vrb v letih 2007 in 2008 (Δ ± SN, n = 17 - 32)



Slika 17: Premer lista topolov v letih 2007 in 2008 (Δ ± SN, n = 9 - 32)

Preglednica 15: Model linearne regresije hitrosti rasti v premeru lista lesnatih rastlin v letu 2007 in 2008

vrsta	do septembra 2007		2008	
	y	R2	y	R2
P. panonica	6,254x - 20911	0,9829	14,908x - 19331	0,9949
P. regenerata	3,593x - 17484	0,9605	18,864x - 24475	0,9861
P. maximowiczii	10,931x - 14052	0,9636	19,846x - 25740	0,978
S. viminalis	0,8478x - 1085,1	0,7132	0,4412x - 559,69	0,1181
S. purpurea	0,5826x - 741,66	0,7778	0,7632x - 979,65	0,9996

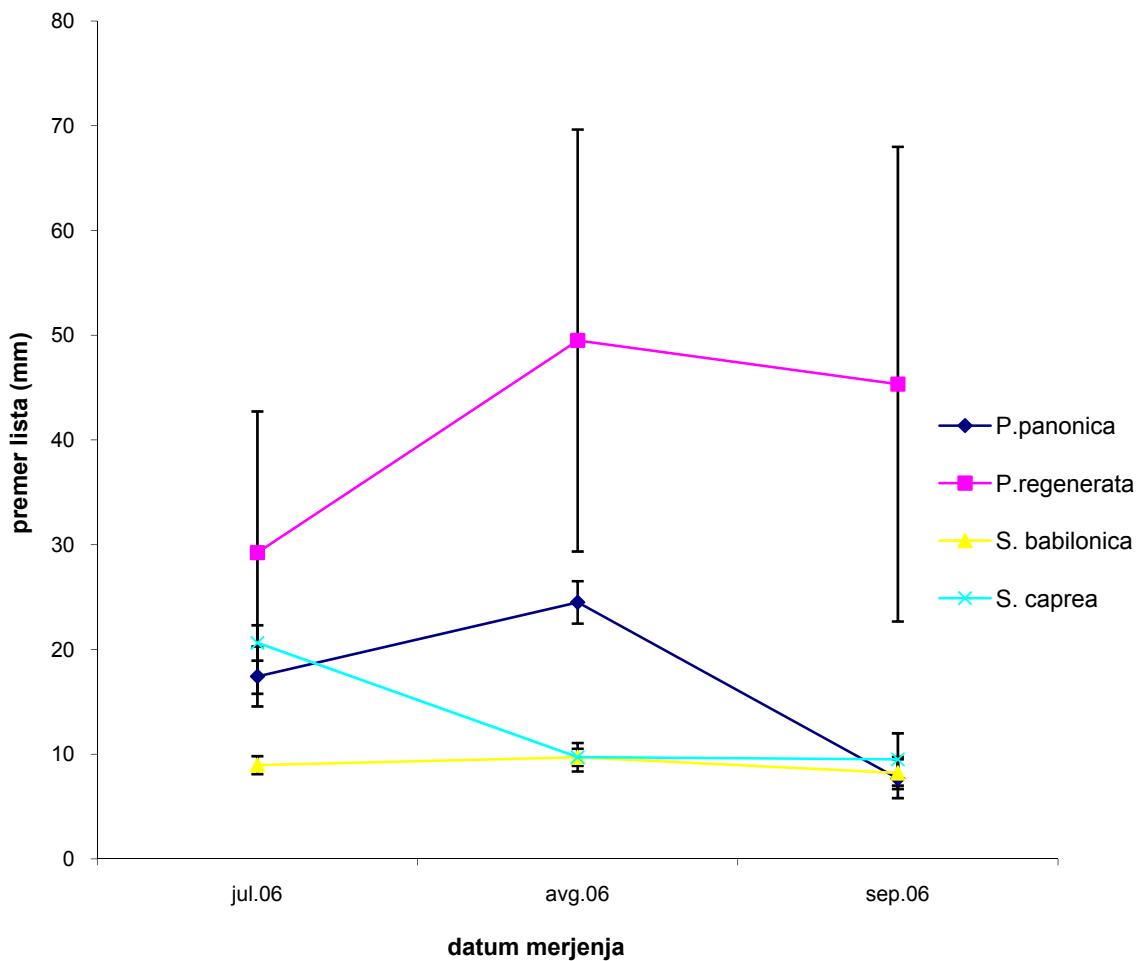
Slika 16 prikazuje premer listov vrba v letih 2007 in 2008. Ugotovili smo, da ima vrba *S. purpurea* v letu 2007 statistično značilno večje liste od vrbe *S. viminalis*, kar pa se v letu 2008 spremeni. Meseca junija in julija 08 ima vrba *S. viminalis* statistično značilno večje liste kot vrba *S. purpurea*. V mesecu avgustu 08 se velikosti listov vrba izenačita. Tudi iz linearnega modela vidimo, da v letu 2007 hitreje povečuje liste *S. viminalis*, v letu 2008 pa *S. purpurea*. Določitveni koeficient vrbe *S. viminalis* v letu 2008 je izredno slab.

V naravnih razmerah ima vrba *S. purpurea* (do 20 mm) širše liste kot vrba *S. viminalis* (do 10 mm). Poznana je tudi večja prilagodljivost vrbe *S. purpurea* na spremenljive okoljske dejavnike v primerjavi z vrbo *S. viminalis* (Brus, 2004). Posledično sklepamo, da okoljski dejavniki in visoka vsebnost kroma v tleh nista vplivala na nihanja širine listov.

Predvidevamo, da je v letu 2008 prišlo do napak pri meritvah. To potrjuje tudi nizek določitveni koeficient linearnega modela v letu 2008 in rezultati širine listov, ki so pri *S. viminalis* v letu 2008 višji od dejansko možnih v naravi.

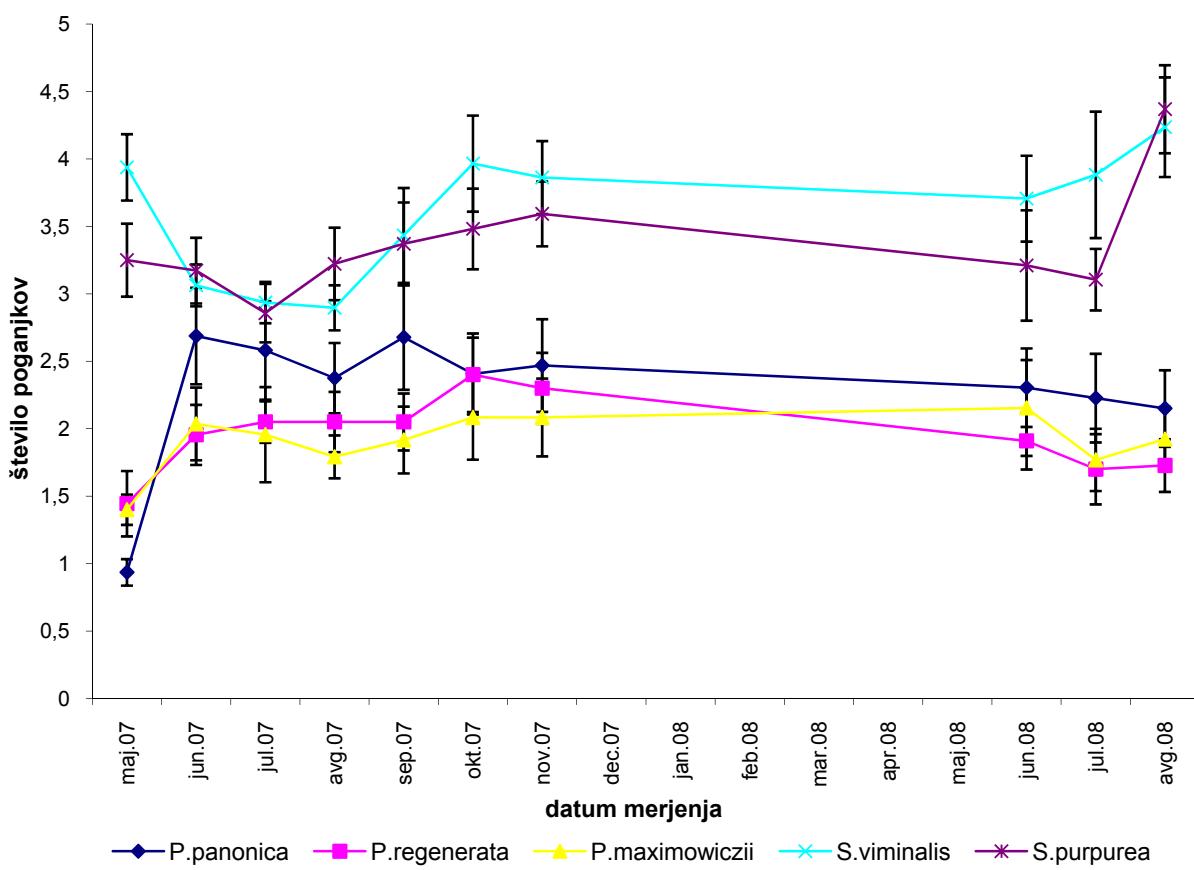
Slika 17 prikazuje premer listov topolov v letih 2007 in 2008. Topol *P. panonica* ima v nasprotju z letom 2006 v letu 2007 statistično značilno največje liste. Razlika v premeru listov topola *P. regenerata* in topola *P. maximowiczii* ni statistično značilna, razen v mesecu juniju 07, ko ima širše liste topol *P. maximowiczii*, in v mesecu avgustu, ko ima večji premer lista topol *P. regenerata*. Linearni model hitrosti rasti pa kaže, da najhitreje povečuje liste topol *P. maximowiczii*, čeprav nima najširših listov. Sledi mu topol *P. panonica* in nazadnje topol *P. regenerata*. V letu 2008 je stanje popolnoma drugačno.

Statistično značilno najširše liste ima topol *P. maximowiczii*, sledi topol *P. regenerata* in nazadnje topol *P. panonica*. Razlike med zadnjima dvema topoloma niso statistično značilne. Linearni model regresije kaže na veliko večje povečevanje listov kot v preteklem letu. Še vedno najhitreje povečuje liste topol *P. maximowiczii*, ki pa mu tesno sledi topol *P. regenerata*. Hitrost rasti listov topola *P. panonica* pa je z razliko od leta 2007 najmanjša. Linearni model hitrosti rasti kaže tudi vsakoletni trend povečevanja hitrosti rasti pri topolu *P. panonica*. Topol *P. regenerata* pa je imel najhitrejšo rast listov v letu 2006, v letu 2007 se drastično zmanjša, v letu 2008 pa se približa začetni hitrosti povečevanja listov.



Slika 18: Število poganjkov lesnatih vrst v letu 2006 ($\bar{x} \pm SN$, n = 3 - 12)

Na Sliki 18 je prikazano število poganjkov lesnatih rastlin v letu 2006. Statistično značilno ima največ poganjkov vrba *S. babilonica*, katerih število pa z meseci upada. Po številu poganjkov sledi vrba *S. caprea*. Topola *P. regenerata* in *P. panonica* imata enako število poganjkov, ki se v fazi rasti ne spreminja. Razlike med zadnjimi tremi lesnatimi vrstami niso statistično značilne.



Slika 19: Število poganjkov lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008 (\pm SN, n = 9 - 32)

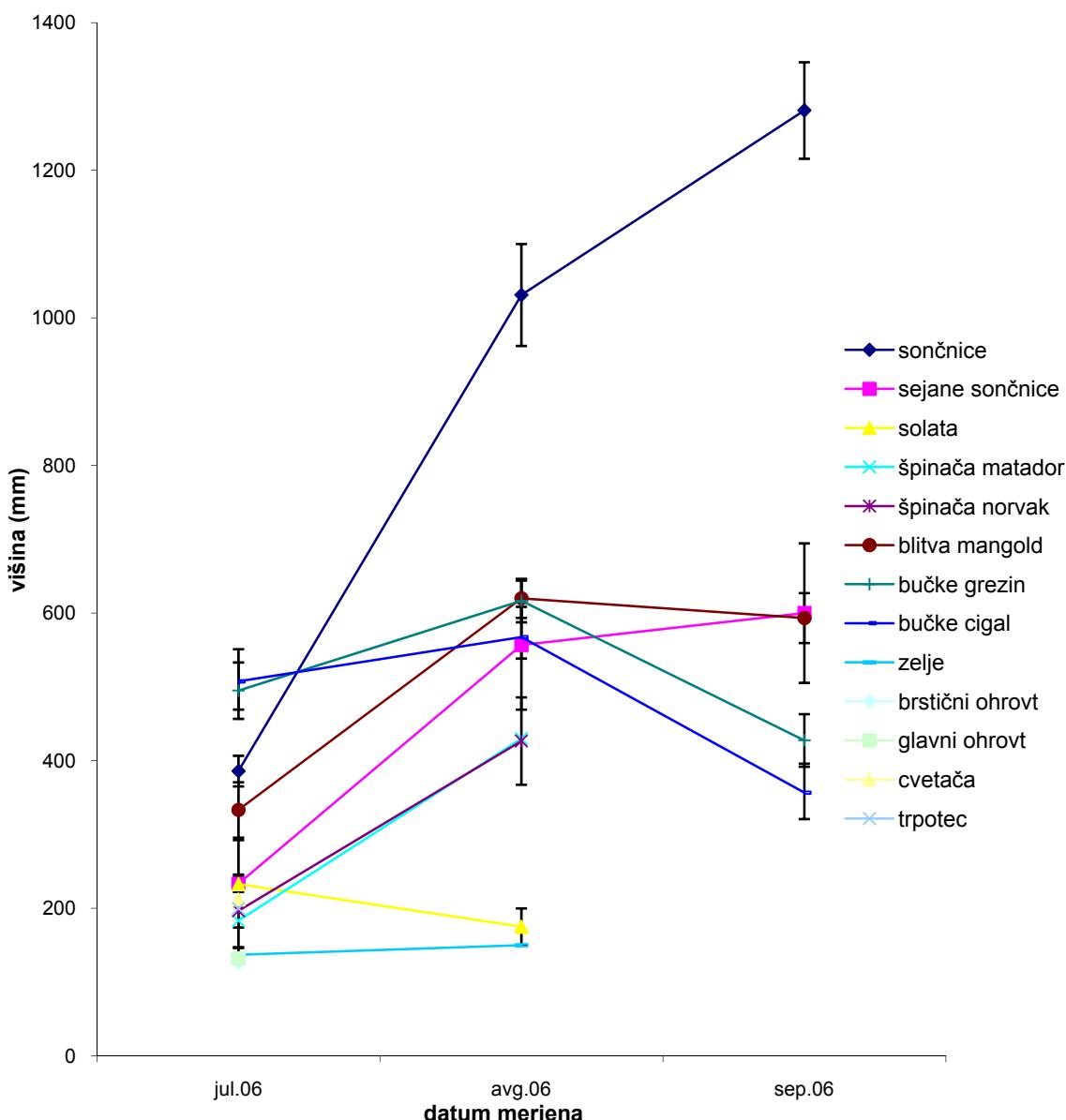
Preglednica 16: Model linearne regresije hitrosti povečevanja števila poganjkov lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008

vrsta	do septembra 2007		2008	
	y	R ²	y	R ²
<i>P. panonica</i>	0,3171x - 406,86	0,4516	-0,0772x + 102,71	0,9998
<i>P. regenerata</i>	0,1307x - 166,64	0,6151	-0,0909x + 120,14	0,6397
<i>P. maximowiczii</i>	0,0789x - 99,998	0,2475	-0,1154x + 152,18	0,3553
<i>S. viminalis</i>	-0,1174x + 154,74	0,1802	0,2647x - 340,71	0,9643
<i>S. purpurea</i>	0,0291x - 34,306	0,0574	0,5789x - 750,23	0,6823

Na Sliki 19 je prikazano število poganjkov lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008. Vrbe imajo v obeh letih sicer statistično značilno večje število poganjkov od topolov, kar pa je povsem naravno, zato primerjava med vrbami in topoli v številu poganjkov ni možna.

V začetku rasti leta 2007 je imela večje število poganjkov vrba *S. viminalis*, v fazi rasti jo prehititi vrba *S. purpurea*, v fazi umirjanja in v letu 2008 pa ima več poganjkov zopet vrba *S. viminalis*. Razlike med vrbama niso statistično značilne. Med topoli ima v obeh letih največ poganjkov topol *P. panonica*. V začetku rasti med topolom *P. regenerata* in topolom *P. maximowiczii* ni razlike, v fazi rasti v letu 2007 ima več poganjkov topol *P. regenerata*, v letu 2008 pa ima večje število poganjkov topol *P. maximowiczii*. Razlike med topoli niso statistično značilne.

