

Využitie biouhlia na imobilizáciu ťažkých kovov v pôdach zaťažených hutníckym priemyslom

Utilization of Biochar for Heavy Metals Immobilization in Smelter-Contaminated Soils

Vladimír Frišták¹, Martin Pipíška¹, Gerhard Soja²

¹Katedra chémie, Pedagogická fakulta, Trnavská univerzita v Trnave

²Energy Department, Austrian Institute of Technology GmbH, Tulln, Rakúsko

Abstract: Unsecured landfills pose a serious risk to the environment by possible penetration of mobile contaminants into soil, subsoil, groundwater and potentially into the food chain. Promising remediation technologies are represented by immobilization of such contaminants by the application of suitable soil additives. In the study, we investigated the possibility of using biochar prepared from garden waste in the process of slow pyrolysis as a potential soil additive for the immobilization of heavy metals in contaminated soil. The results show a significant reduction in the concentration of available forms of Cd, Pb and Zn in the soil samples treated by biochar. Decrease in availability of Cu after addition of biochar was not observed, suggesting the difference in Cu binding mechanisms compared to other metals. More detailed studies are required in the context of pH changes, the sorption potential of biochar and amount of soluble organic forms of carbon.

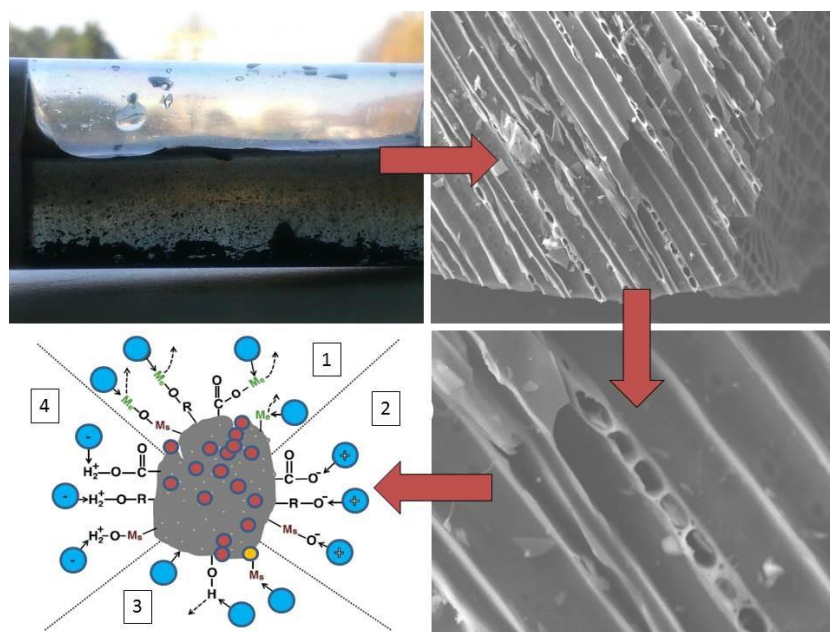
Keywords: biochar, immobilization, heavy metals, remediation, sorption interactions.

1 Úvod

Rozvoj aglomerácii a intenzifikácia priemyselných činností so sebou prináša rad negatívnych vplyvov na životné prostredie. Nezabezpečené skládky odpadov predstavujú obrovské environmentálne riziko vo forme penetrácie mobilných zložiek kontaminantov do pôdy, podložia, podzemných vôd a tým potenciálne do potravinového reťazca. Imobilizácia kontaminantov aplikáciou vhodných pôdnych aditív predstavuje z pohľadu environmentálneho manažmentu dôležitý medzník v remediačných technológiách. Konvenčné techniky znižovania mobility kovov (zavápnenie, exkavácia kontaminovanej pôdy, pôdny „washing“) v priemyselne zaťažených pôdach sú často ekonomicky nákladné a z ekologic-

kého pohľadu problematické riešenia. Na základe týchto skutočností je nevyhnutné hľadať alternatívne možnosti spracovania nízkonákladových dostupných materiálov, často zaradených medzi odpady, tradičnými technológiami. V posledných desaťročiach zaznamenala pyrolýza a jej využitie v spracovaní biomasy a bioodpadov enormný záujem vedecko-výskumnej sféry i aplikačnej praxe. Práve záujem o biouhlie rezonuje v nespočetnom rade odborných publikácií. Charakteristika tohto materiálu vychádza z biologickej podstaty vstupnej biomasy a procesu jej následného spracovania – karbonizácie.

