

## Fitoremediacija s kovinami onesnaženih tal z uporabo sadik dreves

Samar AL SAYEGH PETKOVŠEK<sup>1</sup>, Gregor BOŽIČ<sup>2</sup>, Hojka KRAIGHER<sup>3</sup>, Tom LEVANIČ<sup>4</sup>, Boštjan POKORNY<sup>5</sup>

### Izvelek

Na pehotnem strelišču vojaškega poligona Poček smo opravili poskus fitoremediacije na dveh raziskovalnih ploskvah. Prva ploskev leži na območju pehotnega strelišča in je onesnažena s Pb ter Cu, druga raziskovalna ploskev pa v njegovi okolici, kjer so tla manj obremenjena s kovinami. Zasadili smo ju z izbranimi drevesnimi vrstami (*Alnus glutinosa* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L., *Salix caprea* L.) po standardiziranem sistemu, izmerili rastne parametre ter določili vsebnosti kovin v koreninah, deblih in poganjkih sadik. Ugotovili smo, da kljub temu da izbrane drevesne vrste kopičijo v koreninah le Cd (BCF = 1,2), druge kovine pa sprejemajo v manjših vsebnostih in vrstno specifično, lahko uporabimo večino preučevanih drevesnih vrst predvsem za fitostabilizacijo onesnaženih tal. Ugodno razmerje med bioakumulacijo in translokacijo kovin smo ugotovili za vse drevesne vrste z izjemo ive, kjer je prenos Cd v liste precejšen (TF = 6,9). Upošteva je rastne parametre in privzem kovin v sadike je najprimernejša vrsta za remediacijo obravnavanega območja rdeči bor, najmanj pa iva.

**Ključne besede:** fitoremediacija, sadike dreves, rastni parametri, privzem kovin, pehotno strelišče

## *Phytoremediation of metal contaminated soil with the use of tree seedlings*

### Abstract

*Phytoremediation was performed on two research plots at Poček military training ground. The first research plot (polluted with Pb and Cu) is situated at the shooting range and the second in its close vicinity, where soil is less loaded with metals. Seedlings of five species (*Alnus glutinosa* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Betula pendula* Roth., *Pinus sylvestris* L., *Salix caprea* L.) were planted on plots according to the standardised system; in addition, growth parameters and metal contents in roots, stems and shoots were measured as well. Although seedlings accumulate only Cd (BCF = 1.2) in their roots, and the rest of metals are taken up in smaller concentration and species specific, the majority of tree species have the potential for remediation and especially for phytostabilisation. Favourable ratio between bioaccumulation and translocation was determined for all species with the exception of *Salix caprea*, which was effective in taking up Cd in leaves (TF = 6.9). The results of our study have shown that *Pinus sylvestris* is the most suitable species regarding growth parameters and metal uptake, whereas the least suitable is *Salix caprea*.*

**Key words:** phytoremediation, seedlings of trees, growth parameters, metal uptake, shooting range

## 1 Uvod

### 1 Introduction

V zadnjih petnajstih letih so mnoge raziskave usmerjene k fitoremediaciji, ki je okoljsko prijazna, stroškovno ugodna in sonaravna tehnologija, namenjena sanaciji degradiranega okolja. Fitoremediacija vključuje več tehnologij, ki uporabljajo rastline za sanacijo (remediacijo) onesnaženih tal, sedimentov in blat čistilnih naprav, med njimi sta najpogosteje uporabljeni fitoekstrakcija in fitostabilizacija (PULFORD / WATSON 2003, FRENCH / DICKINSON / PUTWAIN 2006; BRUNNER *et al.* 2008;

VAMERALI / BANDIERA / MOSCA 2010).

S fitoekstrakcijo se odstranjujejo onesnažila iz okolja. Rastline jih sprejemajo v svoje nadzemne dele, ki jih posekamo oz. požanjemo, nastalo biomaso lahko nato uporabimo v energetske namene kot gorivo ali jo kompostiramo, možna je tudi reciklaža kovin iz rastlin (GARBUSU *et al.* 2001; VOVK KORŽE / VRHOVŠEK 2007). Za fitoekstrakcijo so primerne rastline, ki kopičijo onesnažila in imajo velike biokoncentracijske (BCF: razmerje med vsebnostjo onesnažil v koreninah in tleh) in translokacijske faktorje (TC: razmerje med vsebnostjo onesnažil v poganjkih in tleh). Še posebej zanimive so

<sup>1</sup> doc. dr. S. A. P., ERICo Velenje d.o.o., Koroška 58, 3320 Velenje, samar.petkovsek@erico.si

<sup>2</sup> dr. G. B., Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, gregor.bozic@gozdis.si

<sup>3</sup> prof. dr. H. K., Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, hojka.kraigher@gozdis.si

<sup>4</sup> doc. dr. T. L., Gozdarski inštitut Slovenije, Večna pot 2, 1000 Ljubljana, tom.levanic@gozdis.si

<sup>5</sup> doc. dr. B. P., ERICo Velenje d.o.o., Koroška 58, 3320 Velenje, bostjan.pokorny@erico.si

hiperakumulatorske rastline, ki so sposobne sprejemati v svoja tkiva vsaj stokrat več onesnažil kot neakumulatorske rastline. Vendar pa imajo tovrstne rastline v smislu uporabe za remediacijske namene nekatere omejitve, kot so premajhna biomasa, plitev koreninski sistem in majhna tvorba semen. Med hiperakumulatorskimi vrstami so v Sloveniji še posebej raziskali akumulacijski potencial ranega mošnjaka (*Thlaspi praecox* Wulfen). Ta vrsta iz družine križnic je hiperakumulator Zn in Cd, obe kovini pa se pretežno transportirata v poganjke (VOGEL-MIKUŠ / DROBNE / REGVAR 2005; VOGEL-MIKUŠ *et al.* 2006, 2008; KOKOVNIK 2007; LIKAR *et al.* 2009; PONGRAC *et al.* 2009; PONGRAC / BRVAR / REGVAR 2009). Poleg fitoekstrakcije sočasno največkrat poteka proces fitostabilizacije, ki zmanjšuje mobilnost in biodostopnost onesnažil. Rastline z izraženim fitostabilizacijskim potencialom morajo imeti globok in obsežen koreninski sistem, ki učinkovito sprejema onesnažila in tako zmanjša prenos onesnažil v nadzemne dele.

Za ekoremediacijske namene je vse bolj zanimiva uporaba dreves, ki je stroškovno primerna, sonaravna in ekološko sprejemljiva rešitev (DICKINSON 2000). Zasaditev dreves se opravlja za remediacije odlagališč, brežin vodotokov, opuščeni onesnaženi industrijskih površin, na obrobju intenzivne kmetijske predelave in na drugih onesnaženih površinah (ZUPANČIČ JUSTIN 2009). Kar nekaj lastnosti favorizira uporabo dreves, in sicer: sposobnost rasti v mineralno revnih tleh, obsežen in globok koreninski sistem ter razmeroma hitra rast mnogih lesnatih vrst (npr. iz rodu *Salix*, *Populus*, *Alnus*). Drevesa tvorijo opad, ki hitro prekrije onesnažena tla in hkrati zmanjšujejo erozijo. Drevesne vrste (še posebej hitro rastoče vrste) privzemajo velike količine vode iz tal in hkrati sprejemajo onesnažila ter ustvarjajo novo kapaciteto v tleh za shranjevanje vode. Posledično tako zmanjšujejo površinski odtok vode (PULFORD / WATSON 2003; BRUNNER *et al.* 2008; ZUPANČIČ JUSTIN 2009; VAMERALI / BANDIERA / MOSCA 2010).

Fitoremediacija se pogosto uporablja za sanacijo tal, onesnaženih s kovinami. Rastline so solarne črpalke, ki lahko iz tal izločijo nekatere kovine in jih nato koncentrirajo (YANG *et al.* 2005). Na sprejem in biodostopnost kovin vplivajo številni dejavniki, kot so vsebnosti kovin v tleh, pH, količina vode in organske snovi ter obstoj drugih elementov v rizosferi. Korenine in talni mikrobi ter njihove interakcije lahko povečajo sprejem kovin z izločanjem protonov, organskih kislin, fitohelatov, amino kislin in encimov (KHAN 2005, 2006; YANG *et al.* 2005; LESKI *et al.*, 2009). Imobilizacija kovin poteka v kratkih koreninah. Kovine skupaj z Al se vežejo na pektine v celičnih stenah in na negativno nabita mesta v membranah ter hkrati sprostitjo katione (npr.  $\text{Ca}^{2+}$  in  $\text{Mg}^{2+}$ ), ki tvorijo celične stene oz. membrane. Znotraj celične stene se vežejo tudi na specifične proteine – metalotionine (KOHLER *et al.* 2004). Kompleksi, ki se tvorijo, se transportirajo v vakuole ali v celice oz. med nje. Tudi vezava kovin na druge biomolekule, kot so fitohelati, organske kisline,

nikotianamini ali glutation, je lahko povezana z njihovim kopičenjem v rastlinskih tkivih (BRUNNER *et al.* 2008).

Na dostopnost hranilnih elementov in kovin, njihov sprejem ter shranjevanje v različnih delih rastline vplivajo tudi mikroorganizmi v koreninskem sistemu, od različnih simbiotskih in endofitnih gliv in bakterij do mikroorganizmov v predelu okoli korenin, v rizosferi. Ti mikroorganizmi vplivajo na povečano dostopnost elementov z izločanjem organskih kislin, encimov in sideroforjev, to je makromolekul, ki omogočijo sprejem elementov v hife gliv in prek njih v korenine. Hranilni elementi in kovine se nato bodisi shranjujejo, imobilizirajo v koreninskem sistemu (v glivnem plašču ali v shranjevalnih mešičkih gliv znotraj korenin), ali pa se prenašajo naprej v druge organe višjih rastlin (SCHNOOR 1997; KHAN 2005, 2006; LESKI *et al.* 2009). Hife endomikoriznih gliv vsebujejo polifosfatne granule, ki lahko vežejo kovine (JENTSCHKE / GODBOLD 2000, BRUNNER 2001, HALL 2002). Opisane lastnosti mikroorganizmov izkorišča metoda rizoremediacije (SCHNOOR 1997) oziroma mikorizoremediacije (KHAN 2005, 2006). Pri tej metodi se za odstranjevanje kovin iz tal uporabljajo rastline, ki v svojem koreninskem sistemu vključujejo različne oblike mikroorganizmov, živeče v eni izmed oblik sožitja s koreninami rastlin. Metoda je okoljsko prijazna, stroškovno ugodna in ima v primerjavi s tradicionalnimi remediacijskimi metodami ekonomske, estetske ter tehnične prednosti (BAKER *et al.* 1994; CHEN / SHEN / LI 2004).

Uspešnost uporabe rastlin v procesih remediacije s kovinami onesnaženih tal določa rast biomase in privzem kovin. Idealna remediacijska rastlina bi morala imeti veliko biomaso (hitrorastoče vrste), tolerirati velike vsebnosti kovin v tleh in jih hkrati tudi veliko sprejemati. Topole (*Populus* sp.) in vrbe (*Salix* sp.) pogosto uporabljajo za fitoremediacijo ter celo fitoekstrakcijo, ker kopičijo kovine v svojih listih, hitro rastejo in privzemajo velike količine vode. Hkrati je kopičenje slabo mobilnih kovin (npr. Pb) v koreninah oblika fitostabilizacije (PULFORD / WATSON 2003; UNTERBRUNNER *et al.* 2007; BRUNNER *et al.* 2008; ROBINSON *et al.* 2008). V listih belega topola (*Populus alba* L.), ki je preraščal nasipe rečnih sedimentov, so bile določene povečane vsebnosti Cd in Zn, kar zmanjšuje njegov ekoremediacijski potencial, saj lahko z odmetavanjem listov kovine prek opada ponovno vstopijo v ekosistem (MERTENS *et al.* 2004; FRENCH / DICKINSON / PUTWAIN 2006). Raziskan je bil privzem kovin v korenine in liste ive (*Salix caprea* L.), ki je najpogosteje rastoča lesna vrsta na območju v Žerjavu, močno onesnaženem s Pb, Cd in Zn. Ugotovili so, da je potencialno primerna vrsta za fitoekstrakcijo Cd na zmerno onesnaženih območjih, hkrati se lahko uporabi za fitostabilizacijo s Pb močno obremenjenih tal. Njeno sposobnost prilagoditve na zelo onesnažena tla povečujejo simbiotske glive kar treh funkcionalnih skupin (ektomikorizne (ECM), arbuskularne (AM) in DSE (temne, septirane endofitske glive)), ki kolonizirajo njene korenine (PODGORELEC 2007; REGVAR *et al.* 2006, 2009). V

splošnem so drevesa predvsem primerna za fitostabilizacijo tal in manj za fitoekstrakcijo, še zlasti so učinkovita v rahlo oz. zmerno onesnaženih tleh (BRUNNER *et al.* 2008; VAMERALI *et al.* 2009).

V pričujoči raziskavi smo na pehotnem strelišču Poček, kjer so tla onesnažena s Pb in Cu (AL SAYEGH PETKOVŠEK *et al.* 2006, 2009), napravili poskus ekoremediacije z uporabo sadik dreves (rdeči bor, črna jelša, gorski javor, navadna breza, iva) z namenom: (a) zmanjšati potencialni negativni vpliv onesnaženih tal na okolje; (b) primerjati akumulacijske sposobnosti kovin v različnih vrstah dreves; (c) oceniti potencial izbranih drevesnih vrst za fitostabilizacijo oziroma fitoekstrakcijo; (d) oblikovati modelni pristop za reševanje tovrstne problematike na območjih, onesnaženih s kovinami.

