

Znečištění těžkými kovy a zdravotní rizika u rostlin cukrové řepy pěstované v půdě hnojené čistírenskými kaly

HEAVY METAL POLLUTION AND HEALTH RISKS IN SUGAR BEET PLANTS GROWN IN SEWAGE SLUDGE APPLIED SOIL

Bülent Topcuoğlu – Akdeniz University, Vocational School of Technical Sciences, Turecko

Nakládání s čistírenskými kaly představuje z hlediska životního prostředí problém. Zvýšená urbanizace a industrializace, zejména v rozvojových zemích, pak nutí místní úřady řešit otázku zacházení s rostoucím množstvím čistírenských kalů.

Kaly obsahují pro rostliny hodnotné živiny a organickou hmotu, mohou tedy zlepšit úrodnost půdy. Výživa rostlin čistírenskými kaly bývá přirovnávána k výživě chlévským hnojem, má stejnou úroveň produktivity – kvantitativní i kvalitativní (1). Čistírenské kaly však velmi často obsahují potencionálně toxické prvky, které mohou způsobit kontaminaci půdy, fytotoxicitu a nežádoucí rezidua v rostlinných a živočišných produktech (2). To představuje problém, protože takové kaly mohou zvýšit obsah těžkých kovů v půdě, v důsledku může dojít k transportu těžkých kovů do rostlin, příp. k jejich dalšímu šíření vodou. Konzumace plodin, které byly čistírenskými kaly hnojeny, pak může být riziková pro lidské zdraví. Z dlouhodobého hlediska může aplikace čistírenských kalů způsobit průkaznou akumulaci Zn, Cu, Pb, Ni a Cd v půdě i rostlinách (3).

Maximální přípustná množství těžkých kovů na povrchu půdy vycházejí z celkové koncentrace, i když se jedná o biologicky rozpustnou frakci s dopady na životní prostředí (4). Tato kritéria jsou nedostatečná, protože mobilita, difuze do životního prostředí a dostupnost těžkých kovů pro organismy jsou značně závislé na chemických vlastnostech půdy (5). Z pohledu životního prostředí je pro hodnocení a prognózu kontaminace potravin významná biologicky dostupná frakce těžkých kovů v půdě. Proto je pro stanovení potencionální biologické dostupnosti a remobilizace těžkých kovů v půdě důležitá jejich chemická forma (6).

V posledních letech se z důvodu zvýšených nároků na obsah živin v půdě a nutnosti prodloužení vegetační doby cukrové řepy stává otázka přeměny čistírenských kalů v půdě jedním z předních témat v oblasti hledání alternativ ve výživě řepy. Cílem této práce bylo vyhodnotit účinky čistírenských kalů na růst, cukernatost, akumulaci těžkých kovů a možná zdravotní rizika rostlin cukrové řepy. Má také poskytnout informace o mobilitě kovů a vyhodnotit nebezpečí kontaminace půdy těžkými kovy po aplikaci čistírenských kalů.

Materiál a metodika

Experiment byl proveden jako nádobový pokus ve skleníku, cukrová řepa byla pěstována v půdě hnojené čistírenskými kaly (SS). Vzorky půdy byly odebrány z hloubky půdy 0–30 cm, vysušeny a přesívány přes síto s 2mm oky. Čistírenský kal pocházel z čistíren odpadních vod z jižní Antalye. Kal převážně z domácích čistíček aerobně zrál a potom byl kompostován.

Před aplikací do půdy byl čistírenský kal sušen a přesíván přes síta s oky 2 mm. Chemické vlastnosti půdy a čistírenského kalu jsou shrnuty v tab. I.

Čistírenský kal získán z čističky odpadních vod v Hurmě v provincii Antalya. Rostliny cukrové řepy byly pěstovány v plastových květináčích s 25 kg půdy. Čistírenský kal byl aplikován do půdy v květináči ve variantách: kontrola, ošetřené varianty – SS₁ a SS₂ s dávkou 0,80 a 160 t.ha⁻¹ sušeného kalu. Čistírenský kal byl manuálně vpraven do půdy a ponechán v ní po dobu dvou měsíců před vysazením rostlin. Nádoby byly zcela náhodně rozmístěny (completely randomized block design) v 6 opakováních. Vlhkost substrátu byla udržována denním zavlažováním destilovanou vodou. Rostliny cukrové řepy (odrůdy Türkşeker) byly vysazeny po 2 v jedné nádobě, předtím byl substrát pohnojen NPK hnojivem (ekvivalent 150 kg.ha⁻¹ N, P₂O₅, K₂O). Sklizeny byly po 150 dnech, byly odděleny listy a kořeny na vážení a analýzu. Ve vzorcích kořene byl stanoven obsah cukru pomocí polarimetru Polamat. Vzorky rostlin byly sušeny při teplotě 60 °C, rozemlety a rozpuštěny ve vodním roztoku podle mezinárodní normy (8).