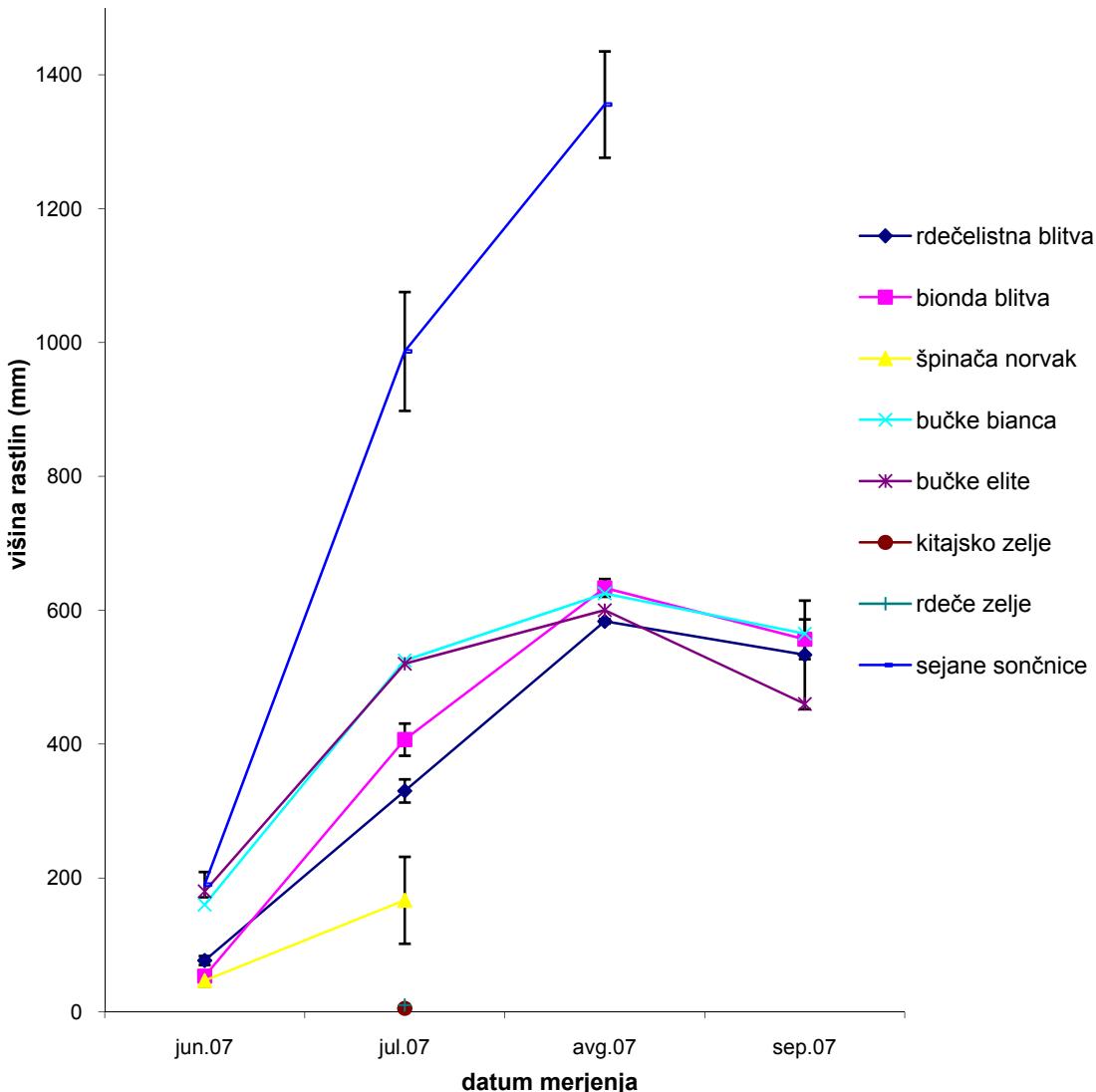
4.1.2.2 Rastni parametri zelnatih rastlin



Slika 20: Višina zelnatih rastlin v letu 2006

Na Sliki 20 je prikazana višina zelnatih rastlin v letu 2006. Posadili smo 12 vrst rastlin, poleg tega pa smo sončnice sadili na dva načina: sejali seme in sadili mladike. V začetku rasti so najvišje bučke 'Cigal' in 'Grezin', med katerimi ni statistično značilnih razlik. Sledijo sončnice, blitva 'Mangold', sejane sončnice, solata, cvetača, trpotec, špinača 'Norvak', špinača 'Matador', zelje, glavni in brstični ohrov. V fazi rasti so statistično značilno najvišje sončnice, ki smo jih sadili kot mladike. Sončnicam sledijo blitva 'Mangold' in bučke 'Grezin', med katerimi ni statistično značilnih razlik. Sledijo bučke 'Cigal' in sejane sončnice, špinači 'Matador' in 'Norvak' ter solata in zelje. Trpotec, cvetača, brstični in glavni ohrov so propadli že pred avgustom. V fazi umirjanja rasti so statistično

značilno najvišje sončnice, sledijo sejane sončnice in blitva 'Mangold' ter bučke 'Grezin' in 'Cigal'. Ostale vrste vrtnin so propadle pred septembrom.



Slika 21: Višina zelnatih rastlin v letu 2007

Na Sliki 21 je prikazana višina zelnatih rastlin v letu 2007. Posadili smo 8 vrst zelnatih rastlin. V fazi rasti so statistično značilno najvišje sejane sončnice. Druge po velikosti so bučke 'Bianca' in 'Elite', med katerimi ni statistično značilnih razlik. S statistično značilno razliko sledijo blitva 'Bionda', rdečelistna blitva in špinača 'Norvak'. Rdeče in kitajsko zelje sta uspevala le do julija. V fazi umirjanja rasti so najvišje bučke 'Bianca', sledijo jim 'Bionda' in rdečelistna blitva ter bučke 'Elite'. Med njimi ni statistično značilnih razlik. Sejane sončnice so do septembra že propadle.

Rozman, R. Fitoremediacija sedimentov in drugih kontaminiranih zemljin.

Dipl.delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo, 2008

4.1.2.3 Fluorescencija klorofila *a* lesnatih rastlin

Preglednica 17: Fluorescencija klorofila *a* lesnatih vrst rastlin v letih 2007 in 2008

vrsta	povpreč. Fm/Fv ± SN, (n=5-10)		t test
	2007	2008	
<i>P. panonica</i>	0,789±0,015	0,828±0,007	0,642
<i>P. regenerata</i>	0,781±0,008	0,811±0,008	0,861
<i>P. maximowiczii</i>	0,784±0,012	0,789±0,02	0,996
<i>S. viminalis</i>	0,789±0,008	0,833±0,012	0,674
<i>S. purpurea</i>	0,773±0,011	0,787±0,021	0,422

V Preglednici 17 je prikazana fluorescencija klorofila *a* s standardno napako lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008. Fluorescencija klorofila *a* (parameter Fm/Fv) je zelo uporaben parameter za oceno fiziološkega stanja rastlin. Vrednosti Fm/Fv pod 0,83 nakazujejo, da je rastlina pod stresom, na kar pa ne vpliva zgolj visoka koncentracija kroma tleh, temveč tudi ostali okoljski dejavniki. Fluorescencija klorofila *a* je torej dodaten kazalec primernosti posameznih rastlinskih vrst za uporabo v fitoremediacijske namene. V letu 2007 so bila vse lesnate rastline v stresu, najbolj pa vrba *S. purpurea*. V letu 2008 se je stres zmanjšal pri vseh vrstah, kljub temu je vrba *S. purpurea* še vedno najbolj prizadeta. Topol *P. panonica* in vrba *S. viminalis* so vrednosti v mejah vitalnosti.

4.1.2.4 Fluorescencija klorofila *a* zelnatih rastlin

Preglednica 18: Fluorescencija klorofila *a* zelnatih rastlin v letih 2006 in 2007

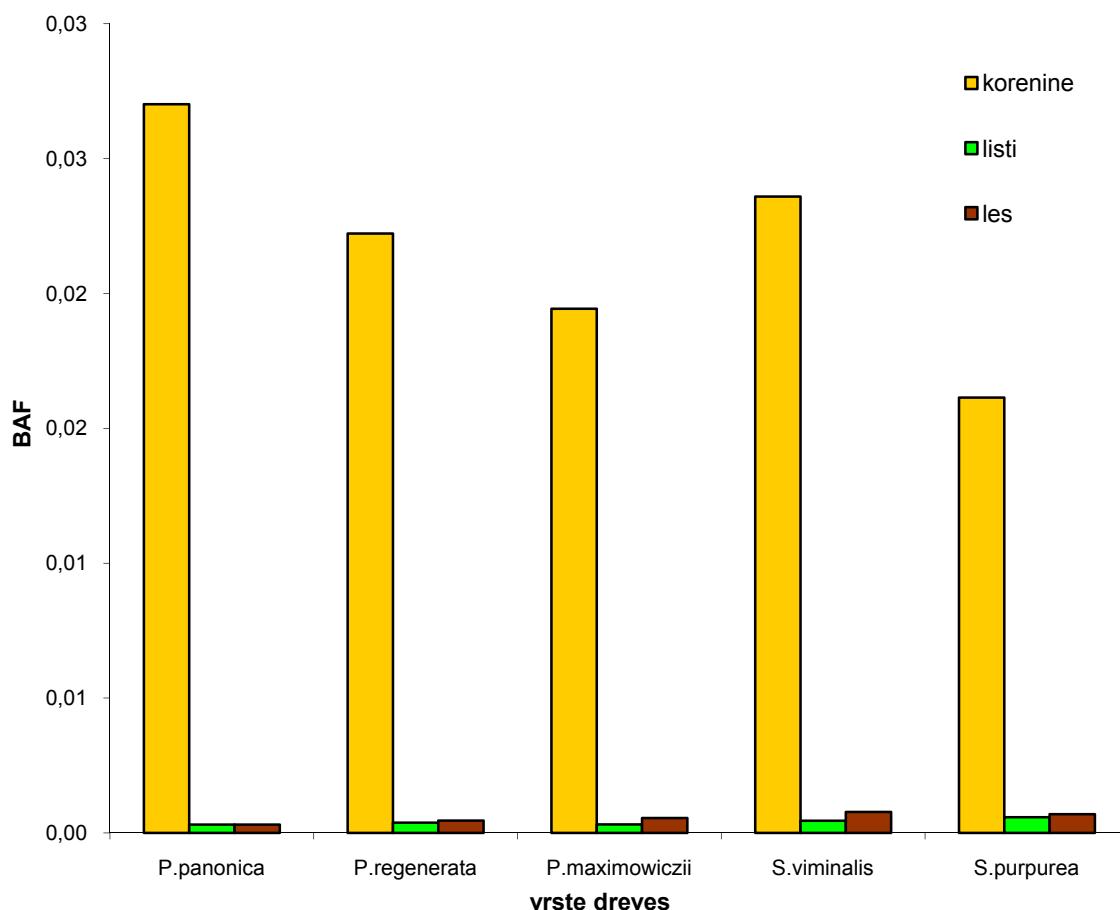
	povpreč. Fm/Fv ± SN (n=3)	
vrsta	2006	2007
Brstični ohrovtt	0,818±0,015	
Glavni ohrovtt	0,811±0,011	
Zelje	0,823±0,01	
Cvetača	0,810±0,07	
Sončnice	0,777±0,014	0,843±0,013
Bučke Cigal	0,700±0,022	
Bučke Grezin	0,735±0,009	
Bučke Elite F1		0,72±0,026
Bučke Bianca		0,746±0,018
Blitva Mangold	0,743±0,051	
Blitva Rhubarb chard		0,849±0,003
Blitva Bionda		0,824±0,016
Špinaca Norvak	0,849±0,003	
Špinaca Matador	0,824±0,016	
Trpotec	0,849±0,003	
Lubenice	0,824±0,016	

V Preglednici 18 je prikazana takojšna fluorescencija klorofila *a* s standardno napako zelnatih rastlinskih vrst iz odlagališča Rakovnik: trinajst zelnatih rastlin iz leta 2006 in pet zelnatih rastlin iz leta 2007. Ugotovili smo, da so v letu 2006 vse zelnate rastline, razen špinace 'Norvak' in trpotca, v stresu. Najbolj prizadete so bučke 'Cigal'. V letu 2007 so prav

tako v stresu bučke in ena izmed dveh testiranih vrst blitve. Druga vrsta blitve je vitalna. Z razliko od leta 2006 so v letu 2007 vitalne tudi sončnice.

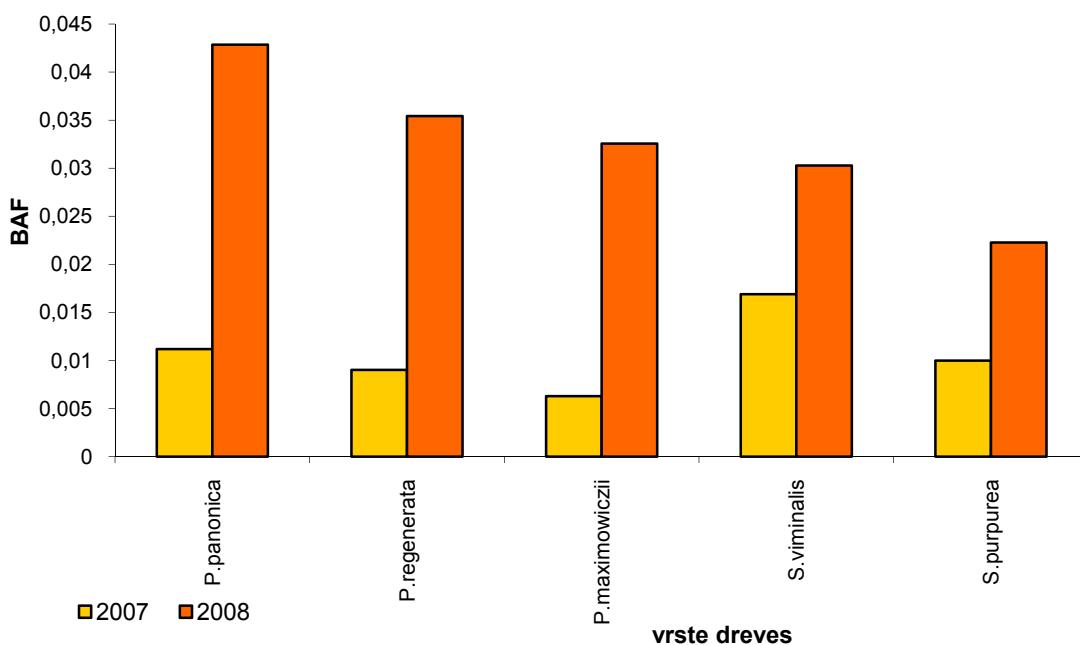
4.1.3 Vsebnost kroma

4.1.3.1 Bioakumulacijski faktor korenin, lesa in listov lesnatih rastlin v letih 2007 in 2008



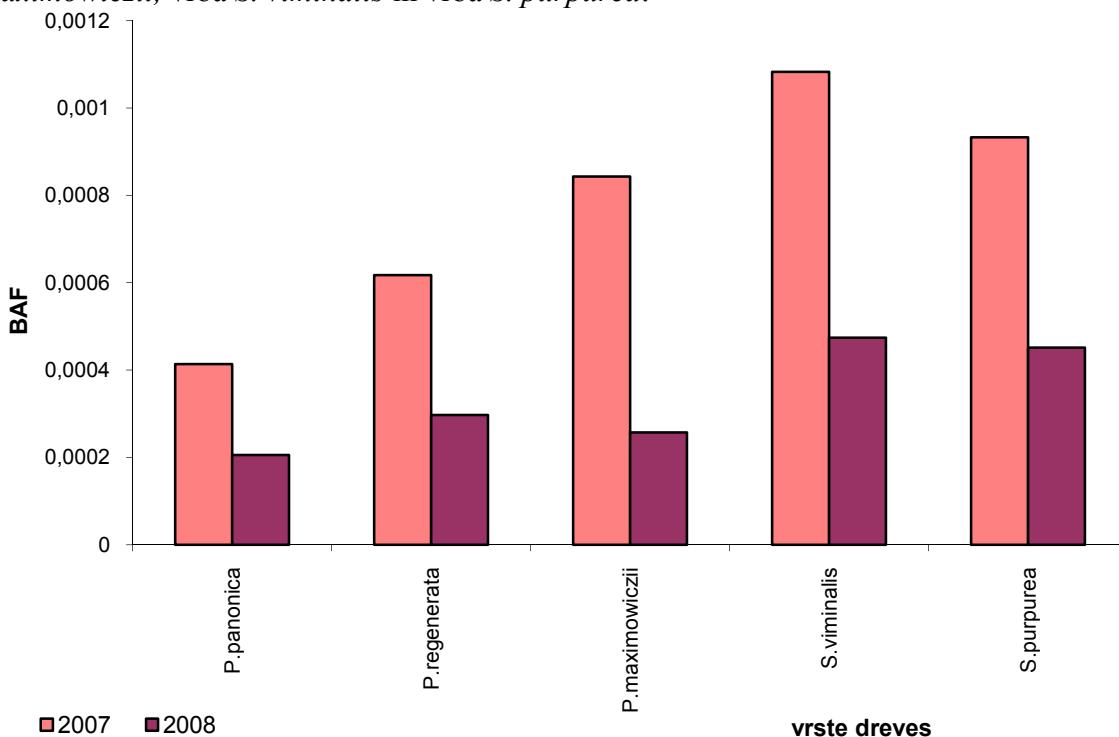
Slika 22: Povprečni bioakumulacijski faktor korenin, listov in lesa lesnatih vrst

Na Sliki 22 je prikazan povprečni bioakumulacijski faktor (BAF = vsebnost kroma v rastlinskih tkivih / vsebnost kroma v substratu) v koreninah, listih in lesu lesnatih vrst. Izračunan je kot povprečje let 2007 in 2008. Lesnate vrste največ kroma kopijojo v koreninah, prenos v nadzemne dele rastlin je minimalen. Največji BAF v koreninah ima topol *P. panonica*, sledijo mu vrba *S. viminalis*, topol *P. regenerata*, topol *P. maximowiczii* in vrba *S. purpurea*.