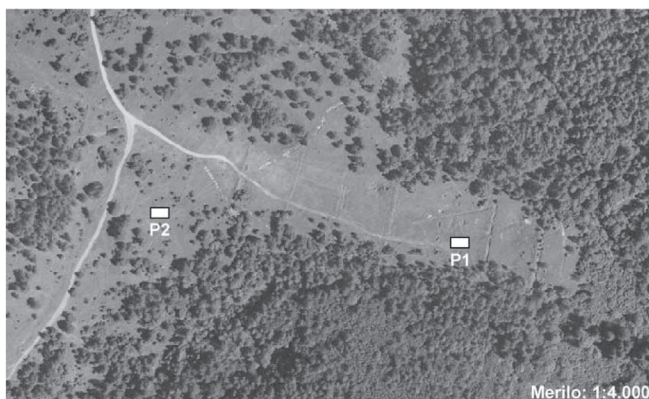
## 2 Material in metode

### 2 Material and methods

#### 2.1 Opis območja raziskave

##### 2.1 Description of study site

Pehotno strelišče na vojaškem poligonu Poček leži na kraškem polju ob vznožju jugozahodnih pobočij Javornikov. Nadmorska višina je 560 m, nagib terena 0 %. Gozdovi, ki preraščajo območja vojaškega vadišča Poček, so večinoma termofilnega značaja. Prevladujejo gozdovi črnega gabra, malega jesena in hrastov; sledijo jim gozdovi rdečega in črnega bora z listavci, najmanjši pa je delež hrastovih gozdov z bukvijo in lipo. Na manjših površinah se pojavljajo tudi gozdne združbe, ki jih tvorita bukev in smreka; slednja je bila skupaj s črnim borom umetno vnesena v to pokrajino (HABIČ 1998). Rjava pokarbonatna tla, ki so se razvila na apnencu, so slabo kislila (pH = 6,2). Tla so glinasto-illovnate teksture z ugodnim razmerjem C: N za mikrobiološko razgradnjo organske snovi. Dobra je



Slika 1: Pehotno strelišče Poček z raziskovalno ploskvijo P1 in manj onesnaženo ploskvijo P2 v njegovi okolici

Figure 1: Poček shooting range with research plot P1 and less polluted plot P2, situated in its surroundings

tudi založenost tal z rastlinam dostopnim kalijem, medtem ko je dostopnost fosforja slaba (AL SAYEGH PETKOVŠEK *et al.* 2006, 2009).

V območju pehotnega strelišča Poček smo zasnovali dve raziskovalni ploskvi z namenom, da zajamemo značilnosti rastišča na različno obremenjenih tleh. Prva raziskovalna ploskev leži na predelu aktivnega pehotnega strelišča z bolj onesnaženimi tlemi (P1), druga pa v bližnji okolici pehotnega strelišča, na lokaciji, kjer smo predvidevali, da so tla bistveno manj neonesnažena (P2). Na raziskovalni ploskvi P1 (Gaus-Krügerjevi koordinati: X = 64999,50 m, Y = 440573,70 m), ki leži med linijo tarč in zaščitnim nasipom (slika 1), so tla obremenjena s kovinami (glej preglednico 6). Zaradi onesnaženja tal in hitrega odtoka padavinske vode v podtalje imajo tla zmanjšano samoočiščevalno sposobnost. Predhodna raba tal raziskovalne ploskve P2 (X = 64540,31 m, Y = 440277,58 m), ki je manj onesnažena, je travnik v zaraščanju. Raziskovalni ploskvi imata enake dimenzije. Površini ploskev z robno vrstico merita 91 m<sup>2</sup> (13 m x 7 m), skupaj z ograjeno površino 135 m<sup>2</sup> (15 m x 9 m). Obe ploskvi sta ograjeni z 2 m visoko žičnato ogrado, ki preprečuje divjadi objedanje in poškodovanje sadik. Poskusni objekt P1, ki leži na pehotnem strelišču, ima na sprednji strani, okoli 10 metrov pred ogrado, še nov 1 m visok zaklon iz zemljine in kamenja, da bi se med streljanjem zmanjšale možnosti poškodovanja sadik.

#### 2.2 Izbor drevesnih vrst

##### 2.2 Selection of tree species

Primerne lesnate vrste za zasaditev poskusnih površin smo iskali med okoliškimi drevesnimi vrstami, ki poraščajo travišča obravnavanega območja. Pri izbiri smo upoštevali talne značilnosti zemljišč in obremenjenost tal s kovinami. Izbrane drevesne vrste se morajo odlikovati z nekaterimi lastnostmi, ki so potrebne, da bi potencialni sanacijski nasadi učinkovito opravljali pričakovano zaščito zemljišča in s sprejemom kovin v tkiva dreves tudi blagodejno delovali na izboljšanje razmer razvrednotenega okolja. Pri izboru in kombinaciji vrst smo upoštevali značilnosti njihovih interakcij v rizosferi, oblik mikorize in drugih simbiotskih organizmov korenin. Posamezne drevesne vrste so navezane na različne skupine organizmov v koreninskem sistemu, z različnim pomenom za privzem, shranjevanje kovin in prenos hranilnih snovi med vrstami, zato so pomembne tudi kombinacija različnih drevesnih vrst ter povezave koreninskih sistemov s skupnim micelijem gliv v tleh.

Ob upoštevanju pokrajinske značilnosti obravnavanega predela Slovenije, rastiščnih in splošnih ekoloških razmer, morfoloških, fizioloških ter drugih značilnosti posameznih drevesnih vrst in razpoložljivosti sadik v slovenskih drevesnicah, smo za testno zasaditev poskusnih površin izbrali 5 drevesnih vrst, in sicer: rdeči



bor (*Pinus sylvestris* L.), črno jelšo (*Alnus glutinosa* L.), gorski javor (*Acer pseudoplatanus* L.), navadno brezo (*Betula pendula* Roth.) in ivo (*Salix caprea* L.). Sadike črne jelše, gorskega javorja in rdečega bora, ki smo jih pridobili v drevesnici Omorika na Muti, imajo spričevalo o izvoru gozdnega reprodukcijskega materiala. Sadilni material je avtohtonega izvora iz semenskih objektov v predalpskem provenienčnem območju, kategorija izbran (rdeči bor, GSO št. 4.0253) ali znano poreklo (črna jelša, GSO št. 4.0250), ter iz provenienčnega območja Pohorje (gorski javor). Sadike navadne breze smo pridobili v drevesnici Semesadike Mengeš d.d, vrbo ivo pa iz drevesnice Markovci, oboje kategorije znano poreklo in »ni za uporabo v gozdarstvu«. Rastlinski material je bil v drevesnicah vzgojen za prodajo brez uporabe posebnih postopkov nege. Sadike so bile stare 2 do 3 leta. Sadike smo do sadnje na Počku dne 14.4.2008 hranili v hladilnici Semesadike Mengeš pri Ljubljani.

### 2.3 Opis poskusa in meritve rastnih parametrov ter vitalnosti sadik

#### 2.3 Description of experiment and measurements of growth parameters and vitality of trees

Fitoremediacijski poskus je zasnovan v obliki naključnih popolnih blokov (RCB / »Randomized Complete Blocks design«). Posamezno raziskovalno ploskev (P1 in P2) smo oblikovali v 3 naključnih blokih (ponovitvah) s 6 ploskvicami v vsakem bloku. Posamezni blok je sestavljen iz 5 ploskvic s 4 sadikami iste drevesne vrste (rdeči bor, navadna breza, črna jelša, gorski javor, iva) na ploskvico ter iz ploskvice »M« s kombinacijo 4 sadik različnih drevesnih vrst (rdeči bor, navadna breza, črna jelša, vrba – iva). Bloki imajo kompaktno formo in so zasnovani tako, da je mikrorastiščna variabilnost znotraj blokov manjša kot med bloki. Kotne pozicije poskusnega objekta in ponovitve (bloki) smo označili s količki in tablicami. Sadili smo v

ravnih linijah z enakimi razdaljami med sadikami. Razmik med posameznimi sadikami je en meter.

Raziskovalno ploskev obdaja robna vrsta, ki smo jo zasadili s sadikami rdečega bora. Robna vrsta zagotavlja enake razmere za vse testne sadike v poskusu in zato ni predmet meritev in opazovanj. Raziskovalni ploskvi smo osnovali v aprilu 2008 pred začetkom vegetacijske sezone po predhodnem terenskem ogledu, izdelanem načrtu, terenski izmeri in označitvi na terenu.

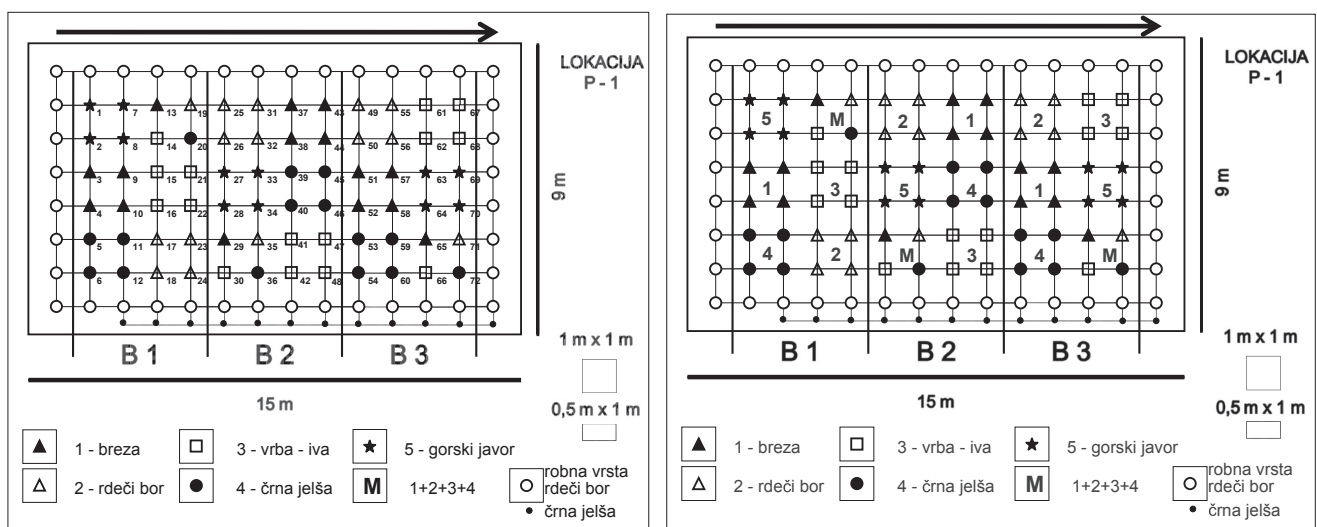
Na posamezni raziskovalni ploskvi smo izmerili višine debelc živih terminalnih poganjkov in premere debelc na koreninskem vratu sadik vseh primerkov ter popisali vitalnost osebkov, poškodovanost in potencialne vzroke za izgubo vitalnosti oziroma za poškodovanost sadik. Sadike smo po vitalnosti razvrstili v razrede (preglednica 1).

Meritve in opazovanja smo opravili v prvem letu (27. junij in 6. oktober 2008) ter v drugem letu poskusa (24. junij 2009). Za meritve premerov debelc smo uporabili milimetrsko merilo, medtem ko smo višine dreves merili z letvijo. Natančneje je postopek meritev opisan v poglavju statistične analize.

### 2.4 Vzorčenje sadik in kemijske analize kovin v njihovih tkivih

#### 2.4 Sampling of seedlings and chemical analyses of metals in their tissues

Za ocenitev sposobnosti privzema kovin iz tal v rastlinska tkiva sadik dreves (korenine, les, listi oz. iglice) smo po zaključku vegetacijske dobe v prvem letu rasti, 6. oktobra 2008, odvzeli po 3 sadike posamezne drevesne vrste na raziskovalni ploskvi. Vzorčene sadike so bile vitalne in rastoče. Odvzete sadike smo beležili s kodo 999. V posamezni sadiki smo izmerili kovine v treh rastlinskih



Slika 2: Skici zasaditve ploskve P1 z oštevilčenimi sadikami (levo) in označenimi ploskvicami v posameznem bloku (desno)

Figure 2: Maps of research plot P1 with planted and numbered seedlings (left) and subplots in selected block (right)

Preglednica 1: Razvrstitev sadik v razrede po stopnji vitalnosti

Table 1: Seedlings are ranged in different classes according to degree of their vitality

Razred vitalnosti sadik <i>Class of vitality</i>	Opis sadike, ki sodi v posamezen vitalnostni razred <i>Description of seedling, which is ranged in selected class of vitality</i>
1	slabo vitalna sadika
2	srednje vitalna sadika
3	dobro vitalna sadika
40	posušena sadika
41	sadika je vitalna le pri korenčniku ali v spodnjem delu debelca, večinoma suhi poganjki
999	vzorčenje za analizo kovin, sadika je bila odstranjena iz poskusa

organih (koreninski sistem, debelce in listi oz. iglice). Hkrati smo v okolici koreninskega sistema posameznih sadik vzorčili tla.

Odvzete talne vzorce smo posušili pri temperaturi do 35 °C, homogenizirali in presejali skozi plastično sito, velikosti por 2 mm. Rastlinske vzorce (korenine, debelca, iglice in liste) smo sušili v sušilniku pri 28 °C do konstante teže. Posušeni rastlinski material smo homogenizirali z visokofrekvenčnim mlinčkom s keramičnim nožem (Büchi-Mixer B-400). Nato smo talne in rastlinske vzorce razklopili s popolnim kislinskim sežigom v mikrovalovni napravi (Milestone Ethos Plus; zatehta vzorca 0,5000 ± 0,0010 g; reagent: 10 ml ultračiste HNO<sub>3</sub> z dodatkom KMnO<sub>4</sub>; T<sub>max</sub> = 180 °C) in v njih izmerili vsebnosti kovin (Pb, Cu, Cd, As, Zn, Co, Ni in Cr) z metodo induktivno sklopljene plazme z masnospektrometrično detekcijo (ICP-MS; Hewlett Packard). Vse kemijske analize so bile opravljene v laboratoriju ERICo Velenje. Uporabili smo standardne referenčne materiale za rastline (IAEA-336, Trace and minor elements in Lichen) in tla (NIST SRM 2711, Montana Soil).