Vzorky půdy byly po sklizni cukrové řepy odebrány z květináčů a byly sušeny a přesívány (síto s oky 2 mm). Listy a kořeny cukrové řepy byly analyzovány odděleně. V půdě byla měřena elektrická vodivost (EC) a pH: poměr vody 1 : 2, KVK (kationtová

Tab. I. Analytické vlastnosti pokusné půdy a čistírenských kalů před aplikací

Parametry	Půda	Půdní limity (mg.kg ⁻¹) (7)	Čistírenský kal	Limity kalu (mg.kg ⁻¹) (7)
Struktura	hlinitá		–	
pH H ₂ O	7,36		7,55	
CaCO ₃	7,70		–	
Popel (%)	–		44,5	
EC (dS.m ⁻¹)	0,03		4,3	
Zn (mg.kg ⁻¹)	74,13	150–300	1560	2500–40 002
Cu (mg.kg ⁻¹)	22,44	50–140	212	1 000–1 750
Ni (mg.kg ⁻¹)	15,90	30–75	58	300–400
Pb (mg.kg ⁻¹)	42,11	50–300	456	750–1 200
Cd (mg.kg ⁻¹)	0,02	1–3	4,8	20–40
As (mg.kg ⁻¹)	11	100	115	1 200

Tab. II. Celková koncentrace těžkých kovů v půdě hnojené čistírenským kalem

Aplikace	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd	As
Kontrola	75,1	22,5	16,6	41,4	0,02	11,4
SS ₁	118,3	27,8	17,1	53,8	0,11	13,8
SS ₂	160,2	32,7	19,2	62,8	0,18	16,4
Průkaznost	**	*	*	**	**	*

Všechny hodnoty jsou v mg.kg⁻¹ sušiny jako průměr 6 opakování,
* na hladině průkaznosti P ≤ 0,05; ** na hladině průkaznosti P ≤ 0,01.

výměnná kapacita) – stanoveno extrakcí 0,1M NN₄AOc; obsah CaCO₃ byl určován pomocí kalcimetru, organický uhlík byl určen mokrou oxidací a struktura byla stanovena Bouyoucos hydrometrickou metodou. Pro určení celkové koncentrace těžkých kovů byly půdní a rostlinné vzorky rozpuštěny podle mezinárodní normy (8) HNO₃/HCl v poměru 1 : 3. Ke stanovení frakcí kovů v půdních vzorcích byla použita metoda postupné extrakce (9), skládala se z těchto částí:

- F1: 1M MgCl₂ (1:8 w/v, pH 7) při pokojové teplotě po dobu jedné hodiny; kovy v půdním roztoku ve výměnných formách.
- F2: 1M NaOAc (1:8 w/v, pH 5) při pokojové teplotě po dobu pěti hodin; kovy v karbonátové frakci.
- F3: 0,04M NH₂OH/HCl in 25 % (v/v) HOAc (1: 20 w/v) při teplotě 96 °C po dobu 6 hodin; kovy vázané s oxidy Fe a Mn
- F4: 3 ml 0,02M HNO₃+5 ml 30 % H₂O₂ (pH 2) při teplotě 85 °C po dobu 3 hodin; kovy vázané s organickou hmotou.
- F5: HNO₃-HCl digestát; zbytková frakce.