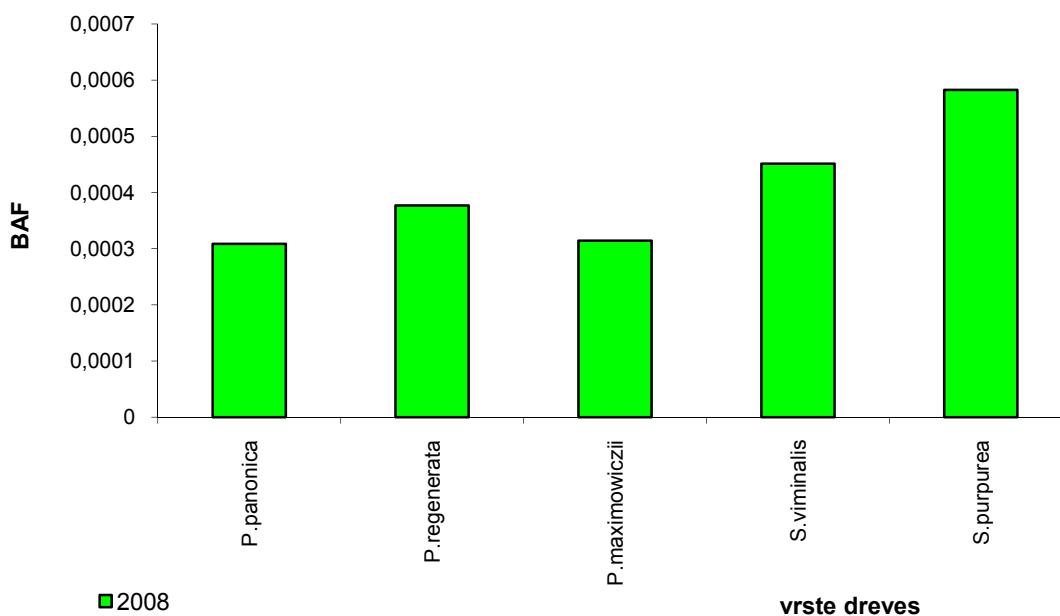
Slika 23: BAF v koreninah lesnatih vrst v letih 2007 in 2008

Na Sliki 23 je prikazan BAF v koreninah lesnatih vrst v letih 2007 in 2008. V letu 2007 je največ kroma v koreninah kopičila vrba *S. viminalis*, sledijo ji topol *P. panonica*, vrba *S. purpurea*, topol *P. regenerata* in topol *P. maximowiczii*. Leta 2008 je bil BAF večji v primerjavi s prejšnjim letom. V letu 2008 imajo topoli večji BAF v koreninah kot vrbe. Največji BAF v korenine je imel topol *P. panonica*, sledijo topol *P. regenerata*, topol *P. maximowiczii*, vrba *S. viminalis* in vrba *S. purpurea*.



Slika 24: BAF v lesu lesnatih vrst v letih 2007 in 2008

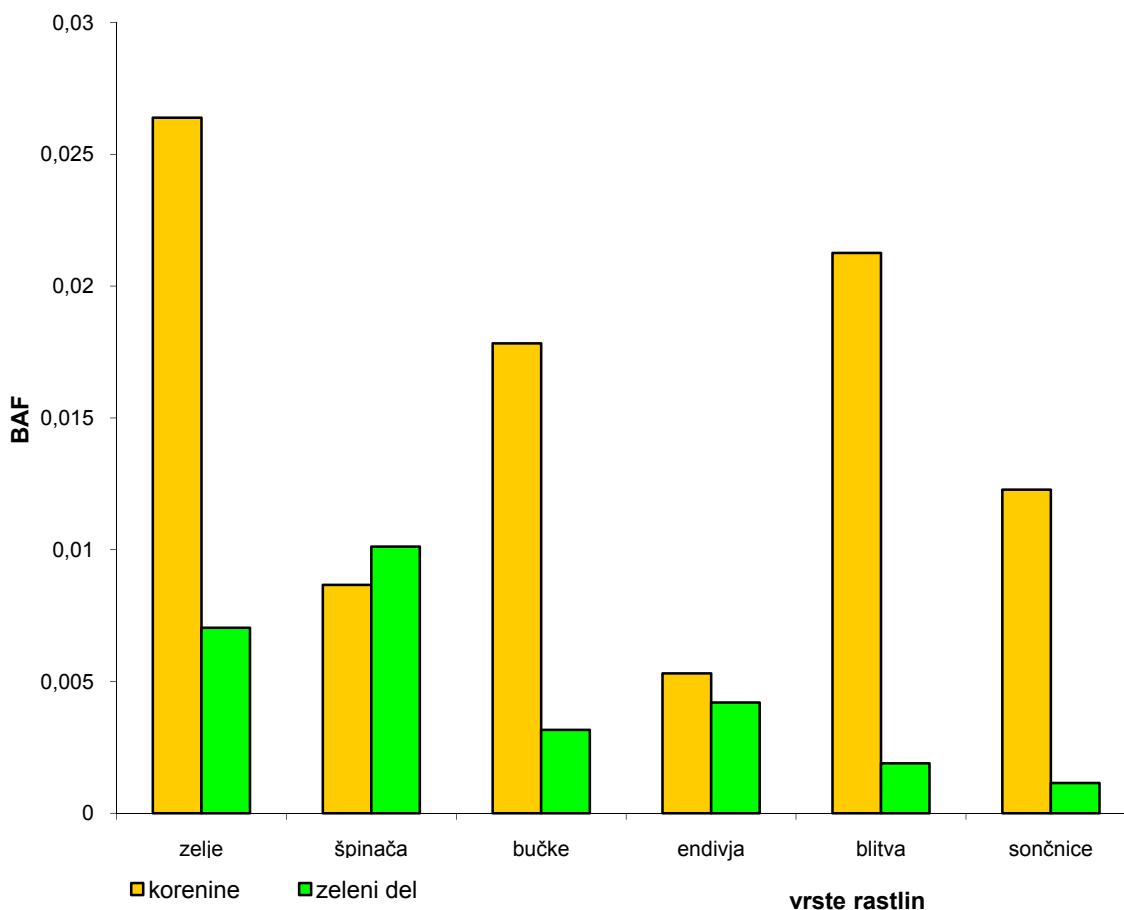
Na Sliki 24 je prikazan BAF v lesu lesnatih vrst v letih 2007 in 2008. V letu 2007 je bil BAF v lesu višji v primerjavi z letom 2008. Vrbi tako v letu 2007 kot v letu 2008 v lesu kopičita več kroma kot topoli. V letu 2007 je imela najvišji BAF v koreninah vrba *S. viminalis*, sledijo vrba *S. purpurea*, topol *P. maximowiczii*, topol *P. regenerata*, topol *P. panonica*. V letu 2008 ima podobno kot prejšnje leto najvišji BAF v koreninah vrba *S. viminalis*, sledijo vrba *S. purpurea*, topol *P. regenerata*, topol *P. maximowiczii* in topol *P. panonica*.



Slika 25: BAF v listih lesnatih vrst v letu 2008

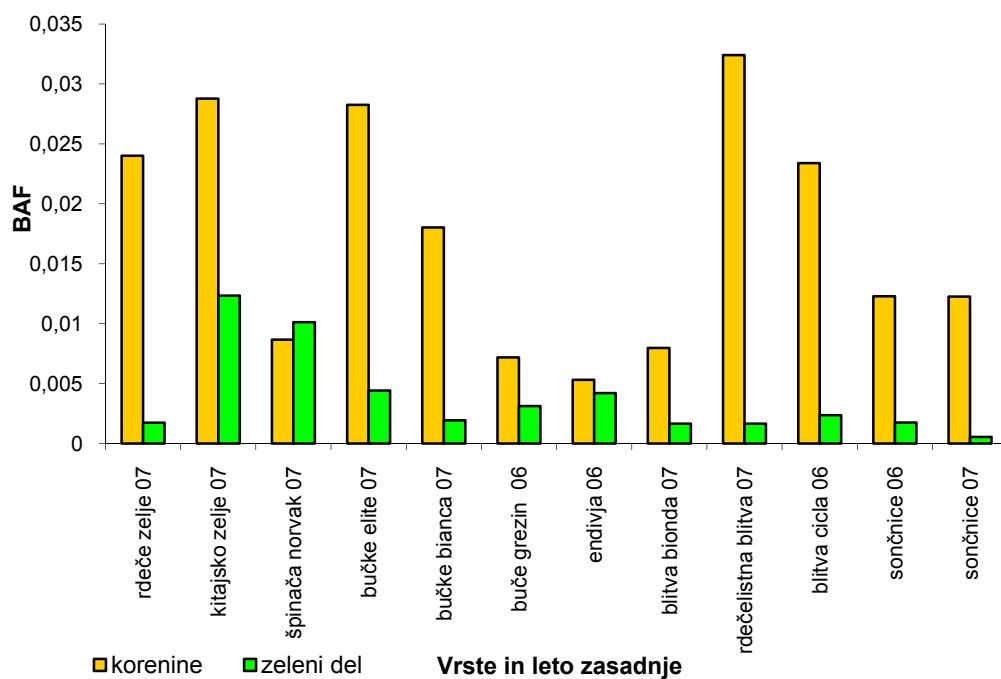
Na Sliki 25 je prikazan BAF v listih lesnatih vrst v letu 2008. Vrbe kopičijo več kroma v listih kot topoli. Največ kroma v liste je prizvela vrba *S. purpurea*, sledijo vrba *S. viminalis*, topol *P. regenerata*, topol *P. maximowiczii* in topol *P. panonica*.

4.1.3.2 Bioakumulacijski faktor kroma v koreninah in nadzemnih delih zelnatih rastlin v letih 2006 in 2007



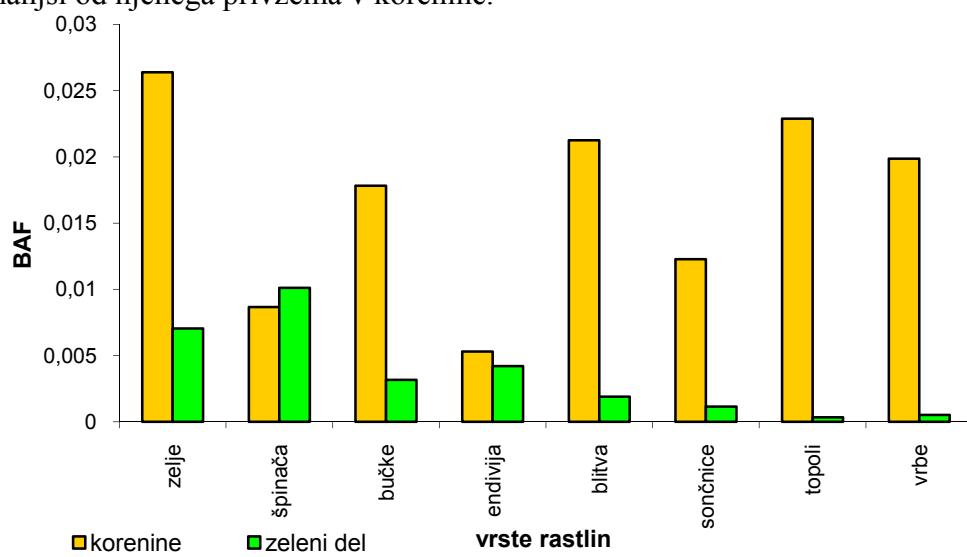
Slika 26: Povprečni BAF zelnatih vrst rastlin na odlagališču

Na Sliki 26 je prikazan povprečni BAF zelnatih vrst rastlin. Povprečje je izračunano za posamezno vrsto iz vseh podvrst in iz vseh let. Ugotovili smo, da je pri vseh preskušanih vrstah privzem kroma v korenine večji kot privzem v zelnate dele, razen pri špinači. Največji privzem kroma v korenine ima zelje, sledijo blitva, bučke, sončnice, špinača in endivija. Nekaj kroma se pri vseh vrtninah kopiči tudi v zelnatih delih. Špinača je edina preskušana vrsta, ki ima večji privzem kroma v zelnati del kot v korenine. Ob izračunanem povprečju ima špinača tudi največji privzem v zelnate dele, sledijo ji zelje, endivija, bučke, blitva in sončnice.