## 2.5 Statistične analize

### 2.5 Statistical analyses

Z obdelavo merilnih podatkov na koncu rasti v oktobru 2008 in v enoletnem razmiku med 27.6.2008 ter 24.6.2009 smo izračunali povprečne višine normalno rastočih osebkov za posamezne drevesne vrste in povprečne debeline debelc na koreninskem vratu za vse žive osebke ne glede na to, ali normalno priraščajo v višino, ali pa zaradi različnih okoljskih dejavnikov (pozni mraz, suša) odganjajo le še v spodnjem delu debelca. Analiza primerjave rasti posamezne drevesne vrste na različnih poskusnih ploskvah omogoča oceno stopnje njene prilagodljivosti na dane rastiščne razmere okolja.

Izhodiščno stanje testnega materiala smo zaradi upoštevanja vpliva presaditvenega efekta na rast in razvoj sadik v poskusu ocenili po zaključku vegetacijske dobe v letu 2008, to je po prvem letu rasti sadik v poskusu. Pri ovrednotenju primerjalnih izhodiščnih višin debelc smo v statistične analize zajeli vitalne sadike (izločeni osebki s kodo »40« in kodo »41«), medtem ko smo pri analizah premera debelc na koreninskem vratu upoštevali vse

žive sadike (izločeni osebki s kodo »40«). Podatke smo obdelali s programskim paketom za statistične analize *Statistica for Windows*. Homogenost varianc smo preverili s *testom po Levenu*. V primeru sprejetja ničelne hipoteze o enakosti varianc smo za testiranje hipoteze o enakosti višin ali premera koreninskega vratu po posameznih drevesnih vrstah na poskusnih objektih P1 in P2 uporabili metodo ANOVA, v primeru zavrnitve ničelne hipoteze in sprejetju alternativne hipoteze pa *Studentov t test* z ločeno oceno varianc. Hipotezo o enakosti zavračamo pri stopnji tveganja  $\alpha = 0,05$ .

Debelinske in višinske prirastke posameznih drevesnih vrst, rastočih na različno onesnaženih ploskvah, smo primerjali med seboj v drugem letu njihove rasti v nasadu (2009), da bi ugotovili, ali obstaja oziroma kolikšna je razlika med njimi v rasti. V primerjavo testnega materiala smo zajeli povprečni višinski prirastek (pIh) in povprečni relativni višinski prirastek (pIh %) ter povprečni prirastek premera debelca na koreninskem vratu sadike (pId) in povprečni relativni prirastek premera debelca na koreninskem vratu sadike (pId %). Višinski prirastek (Ih) za vsako posamezno sadiko na posameznem objektu smo izračunali po formuli  $(h_{(24.6.2009)} - h_{(6.10.2008)})$ , relativni višinski prirastek sadike pa po naslednji formuli  $(h_{(24.6.2009)} - h_{(6.10.2008)}) / (h_{(24.6.2009)}) * 100$ . Analogno formulo smo uporabili tudi za izračun debelinskega prirastka sadike. Iz primerjalnih analiz rasti v višino (Ih) smo izločili vse osebke s kodami »40«, »41« in »999«, iz primerjalnih analiz značilnosti rasti v debelino (Id) pa osebke s kodami »40« in »999«.

Vse statistične analize vsebnosti kovin smo opravili s pomočjo programskega paketa *Statistica for Windows 7.1* (StatSoft, 2006). Kot statistično značilne smo privzeli rezultate, če je bila velikost statističnega tveganja  $p < 0,05$ . Za vzorce, v katerih so bile vsebnosti pod mejo določljivosti analitske metode, smo pri izračunu upoštevali polovično vrednost meje določljivosti. Homogenost varianc smo testirali z uporabo *Levanovega t testa*. Za testiranje razlik med povprečnimi višinami in debelinami posameznih vrst, rastočih na različnih ploskvah, smo uporabili *t test za neodvisne vzorce*. Razlike v vsebnostih kovin v tleh ploskev P1 in P2 smo testirali z uporabo *Mann-Whitney U testa*, razlike med povprečnimi vsebnostmi kovin v istih vrstah sadik, rastočih na različnih ploskvah, pa s *Kruskal-Wallis ANOVA* testom. Soodvisnost med vsebnostjo kovin

v tleh in koreninah sadik smo ugotavljali z izračunom Spearmanovega korelacijskega koeficienta rangov (R). Vse prikazane vsebnosti kovin so podane na suho težo vzorcev. Z izračunom biokoncentracijskega faktorja (BCF) in translokacijskega faktorja (TC) smo ocenili mobilnost posameznih kovin. BCF podaja razmerje med vsebnostjo kovin v koreninah in tleh, TC pa razmerje med vsebnostjo kovin v poganjkih in koreninah.

### 3 Rezultati in diskusija

#### 3 Results and discussion

##### 3.1 Rastna uspešnost sadik

###### 3.1 Growth efficiency of seedlings

Rastno uspešnost sadik smo ocenjevali z ugotavljanjem vitalnosti sadik, z določitvijo indeksa preživetja (mortalitete) in z meritvami višinskih ter debelinskih prirastkov sadik po dobrih dveh mesecih rasti na raziskovalnih ploskvah (27.6.2008), po koncu vegetacijskega obdobja (6.10.2008) in tik pred zaključkom pričujoče raziskave (24.6.2009). Spremljali smo rastno uspešnost po 15 sadik črne jelše, navadne breze, rdečega bora in ive ter 12 sadik gorskega javorja oziroma 72 sadik na posamezni raziskovalni ploskvi (skupaj 144 sadik petih drevesnih vrst).

Po 15 mesecih rasti v poskusu je bilo največ vitalnih sadik rdečega bora in navadne breze. Najmanj vitalne so bile na dan 24.6.2009 sadike ive in gorskega javorja, saj smo v skupino vitalnih sadik uvrstili le dve (P1) oz. eno sadiko ive (P2) ter le sadiko gorskega javorja na ploskvi P2 (preglednica 2). Nasprotujoči so podatki za črno jelšo, ki je očitno uspešno rastla na ploskvi P1 (9 sadik uvrščenih v razred vitalnih sadik) in povsem nasprotno na ploskvi P2 (kar 7 sadik je propadlo, med preostalimi pa ni bila nobena vitalna). Natančneje je delež preživelih sadik prikazan v preglednici 3.

Pomemben kazalec uspešnosti zasaditve je indeks preživetja oziroma mortaliteta sadik. Glede na slednje je najuspešnejša vrsta rdeči bor, kjer je bil delež preživetja 100 % v vseh obdobjih opazovanja in na obeh raziskovalnih ploskvah. Tudi število vitalnih sadik se je sčasoma povečevalo in je največje med vsemi preučevanimi drevesnimi vrstami. Glede na delež preživetja mu sledi navadna breza, kjer sta na ploskvi P1 propadli le dve sadiki, na ploskvi P2 pa nobena. Gorski javor in črna jelša sta uspešneje rastla na ploskvi P1, kjer je propadla le ena sadika črne jelše in nobena sadika gorskega javorja. Nasprotno pa je na ploskvi P2 propadlo 6 sadik gorskega javorja oziroma 7 sadik črne jelše. Pri omenjenih vrstah na sušenje sadik najverjetneje niso vplivale povečane vsebnosti kovin v tleh, ampak mikroklimatske razmere in sposobnost prilagoditve posamezne drevesne vrste na kraški teren, kjer površinska voda hitro odteka, sadike pa so lahko tudi izpostavljene poznemu mrazu in pozebam v

Preglednica 2: Pregled sadik, ki so uvrščene v posamezne razrede vitalnosti

Table 2: List of seedlings, ranged in selected classes of vitality

vrsta species	datum date	P1						P2					
		1	2	3	40	41	999	1	2	3	40	41	999
<b>razredi vitalnosti*</b> classes of vitality													
<b>črna jelša</b> <i>Alnus glutinosa</i> (n = 15)	27.06.2008		3	12					8	4	3		
	6.10.2008		1	12	1	1			4	6	5		
	24.06.2009			9	1	2	3		1		7	4	3
<b>gorski javor</b> <i>Acer pseudoplatanus</i> (n = 12)	27.06.2008	2	5	5				1	4	3	2	2	
	6.10.2008		4	8					4	4	2	2	
	24.06.2009		4	0		5	3	2	2	1	3	1	3
<b>navadna breza</b> <i>Betula pendula</i> (n = 15)	27.06.2008	1	6	6	1	1		1	7	7			
	6.10.2008	1	3	9	2			1	1	13			
	24.06.2009		4	5	2	1	3	3	1	8			3
<b>rdeči bor</b> <i>Pinus sylvestris</i> (n = 15)	27.06.2008	1	4	10				2	8	5			
	6.10.2008		3	12				2	3	10			
	24.06.2009		1	11			3		1	11			3
<b>iva</b> <i>Salix caprea</i> (n = 15)	27.06.2008		6	1	3	5			5	7	1	2	
	6.10.2008		1	7	6	1		1	1	11	2		
	24.06.2009		4	2	6		3	3	1	1	6	1	3

\*Razredi vitalnosti: 1 – slaba, 2 – srednja, 3 – dobra, 40 – posušena sadika, 41 – sadika, vitalna le pri koreničniku in / ali spodnjem delu debelca; 999 – izkopane sadike za analize kovin v rastlinskih tkivih

\*Classes of vitality: 1 – weak, 2 – medium, 3 – good, 40 – dead seedling, 41 – seedling was vital only at the base of the stem, 999 – seedlings were dug out for chemical analyses of the metals accumulated in plant tissues

Preglednica 3: Število propadlih in delež preživelih sadik na raziskovalnih ploskvah P1 in P2

Table 3: Number of dead seedlings and survival rate of seedlings planted on research plots P1 and P2

vrsta species	datum date	P1		P2	
		n*	delež**	n	delež
<b>črna jelša</b> <i>Alnus glutinosa</i> (n = 15)	27.06.2008	0	100 %	3	80 %
	6.10.2008	1	93 %	5	67 %
	24.06.2009	1	93 % (73 %)	7	53 % (42 %)
<b>gorski javor</b> <i>Acer pseudoplatanus</i> (n = 12)	27.06.2008	0	100 %	2	87 %
	6.10.2008	0	100 %	2	87 %
	24.06.2009	0	100 % (75 %)	6	50 % (25 %)
<b>navadna breza</b> <i>Betula pendula</i> (n = 15)	27.06.2008	1	93 %	0	100 %
	6.10.2008	2	87 %	0	100 %
	24.06.2009	2	87 % (83 %)	0	100 % (93 %)
<b>rdeči bor</b> <i>Pinus sylvestris</i> (n = 15)	27.06.2008	0	100 %	0	100 %
	6.10.2008	0	100 %	0	100 %
	24.06.2009	0	100 % (93 %)	0	100 % (93 %)
<b>iva</b> <i>Salix caprea</i> (n = 15)	27.06.2008	3	80 %	1	93 %
	6.10.2008	6	60 %	2	87 %
	24.06.2009	6	60 % (50 %)	6	60 % (50 %)

\*Število propadlih sadik. \*\*Delež preživelih sadik, če bi upoštevali, da bi tudi vse izkopane sadike preživele, saj je bila večina sadik dobro vitalna; v oklepaju podajamo delež preživelih sadik, če je vzorec zmanjšan zaradi izkopanih sadik, ki smo jih uporabili za analizo kovin

\*Number of dead seedlings. \*\*Survival rate, considering that all seedlings, which were dug out for chemical analyses, would survive since they were vital; the figures in brackets indicate the survival rate for reduced samples

Preglednica 4: Povprečne višine (h) in premeri debelc na koreninskem vratu ( $d_{kv}$ ) s koeficienti variacije (KV) za sadike testnih drevesnih vrst na rastiščih z različno onesnaženimi tlemi P1 in P2 v letu 2008

Table 4: Average heights (h) and diameters at the base of stems ( $d_{kv}$ ) with standard deviations (KV) of seedlings, growing on differently polluted plots P1 and P2 in 2008

vrsta / species	6. 10. 2008		P1		P2		P		
	parameter	n	$\bar{a}$	KV %	n	$\bar{a}$	KV %		
<b>črna jelša</b> <i>Alnus glutinosa</i>	h (cm)	13	27,8	24	10	23,4	30	0,14881	nz
	$d_{kv}$ (mm)	14	4,00	22	10	4,10	24	0,79684	nz
<b>gorski javor</b> <i>A. pseudoplatanus</i>	h (cm)	12	112	13	8	110	14	0,80115	nz
	$d_{kv}$ (mm)	12	9,33	12	10	9,00	21	0,61588	nz
<b>navadna breza</b> <i>Betula pendula</i>	h (cm)	13	69,5	11	15	92,0	15	0,00027	***
	$d_{kv}$ (mm)	13	6,69	21	15	7,80	19	0,51190	nz
<b>rdeči bor</b> <i>Pinus sylvestris</i>	h (cm)	15	43,3	16	15	44,4	11	0,62790	nz
	$d_{kv}$ (mm)	15	11,1	17	15	11,1	11	0,90186	nz
<b>vrba iva</b> <i>Salix caprea</i>	h (cm)	8	61,6	40	13	96,9	34	0,01800	*
	$d_{kv}$ (mm)	9	9,44	29	13	10,8	19	0,18316	nz

\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$ ; nz:  $p \geq 0,05$  (ni značilnih razlik); n – število osebkov;  $\bar{a}$  – aritmetična srednja vrednost

\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$ ; nz:  $p \geq 0,05$  (not statistically significant); n – number of seedlings;  $\bar{a}$  – arithmetic means



vegetacijski dobi. Rezultati ugodnejše rasti drevesnih vrst na rastišču, ki je bolj obremenjeno s težkimi kovinami (ploskev P1) v letu 2009, so najverjetneje posledica razlik v pojavljanju poznega mraza v času razvoja mladih odganjkov. Ob popisu dne 24.06.2009 smo namreč v neposredni bližini ploskve P2 opazili tudi poškodovanost naravne vegetacije na tem območju. Na obeh ploskvah je bila najmanj uspešna vrsta iva; med zasajenimi sadikami ive je po 15 mesecih rasti propadlo na ploskvi P1 šest, na ploskvi P2 pa sedem sadik, ena pa je bila delno posušena (60-odstotni delež preživetja). Domnevamo, da je (kljub izrazito kratkemu obdobju opazovanja) umrljivost na ploskvi P1 sprejemljiva za vse vrste sadik, nasprotno velja za gorski javor in črno jelšo, rastočih na raziskovalni ploskvi P2, saj je mortaliteta večja od 30 %, kar naj bi bila po literaturi še sprejemljiva mortaliteta za sadike po drugi vegetacijski dobi (MERTENS *et al.* 2004).