Koncentrace kovů (Zn, Cu, Ni, Pb, Cd a As) v rostlinných a půdních vzorcích byly analyzovány použitím ICP-MS za optimálních podmínek měření, hodnoty byly upraveny pro sušený materiál (12 h při 105 °C). Vybranými ukazateli znečištění životního prostředí pro půdní vzorky byly „faktor mobility“ (MF) (6), „jednofaktorový index znečištění“ (Pi) a „vícefaktorový index znečištění“ (PN) (10) a pro vzorky rostlin „faktor mobility těžkých kovů“ (TF) a „cílový kvocient potravinové bezpečnosti“

(THQ) (11). Tyto ukazatele sloužily pro komplexní, integrované vyhodnocení možných rizik znečištění způsobeného hnojením čistírenskými kaly. Statistická analýza byla provedena pomocí programu SPSS-16 pro Windows.

Výsledky a diskuze

Celkový obsah kovů v půdě

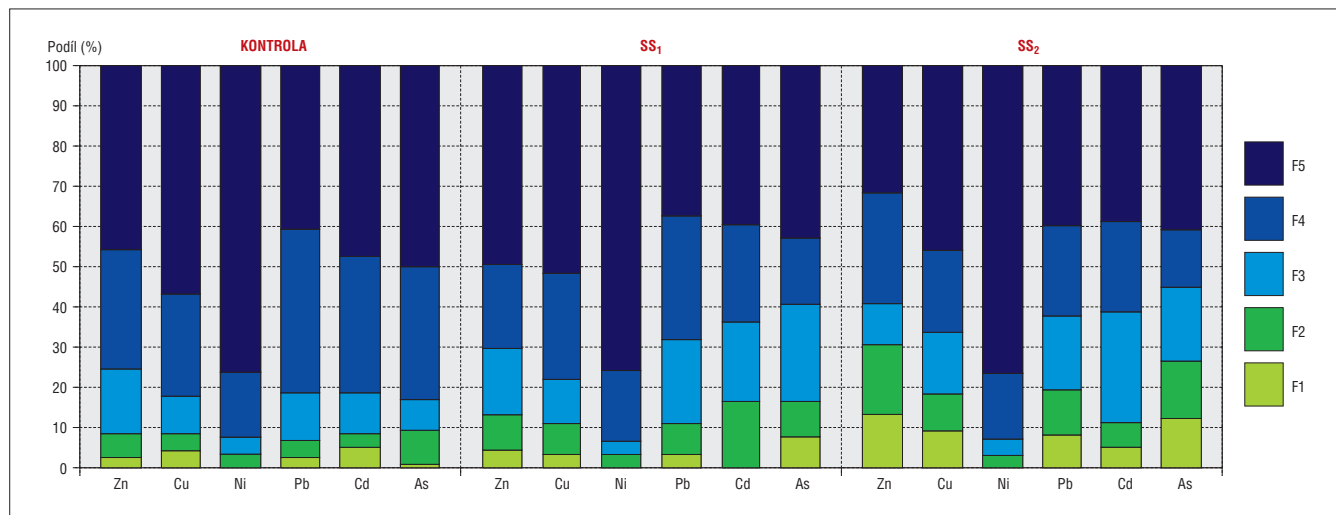
Obsah těžkých kovů v půdě a organickém materiálu kalů, které byly analyzovány před pokusem (tab. I.), byl v přijatelném rozsahu agronomických hodnot. Porovnání obsahu kovů v organickém materiálu s neošetřenou půdou ukázalo, že kovy jako Zn, Cu, Ni, Pb a Cd byly přítomny čistírenském kalu ve větších koncentracích než v experimentálních vzorcích půdy. Přesto byly koncentrace těžkých kovů v čistírenském kalu pod hodnotami stanovenými (EU) (7) pro zemědělské využití kalů.

Aplikace čistírenského kalu vedla ke zvýšení obsahu sledovaných těžkých kovů, což se projevilo v průkazném zvýšení jejich forem v půdě v porovnání s kontrolou (tab. II.). Rostoucí obsah kovů v půdě po aplikaci čistírenského kalu byl v literatuře popsán (12). Zvýšené obsahy kovů v půdě nepřekročily hodnoty stanovené pro koncentrace kovů legislativou EU (7).

Upřesnění a pohyblivost kovů v půdě

Graf na obr. 1. vyjadřuje podíly frakcí těžkých kovů v půdě v neošetřené variantě a v ošetřených variantách SS₁ a SS₂. U všech kovů platí shoda mezi celkovými hodnotami frakcí kovů a extrahovatelnými hodnotami kovů v 1:3 HNO₃/HCl, které jsou v přijatelném rozsahu (100 ± 5 %).