Slika 27: BAF zelnatih vrst in podvrst rastlin na Rakovniku

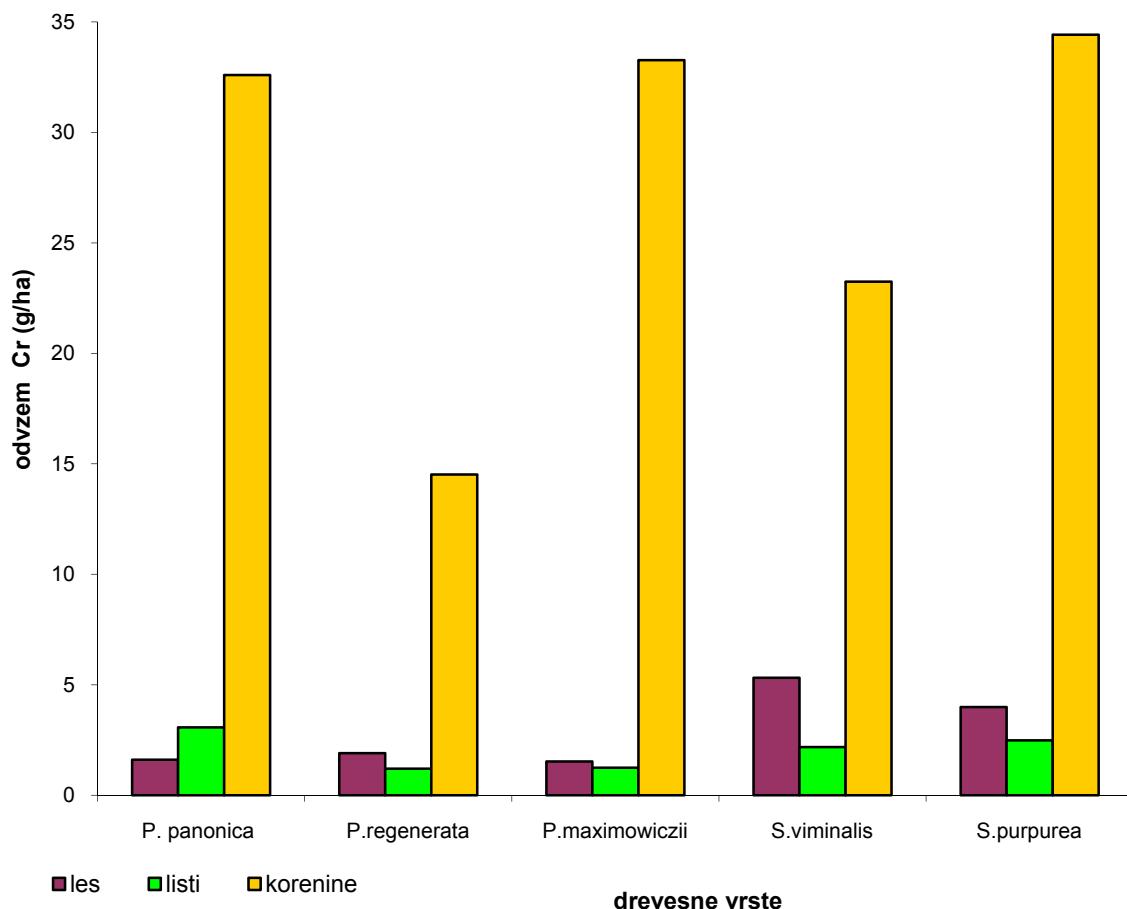
Na Sliki 27 so prikazani bioakumulacijski faktorji korenin in zelnatih delov vrtnin na odlagališču Rakovnik v letih 2006 in 2007. V letu 2006 imamo podatke o privzem kroma za 4 vrste rastlin, v letu 2007 pa za 8. Ugotovili smo, da je pri vseh preskušanih vrstah privzem kroma v korenine večji kot privzem v zelnate dele, razen pri špinači. Največji privzem kroma v korenine ima rdečelistna blitva, velik je tudi pri kitajskem zelju, bučkah 'Elite', rdečem zelju, blitvi 'Cicli' in bučkah 'Bianca'. Nekaj kroma se pri vseh vrtninah kopici tudi v zelnatih delih. Špinača je edina rastlina, kjer je privzem kroma v liste večji od privzema kroma v korenine. Kitajsko zelje ima največji privzem kroma v zelnate dele od testiranih vrst na odlagališču, večji je tudi od špinače. Endivijin privzem kroma v liste je le malo manjši od njenega privzema v korenine.



Slika 28: Primerjava BAF zelnatih in lesnatih vrst iz odlagališča Rakovnik

(n zelje=2, n špinača= 1, n bučke=3, n endivija=1, n blitva=3, n sončnice=2, n topoli=3, n vrbe= 2)

Na Sliki 28 je prikazana primerjava BAF zelnatih rastlin in rastlin na odlagališču Rakovnik. Vse preskušane rastline kopičijo krom predvsem v koreninah. Ugotovili smo da, so BAF v korenine lesnatih vrst in zelnatih rastlin primerljive. Zelje ima celo večji BAF v korenine od topolov in vrb, blitva pa večjega od vrb. BAF v listih pa je pri lesnatih vrstah mnogo manjši v primerjavi z zelnatimi rastlinami.



Slika 29: Teoretični privzem kroma na hektar lesnatih vrst v letu 2008

Na Sliki 29 je prikazan izračunani teoretični privzem kroma na hektar rastlinskih vrst v letu 2008. Izračunan je bil iz biomase in vsebnosti kroma posameznih delov rastlin na enem testnem polju. Največji teoretični privzem kroma je bil s koreninami, nekaj pa tudi z lesom in listi. Največji teoretični privzem na hektar s koreninami ima vrba *S. purpurea*, sledijo topol *P. maximowiczii*, topol *P. panonica*, vrba *S. viminalis* in topol *P. regenerata*. Vrbi imata večji teoretični privzem kroma na hektar z lesom kot topoli, in sicer ima največjega vrba *S. viminalis*. Največji teoretični privzem na hektar z listi ima topol *P. panonica*, sledijo vrba *S. purpurea*, vrba *S. viminalis*, topol *P. maximowiczii* in topol *P. regenerata*.

4.2 POSKUS V NADZOROVANIH RAZMERAH V RASTLINJAKU

Rezultati kaljivosti so predstavljeni v Preglednici 19. Fluorescenza klorofila *a* je prikazana v Preglednici 01. V Slikah 30 - 36 je podana vsebnost kroma. V Sliki 35 je prikazan izračunan teoretični privzem kroma nekaterih rastlin na hektar. Oznaka IUV pomeni vzorec rastlin, ki so rasle v kompostu iz odlagališča Rakovnik, K pa vzorec rastlin, ki so rasle v kontrolnem kompostu.

4.2.1 Kaljivost

Preglednica 19: Kaljivost rastlin v letih 2006 in 2007

Leto		2006		2007		t test med leti
		Rastlina	Substrat	% kaljivosti	t test substrat	
blitva	IUV	215% ¹		178%	0,0245	0,1996
	Kontrolni	275%		115%		0,0096
repa	IUV	95%		90%	1	0,3559
	Kontrolni	95%		90%		0,6985
zelje	IUV	95%		63%	0,2164	0,0445
	Kontrolni	95%		90%		0,4226
kolerabica	IUV	88%		90%	0,1778	0,7502
	Kontrolni	80%		100%		0,2724
ohrovt	IUV	70%		65%	0,8042	0,7854
	Kontrolni	80%		60%		0,4226
sončnice	IUV	85%		53%	0,2436	0,0113
	Kontrolni	75%		70%		0,4226
oves	IUV	45%		43%	0,4941	0,8701
	Kontrolni	30%		30%		1
špinača	IUV	83%		55%	0,8216	0,0871
	Kontrolni	85%		60%		0,1548
endivija	IUV	40%		23%	0,0612	0,0106
	Kontrolni	50%		35%		0,5425

V Preglednici 19 je podana kaljivost 9 vrst rastlin posejanih v letih 2006 in 2007. Največjo stopnjo kaljivosti v letu 2006 imata repa in zelje, sledijo koleraba, sončnice, špinača, ohrovt, oves in endivija. Pri blitvi, kolerabi, ohrovtu, špinači in endiviji je kaljivost v kontrolnem substratu večja kot v IUV substratu, vendar je razlika med substratoma statistično značilna le za blitvo ($p<0,05$). Pri repi in zelju ni razlike v kaljivosti med kontrolnim in IUV substratom. Oves in sončnice pa so imeli v kontrolnem substratu celo manjšo kaljivost napram IUV substratu, razlika ni statistično značilna.

V letu 2007 sta najbolje vzkalili repa in koleraba, sledijo ohrovt, zelje, špinača, sončnice, oves in endivija. Pri zelju, kolerabi, sončnicah, špinači in endiviji je bila kaljivost v kontrolnem substratu večja kot v IUV substratu, a razlika ni statistično značilna. Repa ima

¹ Plodov blitve pred setvijo nismo razstavili, zato je podatek o kaljivosti uporaben le za relativno primerjavo!

podobno kot v letu 2006 enako kaljivost tako v kontrolnem kot IUV substratu. Blitva, ohrovit in oves so imeli v kontrolnem substratu manjšo kaljivost kot IUV substratu, a tudi tu razlika ni statistično značilna. V letu 2007 je bila kaljivost na splošno nižja kot v letu 2006. Blitva, zelje, sončnice in endivija so v letu 2007 v substratu iz odlagališča kalile statistično značilno slabše kot v letu 2006. V letu 2007 je bolje kot v prejšnjem letu kalila le koleraba, a razlike niso statistično značilne.

4.2.2 Fluorescenza klorofila *a*

Preglednica 20: Fluorescenza klorofila *a* v letih 2006 in 2007

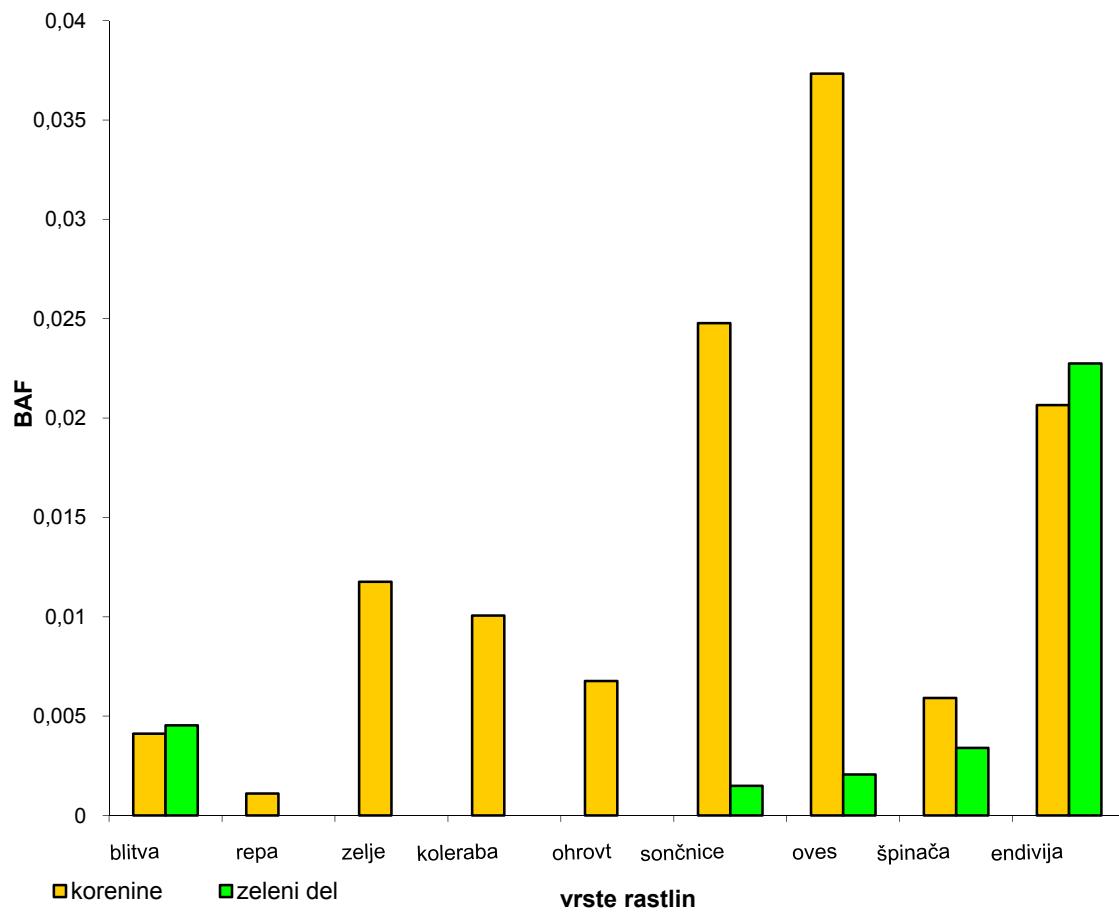
Rastlina	Leto	2006		2007		
		Substrat	povpr. Fv/Fm ± SN	t-test substrat	povpr. Fv/Fm ± SN	
blitva	IUV	0,794±0,019	0,0372	0,85±0,005	0,0274	0,0209
	Kontrolni	0,841±0,002		0,865±0,003		0,0004
repa	IUV	0,83±0,005	0,0138	0,86±0,004	0,8979	0,0015
	Kontrolni	0,849±0,003		0,861±0,005		0,0690
zelje	IUV	0,832±0,006	0,5850	0,856±0,002	0,0017	0,0034
	Kontrolni	0,837±0,008		0,867±0,002		0,0048
kolerabica	IUV	0,817±0,004	0,0383	0,855±0,004	0,1323	0,0001
	Kontrolni	0,839±0,008		0,863±0,003		0,0156
ohrovit	IUV	0,783±0,009	0,0036	0,838±0,007	1,0000	0,0015
	Kontrolni	0,824±0,005		0,838±0,008		0,1305
sončnice	IUV	0,81±0,005	0,0000	0,795±0,023	0,0055	0,4997
	Kontrolni	0,859±0,004		0,0876±0,002		0,0045
oves	IUV	0,778±0,006	0,0061	0,585±0,042	0,0005	0,0020
	Kontrolni	0,802±0,003		0,823±0,003		0,0006
špinača	IUV	0,81±0,007	0,0366	0,817±0,015	0,0570	0,6718
	Kontrolni	0,83±0,005		0,849±0,002		0,0047
endivija	IUV	0,784±0,018	0,5576	0,749±0,018	0,0002	0,2060
	Kontrolni	0,798±0,012		0,864±0,002		0,0007

V Preglednici 20 je prikazana fluorescenza klorofila *a* v letih 2006 in 2007. V letu 2006 vse preskušane rastline, razen zelja in repe, izkazujejo upad parametra Fv/Fm v IUV substratu. Sončnice, ohrovit in oves izkazujejo močno statistično značilen ($p<0,01$), špinača, blitva in koleraba izkazujejo šibkejši, a še statistično značilen ($p<0,05$) upad Fv/Fm v IUV substratu. Repa ima statistično značilen upad Fv/Fm v IUV substratu napram kontrolnemu, čeprav ostaja v mejah vitalnosti. Parameter Fv/Fm je zmanjšan tudi pri ohrovitu, ovsu in endiviji v kontrolnem substratu.

V letu 2007 imajo pod mejo vitalnosti zmanjšano razmerje Fv/Fm v IUV substratu le sončnice, špinača, endivija in oves. Slednji ima zmanjšano takojšnjo fluorescenco klorofila *a* tudi v kontrolnem substratu. Pri vseh omenjenih vrstah, razen pri špinači, so razlike med substratoma močno statistično značilne.

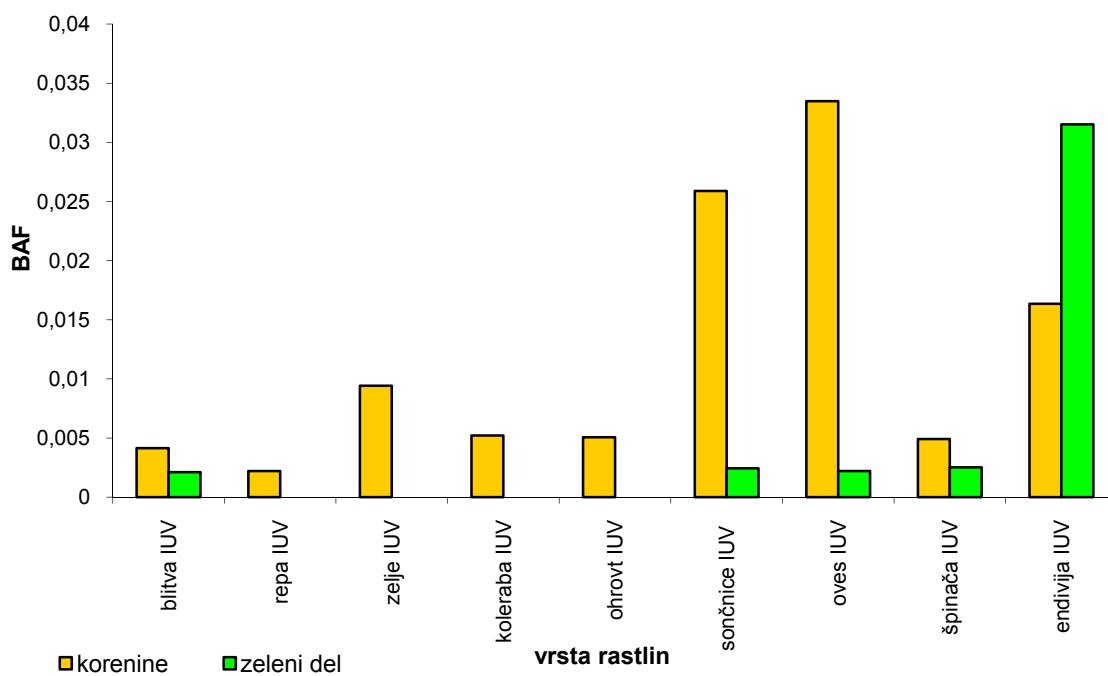
Vrednost Fv/Fm je bila na splošno v letu 2006 nižja kot v letu 2007. Izjema so bile sončnice, solata in oves, pri katerih smo leta 2007 v IUV substratu izmerili nižji Fv/Fm parameter kot v letu 2006. Pri ovsu je razlika med leti statistično značilna.