Podľa Medzinárodnej iniciatívy pre biouhlie (IBI, 2015) ide o tuhý materiál získaný procesom termochemickej konverzie biomasy za striktno anoxických podmienok. Lehmann a Joseph (2015) definitívne odlišili pojem drevené uhlie ako zuhoľnatenej organickej hmoty využívanej výlučne na produkciu energie, od biouhlia široko využiteľného v manažmente životného prostredia. Vo všeobecnosti je biouhlie produkované v procese suchej karbonizácie, pyrolýzy resp. gasifikácie biomasy. V závislosti od podmienok prípravy (teplota termochemickej konverzie, čas zdržania, vstupná biomasa) sa menia aj samotné charakteristiky biouhlia. Vďaka vysokému obsahu organického C, značnej porozite, obsahu mikro- a makroprvkov a rozsiahlemu vnútornému povrchu predstavuje biouhlie zaujímavé pôdne aditívum, ktoré svojimi vlastnosťami prispieva k zlepšovaniu jej úrodnosti (Frišták, Pipíška, Soja, 2018).



Obrázok 1: Mechanizmus sorpcie anorganických kontaminantov biouhlím vo vodnom prostredí:
 1 Iónová výmena, 2 Afinita kationových foriem kontaminantu k voľným funkčným skupinám,
 3 Precipitácia, 4 Afinita aniónových foriem kontaminantu k voľným funkčným skupinám,
 ● – fyzikálna adsorpcia, ● – ióny prítomné na povrchu biouhlia, ● – kontaminant v danej iónovej forme, Me – vymeniteľné ióny, Ms – ióny prítomné v štruktúre biouhlia.

Prítomnosť mikro- a mezopórov v biouhlí napomáha zvyšovaniu pôdnej humidity a rovnako retencii pôdnej vody (Verheijen et al., 2010). Biouhlie ako produkt s neutrálnym resp. zásaditým pH prispieva k alkalizácii kyslých pôd a zvyšuje tiež kationovú a aniónovú výmennú kapacitu pôdnej matrice (Cimò et al., 2014). Navyše veľký špecifický povrch biouhlia predstavuje širokú škálu a variabilitu možností pri formovaní sorpčných miest

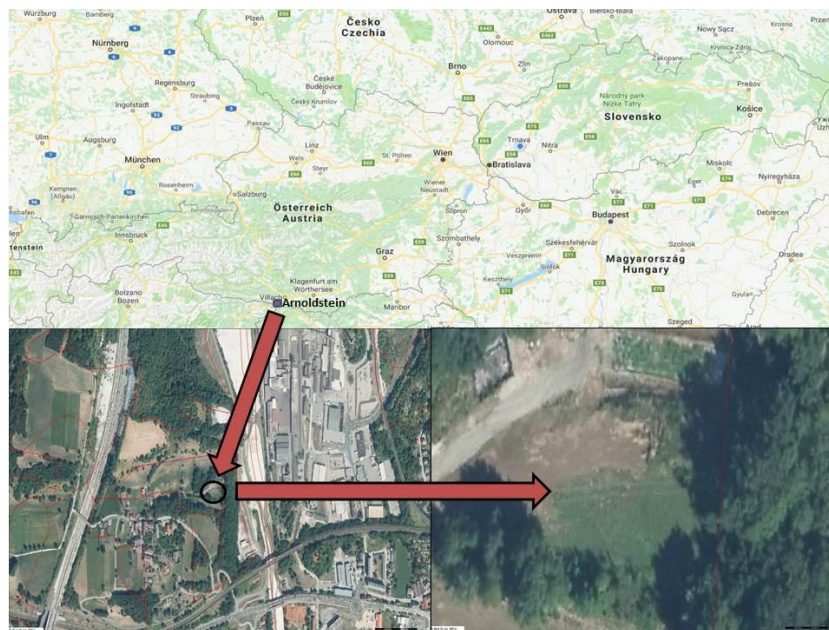
s voľnými funkčnými skupinami (obrázok 1), ktoré aktívne viažu mobilné formy xenobiotík z vodných a pôdných roztokov (Pipíška et al., 2017).