Výzkum distribuce kovů v kontrolní variantě ukázal, že nejvyšší podíl byl zjištěn u všech kovů v reziduální frakci (F5). F1, F2 a F3 frakce Zn byly v kontrolní variantě vyšší než u ostatních kovů. Nejvíce mobilní frakce kovů byla detekována v kontrolní variantě u Zn a nejméně mobilní frakce byla detekována u Ni. Nikl byl spojen s reziduální fází. Tyto výsledky indikují v kontrolní variantě vyšší podíl kovů vázaných na organickou a reziduální frakci. Reziduální fázi představují kovy tvořící krystalickou mřížku půdní frakce, ve které by nemělo dojít k remobilizaci, kromě velmi

Obr. 1. Distribuce kovů v jednotlivých frakcích v kontrolní variantě a ve variantách SS₁ a SS₂

obtížných podmínek (9). Distribuční trendy Zn, Cu, Ni, Pb, Cd a As při aplikacích čistírenského kalu obecně měly pořadí frakcí $F1 < F3 < F2 < F4 < F5$. Frakce kovů F1, F2 a F3 byly značně zvýšeny aplikací čistírenských kalů, to přirozeně dává těmto kovům vysokou pohyblivost. Navzdory nízkým koncentracím Pb, Cd a As ve zkoumaném čistírenském kalu naznačuje vysoká rozpustnost Pb, Cd, As ve výměnné fázi, že by tyto prvky mohly poškozovat životního prostředí, a z tohoto důvodu by se měl rozsah použití čistírenských kalů zvažovat (13).

Kvůli některým formám kovů, které jsou pevněji vázány na půdní složky než extrahované v F1, F2, F3, může být hodnocena pohyblivost kovů v půdních vzorcích na základě absolutního a relativního obsahu frakcí slabě vázaných na půdní složky. To vyjadřuje potencionální faktor pohyblivosti kovů (MF). Hodnoty faktoru mobility kovů v kontrolním vzorku půdy byly značně vyšší u Zn. Aplikace čistírenského kalu do půdy způsobila zvýšení hodnoty faktoru mobility u všech kovů v porovnání s kontrolními vzorky půdy (neošetřenými) (obr. 2.). Arzen a zinek byly při aplikaci čistírenských kalů stanoveny jako nejpoohyblivější kovy. Vysoké hodnoty faktoru mobility byly interpretovány jako symptomy relativně vysoké lability a biologické dostupnosti těžkých kovů v půdě (13).

Hodnocení kontaminace těžkými kovy

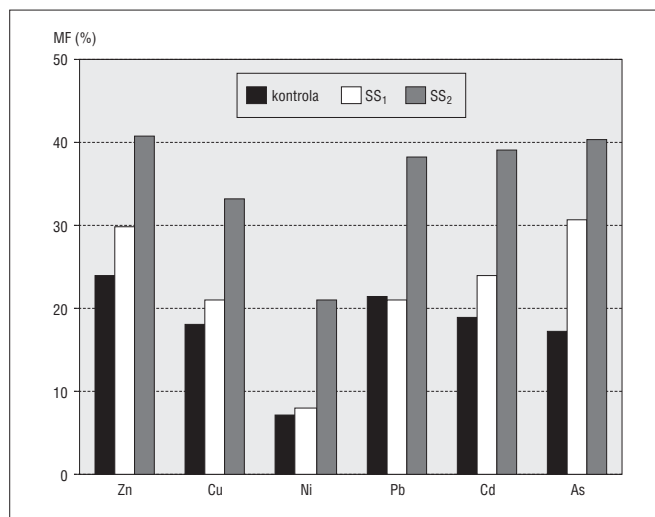
Jednofaktorový (P_i) a složený vícefaktorový koeficient znečištění (P_N) těžkých kovů uvádí obr. 3. Je zřejmé, že ačkoliv aplikace čistírenského kalu zvýšila indexy znečištění, všechny

koeficienty znečištění těžkými kovy po aplikaci kalů do půdy ve skleníku nepřesáhly kritickou hodnotu 0,7 (stupeň čistoty). Z toho vyplývá, že všechny vzorky půdy mohou být po aplikacích považovány za málo kontaminované a lze je tedy brát za nezávadné. Průměrná hodnoty P_i těžkých kovů byly v pořadí $Zn < Ni < Cu < Pb < As < Cd$ pro všechny aplikace.