4.2.3 Vsebnost kroma



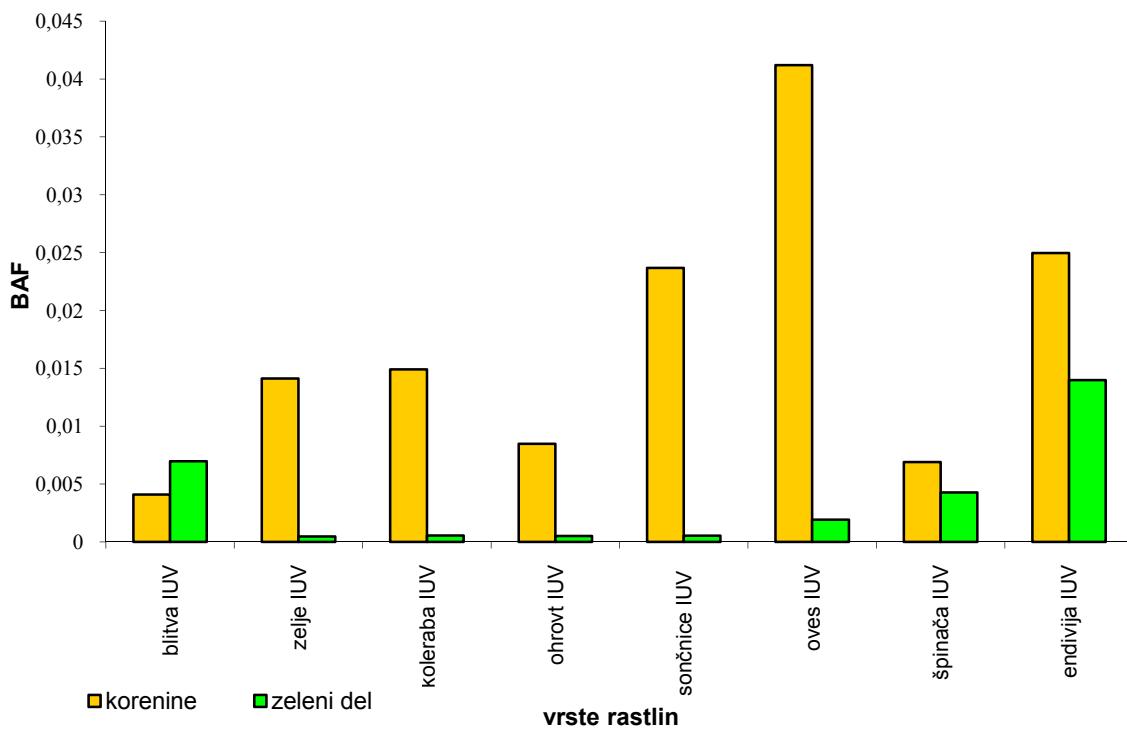
Slika 30: Povprečni bioakumulacijski faktor v koreninah in zelnatih delih rastlin

Na Sliki 30 je prikazan povprečni BAF (BAF = vsebnost kroma v rastlinskih tkivih / vsebnost kroma v substratu) v koreninah in zelnatih delih rastlin, izračunan iz vseh let. Vse rastline privzemajo krom v korenine. Največji koreninski BAF ima oves, sledijo sončnice, endivija, zelje, koleraba, ohrovrt, špinača, blitva in repa. Privzem kroma v liste imajo endivija, blitva, špinača, oves in sončnice. Pri blitvi je privzem v liste celo večji od privzema v korenine.



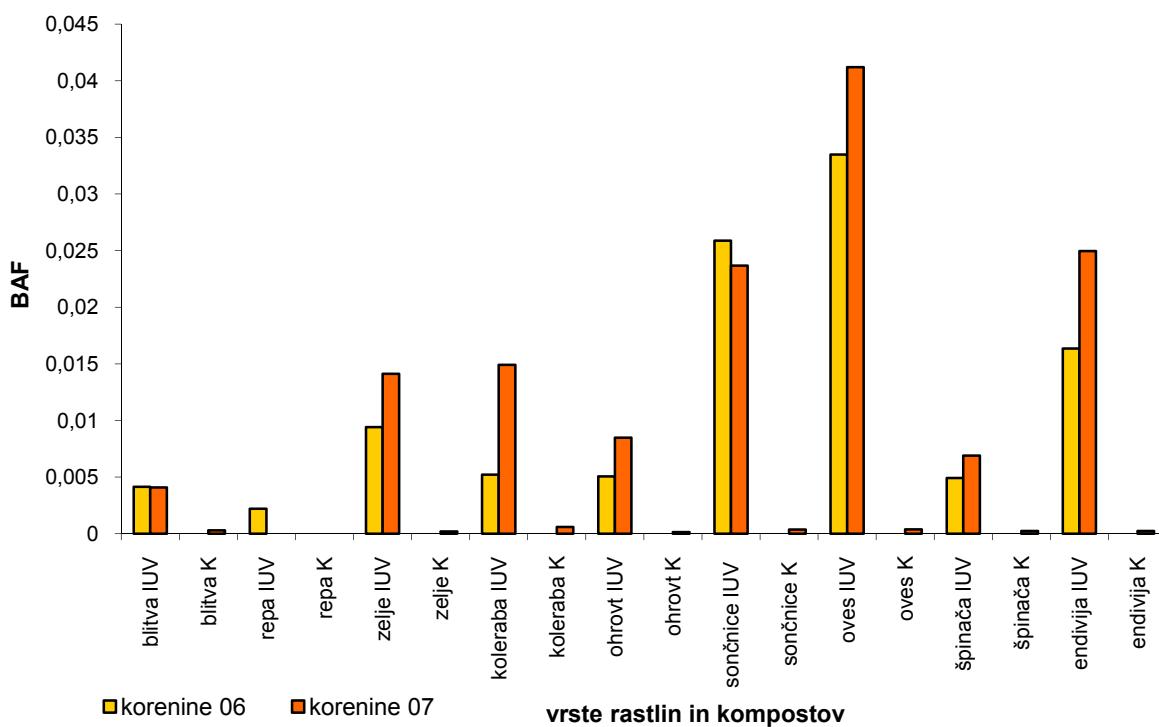
Slika 31: BAF v koreninah in zelnatih delih rastlin v letu 2006

Na Sliki 31 je prikazan BAF v koreninah in zelnatih delih rastlin v letu 2006. Vse rastline privzemajo krom v korenine. Največji koreninski BAF ima oves, sledijo sončnice, endivija, zelje, koleraba, ohrovrt, špinača, blitva in repa. Privzem kroma v zelnate dele imajo endivija, blitva, špinača, oves in sončnice. Pri endiviji je privzem v liste celo večji od privzema v korenine.



Slika 32: BAF v koreninah in zelnatih delih rastlin v letu 2007

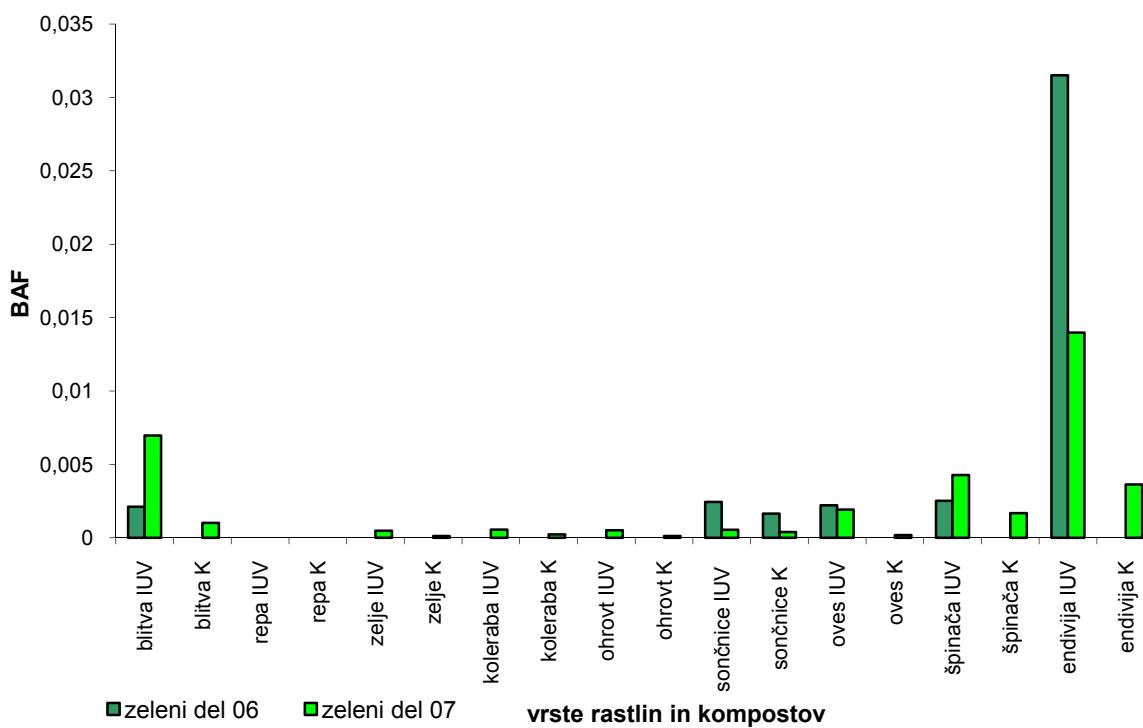
Na Sliki 32 je prikazan BAF v koreninah in zelnatih delih rastlin v letu 2007. Vse rastline dobro privzemajo krom v korenine. Največji koreninski BAF ima oves, sledijo sončnice, endivija, koleraba, zelje, ohrov, špinača, blitva. Privzem kroma v zelnate dele imajo endivija, blitva, špinača in oves. BAF v listih ostalih rastlin je zelo majhen. Pri blitvi je privzem v liste celo večji od privzema v korenine.



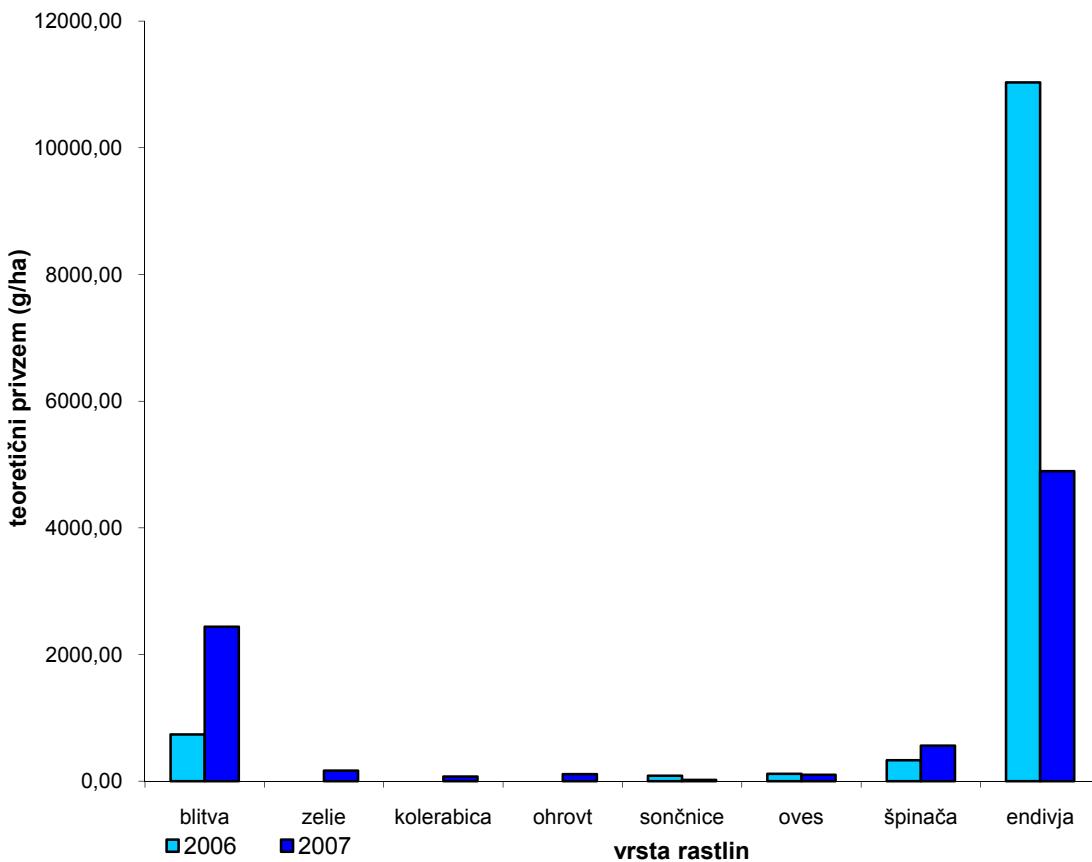
Slika 33: Bioakumulacijski faktor kroma v korenine v letih 2006 in 2007

Na Sliki 33 so prikazani koreninski bioakumulacijski faktorji 9 preskušanih vrst rastlin v IUV in kontrolnem substratu. V letu 2006 ima najvišji koreninski BAF oves, sledijo sončnice, endivija, zelje, koleraba, ohrov, špinača, blitva in repa. V letu 2007, podobno kot prejšnje leto, privzema oves, sledijo endivija, sončnice, koleraba, zelje, ohrov, špinača in blitva. Repe v letu 2007 nismo analizirali.

Na Sliki 34 so prikazani BAF zelnatih delov rastlin. V letu 2006 ima največji privzem kroma v liste endivija, sledijo špinača, oves, blitva in sončnice. V letu 2007 ima, podobno kot v letu poprej, največji privzem kroma v liste endivija, sledijo blitva, špinača in oves. Pri zelju, kolerabi in ohrovu smo zaznali minimalne vsebnosti kroma, ki se bistveno ne razlikujejo od kontrol.

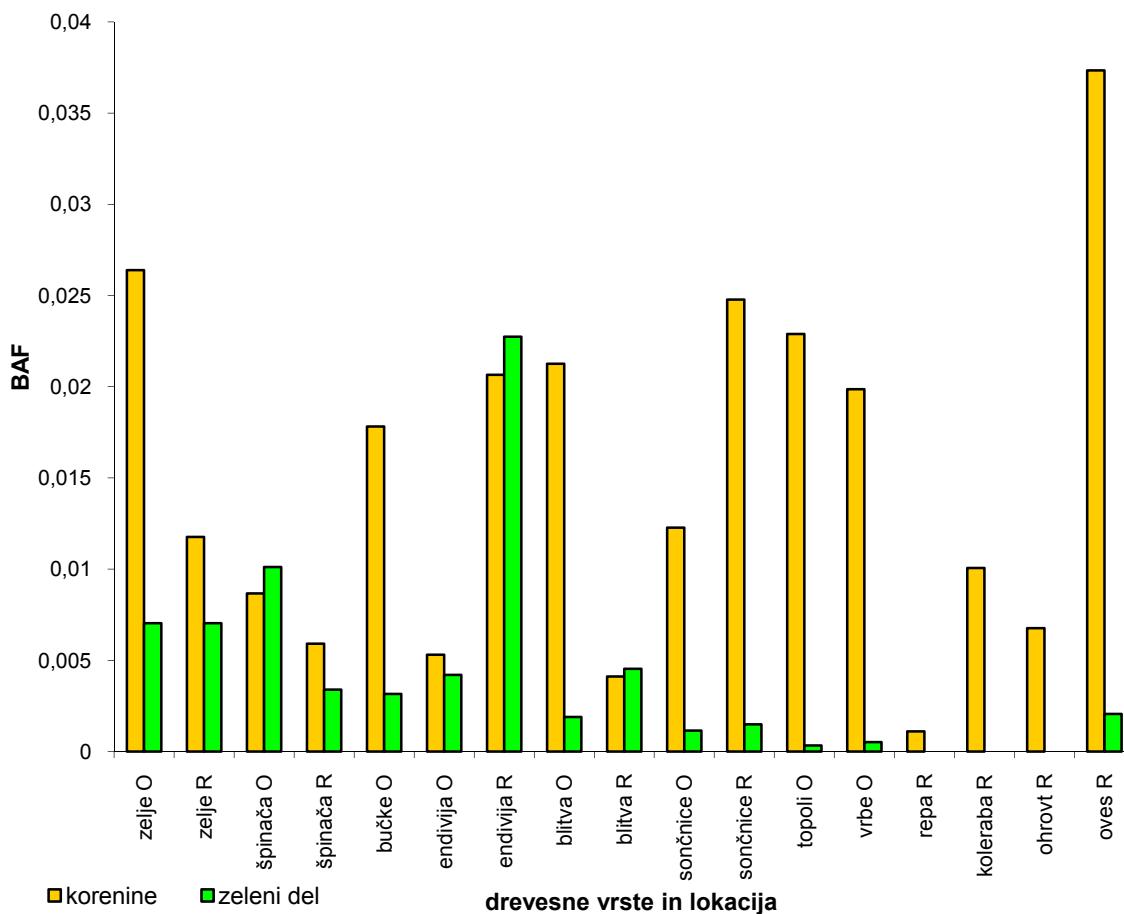


Slika 34: Bioakumulacijski faktor kroma v zelnate dele rastlin v letih 2006 in 2007