Všetky vyššie uvedené vlastnosti pyrolýzných produktov predstavujú dôležité benefity, ktoré biouhlie ako pôdne aditívum, sorpčný materiál resp. imobilizačný nástroj so sebou prináša. Hlavným cieľom našej štúdie je fyzikálno-chemická charakterizácia a aplikačné využitie biouhlia produkovaného z biomasy drevného záhradného odpadu v procese pomalej pyrolýzy na imobilizáciu ťažkých kovov (Cd, Pb, Zn) v pôdach, ktoré sú dlhodobo zaťažené aktivitami hutníckeho a kovospracujúceho priemyslu.

2 Materiál a metódy

2.1 Príprava biouhlia a vzorkovanie pôdy

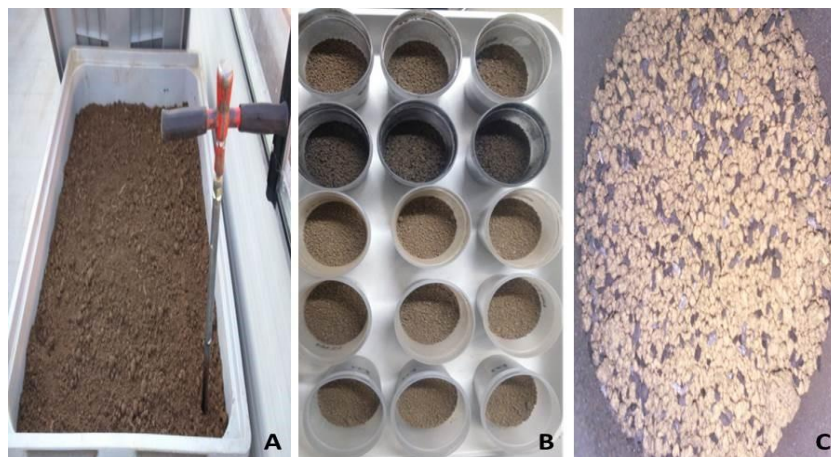
Vzorky biouhlia boli pripravené pomalou pyrolýzou drevného záhradného odpadu s obsahom listovej hmoty. Biomasa bola pred termochemickou konverziou zhomogenizovaná a rezaním bola získaná frakcia o rozmeroch 2 cm × 2 cm × 2 cm. Pyrolýza prebiehala v laboratórnom reaktore, pri teplote 500 °C, čase zdržania 120 min a teplotnom gradiente 5 °C/min v prostredí plynného dusíka na zabezpečenie jednotných teplotných a inertných podmienok.



Obrázok 2: Odberové miesto, lokalita Arnoldstein, Rakúsko.

Získaný produkt bol následne premytý v deionizovanej vode ($\sigma < 0,4 \mu\text{S}/\text{cm}$) s cieľom odstránenia nadbytočného popola a nečistôt, vysušený do konštantnej hmotnosti a preosiaty s cieľom získania frakcie 0,5 – 1 mm. Vzorky pôdy kontaminovanej ťažkými kovmi boli získané z lokality (obrázok 2), ktorá sa nachádza v oblasti zaťaženej intenzívnou činnosťou hutníckeho a metalurgického priemyslu (Arnoldstein, Rakúsko, 46° 33' 9,5" N, 13° 41' 21,5" E).

Vzorky zmesného typu hnedozeme a rendziny boli po odobratí z vrchného pôdneho horizontu (0 – 20 cm) zhomogenizované, zbavené rastlinných a živočíšnych zvyškov a preosiate na získanie frakcie < 2 mm. Technikou kvartovania bola zabezpečená reprezentatívnosť vzoriek na ich charakterizáciu a imobilizačné experimenty (obrázok 3 a – c).



Obrázok 3: Vzorka kontaminovanej pôdy pred a po inkorporácii biouhlia.

2.2 Fyzikálno-chemická charakterizácia vzoriek biouhlia a pôdy

Vo vzorkách biouhlia ako aj vo vzorkách modelovej pôdy boli stanovené základné fyzikálno-chemické parametre. Hodnoty aktívneho $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ a výmenného pH_{KCl} boli zmerané vo výluhu vzorky v deionizovanej vode resp. v 1 mol/L KCl (1 h miešanie; 1 h stabilizácia) pomocou inoLAB pH level 2P (Weilheim, Nemecko). Hodnoty mernej elektrickej vodivosti (EC) boli stanovené vo vodných extraktoch vzoriek biouhlia a pôdy ($V_{\text{pevná fáza}}/V_{\text{kvapalná fáza}}: 1/10$).