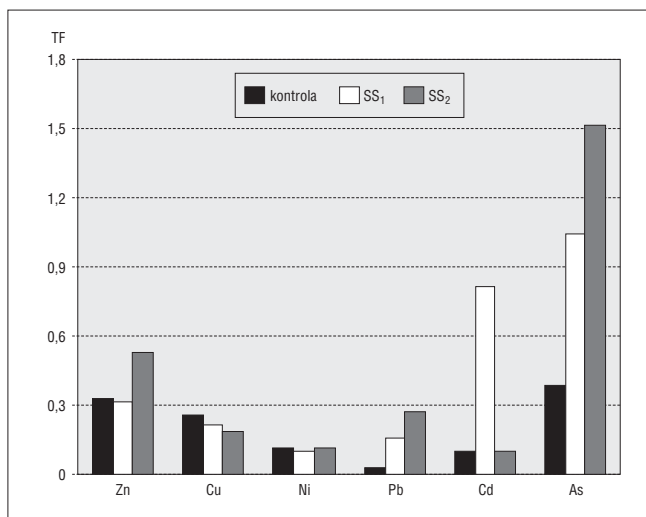
Vlastnosti rostlin a zdravotní rizika

Výnos sušiny, obsah cukru a koncentrace Zn, Cu, Ni, Pb, Cd a As v listových a kořenových pletivech cukrové řepy po ošetření čistírenskými kalů jsou uvedeny v tab. III. a tab. IV. Aplikace čistírenských kalů zvýšila jak v listech tak i kořenech výnos sušiny a koncentrace těžkých kovů v rostlinách ($P < 0,05$, tab. IV.). Celkový obsah cukru v kořenech nebyl statisticky průkazně změněn. Koncentrace kovů v listech u kontrolní varianty byly nízké a představovaly nejnižší limity. V variant s aplikací kalů byly koncentrace těžkých kovů v listových a kořenových pletivech cukrové řepy zvýšeny. Mezi jednotlivými variantami byly zjištěny průkazné rozdíly. Vyšší obsahy kovů byly zjištěny v půdě ošetřené čistírenskými kalů kvůli vyššímu obsahu kovů v čistírenském kalu a také s vyšší použitou dávkou. Nicméně všechny koncentrace kovů byly pod hodnotou fytotoxicity (15). Koncentrace kadmia v listových i kořenových pletivech cukrové řepy byla při aplikaci čistírenských kalů obzvláště vysoká a byla blízka úrovni toxicity. Neexistuje však důkaz, že růst rostlin byl ovlivněn, protože rozdíly ve srovnání s kontrolní variantou byly velmi nízké. Podle výsledků koncentrace Zn, Cd,

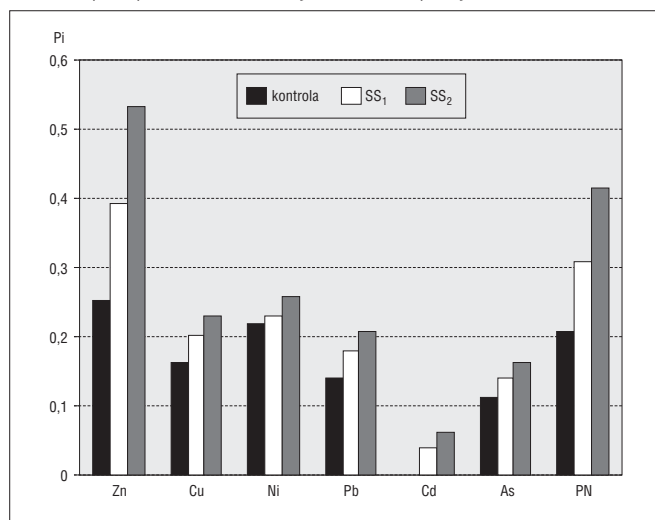
Obr. 2. Průměrný faktor mobility (MF) kovů v půdách po aplikaci čistírenských kalů