Slika 35: Teoretični privzem kroma (g/ha) zelnatih delov rastlin v letih 2006 in 2007

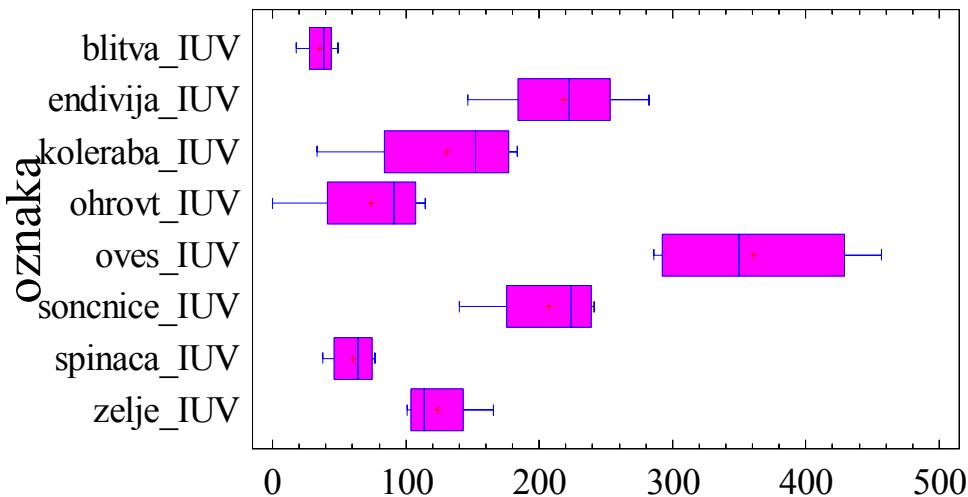
Na Sliki 35 je podan teoretični privzem kroma v zelnate dele rastlin v letih 2006 in 2007. Teoretični privzem je podan za vse rastline, razen repe, za katero v literaturi nismo našli podatkov o pridelku vrtnin na hektar. Največji teoretični privzem kroma na hektar ima endivija, sledita ji blitva in špinača. Teoretični privzem kroma z zeljem, kolerabo, ohrovтом, sončnicami in ovsom je majhen.



Slika 36: Primerjava BAF testiranih vrst na odlagališču Rakovnik (O) in rastlinjaku (R)

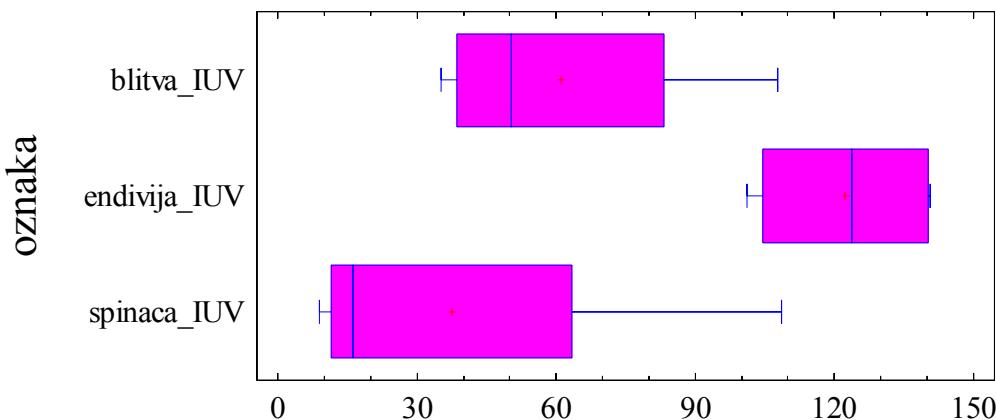
Na Sliki 36 so prikazani BAF testiranih rastlin na odlagališču Rakovnik in v rastlinjaku. Vse rastline privzemajo krom v korenine. Največji BAF v korenine ima oves R, sledijo sončnice R, zelje O, topoli O, blitva O, endivija R, vrbe R, bučke O, sončnice O, zelje R, koleraba R, špinača O, ohrov R, špinača R, endivija O, blitva R, repa R. Zelje, špinača, blitva so več kroma privzeli na odlagališču Rakovnik. Endivija in sončnice pa v rastlinjaku. Največji BAF v zelnate dele ima endivija R, sledijo špinača O, zelje O in R, blitva R, endivija O, špinača R, bučke O, oves R, blitva O, sončnice R, sončnice O, vrne O in topoli. Vsebnosti kroma v zelnatih delih zelja na odlagališču in rastlinjaku so popolnoma enaki. Špinača je več kroma kopičila na odlagališču kot v rastlinjaku. Endivija je neprimerljivo več kroma v zelnatih delih kopičila v rastlinjaku kot na odlagališču. Blitva in sončnice so več kroma kopičile v rastlinjaku kot na odlagališču.

4.2.4 Statistične analize za vsebnosti kroma v koreninah in zelnatih delih rastlin

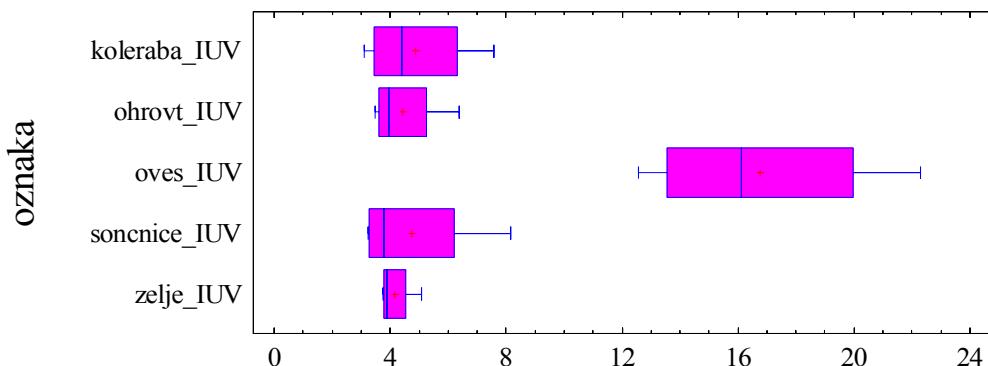


Slika 37: Porazdelitev vrednosti za kroma v koreninah v letu 2007

Na Sliki 37 je prikazana porazdelitev vrednosti za kroma v koreninah v letu 2007, ki je eden izmed grafov analize variance. Analiza variance izračuna varianco znotraj vrst in med vrstami ter vsebuje različne teste (Priloga 1, 2, 3). Varianca med vrstami ni statistično značilno različna, zato je analize variance možna. Rastline se glede na vsebnost kroma v koreninah razvrščajo v štiri homogene skupine. V prvi je oves, ki ima največjo vsebnostjo Krom v koreninah in se statistično značilno razlikuje od ostalih vrst. V drugi so sončnice in endivija, ki se med seboj ne razlikujeta statistično značilno, se pa od vseh ostalih vrst. V tretji skupini so koleraba, zelje, ohrovrt in špinaca, ki imajo statistično značilno manjšo vsebnost kroma v koreninah od sončnic, endivije in ovsa. Zelje in koleraba imata tudi statistično značilno višje vsebnost kroma od blitve. V četrti skupini so blitva, špinaca in ohrovrt, ki se med seboj statistično ne razlikujejo. Blitva ima najnižje vsebnosti kroma v koreninah in se statistično značilno razlikuje od zelja, kolerabe, sončnic, endivije in ovsa.



Slika 38: Porazdelitev vrednosti za kroma v zelnatih delih blitve, endivije in špinače v letu 2007



Slika 39: Porazdelitev vrednosti za kroma v zelnatih delih kolerabe, ohrovta, ovsu, sončnic in zelja v letu 2007

Zaradi prevelikih razlik v variabilnosti med posameznimi obravnavanji, analizo variance za vsebnosti kroma v listih ne moremo izvesti za vsa obravnavanja naenkrat, zato smo jih razdelili v dve skupini: rastline, ki imajo večji sprejem in kažejo večjo variabilnost (blitva, endivija, špinača) in rastline, ki imajo majhen sprejem v nadzemne dele (koleraba, ohrovvt, oves, sončnice, zelje). Za vsako skupino ločeno smo naredili analizo variance in ugotovili, da ima endivija statistično značilno višje vrednosti kroma v zelnatih delih rastlin od blitve in špinače. Med špinačo in blitvo pa ni statistično značilnih razlik. Analiza variance med kolerabo, ohrovptom, ovsom, sončnicami in zeljem ni veljavna, saj je varianca med vrstami statistično značilno različna. Varianca znotraj vrst je večja kot med vrstami.

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 POLJSKI POSKUS NA ODLAGALIŠČU RAKOVNIK

V poljskem poskusu smo ocenjevali primernost rastlinskih vrst za remediacijo odlagališča Rakovnik. Tla na odlagališču so zelo specifičen substrat, zato nas je predvsem zanimalo ali rastline v danih razmerah na odlagališču sploh preživijo in kako uspešne so v rasti ter privzemanju kroma. Kontrolne vrste smo posadili v rastlinjaku na Oddelku za agronomijo. Ker je diplomska naloga potekala v okviru večjega, še ne zaključenega projekta, podatkov o lesnatih vrstah iz rastlinjaka še nismo uspeli vključiti v nalogu. Pridobljene rezultate smo tako primerjali z rezultati v literaturi.

5.1.1 Rastni parametri

Rezultati rastnih parametrov v letu 2006 nakazujejo, da je bila najbolj uspešna lesnata vrsta *S. caprea*. Omenjena vrba je zrasla najvišje in imela je največji premer debla, vendar preživetveno ni bila tako uspešna kot vrba *S. babilonica*. Po uspešnosti vrbi *S. caprea* sledijo vrba *S. babilonica*, topol *P. regenerata* in topol *P. panonica*. Vrba *S. babilonica* je imela največjo stopnjo preživetja (88 %) in največje število poganjkov. Vrbi sta imeli večje število poganjkov kot topoli, vendar njihovo število z meseci pri obeh vrbah nepričakovano upada, kar je lahko bilo posledica objedanja srnjadi. Za najmanj primernega fitoremediatorja se je v letu 2006 izkazal topol *P. deltoides*. Potaknjenci tega topola so bili najbolj občutljivi na s kromom onesnažen substrat, saj ni ozelenel niti eden. Ne moremo pa popolnoma izključiti tudi drugih okoljskih dejavnikov kot razlog za neaktivnost potaknjencev *P. deltoides*. Od 12 posejanih vrst zelnatih rastlin v letu 2006 so do septembra preživele le 4. Najbolj uspešne v rasti so bile posajene sončnice. Dobro pa so uspevale tudi blitva 'Mangold', obe vrsti buč in sejane sončnice. Rastna sezona 2006 ni bila najbolj uspešna za testne rastline na odlagališču Rakovnik. S poskusom smo začeli v juniju, kar je dokaj pozno, še posebej za lesnate vrste. Na rastline v začetni fazici rasti so imeli velik vpliv tudi skrajni okoljski dejavniki kot sta temperatura nad 30 °C in suša. Boljšo stopnjo preživetja in večjo biomaso bi dosegli s saditvijo rastlin zgodaj spomladini, ko je razporeditev padavin enakomernejša in temperature niso previsoke, kar se je potrdilo v rastnih sezонаh 2007 in 2008.

V letu 2007 je bil topol *P. panonica*, v nasprotju z letom 2006, najuspešnejša lesnata vrsta. Imel je najvišjo stopnjo preživetja, največji prirastek v višino in najširše liste. Sledita mu topola *P. maximowiczii* in *P. regenerata* ter vrbi *S. purpurea* in *S. viminalis*. Topol *P. panonica* je bil zelo uspešen tudi v letu 2008. Še vedno je imel najvišjo stopnjo preživetja, vendar pa se je njegova rast začela umirjati. V letu 2008 je bil najuspešnejša lesnata vrsta topol *P. maximowiczii*, saj je imel največji prirastek in najhitrejšo stopnjo rasti. Sledijo mu topol *P. panonica*, topol *P. regenerata*, vrba *S. purpurea* in vrba *S. viminalis*. Vrbe so imele v vseh rastnih sezонаh več poganjkov od topolov, pri vseh vrstah pa se pojavljajo nihanja v številu poganjkov. Zmanjšanje števila poganjkov v določenih mesecih je najbrž, kljub postavljeni zaščitni ograji, še vedno posledica objedanja srnjadi, prisoten pa je bil tudi človeški faktor. Lesnate vrste smo, v želji po čim večji uspešnosti, okopavali in kosili travo. Pri tem je prihajalo do manjših poškodb posameznih poganjkov, ki so se posledično posušili. Topoli so se v rastnih sezонаh 2007 in 2008 glede na rastne parametre izkazali za

boljše remediatorje kot vrbe. Pomembno pa je poudariti visoko stopnjo preživetja vrb in njihovo odpornost na krom. V letu 2007 smo posadili 8 zelnatih vrst rastlin. Do septembra 07 so preživele 4, in sicer obe vrsti blitve in bučk. Najuspešnejše so bile bučke 'Bianca', sledijo jim 'Bionda' in rdečelistna blitva ter bučke 'Elite'. Križnice se, kljub navedbam v literaturi (Zayed in Terry, 2002), niso izkazale kot uspešne, saj so bile izredno podvržene napadom škodljivcev. Za njihovo večje preživetje bi bilo potrebno uporabiti naravna varovalna sredstva.

5.1.2 Fluorescencia klorofila *a*

V letih 2006 in 2007 je imela večina zelnatih rastlin vrednosti parametra Fv/Fm pod mejo vitalnosti ($Fv/Fm < 0,83$). Iz tega sklepamo, da je učinkovitost fotosinteznih reakcij zmanjšana in da je večina zelnatih rastlin v stresu zaradi visoke vsebnosti kroma v tleh in ostalih okoljskih dejavnikov. V letu 2006 znakov stresa ($Fv/Fm < 0,83$) ne kažeta špinača 'Norvak' in trpotec, v letu 2007 pa sončnice in rdečelistna blitva.

V letu 2007 so imele tudi vse lesnate vrste zmanjšano razmerje Fm/Fv. V letu 2008 ima vrba *S. viminalis* vrednosti že v mejah vitalnosti ($Fv/Fm > 0,83$). Tudi topol *P. panonica* ima parameter Fm/Fv že na meji vitalnosti. Rezultati nakazujejo, da so vsaj v začetni fazi rasti vse testirane rastline pod stresom, kar pa ni nujno posledica visokih vrednosti kroma v tleh. Mlade rastline so bolj izpostavljene stresnim dejavnikom, ker še nimajo razvitih mehanizmov za preprečevanje in popravljanje poškodb zaradi stresnega dejavnika. Lesnate rastline so lahko v stresu tudi zaradi odstranitve iz matične rastline. Predvidevamo, da so vrbe in topoli v stresu zaradi vsote vseh okoljskih dejavnikov in ne zgolj zaradi kroma. Ko bodo lesnate vrste razvile mehanizme za preprečevanje in popravljanje poškodb, se bodo vrednosti parametra Fv/Fm pri vseh lesnatih vrstah dvignile v meje vitalnosti, na kar že nakazujejo vrednosti Fv/Fm vrbe *S. viminalis* in topola *P. panonica*.

5.1.3 Vsebnost kroma

Vse preskušane lesnate vrste največ kroma kopičijo v koreninah, prenos v nadzemne dele je minimalen. Akumulacijo kroma v koreninah in neznaten prenos v liste sta ugotovila že Zayed in Terry (2002). Nizek prenos kroma v poganjke vrb pa je potrdil tudi Shanker s sod. (2005). Rezultati povprečnega BAF kažejo, da je največ kroma v koreninah kopičil topol *P. panonica*, sledijo vrba *S. viminalis*, topol *P. regenerata*, topol *P. maximowiczii* in vrba *S. purpurea*. Rezultati iz leta 2008 nakazujejo, da imajo topoli večji BAF v koreninah kot vrbe.