Hodnoty kationovo-výmennej kapacity (KVK) boli stanovené použitím BaCl_2 -metódy (Frišták et al., 2015a). Stanovenie celkového obsahu C, H a N vo vzorkách biouhlia a pôdy bolo realizované pomocou CHN-S total analyzátora (CHNS-O EA 1108, Carlo Erba Instruments, Taliansko). Koncentrácie vybraných prvkov boli stanovené v *aqua regia*-mineralizáciách biouhlia a pôdy pomocou ICP-MS (PerkinElmer, Elan DRcE 9000). Morfológia a štruktúra biouhlia bola charakterizovaná použitím skenovacieho elektrónového mikroskopu (SEM, JEOL JSM7600F, Japonsko), za podmienok: vákuum $9,0 \times 10^{-4}$ Pa, napätie 20 kV a pri zväčšení 250 a 500 \times .

2.3 Dizajn experimentu

Pôdne vzorky boli obohatené prídavkom biouhlia v množstve 1 % a 5 % (w/w). Kontrolná vzorka (K) neobsahovala prídavok biouhlia. Po zapracovaní biouhlia boli vzorky počas 14 dní inkubované pri hodnote vodnej kapacity 65 % a teplote 19 ± 1 °C v uzavretých polypropylénových boxoch.

Po uplynutí času inkubácie bola v kontrolných vzorkách a vo vzorkách s 1 % a 5 % prídavkom biouhlia stanovená hodnota pH, vodivosti, KVK, celková koncentrácia Cd, Cu, Pb,

Zn a ich biologicky dostupných foriem jedнокrokovým extrakčným protokolom za použitia roztoku 1 mol/L NH_4NO_3 (extrakčný pomer w/v 1/2,5, rakúska norma L 1094-1).

3 Výsledky a diskusia

Procesom pomalej pyrolýzy dreveného záhradného odpadu s obsahom listovej hmoty pri 500 °C boli získané produkty s obsahom 79,8 % celkového C, 1,6 % celkového H, 0,7 % celkového N a celkovým produkčným výťažkom 40 % (vstupná biomasa/produkt). Základné fyzikálno-chemické charakteristiky získaných materiálov, ako aj pôdy sú uvedené v tabuľke 1. Hodnoty pH, EC a KVK poukazujú na podobnosť s materiálmi produkovanými z podobnej vstupnej biomasy za identických podmienok, ktoré sú bližšie charakterizované v práci Rajec et al. (2016) a Wawra et al. (2018). Koncentrácie sledovaných ťažkých kovov (Cd, Cu, Pb, a Zn) v biouhli sú zanedbateľné a neprekračujú povolené limity podľa Európskeho certifikátu pre biouhlie (EBC, 2012).

Tabuľka 1: Vybrané fyzikálno-chemické charakteristiky vzoriek biouhlia a modelovej pôdy. Všetky merania boli realizované v troch opakovaníach (priemerná hodnota \pm smerodajná odchýlka).

	Biouhlie	Pôda
pH _{H2O}	9,02 \pm 0,10	6,24 \pm 0,10
pH _{KCl}	8,70 \pm 0,10	5,98 \pm 0,10
EC [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	1142,50 \pm 21,84	71,25 \pm 3,87
objemová hmotnosť [kg/L]	0,34 \pm 0,02	1,45 \pm 0,10
KVK [cmol/kg]	12,65 \pm 0,45	15,40 \pm 0,30
Cd [mg/kg]	<LOD*	39,20 \pm 3,50
Cu [mg/kg]	10,40 \pm 0,95	154,85 \pm 6,40
Pb [mg/kg]	26,78 \pm 1,30	1482,60 \pm 10,50
Zn [mg/kg]	93,15 \pm 2,65	1312,10 \pm 10,26