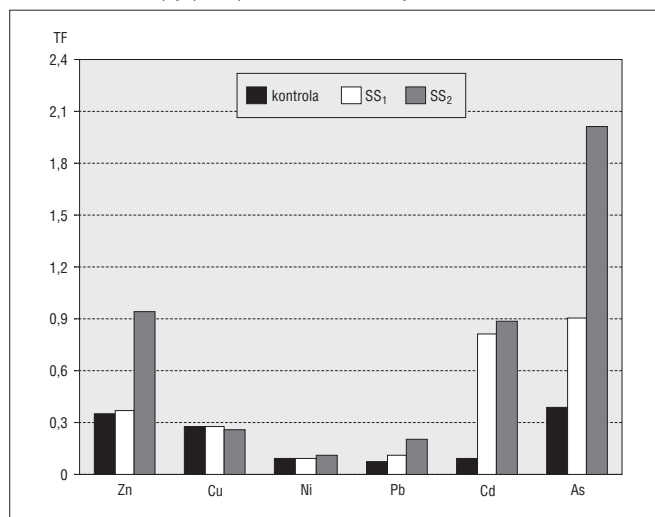
Obr. 5. Faktor mobility těžkých kovů (TF) v kořenových pletivech cukrové řepy po aplikaci čistírenských kalů



Obr. 3. Jednofaktorový (Pi) a složený koeficient těžkých kovů (PN) po aplikaci čistírenských kalů do půdy



Obr. 4. Faktor mobility těžkých kovů (TF) v listových pletivech cukrové řepy po aplikaci čistírenských kalů



Pb a As v cukrové řepě při aplikaci čistírenských kalů do půdy překročily index obsahu pro potraviny a hraniční hodnoty pro zeleninu (CEC, 2001).

Faktor mobility těžkých kovů (TF) a cílový kvocient bezpečnosti (THQ) cukrové řepy

Hodnoty TF jsou znázorněny na obr. 4. a 5. Faktor mobility těžkých kovů byl při všech aplikacích vyšší v listech než v kořenech cukrové řepy. Aplikace čistírenských kalů vedla k vyššímu přenosu Zn, Cd a As jak v listových, tak kořenových pletivech cukrovky. Nejvyšší průměrný TF byl zjištěn u arzeny ve vzorcích listů. Druhý nejvyšší faktor TF byl zjištěn u kadmia v listových a kořenových pletivech cukrové řepy při hnojení čistírenskými kalů. To pravděpodobně nastalo v důsledku vysokého faktoru mobility kovů v půdě a rozpustnosti kovových prvků u čistírenských kalů. Mobilita kovů z půdy do rostlin je funkcí ovlivněnou fyzikálními a chemickými vlastnostmi půdy i jednotlivých rostlinných druhů, působí na ni nespočetné antropogenní vlivy i faktory životního prostředí (17). Vysoká akumulace Cd a As v listech a kořenech cukrové řepy může být způsobena vysokou mobilitou a rozpustností Cd a As ve výměnné fázi půdy při ošetření čistírenskými kalů. Podle očekávání byla nejnižší hodnota TF u niklu kvůli nízké rozpustnosti a MF půdy.

Jak můžeme vidět, průměrné hodnoty THQ kovů (kromě Zn a Pb) se v listových a kořenových pletivech cukrové řepy nacházely pod kritickou hodnotu 1 (obr. 6. a 7.). Hodnoty THQ překročily u Zn a Pb ve variantách s čistírenskými kalů tuto kritickou hodnotu. Hodnota indexu bezpečnosti (HI) pro potraviny vyjadřuje celkové riziko znečištění kovy. Při ošetření čistírenskými kalů byl HI vyšší než kritická hodnota. To znamená, že by příp. konzumace čistírenskými kalů ošetřené cukrové řepy (jako zeleniny) mohla způsobit ve střednědobém či dlouhodobém horizontu vážné zdravotní problémy.

Závěr

Spolu s aplikací čistírenských kalů se do půdy dostaly i těžké kovy, čímž se průkazně zvýšila jejich koncentrace v půdách. Přesto

byly jejich koncentrace v půdě navýšené čistírenskými kalý všeobecně pod limity stanovenými 86/278/EEC pro zemědělské půdy s pH >7.