Z analizo primerjave rasti posamezne drevesne vrste na različnih poskusnih ploskvah smo ocenjevali stopnjo njene prilagodljivosti na dane rastiščne razmere v juvenilni fazi rasti in razvoja sadik. Z namenom, da bi ugotovili izhodiščno (začetno) stanje testnega materiala za nadaljnje primerjave, smo po prvem letu rasti sadik v poskusu statistično ovrednotili rastne razlike vzorčenih sadik po drevesnih vrstah glede na njihovo rast na ploskvi P1 in P2.

S stopnjo tveganja  $\alpha = 0,001$  oz.  $\alpha = 0,05$  lahko trdimo, da je bila 6. oktobra 2008 povprečna vrednost višine pri navadni brezi oz. vrbi iva na ploskvi P2 statistično značilno večja kot na ploskvi P1, medtem ko je bilo populacijsko povprečje višine dreves za črno jelšo, gorski javor in rdeči bor enako na ploskvi P1 in na P2 pri dani stopnji tveganja. Iz koeficienta variacije (KV) je razvidno, da je bila porazdelitev za višino sadik pri gorskem javoru podobno variabilna na obeh ploskvah, medtem ko je bila pri rdečem boru in vrbi iva bolj variabilna na ploskvi P1, pri navadni brezi in črni jelši pa na ploskvi P1 manj variabilna kot na ploskvi P2. Oktobra 2008 je bil povprečen premer drevesa na koreninskem vratu na ploskvi P1 enak kot na ploskvi P2. Trditev velja pri stopnji tveganja  $\alpha = 0,05$  za vse posamezne testne drevesne vrste. Porazdelitev za  $d_{kv}$  je na obeh ploskvah podobno variabilna za navadno brezo in črno jelšo, medtem ko je za rdeči bor in ivo bolj variabilna na ploskvi P1, za gorski javor pa manj variabilna na ploskvi P1 kot na ploskvi P2.

Ugotovljene značilne razlike v povprečni višini brez oziroma ive so lahko posledica izbire saditvenega materiala ob osnovanju poskusa dne 14.4.2008 (razlike v višini sadik; izmera tedaj ni bila narejena) kakor tudi razlik v rastiščnih razmerah med ploskvijo P1 in P2 (mikroklimatske, onesnaženost tal) in s tem povezane stopnje potencialne prilagojenosti sadik izbranih vrst za rast v novih življenjskih razmerah okolja. Sadike navadne breze smo pridobili v drevesnici Seme Sadike Mengeš, vrbo ivo pa iz drevesnice Markovci pri Ptujju. Enakost premera koreninskega vratu tudi pri brezi in vrbi na poskusnih objektih P1 in P2 sicer

nakazuje možnost, da obstaja povezanost obeh drevesnih vrst med rastjo v višino v prvem letu in razlikami v rastiščnih razmerah na primerjalnih objektih.

Za oceno primernosti izbere drevesnih vrst, ki so najbolj uspešno priraščale na obeh ploskvah, smo za obdobje od jeseni 2008 do poletja 2009 analizirali povprečne višinske in debelinske prirastke po posameznih testnih vrstah in jih primerjali po povprečnih relativnih prirastnih vrednostih glede na povprečno velikost sadik poskusnih vrst v letu 2009. Rezultate prikazujemo v preglednici 5. Obravnavali smo vse sadike brez vidnih poškodb, ki smo jih lahko uvrstili v razrede vitalnosti od 1 do 3, med njimi tudi tiste, ki so zaradi različnih stresnih dejavnikov okolja imele odmrle dele odganjkov in so slabo priraščale v višino (izmerjena višina manjša od predhodno izmerjene). Posledično so bili nekateri povprečni prirastki negativni (iva na ploskvi P1). Podatkov za povprečno višino črne jelše, rastoče na ploskvi P1, ne prikazujemo, ker je bila na dan meritve le ena sadika še vitalna (preglednica 5).

V nadaljevanju prikazujemo tudi višinske in debelinske podatke po dnevih meritev za celotno preučevano obdobje z ocenami standardnih deviacij. V prvi skupini (slika 3) prikazujemo ivo in navadno brezo, kjer je bilo izhodiščno stanje med ploskvama enako po debelini, a različno po višini obravnavanih sadik, ter v drugi skupini (slika 4) vrste, kjer je bilo izhodiščno stanje med ploskvami enako po višini in debelini sadik. Na dan zadnje meritve (24.6.2009) se povprečni višini rdečega bora in gorskega javorja, rastočih na različno s kovinami obremenjenih ploskvah, še vedno ne razlikujeta. Primerjave za črno jelšo nismo opravili zaradi premajhnega vzorca na ploskvi P2.

Najbolje med vsemi testnimi drevesnimi vrstami je v drugem letu rasti v nasadu priraščal rdeči bor. Na ploskvi P1 je v povprečju v višino prirastel 25,8 cm, na ploskvi P2 pa 19,8 cm. Njegov relativni prirastek v višino je bil na ploskvi P1, ki je onesnažena s težkimi kovinami, večji (37,3 %) kot na manj obremenjeni ploskvi P2 (30,8 %). Tudi v debelino je uspešno priraščal, in sicer je bila razlika med povprečnima premeroma koreninskega vratu v obravnavanem obdobju 3,6 mm (25 %). Druga najuspešnejša vrsta je navadna breza, ki je priraščala v višino na obeh ploskvah, in sicer 6,9 cm (9,0 %) (P1) oziroma 5,5 cm (5,6 %) (P2).

Črna jelša in gorski javor sta povsem nasprotno priraščala na ploskvah P1 in P2. Prva vrsta je uspešneje priraščala v višino na ploskvi P1, druga pa na ploskvi P2, enako velja tudi za priraščanje v debelino. Vrba iva se je izkazala kot občutljiva vrsta oz. provenienca, kar kažejo tako njena mortaliteta, število vitalnih sadik kot priraščanje v višino. Večje propadanje sadik je bilo opaženo na ploskvi P1 v prvem letu rasti, medtem ko v drugem letu rasti ugotavljamo večjo mortaliteto na lokaciji P2. Podobno uspešnejšo rast na ploskvi P1 smo ugotovili za rdeči bor in črno jelšo, vzrok je najverjetneje v vplivu poznega mraza na sadike, rastoče na ploskvi P2.

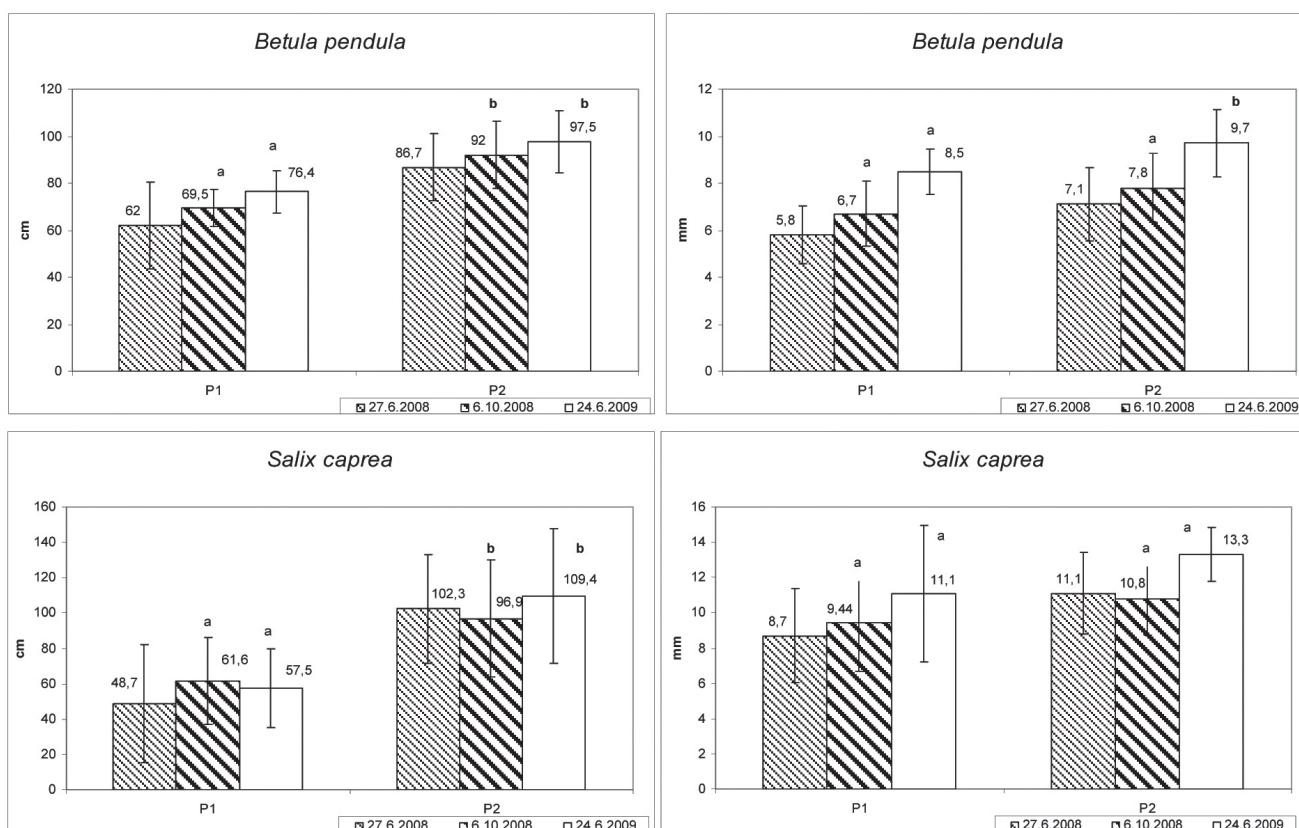


Preglednica 5: Povprečni in relativni višinski ter debelinski prirastki sadik, rastočih na ploskvi P1 in P2

Table 5: Average and relative growth in height and thickness of seedlings growing on research plots P1 and P2

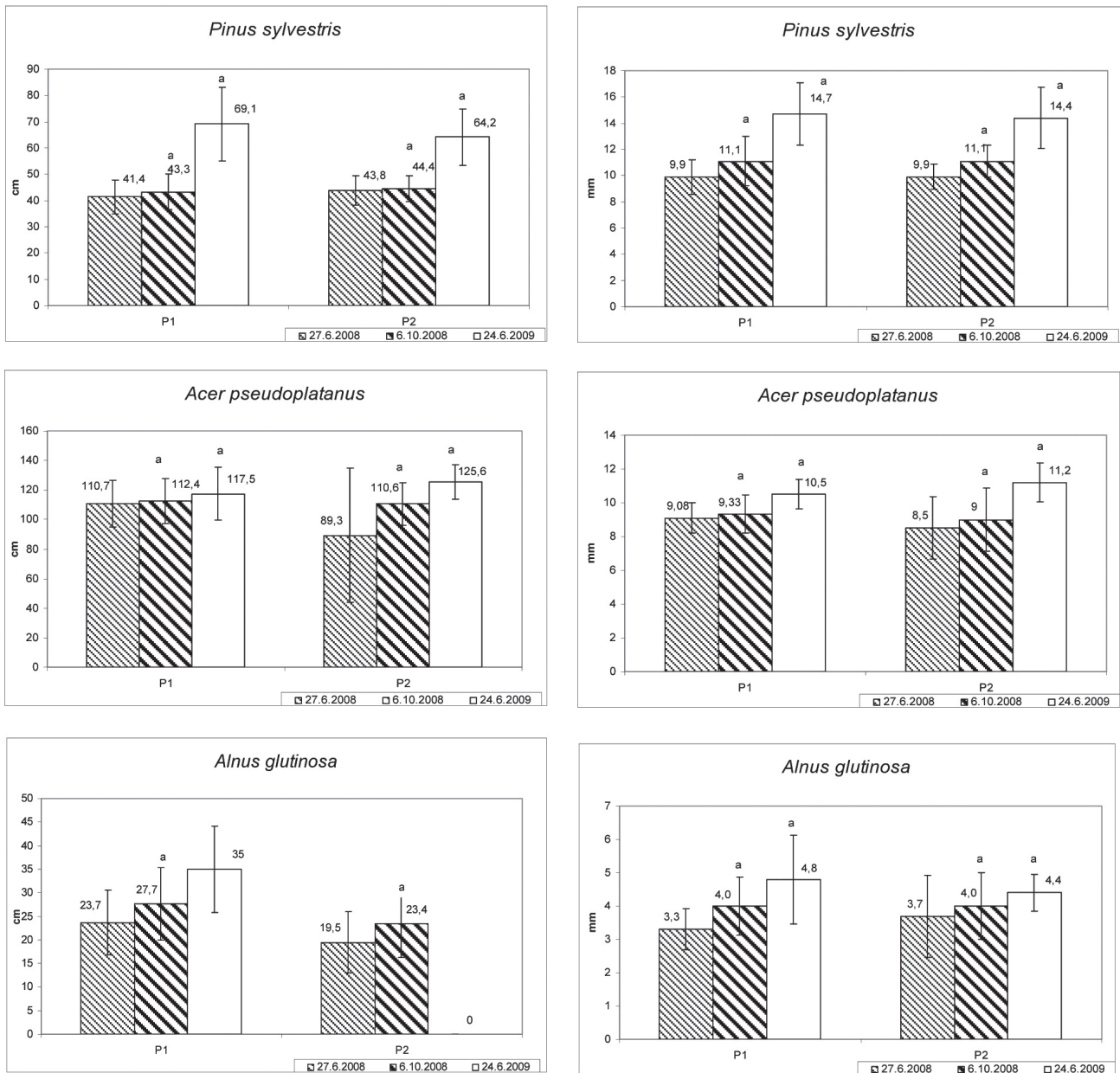
drevesna vrsta / tree species	P1			P2		
	n <sub>h</sub> *	pIh (cm)	pIh (%)	n <sub>h</sub>	pIh (cm)	pIh (%)
<b>Povprečni višinski prirastek (cm) in povprečni relativni višinski prirastek (%)</b>						
črna jelša ( <i>Alnus glutinosa</i> )	9	7,3	20,8	1	/	/
gorski javor ( <i>A. pseudoplatanus</i> )	4	5,1	4,3	5	15	11,9
navadna breza ( <i>Betula pendula</i> )	9	6,9	9,0	12	5,5	5,6
rdeči bor ( <i>Pinus sylvestris</i> )	12	25,8	37,3	12	19,8	30,8
iva ( <i>Salix caprea</i> )	6	-4,1	-7,1	5	12,5	11,4
<b>Povprečni debelinski prirastek (mm) in povprečni relativni debelinski prirastek (%)</b>						
	n <sub>h</sub> *	pId <sub>kv</sub> (mm)	pId <sub>kv</sub> (%)	n <sub>h</sub>	pId <sub>kv</sub> (mm)	pId <sub>kv</sub> (%)
črna jelša ( <i>Alnus glutinosa</i> )	11	1,4	29,2	5	2,5	9,1
gorski javor ( <i>A. pseudoplatanus</i> )	9	1,2	11,4	6	2,2	19,6
navadna breza ( <i>Betula pendula</i> )	10	1,8	21,2	12	1,9	19,6
rdeči bor ( <i>Pinus sylvestris</i> )	12	3,6	24,5	12	3,6	25,0
iva ( <i>Salix caprea</i> )	6	1,4	12,6	6	2,5	18,8