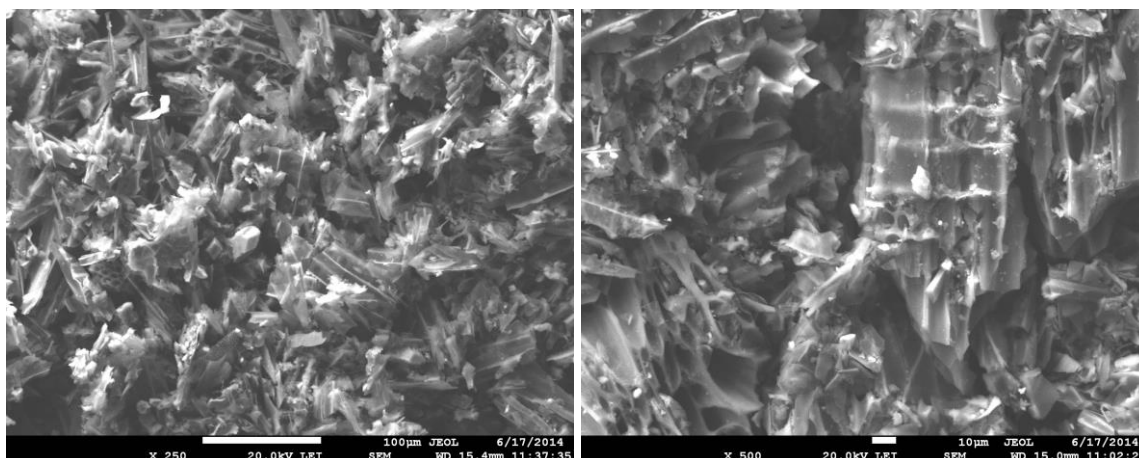
*<LOD – hodnota nižšia ako medza detekcie daného stanovenia

Fyzikálno-chemická charakterizácia skúmanej pôdnej matrice poukázala na slabo kyslý charakter a pomerne vysokú hodnotu KVK, ktorá je porovnateľná s hodnotou KVK pôdy pochádzajúcej z blízkosti nášho odberového miesta (Karar et al., 2015). Rovnako hodnoty koncentrácie ťažkých kovov zistené autormi korelujú s obsahmi, ktoré boli zistené v našej práci.

Podľa rakúskeho zákona S2082-2 stanovujúceho prípustné limity ťažkých kovov v poľnohospodársky využívaných pôdach, boli koncentračné limity v prípade Cd prekročené 40-násobne, Cu 1,5-násobne, Pb 15-násobne a v prípade Zn 4-násobne. Na základe tohto zistenia konštatujeme, že ide o pôdu dlhodobo zaťaženú priemyselnými aktivitami a jej remediácia je nevyhnutná z hľadiska eliminácie rizika novej penetrácie ťažkých kovov do podzemných vôd a biologických systémov.

Skenovacia elektrónová mikroskopia (SEM) odhalila charakteristické štruktúry a morfológiu povrchov biouhlia produkovaného z rastlinnej biomasy a lignocelulóзовých odpadov (obrázok 4). Na základe získaných mikrosnímkov pri zväčšení 250 \times a 500 \times vieme diferencovať zmeny, ktoré nastali vplyvom termochemickej konverzie biologického materiálu a prispeli k formovaniu vysoko porózneho materiálu s rozsiahlym systémom

mikro- a mezopórov, lamiel a komôrok. Štruktúrne a fyzikálno-chemické vlastnosti biouhlia naznačujú jeho možné využitie pri imobilizácii ťažkých kovov v pôdnej matrici. Tento predpoklad sme overili v ďalších experimentoch.



Obrázok 4: SEM-snímky biouhlia pripraveného zo záhradného dreveného odpadu s obsahom listovej hmoty pri zväčšení 250× a 500×.

Po zapracovaní biouhlia pripraveného z dreveného záhradného odpadu s obsahom listovej hmoty do pôdnych vzoriek (prídavok 1 % a 5 % w/w) a následnej krátkodobej kultivácii (14 dní) boli opäť stanovené vybrané fyzikálno-chemické charakteristiky (tabuľka 2).