Studie specifikace kovů ukázala, že F1, F2 a F3 frakce zkoušených kovů byly po aplikaci čistírenských kalů značně zvýšeny. Tato vlastnost dává těžkým kovům přirozenou mobilitu. Bylo zjištěno, že navzdory nízkým koncentracím Pb, Cd a As v čistírenském kalu byly formy uvedených kovů vysoce rozpustné. Nejvíce mobilní frakce v kontrolní variantě byly zjištěny u Zn a As a nejméně mobilní frakce kovů byly detekovány v Ni. Aplikace čistírenského kalu do půdy způsobila vyšší hodnoty MF pro všechny kovy s výjimkou Ni. Arsen a zinek byly při ošetření čistírenskými kalý detekovány jako nejvíce mobilní kovy.

Hnojení čistírenskými kalý zvýšilo výnos sušiny listů a kořenů i koncentrace těžkých kovů v rostlinách cukrové řepy. Celkový obsah cukrů v kořenech nebyl průkazně změněn. Ačkoliv byly koncentrace těžkých kovů v listových a kořenových pletivech řepy po aplikaci čistírenského kalu zvýšeny, u všech kovů byly pod hodnotou fytotoxicity. Koncentrace Zn, Cd, Pb a As v cukrové řepě po ošetření čistírenskými kalý překročily podle našich výsledků index potravinové bezpečnosti a hodnoty stanovené jako bezpečné pro syrovou zeleninu.

Aplikace kalů vedla k vyšší mobilitě Zn, Cd a As v listových a kořenových pletivech rostlin. Faktory mobility kovů ve všech aplikacích byly vyšší v listech než v kořenech. Nejvyšší faktor mobility těžkých kovů (TF) v listech cukrové řepy po aplikaci čistírenských kalů byl zjištěn u As. To nastalo kvůli vyššímu faktoru mobility kovů v půdě a kvůli rozpustnosti kovových prvků po aplikaci kalů. TF byl nejnižší u Ni kvůli nízké rozpustnosti a průměrnému faktoru mobility v půdě (MF). Hodnocení kontaminace ukázalo, že jednofaktorový (Pi) i složený vícefaktorový koeficient znečištění (PN) těžkých kovů

Tab. III. Výnos sušiny listů a koncentrace kovů v rostlinách cukrové řepy hnojené čistírenskými kalý

Ošetření	Sušina listů	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd	As
	(g)	(mg.kg ⁻¹ sušiny)					
Kontrola	18,8	27	6,2	1,6	3,2	0,002	4,5
SS ₁	19,5	44	7,7	1,6	5,8	0,009	12,6
SS ₂	27,5	152	8,2	2,1	12,8	0,16	27,8
Základní úroveň (14)		40	8	2	3	<0,50	10–50
Úroveň fytotoxicity (15)		100–400	20–100	10–100	30–300	5–30	5–30

Všechny hodnoty jsou v mg.kg⁻¹ sušiny jako průměr 6 opakování, * na hladině průkaznosti P ≤ 0,05; ** na hladině průkaznosti P ≤ 0,01.

Tab. IV. Výnos sušiny kořenů a koncentrace kovů v rostlinách cukrové řepy hnojené čistírenskými kalý

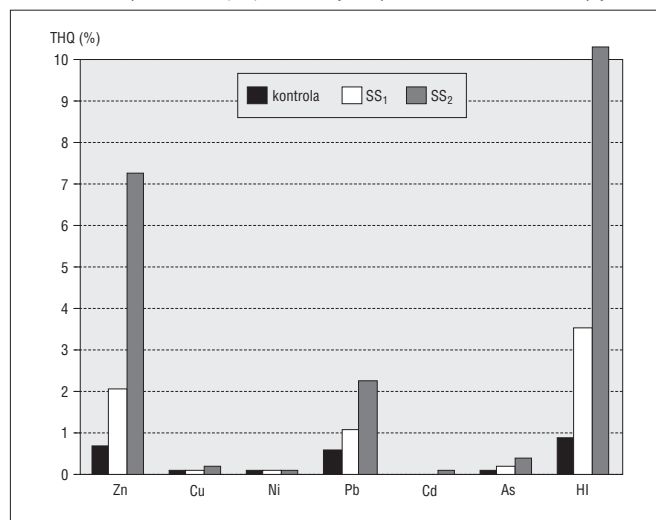
Ošetření	Sušina kořenů	Cukernatost	Zn	Cu	Ni	Pb	Cd	As
	(g)	(%)	(mg.kg ⁻¹ sušiny)					
Kontrola	13,6	16,15	25	5,8	1,8	1,2	0,002	5,2
SS ₁	14,5	16,77	38	5,7	1,8	8,8	0,09	14,5
SS ₂	16,8	16,45	85	6,2	2,2	17,5	0,19	24,8
Limity pro potraviny (16)			20	10	10	0,2	0,005	0,5

Všechny hodnoty jsou v mg.kg⁻¹ sušiny jako průměr 6 opakování, * na hladině průkaznosti P ≤ 0,05; ** na hladině průkaznosti P ≤ 0,01.