\*Število sadik, ki smo jih izmerili 24.6.2009. \*Number of seedlings measured on 24.6.2009.



Slika 3: Povprečne višine (cm), debeline (mm) in standardne deviacije ive (*Salix caprea*) ter navadne breze (*Betula pendula*), rastočih na ploskvah P1 in P2. Statistično značilne razlike med obema raziskovalnima ploskvama smo označili z različnimi črkama.

Figure 3: Average heights (cm), thicknesses (mm) and standard deviations of *Salix caprea* and *Betula pendula* seedlings growing on research plot P1 and P2. Statistically significant differences between two research plots are marked with different letters.



Slika 4: Povprečne višine (cm), debeline (mm) in izračunane standardne deviacije sadik rdečega bora (*Pinus sylvestris*), gorskega javorja (*Acer pseudoplatanus*) in črne jelše (*Alnus glutinosa*), rastočih na ploskvah P1 in P2. Statistično značilne razlike med obema raziskovalnima ploskvama smo označili z različnima črkama.

Figure 4: Average heights (cm), thicknesses (mm) and standard deviations of *Pinus sylvestris*, *Acer pseudoplatanus* and *Alnus glutinosa* seedlings, growing on research plots P1 and P2. Statistically significant differences between two research plots are marked with different letters.

Podatki prirastnih parametrov in primerjalne analize rezultatov, ki smo jih naredili za testne drevesne vrste, s katerimi smo zasadili dve raziskovalni ploskvi na vojaškem poligonu Poček, nakazujejo zaostrene rastiščne razmere. Raziskava je pokazala, da med drevesnimi vrstami obstajajo razlike v uspevanju že v juvenilni fazi razvoja. Poškodbe dreves in umiranje se s časom povečujejo pri vseh drevesnih vrstah razen pri rdečem boru, ki kaže najboljšo ekološko prilagodljivost na dane razmere okolja. Rdeči bor dobro prirašča tudi na močno onesnaženih tleh,

iva skupaj z gorskim javorjem pa najslabše. Zaključimo lahko, da je za remediacijo pehotnega strelišča na Počku pomembno izbrati tako primerno drevesno vrsto kakor tudi dobro prilagojene osebkne posamezne vrste. Sicer moramo računati z izgubo remediacijske sposobnosti nasada, kljub večjim finančnim vložkom ob sadnji in vzdrževanju nasada.

### 3.2 Privzem kovin iz tal v sadike

#### 3.2 Metal accumulation in seedlings

#### 3.2.1 Vsebnost kovin v tleh

##### 3.2.1 Metal levels in soil

V tleh, v katerih so rastle korenine sadik, smo analizirali vsebnosti Pb, Cu, Zn, Cd, As, Co, Mo, Ni in Cr. Izmerjene povprečne vsebnosti ( $n = 15$ ) smo primerjali z zakonsko določenimi mejnimi (MIV), opozorilnimi (OIV) in kritičnimi imisijskimi vrednostmi za izbrane kovine (KIV) ter referenčnimi podatki (KABATA PENDIAS 2001). MIV pomeni gostoto posamezne nevarne snovi v tleh, pri kateri so učinki ali vplivi na zdravje človeka ali okolja še sprejemljivi, pri OIV obstaja verjetnost škodljivih učinkov ali vplivov na zdravje človeka ali okolja pri določenih vrstah rabe tal, KIV pa pomeni določeno koncentracijo nevarnih snovi, pri katerih tla štejemo za onesnažena; tako onesnažena tla niso primerna za pridelavo rastlin, namenjenih prehrani ljudi in živali, in za zadrževanje ali filtriranje padavinske vode (Ur. l. RS, št. 68/1996).

Najbolj so povečane vsebnosti Pb in Cu na ploskvi P1 (pehotno strelišče), kjer povprečne vsebnosti prekoračujejo opozorilno imisijsko vrednost (Pb v enem vzorcu celo kritično imisijsko vrednost) in hkrati zgornjo mejo referenčnih vrednosti za 5,5-krat (Pb) oziroma 1,2-krat (Cu). Povečane so tudi vsebnosti Ni in Cr na ploskvi P2, saj povprečne vsebnosti prekoračujejo opozorilno (Ni) oz. mejno imisijsko vrednost (Cr). Slednji prekoračuje tudi svetovno povprečje za skoraj dvakrat. Povečane vsebnosti Ni in Cr v okolici pehotnega strelišča (ploskev P2) so

najverjetneje povezane z vplivi drugih vojaških dejavnosti, ki jih ne moremo izključiti na tem območju. Vsebnosti Zn, As, Co in Mo v analiziranih talnih vzorcih niso povečane, saj so izmerjene vsebnosti manjše od zakonsko predpisanih imisijskih vrednosti na obeh ploskvah. Napravili smo tudi primerjavo med vsebnostmi kovin v tleh obeh raziskovalnih ploskev. Le vsebnosti Cd se v talnih vzorcih z obeh ploskev ne razlikujejo. Vsebnosti Pb, Cu in Zn so statistično značilno večje v tleh na raziskovalni ploskvi P1, ki leži na pehotnem strelišču, medtem ko so vsebnosti As, Co, Mo, Ni in Cr statistično značilno večje v talnih vzorcih z raziskovalne ploskve P2.

#### 3.2.2 Sprejem kovin v rastlinska tkiva

##### 3.2.2 Uptake of metals in plant tissues

Vsebnosti kovin v koreninah, deblih in poganjkih sadik, ki so rastle v različno obremenjenih tleh (ploskvi P1 in P2), smo določili na koncu prve vegetacijske sezone. Kljub temu da je remediacijske poskuse nujno opravljati vsaj dve vegetacijski sezoni, pa sklepamo, da so predstavljeni rezultati dovolj reprezentativni, saj obstajajo raziskave, ki nakazujejo, da so korenine zasičene s kovinami že v prvi rastni sezoni (BRUNNER *et al.* 2008). Sprejem kovin v rastlinska tkiva se razlikuje glede na kovino oziroma rastlinsko vrsto. Glede na njihov sprejem in razporeditev v rastlinskih organih ločujemo tri skupine kovin. V prvi skupini (Zn, Mn, Ni in B) se kovine enakomerno razporejajo med koreninami in poganjki; za drugo skupino (Cu, Cd, Co, Mo) je značilno, da se kovine kopičijo v koreninah v zmernih koncentracijah, večasih pa

Preglednica 6: Povprečne vsebnost kovin (mg/kg) z izračunano standardno deviacijo v tleh v okolici korenin izbranih sadik na raziskovalnih ploskvah P1 in P2 ter primerjava z referenčnimi vrednostmi in zakonodajo

Table 6: Average metal content (mg/kg) with calculated standard deviations in soil associated with roots, sampled on plots P1 and P2, reference data and Slovene legislation limits

	P1 (n = 15)	P2 (n = 15)	referenca <sup>1</sup> reference data <sup>1</sup>	mejne vrednosti <sup>2</sup> legislation limits <sup>2</sup>
Pb	385 ± 115 <sup>a</sup>	52,8 ± 6,21 <sup>b</sup>	1,5 – 70	85, 100, 530
Cu	120 ± 120 <sup>a</sup>	31,3 ± 6,56 <sup>b</sup>	4 – 100	60, 100, 300
Zn	176 ± 41,7 <sup>a</sup>	125 ± 15,5 <sup>b</sup>	9 – 326	200, 300, 720
Cd	0,77 ± 0,25 <sup>a</sup>	0,86 ± 0,15 <sup>a</sup>	0,08 – 1,61	1, 2, 12
As	15,0 ± 0,71 <sup>a</sup>	18,0 ± 1,44 <sup>b</sup>	0,2 – 25	20, 30, 55
Co	16,2 ± 0,67 <sup>a</sup>	18,1 ± 1,30 <sup>b</sup>	25	20, 50, 240
Mo	1,75 ± 0,55 <sup>a</sup>	2,35 ± 0,29 <sup>b</sup>	0,01 – 17	10, 40, 200
Ni	61,7 ± 1,90 <sup>a</sup>	74,7 ± 7,91 <sup>b</sup>	0,2 – 450	50, 70, 210
Cr	78,7 ± 3,03 <sup>a</sup>	102 ± 8,33 <sup>b</sup>	54	100, 150, 380

<sup>1</sup>Svetovno povprečje za površinsko plast tal (KABATA PENDIAS 2001). <sup>2</sup>Mejne imisijske vrednosti za posamezne kovine (mejne, opozorilne in kritične imisijske vrednosti) (Ur. l. RS, št. 68/1996). <sup>a</sup>Z različnima črkama smo označili statistično značilno razliko ( $p < 0,05$ ).

<sup>1</sup>Reference data for surface soil calculated on the world scale (KABATA PENDIAS 2001). <sup>2</sup>Thresholds values according to Slovene legislation (Ur. l. RS, no. 68/1996). <sup>a</sup>Data with the same letter indicate statistically identical values ( $p < 0.05$ ).

v precejšnjih količinah v poganjkih; v tretji skupini (Pb, Sn, Ti, Ag, Cr, V) kovine ostajajo vezane v koreninah in se jih v poganjke prenese izredno malo (ADRIANO 2001).

Na slikah 5 in 6 predstavljamo povprečne vsebnosti Pb, Cu, Ni, Co, Zn in Cd v koreninah, deblih in poganjkih

sadik, vzorčenih na ploskvah P1 in P2. Vsebnosti As in Cr podajamo tabelarično, saj smo izmerili vsebnosti omenjenih kovin le v koreninah; v deblih in poganjkih pa so bile vsebnosti As in Cr pod spodnjo mejo analitske metode (preglednica 7).