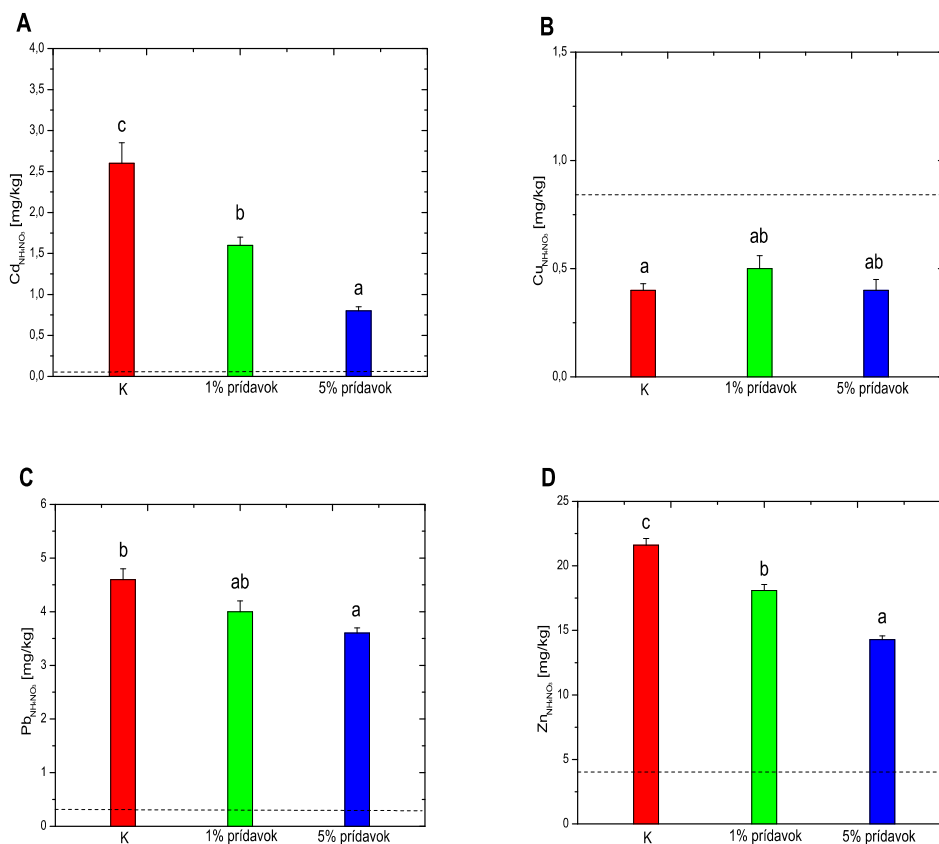
Tabuľka 2: Vybrané fyzikálno-chemické charakteristiky kontrolnej vzorky (K) a vzoriek s 1 % a 5 % (w/w) prídavkom biouhlia po krátkodobej kultivácii (14 dní, 19 °C, vodná kapacita 65 %). Všetky merania boli realizované v troch a experimenty v piatich opakovaníach (priemerná hodnota ± smerodajná odchýlka).

	K	1% prídavok	5% prídavok
pH_{H2O}	6,20 ± 0,10	6,75 ± 0,10	7,22 ± 0,10
pH_{KCl}	5,90 ± 0,10	6,35 ± 0,10	6,90 ± 0,10
EC [µS/cm]	73,65 ± 3,18	126,14 ± 6,84	168,50 ± 10,20
KVK [cmol/kg]	15,35 ± 0,40	17,60 ± 0,60	18,40 ± 0,20
Cd [mg/kg]	39,10 ± 2,84	39,20 ± 1,84	39,20 ± 1,94
Cu [mg/kg]	154,92 ± 7,65	155,60 ± 7,20	157,40 ± 8,45
Pb [mg/kg]	1483,91 ± 12,64	1484,10 ± 13,60	1485,65 ± 10,80
Zn [mg/kg]	1313,50 ± 11,85	1314,20 ± 16,64	1313,55 ± 15,60

Je zrejmé, že vplyv biouhlia sa prejavil najmä v alkalizácii pôdnej reakcie, zvýšení hodnoty mernej elektrickej vodivosti, ako aj kationovo-výmennej kapacity pôdnych vzoriek. Nárast celkových koncentrácií vybraných ťažkých kovov môžeme považovať za zanedbateľný a štatisticky nevýznamný. Z pohľadu hodnotenia kvality pôd má veľký význam biologická dostupnosť ťažkých kovov.

Na stanovenie prístupnosti kovov v pôdnej matrici je možné využiť viacero fyzikálnych, chemických a biologických metód a postupov. Pri charakterizácii biologicky prístupných foriem kovov v pôdnom systéme nesmieme zabúdať na fakt, že ide najmä o vodorozpustné formy, vymeniteľné frakcie a frakcie ľahko uvoľniteľné do chemicky neagresívnych roztokov (Frišták et al., 2015b). V našom prípade sme použili simultánnu extrakčnú protokol s 1 mol/L dusičnanom amónnym ako extraktantom. Je zrejmé, že vplyv biouhlia

sa prejavil v znížení extrahovateľnosti a tým štatisticky významnom znížení prístupných foriem Cd, Pb a Zn (obrázok 5).