Vse lesnate vrste največ kroma kopičijo v koreninah. Primerjava vsebnosti kroma v nadzemnih delih vrb in topolov pa nam je pokazala, da vrbe tako v lesu kot v listih kopičijo več kroma kot topoli. Možno je, da imajo vrbe manjšo vsebnost kroma v koreninah v primerjavi s topoli, ker ga več prenašajo v nadzemne dele.

Pri vseh preskušanih vrstah zelnatih rastlin, razen pri špinači, je privzem kroma v korenine večji kot privzem v zelnatih dele. Največji privzem kroma v korenine ima zelje ($BAF=0,03$), sledijo blitva, bučke, sončnice, špinača in endivija. Minimalna količina kroma se pri vseh vrtninah prenaša tudi v zelnatih dele ($BAF=0,0003 - 0,004$). Špinača je

imela največji privzem kroma v zelnate dele ($BAF=0,01$). in je bila tudi edina vrsta z večjim BAF v zelnati del kot v korenine. Cary s sod. (1977a) je odkril, da so rastline, ki kopičijo Fe (npr. špinača in blitva) bolj učinkovite pri prenašanju kroma v poganjke.

Korenine drevesnih vrst in zelnatih rastlin so glede privzemanja kroma primerljive.

Ob uporabi lesnatih rastlin za remediacijo odlagališča bi se teoretično največ kroma odstranilo s koreninami (35 g/ha), malo (5 g/ha) pa tudi z lesom in listi. Največji teoretični privzem na hektar s koreninami ima vrba *S. purpurea*, sledijo topol *P. maximowiczii*, topol *P. panonica*, vrba *S. viminalis* in topol *P. regenerata*. Vrbi imata večji teoretični privzem kroma na hektar z lesom kot topoli, in sicer ima največjega vrba *S. viminalis*. Največji teoretični privzem na hektar z listi ima topol *P. panonica*, sledijo vrba *S. purpurea*, vrba *S. viminalis*, topol *P. maximowiczii* in topol *P. regenerata*.

5.2 POSKUS V NADZOROVANIH RAZMERAH V RASTLINJAKU

5.2.1 Kaljivost

Rezultati kažejo, da substrat z odlagališča Rakovnik bistveno ne zavira kalitve pri preskušanih vrstah rastlin. Repa je v obeh testnih letih najbolje kalila (93%), zelo uspešna sta bila tudi koleraba (89%) in zelje (79%). Najmanjšo stopnjo kaljivosti imata oves (44%) in endivija (32%). Koleraba, špinača in endivija imajo tako v letu 2006 kot v letu 2007 manjšo kaljivost v IUV kot v kontrolnem substratu, vendar je razlika statistično značilna le za blitvo v letu 2006. Pri tem velja omeniti, da smo pri blitvi sejali plodove, ki so vsebovali več semen, zato je bila kaljivost v obeh substratih več kot 100% in je podatek o kaljivosti blitve uporaben le za relativno primerjavo. Repa ima v obeh letih enako kaljivost v IUV in kontrolnem substratu. Oves ima majhno kaljivost v obeh substratih, vendar je v IUV substratu njegova kaljivost za 2% večja kot v kontrolnem substratu. Posledično ne moremo z gotovostjo trditi, da je kaljivost pri ovsu zavrnja zaradi visokih vsebnosti kroma v IUV substratu. V letu 2007 je bila kaljivost na splošno nižja kot v letu 2006. Razlog je bil najbrž v semenih in substratu. V letu 2007 smo uporabili neodprte vrečke semen, ki so ostala iz prvega poskusa leta 2006. Poleg tega pa niti IUV niti kontrolnega substrata v lončih leta 2007 nismo zamenjali z novim. Možno je, da so se v času rasti sproščali inhibitorji kalitve.

5.2.2 Fluorescencia klorofila *a*

V obeh testnih letih sončnice, špinača, endivija in oves izkazujejo močno občutljivost na IUV substrat. Pri sončnicah in ovsu je upad parametra Fv/Fm statistično značilen. Pri repi nismo niti v letu 2006 niti 2007 zaznali upada parametra Fv/Fm, kar nakazuje, da ni občutljiva na visoke vrednosti kroma v substratu. V letu 2007 je bila takojšna fluorescencia klorofila *a* na splošno višja v primerjavi s prejšnjim letom. Razlog je mogoče v tem, da smo leta 2006 fluoresenco klorofila *a* merili septembra, leta 2008 pa že junija. Na stres (zmanjšan parameter Fv/Fm) rastlin v rastlinjaku so lahko vplivali tudi zunanji okoljski dejavniki kot so močna svetloba in visoke temperature. V letu 2007 smo parameter Fv/Fm merili pred najhujšo poletno pripeko in rastline še niso utrpele morebitnih poškodb, ki jih povzročajo skrajne temperature in pomanjkanje vode in ki so prav tako povzročitelji stresa pri rastlinah.

5.2.3 Vsebnost kroma

Rastline največ kroma kopičijo v koreninah, prevajanje v liste je majhno. Vse preskušane rastline kopičijo krom v koreninah. Najvišji koreninski BAF ima oves, sledijo sončnice, endivija, zelje, koleraba, ohrov, špinača, blitva in repa. Krom se pri endiviji, blitvi, špinači, ovsu in sončnicah prevaja tudi v liste, a v majhnih koncentracijah. Iz tega sklepamo, da je sprejem kroma v korenine dober, prevajanje v nadzemne dele pa omejeno. Endivija ima visok tako koreninski kot listni BAF. Transport v nadzemne dele je celo večji kot v korenine. Glede na rezultate iz posameznih let sklepamo, da ima tudi blitva večji BAF v listih kot koreninah. Cary s sod. (1977a) je odkril, da so listnate rastline, ki akumulirajo Fe, bolj učinkovite pri prenašanju kroma v nadzemne dele.

Primerjava BAF rastlin, ki so rasle tako na odlagališču Rakovnik kot v rastlinjaku nam je pokazala, da so zelje, špinača in blitva več kroma v korenine privzeli na odlagališču Rakovnik, endivija in sončnice pa v rastlinjaku. Vsebnosti kroma v zelnatih delih zelja na odlagališču in rastlinjaku so popolnoma enaki. Špinača je več kroma kopičila na odlagališču kot v rastlinjaku. Endivija, blitva in sončnice so več kroma v zelnatih delih kopičile v rastlinjaku kot na odlagališču. Zelje, blitva in špinača imajo bujno rast. Na odlagališču Rakovnik so imeli neomejeno prostora za razvoj globokega in razvejanega koreninskega sistema, zato so lahko privzemali več kroma kot v rastlinjaku. Razlog za večje kopičenje kroma v endiviji in sončnicah v rastlinjaku bi lahko bil odsotnost srnjadi.

SKLEPI

Kriterij za hiperakumulatorja kroma je več kot 1000 mg kg^{-1} kroma v suhi masi listov (Zhang s sod., 2006). V naši raziskavi hiperakumulatorjev nismo odkrili, vendar kot pravi Schnor (2000) so za fitoremediacijo uporabne tudi nizkoakumulacijske rastline z veliko produkcijo biomase in globokimi koreninami, med katere topoli in vrbe prav gotovo spadajo.

Rastline uporabne za remediacijo naj bi bile po raziskavah Schnor-a (2000) odporne, sposobne privzema onesnaževal, imele hitro rast, veliko produkcijo biomase, visoko transpiracijo in globok koreninski sistem. Glede na večino omenjenih parametrov so se v poljskem poskusu na odlagališču Rakovnik kot potencialni remediatorji izkazali: topol *P. panonica*, vrba *S. viminalis*, blitva, sončnice in bučke. Topol *P. panonica* je bil preživetveno najbolj uspešen, rassel je hitro, imel je največji prirast biomase in največji BAF kroma v koreninah ter ni imel bistveno zmanjšane fluorescence klorofila *a*. Vrba *S. viminalis* je imela največji teoretični privzem kroma na hektar in parameter Fv/Fm v mejah vitalnosti. Tudi blitva, sončnice in bučke imajo veliko biomaso, privzem kroma v korenine in liste ter niso občutljive na onesnažen substrat. Uporabnost sončničnih korenin za remediacijo je ugotovil tudi Salt s sod.(1995).

V nadzorovanih razmerah v rastlinjaku so potencial za remediacijo pokazali oves, sončnice in endivija. Oves ima največji privzem kroma v korenine, nekaj ga nalaga tudi v liste. Sončnice niso kazale znakov stresa v IUV substratu in so imele dober privzem kroma v

korenine. Endivija pa je imela največji privzem kroma v zelnati del in daleč največji teoretični privzem kroma na ha tako med zelnatimi kot lesnatimi rastlinami.

Križnice (zelje, cvetača, glavni in brstični ohrov) se v nasprotju z navedbami v literaturi (Cary s sod., 1977a) niso izkazale za dobre akumulatorje kroma niti na odlagališču niti v rastlinjaku. Zelje je na odlagališču sicer imelo največje vsebnost kroma v koreninah, a je hitro propadlo, zaradi objedanja srnjadi in rastlinojedih žuželk.

Endivija, blitva in špinača bi teoretično odvzele veliko več kroma na hektar kot lesnate vrste. Endivija bi teoretično z zelnatimi deli lahko odvzela 11 kg na hektar, blitva 2,5 kg/ha in špinača 0,5 kg/ha. Vrba *S. purpurea* bi s koreninami odvzela le 34 g kroma na hektar. Podatke za teoretični privzem zelnatih rastlin imamo le za kontrolirane razmere v rastlinjaku. Če bi bil poskus v realnih razmerah, bi bil teoretični privzem kroma na ha zelnatih in lesnatih rastlin bolj primerljiv.

Koncentracija kroma v IUV kompostu je prevelika za praktično zmanjšanje kroma tako, da bi vrednost padla v meje zakonsko določenih (Uredba o emisiji snovi in topote pri odvajjanju odpadne vode iz naprav za proizvodnjo usnja in krzna (Ur.l. RS, št. 45/2007); Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih (Ur.l. RS, št. 32/2006, 98/2007, 62/2008)). Kljub temu pa je fitoremediacija pomembna, saj rastline preprečijo spiranje sicer majhnega deleža topnega kroma iz odlagališča, kar bodo pokazale meritve izcedne vode v naslednjih letih.

Zelnate rastline so za sanacijo odlagališča Rakovnik manj primerne. V kontroliranih razmerah v rastlinjaku sicer dobro uspevajo in imajo velik privzem kroma, vendar jim na odlagališču učinkovitost in produktivnost zmanjšujejo rastlinojedci. Če bi bil naš namen odstranitev kroma iz odlagališča, bi poskrbeli za večjo konkurenčnost in uspešnost zelnatih rastlin v realnih razmerah. Ker pa je bil naš cilj predvsem zadržati krom na odlagališču in zmanjšati količino izcednih vod ocenujemo, da so za ozelenitev odlagališča Rakovnik zaradi svoje tolerantnosti, velike biomase in transpiracije, privzema kroma v korenine, enostavnosti za vzgojo in dolgoživosti najbolj primerne lesnate vrste.

6 VSEBINA (SUMMARY)

6.1 VSEBINA

V naši raziskavi smo žeeli oceniti primernost različnih rastlinskih vrst za remediacijo usnjarskih odpadkov, onesnaženih s kromom, in raziskati možnosti ozelenitve odlagališča Rakovnik. Krom je v majhnih koncentracijah ($0,02 - 0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s.) potreben za rast rastlin, saj povečuje rast z vplivom na kofaktorje v celičnih procesih, v prevelikih koncentracijah ($>0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ s.s) pa zavira rast korenin in listov, povzroča kloroze na listih in plodovih, zmanjša delovanje encimov in povzroča smrt (Zayed in Terry, 2002). Teste smo izvajali na odlagališču Rakovnik in v rastlinjaku na Oddelku za agronomijo Biotehniške fakultete. Na odlagališču smo vzpostavili testna polja in jih zasadili z 8 lesnatimi in 18 zelnatimi rastlinami. Za oceno uspešnosti rasti smo določili proizvedeno biomaso, ki smo jo mesečno merili z rastnimi parametri. Primernost rastlin smo ugotavljali tudi z merjenjem fluorescence klorofila *a* in privzema kroma v rastline. V rastlinjaku smo

v IUV in kontrolni kompost posadili 9 zelnatih rastlin s povečanim privzemom kroma. Merili smo njihovo kalitev, fluorescenco klorofila *a* in privzem kroma v rastline. Rezultati rastnih parametrov nakazujejo, da je bila leta 2006 najuspešnejša lesna vrsta vrba *S. caprea*, ki je zrasla najviše in imela je največji premer debla. V letu 2006 so na odlagališču preživele le 4 od 12 posajenih zelnatih rastlin. Najuspešnejše med njimi so bile sončnice, blitva in bučke. V letu 2007 je imel najvišjo stopnjo preživetja in največji prirastek topol *P. panonica*. Najuspešnejše zelnate rastline pa so bile, podobno kot lansko leto, blitva in bučke. V letu 2008 je bil najuspešnejša vrsta zopet *P. panonica*. Iz rezultatov testa kalitve v rastlinjaku opazimo, da IUV kompost nima neposrednega vpliva na kalitev rastlin. Le koleraba, sončnice in endivija so imeli v obeh testnih letih nižjo kalitev v onesnaženem substratu, ki pa ni statistično značilna. Rezultati fluorescence klorofila *a* na Rakovniku kažejo, da je najmanj občutljiva na razmere na odlagališču vrba *S. viminalis*. Na vse ostale lesnate vrste imajo okoljski dejavniki zaznaven vpliv ($Fv/Fm < 0,83$), le *P. panonica* v letu 2008, podobno kot vrba *S. viminalis*, že izkazuje potencial za fitoremediacijo. Od zelnatih rastlin na odlagališču nimajo upada parametra Fv/Fm špinača, trpotec, sončnice in rdečelistna blitva. V rastlinjaku sončnice, špinača, endivija in oves izkazujejo močno občutljivost na IUV substrat. Rezultati bioakumulacijskega koeficienta (BAF) kažejo, da rastline največ kroma kopijo v koreninah, prevajanje v liste je omejeno. Na odlagališču Rakovnik je med lesnatimi rastlinami največ kroma v koreninah kopil topol *P. panonica*, med zelnatimi pa zelje. V rastlinjaku ima največji BAF kroma v koreninah oves, dober privzem imajo tudi sončnice in endivija. Krom se pri endiviji, špinači, sončnicah, ovsu in blitvi prevaja tudi v liste. Največji BAF v zelnatih delih ima endivija. Največji izračunani teoretični privzem kroma na hektar imajo endivija, blitva in špinača. Lesnate rastline imajo bistveno manjši teoretični privzem na hektar kot zelnate rastline, največjega ima vrba *S. purpurea* s koreninami. Rezultati so pokazali, da je fitoremediacija odlagališča Rakovnik možna in da so v ta namen najprimernejše lesnate vrste topol *P. panonica* in vrba *S. viminalis*, uporabne pa so tudi blitva, sončnice in bučke.

6.2 SUMMARY

The suitability of different plant species for remediation of tannery waste, highly polluted with chromium, was estimated and the possibility of landfill colonization with plants was researched. Chromium is required for normal plant growth because of its influence on cofactors in cell processes, but at concentrations above $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ d.w. it reduces plant growth, interfere with enzymes, causes chlorosis and death. Phytoremediation experiments were performed parallelly in the greenhouse of the Department of Agronomy and at the landfill site Rakovnik. At landfill site Rakovnik testing polygons were created in planted with 8 woody and 18 herbaceous plants. The biomass production was estimated with growth parameters as criterion of successful growth. High rate of transpiration and ability of chromium accumulation were also measured. In the greenhouse 9 herbaceous species were sown in contaminated and control substrate. The growth parameters were measured monthly throughout the growing season at the landfill site Rakovnik. In the greenhouse contaminated substrate was tested for its inhibition of germination and chronic toxicity to higher plants. In both, landfill site and greenhouse, potential photochemical efficiency and chromium uptake were measured. Results of growth parameters showed that willow, *S. caprea*, was the most successful woody plant in 2006. Only four out of twelve sown herbaceous plants survived, the most successful were sunflowers, beet and zucchini. The

highest rate of survival and the largest growth was observed in poplar *P. panonica* in years 2007 and 2008. The beet and zucchini were the most successful herbaceous plants in 2007. Germination results showed that contaminated substrate doesn't have substantial impact on germination of tested plants. The statistical lower germination rate in both years was observed only in turnip, spinach and endive. At the landfill site Rakovnik normal levels of potential photochemical efficiency was noticed only in willow *S. viminalis*, poplar *P. Panonica* spinach, plantain sunflowers and beet. At greenhouse lower levels of parameter Fv/Fm was observed in sunflowers, spinach, endive and oats when growing in contaminated substrate. Chromium was mostly accumulated in the roots, its transfer from roots to aerial parts was low. At landfill site Rakovnik the highest BAF among woody species was noticed in roots of poplar *P. panonica* and in roots of cabbage among herbaceous species. At greenhouse the highest BAF in root was observed in oats, sunflowers and endive. Chromium transfer from roots to shoots was found in endive, spinach, oats and beet. The highest BAF in leaves was noticed in endive. Herbaceous plants had higher calculated uptake of chromium per hectare than woody species. The highest calculated uptake of chromium per hectare among herbaceous species was found in endive, sunflowers and beet. The highest uptake per hectare among woody plants might be in willow *S. purpurea*. Results showed that colonization of landfill with poplars (*P. Panonica*), willows (*S. Babilonica*), beet, sunflowers and zucchini might have remediation effect.