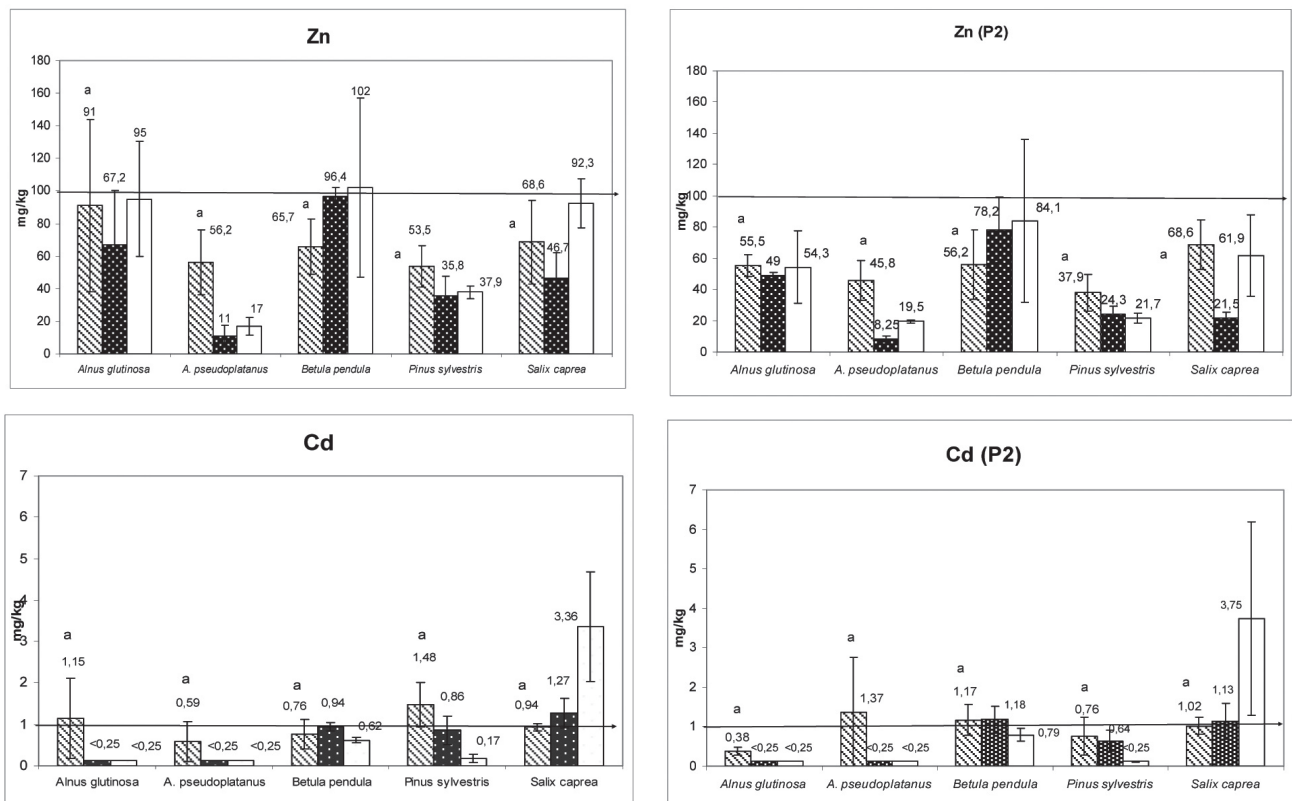
Preglednica 7: Vsebnosti As in Cr (mg/kg) v koreninah izbranih vrst sadik, vzorčenih na ploskvi P1 in P2

Table 7: As and Cr content (mg/kg) in roots of selected species of seedlings sampled on plots P1 and P2

	<i>Alnus glutinosa</i>	<i>A. pseudoplatanus</i>	<i>Betula pendula</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Salix caprea</i>
<b>As</b>					
P1	4,16 (1,53; 5,98)* <sup>a</sup>	3,62 (3,39; 3,91) <sup>a</sup>	2,63 (1,48; 3,78) <sup>a</sup>	3,41 (2,21; 4,82) <sup>a</sup>	3,43 (2,75; 4,55) <sup>a</sup>
P2	3,37 (2,74; 3,84) <sup>a</sup>	3,66 (3,04; 4,37) <sup>a</sup>	2,57 (1,87; 3,52) <sup>a</sup>	2,33 (2,22; 2,42) <sup>a</sup>	2,75 (1,99; 3,49) <sup>a</sup>
<b>Cr</b>					
P1	61,7 (49,5; 83,4) <sup>a</sup>	83,4 (48,5; 106) <sup>a</sup>	34,7 (24,2; 47,7) <sup>a</sup>	122,8 (73,4; 195) <sup>a</sup>	41,1 (33,2; 53,2) <sup>a</sup>
P2	31,6 (30,6; 33,4) <sup>b</sup>	58,6 (41,9; 87,4) <sup>a</sup>	43,3 (22,9; 58,1) <sup>a</sup>	53,5 (37,8; 79,1) <sup>a</sup>	78,0 (45,6; 136) <sup>a</sup>

\*Povprečna vsebnost; v oklepaju podajamo minimalno in maksimalno vsebnost kovin, vsebnosti As in Cr v drugih tkivih so bile pod spodnjo mejo analitske metode. Z različnima malima črkama smo označili statistično značilno razliko.

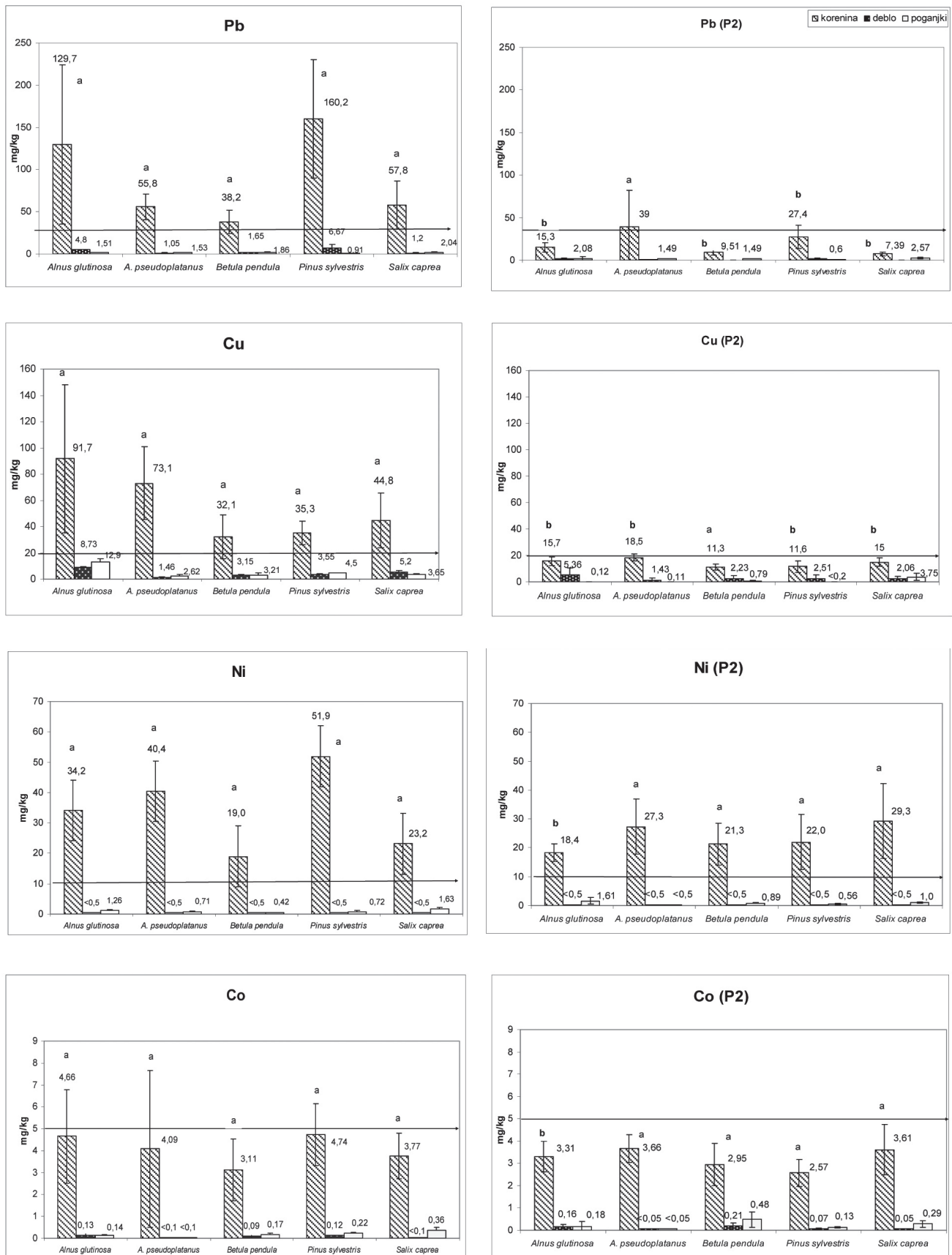
\*Average value, minimal and maximal values of metals in roots (in brackets); however, uptake of As and Cr in stems and shoots was insignificant. Small letters: differences of metal levels in roots within same species grown on different research plots ( $p < 0.05$ ).



Slika 5: Povprečne vsebnosti Zn in Cd v koreninah, deblih in poganjkih sadik, vzorčenih na ploskvah P1 (levo) in P2. Vodoravna črta ponazarja dopustno vsebnost za izbrano kovino (Ur. l. RS, št. 101/06) oziroma je povzeta iz literature (KABATA-PENDIAS 2001). Z različnima črkama smo označili statistično značilne razlike v vsebnostih kovin v koreninah istih vrst, rastočih na različnih ploskvah.

Figure 5: Average levels of Zn and Cd in roots, stems and shoots of seedlings sampled on research plot P1 (left) and P2. Horizontal line indicates tolerable value for selected metals according to Slovene legislation (Ur. l. RS, št. 101/06) and literature values (KABATA-PENDIAS 2001). Small letters: differences of metal levels in roots within same species grown on different research plots ( $p < 0.05$ ).





Slika 6: Povprečne vsebnosti Pb, Cu, Ni in Co v sadikah, vzorčenih na P1 (levo) in P2, glej opombe pod sliko 5

Figure 6: Average levels of Pb, Cu, Ni and Co in seedlings sampled on research plot P1 (left) and P2; see notes below Figure 5

Največje vsebnosti kovin v sadikah so bile izmerjene v zaporedju  $Pb > Zn > Cu > Cr > Ni > Co > As > Cd$ , kar ustreza obremenjenosti tal s kovinami (preglednica 6). Vsebnosti Pb in Cu se v koreninah, ne oziraje se na vrsto (med povprečnimi vsebnostmi v posameznih vrstah praviloma ni statistično značilnih razlik), povečujejo glede na vsebnosti v tleh ( $n = 30$ ;  $R = 0,71$  in  $p = 0,00001$  za obe kovini), za druge kovine soodvisnosti med obema parametroma nismo ugotovili. Posledično so povprečne vsebnosti Pb in Cu v koreninah vseh vrst statistično značilno večje na onesnaženi ploskvi (izjemi sta gorski javor (Pb) in navadna breza (Cu)). Enako primerjavo smo opravili za povprečne vsebnosti Zn in Cd v lesu in poganjkih testnih drevesnih vrst. Le vsebnosti Zn v iglicah rdečega bora in Cd v listih navadne breze so se statistično značilno razlikovale. Primerjaje rastlinske organe (korenine, deblo in poganjki), so bile vsebnosti večine kovin (Pb, Cu, Ni, Co, As in Cr) največje v koreninah, le Zn in Cd, ki sta mobilnejša elementa, sta se v nekaterih drevesnih vrstah bolj kopičila v poganjkih (Zn: navadna breza in vrba; Cd: iva) oziroma je bil sprejem kovin v vse organe bolj ali manj izenačen (Zn: črna jelša, rdeči bor; Cd: navadna breza).

Povprečne vsebnosti kovin smo primerjali z literaturnimi podatki, ki navajajo naravne, toksične in dopustne vsebnosti kovin v listih rastlin (preglednica 9), z namenom ovrednotiti, kako velike vsebnosti kovin so sadike dreves v našem poskusu sprejemale v svoje poganjke. Izmerjene vsebnosti kovin v listih praviloma niso prekoračevale toksičnih vsebnosti. Izjema sta Zn, kjer v posameznih vzorcih izmerjene vsebnosti prekoračujejo spodnjo mejo toksičnih vsebnosti (navadna breza, črna jelša in iva) in hkrati dosega zgornjo mejo vsebnosti značilnih za neonesnažena območja, ter Cd, kjer en vzorec listov ive prekoračuje spodnjo mejo za toksične vsebnosti.

Hkrati so vse izmerjene vsebnosti Cd v listih ive večje od naravnih vsebnosti.

Povprečne vsebnosti Pb, Cu in Ni v koreninah vseh vrst ter Cd v koreninah rdečega bora, črne jelše in ive, vzorčenih na pehotnem strelišču (P1), prekoračujejo dopustne vsebnosti, ki so določene za kmetijske rastline; večinoma so prekoračene spodnje mejne vsebnosti. Hkrati tudi povprečne vsebnosti Cd v listih ive prekoračujejo tako dopustne kot tudi toksične vsebnosti. Povprečne vsebnosti Cd v listih navadne breze prekoračujejo zgornjo mejo dopustnih vsebnosti; primerjave s spodnjo mejo dopustnih vsebnosti za Cd nismo mogli napraviti, saj je manjša od meje določljivosti analitske metode, ki smo jo uporabili. Na podlagi predstavljenih rezultatov zaključujemo, da vsebnosti kovin v listih praviloma ne dosega toksičnih vsebnosti in da so izbrane drevesne vrste primerne za fitostabilizacijo onesnaženih tal.

Sposobnost izbranih drevesnih vrst, ki smo jih uporabili v rastnem poskusu, da sprejemajo kovine iz tal v svoja tkiva, smo ugotavljali z izračunom biokoncentracijskega faktorja (BCF). Dodatno smo izračunali tudi translokacijske faktorje (TF), ki določajo sposobnost rastlin, da prenesejo kovine iz korenin k poganjkom. Z vidika uporabe listavcev v remediacijske namene je pomembno, da vsebnosti kovin v listih ne dosega velikih vsebnosti, saj bi v tem primeru vsakoletno odpadanje listov pomenilo, da se onesnaževanje širi in razpršuje v okolju. Na močno onesnaženih območjih, ki so jih preraščale neakumulatorske rastline (npr. navadni trst (*Phragmites australis*)), niso odkrili povečanih vsebnosti kovin v rastlinah (MERTENS *et al.* 2004). Nasprotno pa so izmerili povečane vsebnosti Cd v tkivih malih sesalcev, ki so živeli v vrbovih sestojih. Sklepali so, da je Cd vstopil v prehranjevalno verigo zaradi vsakoletnega odpadanja

Preglednica 8: Primerjava BCF in TC faktorjev za Pb, Cu, Cd, Zn in Ni v izbranih drevesnih vrstah, rastočih na ploskvah P1 in P2  
Table 8: Comparison of BCF and TC for Pb, Cu, Cd, Zn and Ni for selected seedlings growing on research plots P1 and P2

	Pb	Cu	Cd	Zn	Ni	Pb	Cu	Cd	Zn	Ni
<b>PLOSKEV P1</b>	<b>BCF</b>					<b>TF</b>				
Črna jelša <i>Alnus glutinosa</i>	0,28	0,26	<b>1,32</b>	0,48	0,54	0,01	0,14	/	<b>1,05</b>	0,04
Gorski javor <i>A. pseudoplatanus</i>	0,16	0,52	0,83	0,35	0,67	0,03	0,03	/	0,47	0,01
Navadna breza <i>Betula pendula</i>	0,16	0,26	<b>1,38</b>	0,41	0,30	0,05	0,10	0,81	<b>1,55</b>	0,04
Rdeči bor <i>Pinus sylvestris</i>	0,36	0,16	<b>2,05</b>	0,27	0,83	0,01	0,10	/	0,71	0,01
Iva <i>Salix caprea</i>	0,13	0,20	<b>0,96</b>	0,39	0,53	0,03	0,08	<b>6,86</b>	<b>1,34</b>	0,07
<b>PLOSKEV P2</b>	<b>BCF</b>					<b>TF</b>				
Črna jelša <i>Alnus glutinosa</i>	0,27	0,52	0,40	0,44	0,26	0,04	0,01	/	<b>0,98</b>	0,09
Gorski javor <i>A. pseudoplatanus</i>	0,73	0,66	<b>1,47</b>	0,38	0,38	0,04	0,01	/	0,42	/
Navadna breza <i>Betula pendula</i>	0,18	0,38	<b>1,50</b>	0,45	0,26	0,16	0,07	0,67	<b>1,49</b>	0,04
Rdeči bor <i>Pinus sylvestris</i>	0,53	0,33	<b>0,95</b>	0,33	0,31	0,02	/	0,11	0,57	0,02
Iva <i>Salix caprea</i>	0,14	0,46	0,82	0,49	0,39	0,35	0,25	<b>3,68</b>	0,90	0,03
$\bar{a}$ ( $n = 30$ )	0,29	0,37	<b>1,17</b>	0,40	0,45	0,07	0,09	<b>2,43</b>	0,95	0,04
<b>SD</b>	0,20	0,16	0,47	0,07	0,19	0,11	0,07	2,84	0,41	0,03

vrbovih listov, ki vsebujejo povečane vsebnosti Cd (MERTENS *et al.* 2001).