Graf 1: Vplyv 1 % a 5 % (w/w) prídavku biouhlia na prístupné formy Cd (A), Cu (B), Pb (C) a Zn (D) získané pomocou simultánneho extrakčného protokolu s 1 mol/L NH_4NO_3 v porovnaní s kontrolou (K).

Prerušovaná čiara predstavuje povolené limity extrahovateľných foriem vybraných kovov pre poľnohospodársky využívané pôdy podľa rakúskeho štandardu S 2088-2. Odlišné písmená indikujú štatisticky významné rozdiely pri $p < 0,05$ (Duncanov test).

V prípade Cd bol pozorovaný pokles dostupných foriem o 38 % pri 1 % prídavku biouhlia a takmer o 70 % pri 5 % prídavku biouhlia v porovnaní s kontrolou. Pokles dostupných foriem o 13 % (1 % prídavok) a 21 % (5 % prídavok) v porovnaní s kontrolou bol zaznamenaný v prípade Pb. Dostupnosť Zn klesla o 16 % v prípade 1 % prídavku a o 31 % v prípade 5 % prídavku biouhlia v porovnaní s kontrolnou vzorkou.

V prípade Cu pokles dostupnosti po prídavku biouhlia nebol pozorovaný, čo naznačuje rozdielnosť väzbových mechanizmov Cu v porovnaní s inými kovmi. Je zrejme, že Cu je v pôde prevažne viazaná do foriem organických komplexov, ktoré môžu vplyvom zvýšenej hodnoty pH podliehať rozkladu, a tým ľahko mobilizovať Cu.

V práci Karer et al. (2015) autori poukazujú na fakt, kedy ani využitie vápna ako alkalizačného aditíva nedokázalo znížiť prístupnosť Cu, ale podobne ako v našom prípade došlo k zvýšeniu koncentrácie jej mobilných foriem. Autori rovnako poukazujú na možnosť silného vplyvu pôdnej reakcie, ktorá reguluje dostupnosť Cu z pôdnej matrice. Na dôvažok Uchimiya et al. (2011) vyslovili hypotézu, že v prípade imobilizácie Cu v kontaminovanej pôde s aplikáciou biouhlia ako pôdneho aditíva je nutné uvažovať o možných kompetíciách

medzi voľným rozpustným organickým uhlíkom (z angl. dissolved organic carbon, skr. DOC) a voľnými Cu iónmi o aktívne sorpčné miesta na vnútorných a vonkajších povrchoch materiálu.

4 Záver

Remediácia kontaminovaných pôd aplikáciou vhodných a environmentálne akceptovateľných aditív predstavuje dôležitý medzník v obnove životného prostredia ako aj trvalo udržateľnom rozvoji našej spoločnosti. Je zrejmé, že recyklácia odpadových materiálov, produkcia nových, hodnotných produktov a využitie známych technológií v nových aplikáciách je oblasť výskumu, ktorá si vyžaduje našu pozornosť.

Predložená štúdia sleduje možnosť využitia biouhlia, pripraveného zo záhradného odpadu v procese pomalej pyrolýzy ako potenciálneho pôdneho aditíva na imobilizáciu ťažkých kovov v priemyselne zaťaženej pôde z oblasti Arnoldstein v Rakúsku. Výsledky poukazujú na výrazné zníženie koncentrácie dostupných foriem Cd, Pb a Zn v pôdnych vzorkách s 1 % a 5 % (w/w) prídavkom biouhlia. Správanie Cu si vyžaduje detailnejšie štúdium najmä v kontexte zmien pôdneho pH, sorpčného potenciálu biouhlia a obsahu rozpustných organických foriem uhlíka.

Acknowledgement: The authors gratefully acknowledge the support of Dr. Libor Ďuriška at SEM analysis, support of Dr. Wolfgang Friesl-Hanl at soil sampling and Dr. Katarína Kotuláková at language proofs.