Rozman, R. Fitoremediacija sedimentov in drugih kontaminiranih zemljin.
Dipl.delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo, 2008

7 VIRI

- Bartlett R.J., James B.R. 1988. Mobility and bioavailability of chromium in soils. Chromium in the natural and human environments. 20: 267- 303
- Bartlett R.J., Kimble J.M. 1976. Behavior of chromium in the soils. II. Hexavalent forms. J Environ Qual 5(4): 383-386
- Berti W.R, Cunningham S.D. 2000. Phytostabilization of metals. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. 6: 71-88
- Blaylock M.J., Huang J.W. 2000. Phytoextraction of metals. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. 5: 53-70
- Brus R. 2004. Drevesne vrste na Slovenskem. Ljubljana. Mladinska knjiga Založba, d.d.
- Cary E.E. 1982. Chromium in air, soil and natural waters. Biological and environmental aspects of chromium. 3: 49
- Cary E.E., Allaway W.H., Olson O.E. 1977a. Control of chromium concentrations in food plants. 1. Absorbtion and translocation of chromium by plants J. Agric. Food Chem. 25(2): 300-304
- Dushenkov S., Kapulnik Y., Blaylock M., Sorochinsky B., Raskin I., Ensley B. 1997. Phytoremediation: A Novel Approach to an Old Problem. Global Environmental Biotechnology. D.L. Wise (ed.), Elsevier Science, B.V.
- Ensley B.D. 2000. Rationale for Use of Phytoremediation. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. 1: 3-11
- Geo-hidro d.o.o. 2007. Hidrogeološko poročilo o obratovalnem monitoringu podzemnih voda na območju odlagališča nenevarnih usnjarskih odpadkov IUV Rakovnik Litija. K-II-30 d/c – 391.
- Glass D.J. 2000. Economic potential of phytoremediation. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. 2: 15- 31
- Gonçalves M.T., Gonçalves S.C., Portugal A., Silva S., Sousa J.P., Freitas H. 2006. Effects of nickel hyperaccumulation in *Alyssum pintodasilvae* on model arthropods representatives of two trophic levels. Plant Soil (2007) 293: 177–188
- Handa B.K. 1988. Occurrence and distribution of chromium in natural waters of India. Chromium in the natural and human environments. 7: 189-214
- IUV. 2007a. Odlagališče odpadkov Rakovnik: Dokumentacija v postopku izdaje odločbe za zaprtje odlagališča.

Rozman, R. Fitoremediacija sedimentov in drugih kontaminiranih zemljin.
Dipl.delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo, 2008

IUV. 2007b. Izvid o preiskavi odpadne vode. Datum vzorčenja: 19.3.2007

IUV. 2008. Analiza komposta – Ligonja in Izlužek kompostne mešanice.

Kališová-Špirochová I., Punc'ochár'ová J., Kafka Z., Kubal M., Soudek P., Vaněk, T. 2001. Accumulation of heavymetals by *in vitro* cultures of plants.

Kasassi A., Rakimbei P., Karagidannidis A., Zabaniotou A., Tsionavaras K., Nastis A., Tzaferiopoulou K. 2007. Soil contamination by heavy metals: Measurements from a closed unlined landfill. Bioresource Tehnology 99 (2008) 8578-8584.

Kemijski inštitut Ljubljana. 2006. Analizno poročilo št. 1454: Analiza vzorca biološko obdelanega odpadnega blata.

Košmelj K. 2001. Uporabna statistika. Ljubljana, Biotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani: 145 str.

Nriagu J. 1988. Production and uses of chromium. Chromium in the natural and human environments. 3: 81-104

Nieborer E., Jusys A.A. 1988. Biological chemistry of Cr. Chromium in the natural and human environments. 2: 21-80

Pacyna J.M in Nriagu J.O. 1988. Atmospheric emissions of chromium from natural and anthropogenic sources. Chromium in the natural and human environments. 4: 105-123

Roš M., Gantar A. 1998. Possibilites of reduction of recipient loading of tannery wastewater in Slovenia. Wat. Sci. Tech. 37(8): 145-152

Salt D.E., Blylock M., Nanda P.B.A.K., Duschenkov V., Ensley B.D., Chet I., Raskin I. 1995. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Bio/Tehnology 13: 468-473

Schnoor J.L. 2000. Phytostabilization of metals using hybrid poplar trees. Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment. 9: 133 - 150

Schnoor, JL. 1997. Phytoremediation, technology overview report. Ground-water remediation technologies analysis center. Series E. Vol.1.

Schreck P. 1996. Environmental impact of uncontrolled waste disposal in mining and industrial areas in Central Germany. Environmental Geology 35 (1): 66 – 72

Shanker AK, Cervantes C, Loza-Tavera H, Avudainayagamdet S. Chromium toxicity in plants. 31: 739-753

Svetina M. 1999. Geokemična študija vnosa kadmija v tla Šaleški dolini. Ljubljana. ERICO Velenje

Rozman, R. Fitoremediacija sedimentov in drugih kontaminiranih zemljin.
Dipl.delo. Ljubljana, Univ. v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Odd. za biologijo, 2008

Trošt-Sedej T. 2002. Ekologija rastlin: Priročnik za vaje. Ljubljana. Študentska založba
Tulupov P. E., Tulupov A. P. 2003. Ecological Hazard of Sites of Industrial and Municipal
Waste Disposal. Russian Journal of Ecology. 35(5): 349–353

Uredba o emisiji snovi pri odvajanju izcedne vode iz odlagališč odpadkov (Ur.l. RS, št. 07/00)

Uredba o obdelavi biološko razgradljivih odpadkov (Ur.l. RS, št. 62/2008)

Uredba o odlaganju odpadkov na odlagališčih (Ur.l. RS 32/06, 98/2007, 62/2008)

Uredba o mejnih, opozorilnih in kritičnih imisijskih vrednosti nevarnih snovi v tleh (Ur.l. RS, št. 68/1996)

Zayed A. M., Terry N. 2002. Chromium in the environment: factors affecting biological remediation. Plant and Soil 249: 139-156

Zavod za zdravstveno varstvo Kranj. Papler B. 2008. Odlaganje odpadkov iz usnja. Datoteka: usnje. 4.str.

Zhang X-H., Liu J., Huang H-T., Chen J., Zhu Y-H., Wang D-Q. 2006. Chromium accumulation by the hyperaccumulator plant Leersia hexandra Swartz. Chemosphere 67 (2007): 1138–1143

WHO.1993.

http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/chromiumsum.pdf (3.5.2008)

ARSO. 2000. Industrija.

<http://www.arso.gov.si/varstvo%20okolja/poro%C4%8Dila/poro%C4%8Dila%20o%20stanju%20okolja%20v%20Sloveniji/industrija.pdf> (17.5.2008)

Statistični urad Republike Slovenije. 2008.

http://www.stat.si/pxweb/Dialog/varval.asp?ma=2706301S&ti=Nastale+koli%C8ine+industrijskih+odpadkov+in+ravnanje+z+njimi+po+statisti%C8nih+regijah%2C+Slovenija%2C+letno.&path=../Database/Okolje/27_okolje/02_Odpadki/02_27063_odpadki_iz_dej/&lang=2 (20.5.2008)

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici, prof. dr. Alenki Gaberščik, za vodenje in nasvete pri pripravi diplomske naloge.

Najlepša hvala somentorici, doc. dr. Tjaši Griessler Bulc, da me je sprejela pod svoje mentorstvo, me vključila v raziskovalno skupino, mi pomagala pri prvih korakih v svet znanosti in me usmerjala pri izdelavi diplomske naloge.

Zahvala gre tudi ostalim članom raziskovalne skupine, še posebej dr. Jaku Razingerju in mag. Marku Zupanu. Jaka hvala za meritve fluorescence klorofila *a* in pomoč pri statističnih analizah. Marko hvala tebi in tvojim sodelavcem za trud, nasvete, pomoč, čas, potrpežljivost in dobro voljo. Resnično sem se počutila kot del vaše ekipe.

Iz srca hvala mojemu fantu Borisu Cercu za spodbudo, zagon, pomoč in kratek čas na prav vseh terenskih dnevih. Hvala tudi kolegu agronomu Žigu Kršinarju, ki je bil z nama z Borisom na več kot polovici terenov in je bil v veliko pomoč tudi v laboratoriju.

Hvala študijskim kolegom Matiju Zupanu, Martinu Vrhovšku in Mojci Vrbajnščak pri postavljanju in podiranju poskusov. Brez vas bi najbrž še vedno pripravljala vzorce za analizo.

Hvala tudi vsem ostalim prijateljem, sošolcem in študijskim kolegom, ki so mi pomagali pri diplomskem delu, predvsem pa poskrbeli, da so moja študijska leta (pre)hitro minila in jih bom ohranila v najlepšem spominu.

Nenazadnje gre zahvala tudi moji družini, ki me je moralno in finančno podpirala v času študija ter potrpežljivo prenašala sitnobo in napetost pred izpiti in ob pisanju diplome.

Hvala vsem!

PRILOGE

PRILOGA 1: ANOVA ZA KORENINE 2007 BREZ KONTROL

Analysis Summary

Dependent variable: Cr_korenine_2007

Factor: oznaka

Number of observations: 32

Number of levels: 8

ANOVA Table for Cr_korenine_2007 by oznaka

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	320725,0	7	45817,9	17,75	0,0000
Within groups	61939,8	24	2580,82		
Total (Corr.)	382665,0	31			

Multiple Range Tests for Cr_korenine_2007 by oznaka

Method: 95,0 percent LSD

oznaka Count Mean Homogeneous Groups

blitva_IUV	4	35,7949	X
spinaca_IUV	4	60,4008	XX
ohrovrt_IUV	4	74,175	XX
zelje_IUV	4	123,519	X
koleraba_IUV	4	130,484	X
soncnice_IUV	4	207,208	X
endivija_IUV	4	218,404	X
oves_IUV	4	360,573	X

Contrast Difference +/- Limits

blitva_IUV - endivija_IUV	*-182,609	74,1401
blitva_IUV - koleraba_IUV	*-94,6894	74,1401
blitva_IUV - ohrovrt_IUV	-38,3802	74,1401
blitva_IUV - oves_IUV	*-324,779	74,1401
blitva_IUV - soncnice_IUV	*-171,413	74,1401
blitva_IUV - spinaca_IUV	-24,6059	74,1401

blitva_IUV - zelje_IUV	*-87,7243	74,1401
endivija_IUV - koleraba_IUV	*87,9193	74,1401
endivija_IUV - ohrovrt_IUV	*144,229	74,1401
endivija_IUV - oves_IUV	*-142,17	74,1401
endivija_IUV - soncnice_IUV	11,1959	74,1401
endivija_IUV - spinaca_IUV	*158,003	74,1401
endivija_IUV - zelje_IUV	*94,8844	74,1401
koleraba_IUV - ohrovrt_IUV	56,3093	74,1401
koleraba_IUV - oves_IUV	*-230,089	74,1401
koleraba_IUV - soncnice_IUV	*-76,7233	74,1401
koleraba_IUV - spinaca_IUV	70,0835	74,1401
koleraba_IUV - zelje_IUV	6,96515	74,1401
ohrovrt_IUV - oves_IUV	*-286,398	74,1401
ohrovrt_IUV - soncnice_IUV	*-133,033	74,1401
ohrovrt_IUV - spinaca_IUV	13,7742	74,1401
ohrovrt_IUV - zelje_IUV	-49,3441	74,1401
oves_IUV - soncnice_IUV	*153,366	74,1401
oves_IUV - spinaca_IUV	*300,173	74,1401
oves_IUV - zelje_IUV	*237,054	74,1401
soncnice_IUV - spinaca_IUV	*146,807	74,1401
soncnice_IUV - zelje_IUV	*83,6885	74,1401
spinaca_IUV - zelje_IUV	-63,1184	74,1401

* denotes a statistically significant difference.

Variance Check

Cochran's C test: 0,327561 P-Value = 0,290992

Bartlett's test: 1,70593 P-Value = 0,122317

Hartley's test: 38,1743

Kruskal-Wallis Test for Cr_korenine_2007 by oznaka

oznaka	Sample Size	Average Rank
blitva_IUV	4	4,75
endivija_IUV	4	24,0
koleraba_IUV	4	15,75
ohrovrt_IUV	4	9,75
oves_IUV	4	30,5
soncnice_IUV	4	23,5
spinaca_IUV	4	8,0
zelje_IUV	4	15,75

Test statistic = 25,375 P-Value = 0,000650953

PRILOGA 2 : ANOVA ZA ZELNATE DELE BLITVE, ŠPINAČE IN ENDIVIJE 2007 BREZ KONTROL

Analysis Summary

Dependent variable: Cr_Zeleni del_2007

Factor: oznaka

Number of observations: 12

Number of levels: 3

ANOVA Table for Cr_Zeleni del_2007 by oznaka

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	15369,9	2	7684,96	6,11	0,0210
Within groups	11314,5	9	1257,17		
Total (Corr.)	26684,5	11			

Multiple Range Tests for Cr_Zeleni del_2007 by oznaka

Method: 95,0 percent LSD

oznaka Count Mean

Homogeneous Groups

spinaca_IUV	4	37,4377	X
blitva_IUV	4	60,9676	X
endivija_IUV	4	122,336	X

Contrast Difference +/- Limits

blitva_IUV - endivija_IUV	*-61,3683	56,716
blitva_IUV - spinaca_IUV	23,53	56,716
endivija_IUV - spinaca_IUV	*84,8983	56,716

* denotes a statistically significant difference.

Variance Check

Cochran's C test: 0,601252 P-Value = 0,347834

Bartlett's test: 1,2381 P-Value = 0,432975

Hartley's test: 5,27513

**PRILOGA 3 : ANOVA ZA ZELNATE DELE KOLERABE, OHROVTA, OVSA,
SONČNIC IN ZELJA V LETU 2007 BREZ KONTROL**

Analysis Summary

Dependent variable: Cr_Zeleni del_2007

Factor: oznaka

Number of observations: 20

Number of levels: 5

ANOVA Table for Cr_Zeleni del_2007 by oznaka

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	478,942	4	119,735	20,39	0,0000
Within groups	88,0785	15	5,8719		
Total (Corr.)	567,02	19			

Multiple Range Tests for Cr_Zeleni del_2007 by oznaka

Method: 95,0 percent LSD
 oznaka Count Mean Homogeneous Groups

zelje_IUV	4	4,1641	X
ohrovvt_IUV	4	4,44154	X
soncnice_IUV	4	4,74212	X
koleraba_IUV	4	4,87164	X
oves_IUV	4	16,7734	X

Contrast Difference +/- Limits

koleraba_IUV - ohrovvt_IUV	0,430096	3,65216
koleraba_IUV - oves_IUV	*-11,9018	3,65216
koleraba_IUV - soncnice_IUV	0,129516	3,65216
koleraba_IUV - zelje_IUV	0,70754	3,65216
ohrovvt_IUV - oves_IUV	*-12,3319	3,65216
ohrovvt_IUV - soncnice_IUV	-0,30058	3,65216
ohrovvt_IUV - zelje_IUV	0,277444	3,65216
oves_IUV - soncnice_IUV	*12,0313	3,65216

oves_IUV - zelje_IUV	*12,6093	3,65216
soncnice_IUV - zelje_IUV	0,578024	3,65216

* denotes a statistically significant difference.

Variance Check

Cochran's C test: 0,611768 P-Value = 0,0409862

Bartlett's test: 1,92465 P-Value = 0,0700189

Hartley's test: 44,6841