Glede na povprečne vrednosti BCF, upoštevaje vse drevesne vrste ( $n = 30$ ), so korenine najbolj učinkovite pri sprejemu Cd (BCF = 1,17), nato sledijo Cu, Zn in Ni (BCF je v intervalu od 0,37 do 0,45), najmanj pa korenine sprejemajo Pb (BCF = 0,29). V našem poskusu je rdeči bor najučinkoviteje sprejemal Cd in Ni, gorski javor Pb ter Cu in črna jelša skupaj z ivo in navadno brezo Zn. Največji je bil prenos Cd (TF = 2,43) in nato Zn (TF = 0,95) od korenin k poganjkom, vse druge kovine smo izmerili v poganjkih v zanemarljivih količinah oziroma pod spodnjo mejo analitske metode.

Med testnimi drevesnimi vrstami je imela iva največji translokacijski faktor za Cd (TF = 6,86 oz. 3,68). Za to pionirsko vrsto je bilo že v preteklosti ugotovljeno, da ima izražen fitoekstrakcijski potencial, ki pa je zelo variabilen (PULFORD / WATSON 2003; DICKINSON / PULFORD 2005; UNERBRUNNER *et al.* 2007). V pregledu akumulacijskih sposobnosti različnih drevesnih vrst, rastočih na onesnaženih območjih v osrednji Evropi, so bili TF za prenos Cd v liste ive v intervalu od 0,2 do 12,2 (Kutna Hora) oz. 17,0 (Mežica-Žerjav) (UNTERBRUNNER *et al.* 2007). Ugotovljeno je bilo tudi, da vrednosti TF za

Zn in Cd naraščajo z upadanjem vsebnosti obeh kovin v tleh. Slednje ustreza tudi ugotovitvam raziskave, ki je bila opravljena na območju Žerjava na različno onesnaženih raziskovalnih ploskvah, ki je poudarila, da je iva primerna za fitoekstrakcijo na tleh, zmerno onesnaženih s Cd (PODGORELEC 2007). Na podlagi predstavljenih rezultatov o sprejemu in kopičenju kovin v rastlinskih tkivih testnih drevesnih vrst ugotavljamo, da iva v listih kopiči Cd in Zn (izražen fitoekstrakcijski potencial), vse druge vrste (črna jelša, gorski javor, navadna breza, rdeči bor) pa so primerne predvsem za fitostabilizacijo onesnaženih tal pehotnega strelišča.

## 4 Zaključki

### 4 Conclusions

Na podlagi opravljenega remediacijskega poskusa, ki je potekal od aprila 2008 do konca junija 2009 na pehotnem strelišču (ploskev P1) in v njegovi okolici (ploskev P2) na vojaškem poligonu Poček, lahko oblikujemo naslednje zaključke:

Preglednica 9: Deficitarne, naravne, toksične in dopustne vsebnosti kovin (mg/kg) v listih rastlin

Table 9: Deficiency, normal, phytotoxic and tolerable values (mg/kg) of metals in leaf tissue

element metal	deficit* deficient	naravne vsebnosti normal values	foksične vsebnosti phytotoxic values	dopustne vsebnosti ** tolerable values
Pb	-	5,0 – 10 <sup>1</sup> 0,2 – 20 <sup>2</sup> 0,1 – 10,0 <sup>3</sup>	30 – 300 <sup>1</sup>	0,5 – 10 <sup>1</sup> 30 <sup>4,5</sup>
Cu	2,0 – 5,0 <sup>1</sup>	5,0 – 30 <sup>1</sup> 5,0 – 20 <sup>2</sup> 4,0 – 15 <sup>3</sup>	20 – 100 <sup>1</sup>	5,0 – 20 <sup>1</sup> 25 <sup>5</sup>
Cd	-	0,05 – 0,2 <sup>1</sup> 0,1 – 2,4 <sup>2</sup> 0,2 – 0,8 <sup>3</sup>	5,0 – 30 <sup>1</sup>	0,05 – 0,5 <sup>1</sup> 1 <sup>4</sup>
Zn	10 – 20 <sup>1</sup>	27 – 150 <sup>1</sup> 1 – 400 <sup>2</sup> 8 – 400 <sup>3</sup>	100 – 400 <sup>1</sup>	50 – 100 <sup>1</sup>
As	-	1,0 – 1,17 <sup>1</sup>	5,0 – 20 <sup>1</sup>	0,2 <sup>1, a</sup> 4 <sup>4</sup>
Co	-	0,02 – 1,0 <sup>1</sup>	15 – 50 <sup>1</sup>	5,0 <sup>1</sup>
Mo	0,1 – 0,3 <sup>1</sup>	0,20 – 5,0 <sup>1</sup>	10 – 50 <sup>1</sup>	-
Ni	-	0,1 – 5,0 <sup>1</sup>	10 – 100 <sup>1</sup>	1 – 10 <sup>1</sup> 50 <sup>5</sup>
Cr	-	0,1 – 0,5 <sup>1</sup>	5,0 – 30 <sup>1</sup>	2,0

\*Deficit nastane, ko so vsebnosti esencialnih elementov manjše od navedenih. \*\*Dopustne vsebnosti so navedene za kmetijske rastline in so povzete po naslednjih virih: <sup>1</sup>KABATA-PENDIAS 2001; <sup>2</sup>ALLOWAY 1995; <sup>3</sup>ROSS 1994; <sup>5</sup>CHANEY 1989; <sup>4</sup>Pravilnik o pogojih za zagotavljanje varnosti krme (Ur. l. RS, št. 101/06), tudi naravne vsebnosti so povzete po istih virih. <sup>a</sup>Vsebnost je izražena na svežo težo.

\*Deficiency arises when the amounts of essential elements are smaller than the stated ones. \*\*Tolerable values are given for agronomic crops and are summarized from the following references: <sup>1</sup>KABATA-PENDIAS 2001; <sup>2</sup>ALLOWAY 1995; <sup>3</sup>ROSS 1994; <sup>5</sup>CHANEY 1989; <sup>4</sup> Ur. l. RS, št. 101/06, additionally, normal values are summarized from the same references. <sup>a</sup>Fresh weight basis.

(a) Analiza prirastnih parametrov, mortalitete in vitalnosti testnih drevesnih vrst (črna jelša, gorski javor, navadna breza, rdeči bor in iva), s katerimi smo zasadili dve raziskovalni ploskvi na vojaškem poligonu Poček, nakazujejo zaostrene rastiščne razmere. Raziskava je pokazala, da med drevesnimi vrstami obstajajo razlike v uspevanju že v juvenilni fazi razvoja. Poškodbe dreves in umiranje se s časom povečujejo pri vseh drevesnih vrstah razen pri rdečemu boru, ki kaže najboljšo ekološko prilagodljivost na dane razmere okolja, po uspešnosti rasti in deležu preživetja mu sledi navadna breza. Le-ta prirašča na obeh ploskvah, sadike so večinoma srednje do dobro vitalne, propadlih sadik je malo, le ena na P1 v drugem letu rasti. Vpliva onesnaženih tal na rast sadik nismo dokazali, sklepamo pa, da so imeli drugi stresni dejavniki (npr. pozni mraz, suša) odločujoč vpliv na rastno uspešnost oziroma neuspešnost sadik.

(b) Primerjaje rastlinske organe (korenine, deblo in poganjki), so bile vsebnosti večine kovin (Pb, Cu, Ni, Co, As in Cr) največje v koreninah, le Zn in Cd, ki sta mobilnejša elementa, sta se v nekaterih drevesnih vrstah bolj kopičila v poganjkih (Zn: navadna breza in vrba; Cd: iva) oziroma je bil sprejem kovin v vse organe bolj ali manj izenačen (Zn: črna jelša, rdeči bor; Cd: navadna breza). Vsebnosti Pb in Cu se v koreninah, ne oziraje se na vrsto, povečujejo glede na vsebnosti v tleh, za druge kovine soodvisnosti med obema parametroma nismo ugotovili. Na podlagi primerjave izmerjenih vsebnosti kovin z literaturnimi podatki in zakonodajo ugotavljamo, da kljub povečanim vsebnostim kovin v koreninah izmerjene vsebnosti kovin praviloma ne dosegajo toksičnih vsebnosti in so izbrane drevesne vrste (z izjemo ive) še vedno primerne za uporabo v remediacijske namene.

(c) Glede na povprečne biokoncentracijske faktorje (BCF), izračunane za vse vrste sadik v našem poskusu, so korenine najbolj učinkovite pri sprejemu Cd (BCF = 1,17), nato sledijo Cu, Zn in Ni (BCF je v intervalu od 0,37 do 0,45), najmanj pa korenine sprejemajo Pb (BCF = 0,28). Največji je bil prenos Cd (TF = 2,43) in nato Zn (TF = 0,95) od korenin h poganjkom. Kljub temu da izbrane drevesne vrste akumulirajo le Cd, druge kovine pa sprejemajo korenine v manjših vsebnostih in vrstno specifično, lahko uporabimo večino preučevanih drevesnih vrst predvsem v smislu fitostabilizacije onesnaženih tal, saj praviloma kopičijo precejšnje vsebnosti kovin v koreninah. Ugodno razmerje med bioakumulacijo in translokacijo kovin smo ugotovili za vse drevesne vrste z izjemo ive, kjer je prenos Cd v liste večji (TF = 6,86) in so vsebnosti bistveno večje od izmerjenih v koreninah.

(d) Najbolj primerna vrsta za remediacijo plitvih, deloma kamnitih pokarbonatnih tal, onesnaženih s kovinami (Pb, Cu), je rdeči bor; najmanj primerna vrsta pa iva. Najuspešnejša rast in relativno dober prevzem Cd, Ni in Pb v korenine uvrščajo rdeči bor med primerne fitoremediacijske vrste na kraških rastiščih. Kljub prepoznanemu remediacijskemu potencialu ive kot vrste,

ki uspešno raste v tleh, onesnaženih s kovinami, smo v naši raziskavi ugotovili, da je manj primerna vrsta za fitoremediacijo obravnavanih tal. Zmanjšani delež preživetja in razmeroma majhno število vitalnih sadik nakazuje, da ji rastišče in mikroklimatske razmere na obravnavanem območju ne omogočajo uspešne rasti. Hkrati so vsebnosti Cd in Zn v listih prekoračevale dopustne vsebnosti za uporabo v krmne namene (v posameznih vzorcih celo spodnjo mejo za toksične vsebnosti), kar kaže na možno tveganje za organizme ob odpadanju listov in ponovnem vnosu Cd in Zn v ekosisteme pehotnih streljšč.

## 5 Povzetek

### 5 Summary

Phytoremediation on two research plots was performed due to the polluted soil at Poček military training ground's shooting range with the aim to decrease the negative impact of pollution on the environment. Two research plots were established in spring 2008 and planted with selected tree species (*Pinus sylvestris* L., *Alnus glutinosa* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Betula pendula* Roth., *Salix caprea* L.) following the standardised systems. The first research plot (P1) was situated at the shooting range (soil polluted with Pb, Cu) and the second plot (P2) in its vicinity, where the soil is less loaded with metals. The measurements of growth parameters of 144 seedlings (15 seedlings per species per plot) were performed in the years 2008 and 2009. The impact of site characteristics on the growth efficiency and development of seedlings in juvenile phase was estimated on the basis of measurements of growth parameters (height, thickness) and observations (vitality) of seedlings. In addition, uptake of metals from soil to plant tissues (roots, stems, shoots) was assessed to determine which seedlings of the mentioned species have the potential for remediation of the metal contaminated soil.

The results indicated severe site characteristics; the differences between tree species have been observed (determined) as early as in their juvenile phase. Damages and mortality of all seedlings were increasing with time, with the exception of *Pinus sylvestris*, which reflected the best ecological adaptability on site characteristics, since none of the seedlings died during the experiment. *Pinus sylvestris*, which had the highest height growth (37% (P1); 31% (P2)) and effectively thickness growth (3.2% (P1); 5.7% (P2)), was followed by *Betula pendula*, which grew effectively on both research plots (9.0% (P1) and 5.6% (P2)). We presumed that microclimate and capability of seedlings to adjust to karst, where water flows away quickly and the seedlings are often exposed to late frost, have the crucial impact on growth efficiency of seedlings. Better growth of seedlings (*Pinus sylvestris* and *Alnus glutinosa*) on plot P1, which is polluted with Cu and Pb in comparison



with P2, was the result of a favourable microclimate.