Literatúra

1. Austrian Standards S 2088-2. 2014. Contaminated sites – part 2: application-specific evaluation of soil pollution of old sites and old waste dumps. Austrian Standards Institute. Vienna. Austria.
2. Cimò, Giulia – Kucerik, Jiri – Berns, Anne – Schaumann, Gabriele – Alonzo, Giuseppe – Conte, Pellegrino. 2014. Effect of heating time and temperature on the chemical characteristics of biochar from poultry manure. In *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. Vol. 62, pp. 1912–1918. ISSN 1520-5118.
3. EBC – European Biochar Certificate. 2012 – Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. European Biochar Foundation, Arbaz, Switzerland.
4. Frišták, Vladimír – Gablovičová, Tatiana – Pipíška, Martin – Michálek, Barbora – Lesný, Juraj. 2015. Application of ^{65}Zn and ^{54}Mn isotopic dilution for evaluation of available soil manganese and zinc fractions in Western Slovak region. In *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 303, no. 3, pp. 2489–2495. ISSN 1588-2780.
5. Frišták, Vladimír – Pipíška, Martin – Lesný, Juraj – Soja, Gerhard – Friesl-Hanl, Wolfgang – Packová, Alena. 2015. Utilization of biochar sorbents for Cd^{2+} , Zn^{2+} , and Cu^{2+} ions separation from aqueous solutions: comparative study. In *Environmental monitoring and assessment*. Vol. 187, article no. 4093.
6. Frišták, Vladimír – Pipíška, Martin – Soja, Gerhard. 2018. Pyrolysis treatment of sewage sludge: A promising way to produce phosphorus fertilizer. In *Journal of Cleaner Production*. Vol. 172, pp. 1772–1778. ISSN 0959-6526.

7. IBI. 2015. Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil, IBI-STD-01.1., International Biochar Initiative, www.biochar-international.org/characterizationstandard, accessed November 2015.
8. Karer, Jasmin – Wawra, Anna – Zehetner, Franz – Dunst, Gerald – Wagner, Mario – Pavel, Petronela-Bianca – Puschenreiter, Markus – Friesl-Hanl, Wolfgang – Soja, Gerhard. 2015. Effects of biochar and compost mixtures and inorganic additives on immobilisation of heavy metals in contaminated soils. In *Water, Air and Soil Pollution*. Vol. 226, article no. 342. ISSN 1573-2932.
9. Lehmann, Johannes – Joseph, Stephen. 2015. *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. 2. vyd. Earthscan from Routledge. ISBN 978-0-415-70415-1.
10. Pipíška, Martin – Micháleková-Richveisová, Barbora – Frišták, Vladimír – Horník, Miroslav – Remenárová, Lucia – Stiller, Richard – Soja, Gerhard. 2017. Sorption separation of cobalt and cadmium by straw-derived biochar: a radiometric study. In *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Vol. 311, no. 1, pp. 85–97. ISSN 1588-2780.
11. Rajec, Pavol – Roskopfová, Oľga – Galamboš, Michal – Frišták, Vladimír – Soja, Gerhard – Dafnomili, Argyro – Noli, Fotini – Dukić, Andjelka – Matović, Ljiljana. 2016. Sorption and desorption of pertechnetate on biochar under static batch and dynamic conditions. In *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Vol. 310, no. 1, pp. 253–261. ISSN 1588-2780.
12. Uchimiya, Minori – Wartelle, Lynda – Klasson, Thomas – Fortier, Chanel – Lima, Isabel. 2011. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. In *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 59, no. 6, pp. 2501–2510. ISSN 1520-5118.
13. Verheijen, Franciscus – Jeffery, Simon Lee – Bastos, Ana Catariina – van der Velde, Marijn – Diafas, Iason. 2010. Biochar application to soils – a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. European Commission. ISBN 978-92-79-14293-2.
14. Wawra, Anna – Friel-Hanl, Wolfgang – Puschenreiter, Markus – Soja, Gerhard – Reichenauer, Thomas – Rithner, Caroline – Watzinger, Andrea. 2018. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in a mixed contaminated soil supported by phytostabilization, organic and inorganic soil additives. In *Science of the Total Environment*. Vol. 628–629, pp. 1287–1295. ISSN 0048-9697.

Kontakt

Vladimír Frišták

Katedra chémie, Pedagogická fakulta,
Trnavská univerzita v Trnave
Priemyselná 4, P. O. BOX 9, 918 43 Trnava
vladimir.fristak@truni.sk

Martin Pipíška

Katedra chémie, Pedagogická fakulta,
Trnavská univerzita v Trnave
Priemyselná 4, P. O. BOX 9, 918 43 Trnava
martin.pipiska@truni.sk

Gerhard Soja

Energy Department, Austrian Institute of Technology GmbH
Konrad Lorenz Str. 24, 3430 Tulln, Rakúsko
Gerhard.Soja@ait.ac.at