For remediation purposes, it is important that metal content in leaves is not extremely increased, since litter fall, due to the elevated metal concentrations, could cause an environmental risk because of recycling of the metals in the ecosystem. In general, phytotoxic values were not exceeded, with the exception of Zn (Zn levels exceed the lower limit of toxic values in four samples) and Cd (one sample), respectively.

Although seedlings accumulate only Cd (BCF = 1.17) and the rest of metals are taken up in roots in smaller concentration and species specific (*Pinus sylvestris* was the most efficient in taking up Pb and Ni, *Acer pseudoplatanus* in Pb and Cu, and other tree species (*Alnus glutinosa*, *Betula pendula*, *Salix caprea*) in Zn, respectively), the majority of tree species are suitable for phytostabilisation because they uptake moderate metal concentrations in roots. Favourable ratio between bioaccumulation and translocation was determined for all species, with the exception of *Salix caprea*, which was effective in taking up Cd in leaves (TF = 6.9). The measured Cd concentrations were therefore significantly higher in comparison with roots.

*Pinus sylvestris*, *Betula pendula*, *Acer pseudoplatanus* and *Alnus glutinosa* have the potential for phytoremediation of metal contaminated soil regarding growth parameters and metal uptake and especially for phytostabilisation, while *Salix caprea* has the potential for phytoextraction. The most suitable species is *Pinus sylvestris*, which grew effectively on the polluted plot; furthermore, uptake of Cd, Ni and Pb was relatively high in comparison with other species. Although the remediation experiment should last for at least two vegetation seasons, we believe that the results regarding metal uptake are sufficiently representative, considering that earlier studies confirmed that the capacity to bind the metals already reached its maximum after the first growing season.

## 6 Zahvala

### 6 Acknowledgements

Raziskava je potekala v sklopu projekta "Pehotna strelišča kot dejavnik tveganja za okolje s poudarkom na ekološki sanaciji pehotnega strelišča na vojaškem poligonu Poček (M3-0213)" v okviru CRP „Znanje za varnost in mir 2006 – 2010“, ki ga je prek Javne agencije za raziskovalno dejavnost financiralo Ministrstvo za obrambo Republike Slovenije. Ob tej priložnosti se zahvaljujemo mag. Marjani Trontelj, ki je kot vsebinska spremljevalka omenjenega projekta prispevala k njegovemu uspešnemu zaključku. Iskreno se zahvaljujemo tudi Albinu Knafeljcu iz Slovenske vojske. Vse kemijske analize so bile opravljene v laboratoriju ERICo Velenje. Hvala tudi vsem, ki so sodelovali pri terenskem delu, še posebej Mateju Ruplu ter Robertu Krajncu, Drevesnici Omorika Muta in Semesadiki Mengeš, ter sodelavcem iz GG Postojna.

## 7 Viri

### 7 References

- ADRIANO, D. C., 2001. Trace elements in terrestrial environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and risk of metals.- Springer-Verlag, New York Berlin Heidelberg, 410 str.
- AL SAYEGH PETKOVŠEK, S. / POKORNY, B. / BOLE, M. / VRBIČ KUGONIČ, N. / KONČNIK, D. / ŠPEH, N. / FLIS, J. / PAVŠEK, Z. / ŠEŠERKO, M. / DRUKS GAJŠEK, P. / ZALUBERŠEK, M. / PETRIČ, M. / KOGOVSŠEK, J., GREBENC, T. / KRAIGHER, H., 2006. Določitev vpliva vojaškega poligona na okolje kot modelna študija za varovanje in sanacijo okolja na območju delovanja Slovenske vojske, poročilo DP 16/02/06.- Velenje, ERICo, 286 str.
- AL SAYEGH PETKOVŠEK, S. / VRBIČ KUGONIČ, N. / FINŽGAR, L. / ŠEŠERKO, M. / GLINŠEK, A. / BOLE, M. / DRUKS GAJŠEK, P. / PETRIČ, M. / KOGOVSŠEK, J. / JELENKO, I. / KOŠIR, P. / ČARNI, A. / MARINŠEK, A. / ŠILC, U. / ZELNIK, I. / TOME, D. / BOŽIČ, G. / LEVANIČ, T. / KRAIGHER, H. / POKORNY, B., 2009. Pehotna strelišča kot dejavnik tveganja za okolje s poudarkom na ekološki sanaciji pehotnega strelišča na vojaškem poligonu Poček, končno poročilo, DP 12/02/09.- Velenje, ERICo, 311 str.
- ALLOWAY, B. J., 1995. Heavy metals in soils.- London: Blackie Academic and Professional, p. 386.
- BAKER, A. J. M. / MCGRATH, S.P. / SIDOLI, C. M. D. / REEVERS, R. D., 1994. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants.- Resour Conserv Recycl, 11: 41-49.
- BRUNNER, I. / LUSTER, J. / GÜNTARD-GOERG, M. S. / FREY, B., 2008. Heavy metal accumulation and phytostabilization potential of tree fine roots in a contaminated soil.- Environmental Pollution, 152: 559-568.
- BRUNNER, I., 2001. Ectomycorrhizas: Their role in forest ecosystem under the impact of acidifying pollutants.- Perspective and Plant Ecology, Evolution and Systematics, 10: 13-27.
- CHEN, Y. / SHEN, Z. / LI, X., 2004. The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals.- Applied Geochemistry, 19: 1553-1565.
- DICKINSON, N. M., 2000. Strategies for sustainable woodland on contaminated soils.- Chemosphere, 41: 259-263.
- DICKINSON, N.M. / PULFORD, I.D., 2005. Cadmium phytoextraction using short-rotation coppice *Salix*: the evidence trail.- Environment International, 31: 609-613.
- FRENCH, C. J. / DICKINSON, N. M. / PUTWAIN, P. D., 2006. Woody biomass phytoremediation of contaminated brownfield land.- Environmental Pollution, 141: 387-395.
- GARBISU, C. / ALKORTA, I., 2001. Phytoextraction: a cost effective plant-based technology for the removal of metals from the environment.- Bioresource Technology, 77: 229-236.
- HABIČ, Š., 1998. Rastlinstvo – gozd, poročilo.- Biološki inštitut ZRC SAZU.

- HALL, J. L., 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance.- *Journal of Experimental Botany*, 53: 1-11.
- JENTSCHKE, G. / GOODBOLD, D. J., 2000. Metal toxicity and ectomycorrhizas.- *Physiologia Plantarum*, 109: 107-116.
- KABATA-PENDIAS, A., 2001. Trace elements in soils and plants.- Third edition. CRC Press, p. 413.
- KHAN, A. G., 2005. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation.- *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18: 355-364.
- KHAN, A. G., 2006. Mycorrhizoremediation – an enhanced form of phytoremediation.- *J Zhejiang Univ Science*, B 7(7): 503-514.
- KOCHLER, A. / BLAUDEZ, D. / CHALOT, M. / MARTIN, M., 2004. Cloning and expression of multiple metallothioneins from hybrid poplar.- *New Phytologist*, 164: 83-93.
- KOKOVNIK, M., 2007. Strategija privzema Cd, Zn in Pb pri populacijah ranega mošnjaka (*Thlaspi praecox* Wulfen) z onesnaženega in neonesnaženega rastišča.- Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo, 63 str.
- LESKI, T. / BAJC, M. / AL SAYEGH PETKOVŠEK, S. / RUDAWSKA, M. / KRAIGHER, H., 2009. Ectomycorrhizal community structure on roots of trees planted in the mixture of soils and ashes from the thermal power plant.- V: Ukonmaanaho, L., Nieminen T.M., Starr, M. (Eds): 6th international symposium on ecosystem behaviour BIOGEOMON 2009. Working papers of the Finnish Forest Research Institute. METLA, Vantaa, Finland, p. 417.
- LIKAR, M. / REGVAR, M. / MANDIĆ-MULEC, I. / STRES, B. / BOTHE, H., 2009. Diversity and seasonal variations of mycorrhiza and rhizosphere bacteria in three common plant species at the Slovenian Ljubljana.- *Biol. Fertil. Soils*, no. 6, vol. 45: 573-583.
- MERTENS, J. / LUYSSAERT, S. / VERBEEREN, S. / VERVAEKE, P. / LUST, N., 2001. Cd and Zn concentration in small mammals and willow leaves on disposal facilities for dredged material.- *Environmental Pollution*, 115: 17-22.
- MERTENS, J. / VERVAEKE, P. / SCHRIJVER, A. D. / LUYSSAERT, S., 2004. Metal uptake by young trees from dredged brackish sediment: limitations and possibilities for phytoextraction and phytostabilisation.- *Science of Total Environment*, 326: 209-215.
- PODGORELEC, M., 2007. Akumulacija kovin Pb, Zn in Cd pri ivi *Salix caprea* na onesnaženem območju v Žerjavu. Diplomaska naloga. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo, 77 str.
- PONGRAC, P. / BRVAR, E. / REGVAR, M., 2009. Impact of the simultaneous Cd and Zn substrate amendments on metal accumulation in two Cd/ Zn hyperaccumulating *Thlaspi* species = Vpliv interakcije Cd in Zn v substratu na njuno kopičenje pri dveh hiperakumulacijskih vrstah Cd in Zn iz rodu *Thlaspi*.- *Acta Biol. Slov.*, 52: 61-71.
- PONGRAC, P. / ZHAO, F. / RAZINGER, J. / ZRIMEC, A. / REGVAR, M., 2009. Physiological responses to Cd and Zn in two Cd/Zn hyperaccumulating *Thlaspi* species.- *Environmental and Experimental Botany*, 66: 479-486.
- Pravilnik o pogojih za zagotavljanje varnosti krme.- Uradni list RS, št. 101/06.
- PULFORD, I. D. / WATSON, C., 2003. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees – a review.- *Environmental International*, 29: 529-540.
- REGVAR, M. / LIKAR, M., PILTAVER, A. / KUGONIČ, N. / SMITH, J. E., 2009. Fungal community structure goat willows (*Salix caprea* L.) growing at metal polluted soil: the potential of screening in a model phytostabilization study.- *Plant and Soil*, 333: 345-356.
- REGVAR, M. / VOGEL-MIKUŠ, K. / KUGONIČ, N. / TURK, B. / BATIČ, F., 2006. Vegetational and mycorrhizal successions at metal polluted site: Indications for the direction of phytostabilisation?- *Environmental Pollution*, 114: 976-984.
- ROBINSON, B. H. / BISCHOFBERGER, S. / STOLL, A. / SCHRORER, D. / FURRER, G. / ROULIER, S., GRUENWALD, A. / ATTINGER, W. / SCHULIN, R., 2008. Plant uptake of trace elements on a Swiss military shooting range: Uptake pathways and land management implications.- *Environmental Pollution*, 153: 668-676.
- ROSS, S. M., 1994. Toxic metals in soil-plant systems.- Chichester: John Wiley and Sons, p. 451.
- SCHNOOR, J. L., 1997. Phytoremediation. Technology Evaluation Report TE-98-1.- Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center (GWRTAC), Iowa, 37 pp.
- StatSoft, 2006. Statistica for Windows 7.1.- Tulsa, Statsoft: CD.
- UNTERBRUNNER, R. / PUSCHENREITER, M. / SOMMER, P. / WIESHAMMER, G. / TLUSTOŠ, P. / ZUPAN, M. / WENZEL, E. W., 2007. Heavy metal accumulation in trees growing on contaminated sites in Central Europe.- *Environmental Pollution*, 148: 107-114.
- Uredba o mejnih, opozorilnih in kritičnih imisijskih vrednosti nevarnih snovi v tleh.- Ur. l. RS 68/96, s. 5773- 5574.
- VAMERALI, T., BANDIERA, M. / COLETTI, L. / ZANETTI, F. / DICKINSON, N., M. / MOSCA, G., 2009. Phytoremediation trials on metal- and arsenic-contaminated pyrite wastes (Torviscosa, Italy).- *Environmental Pollution*, 157: 887-894.
- VAMERALLI, T. / BANDIERA, M. / MOSCA, G., 2010. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review.- *Environ Chem Lett*, 8: 1-17.
- VOGEL-MIKUŠ, K. / DROBNE, D. / REGVAR, M., 2005. Zn, Cd and Pb accumulation and arbuscular mycorrhizal colonisation of pennycress *Thlaspi praecox* Wulf. (Brassicaceae) from the vicinity of a lead mine and smelter in Slovenia.- *Environ. pollut.* (1987), 133: 233-242.
- VOGEL-MIKUŠ, K. / PONGRAC, P. / KUMP, P. / NEČEMER, M. / REGVAR, M., 2006. Colonisation of a Zn, Cd and Pb hyperaccumulator *Thlaspi praecox* Wulfen with indigenous arbuscular mycorrhizal fungal mixture induces changes in heavy metal and nutrient uptake.- *Environ. pollut.* (1987), 139: 362-371.
- VOGEL-MIKUŠ, K. / REGVAR, M. / MESJASZ-PRZYBYŁOWICZ, J. / PRZYBYŁOWICZ, W. J. / SIMČIČ, J. / PELICON, P. / BUDNAR, M., 2008. Spatial distribution of cadmium in leaves of metal hyperaccumulating *Thlaspi praecox* using micro-PIXE.- *New phytol.*, vol. 179: 712-721.
- VOVK KORŽE, A. / VRHOVŠEK, D., 2007. Ekoremediacije v življenju ljudi.- *Geografski zbornik*, 3-4: 4-7.
- YANG, X. / FENG, Y. / HE, Z. / STOFFELLA, P. J., 2005. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation

and phytoremediation.- Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 18: 339-353.

ZUPANČIČ JUSTIN, M., 2009. Ekoremediacija kontaminiranih zemljin, sedimentov in odlagališč odpadkov.- V: RAZINGER, J.: Ekoremediacije, sredstvo za doseganje okoljskih ciljev in trajnostnega razvoja Slovenija, 71-93.