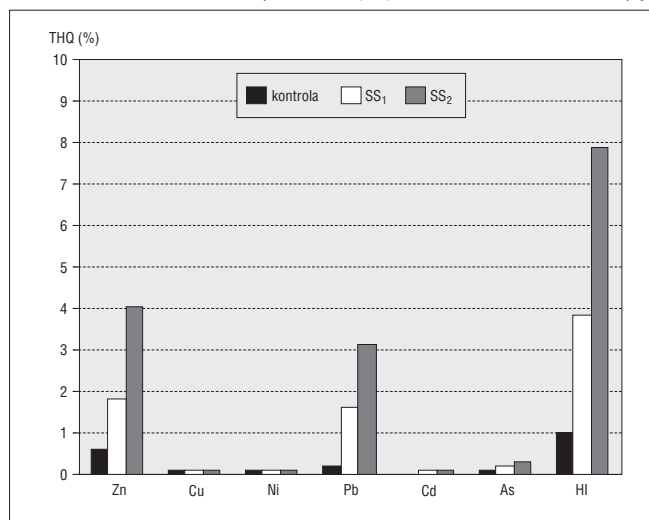
při hnojení ve skleníku nepřesáhl kritickou hodnotu. Všechny vzorky půdy mohou být po aplikaci kalu považovány za málo kontaminované.

Hodnoty cílového kvocientu bezpečnosti (THQ) přesáhly po aplikaci čistírenských kalů u Zn a Pb kritickou hodnotu, hodnota indexu potravinové bezpečnosti (HI), která představuje celkovou

Obr. 6. Cílový kvocient bezpečnosti (THQ) těžkých kovů a index bezpečnosti (HI) v listových pletivech cukrové řepy



Obr. 7. Cílový kvocient potravinové bezpečnosti (THQ) těžkých kovů a index bezpečnosti (HI) v kořenech cukrové řepy



sumu všech indexů znečištění, byla také nad kritickou hodnotou. Tyto výsledky znamenají, že konzumace rostlin hnojených čistírenskými kaly může způsobit při jejich průměrné spotřebě a dlouhodobé konzumaci vážné zdravotní problémy.

V této studii nebyly žádné škodlivé účinky po aplikaci čistírenských kalů do půdy detekovány. Obsahy těžkých kovů při jednotlivých aplikacích nepřesáhly povolené limity, ačkoliv aplikace čistírenských kalů očividně zvýšily dostupnost těžkých kovů pro rostliny cukrové řepy. Dlouhodobé používání čistírenských kalů však může pravděpodobně vést až ke zvýšení obsahu kovů k jejich toxickým hladinám. Proto je nutné provádět analýzy půdy, do které jsou pravidelně aplikovány čistírenské kaly, pro kontrolu obsahu těžkých kovů.

Souhrn

Cílem pokusu bylo zjistit kapacitu zatížení těžkými kovy, mobilitu kovů a rizika půdního znečištění, dále určit růst, akumulaci těžkých kovů a zdravotní rizika rostlin cukrové řepy při hnojení čistírenskými kaly. Hnojení čistírenskými kaly vedlo k většímu zapravení těžkých kovů do půdy a k průkaznému zvýšení jejich koncentrací. Výzkumy zabývající se kovy ukázaly, že rozpustné vyměnitelné Fe-Mn vazané frakce kovů se po aplikaci čistírenských kalů významně zvýšily. Hnojení čistírenskými kaly způsobilo vyšší hodnoty faktorů mobility pro všechny kovy s výjimkou Ni. Zvýšilo také obsah sušiny jak v listech, tak kořenech, a také koncentraci těžkých kovů v rostlinách cukrové řepy. Celkový obsah cukru v kořenech nebyl průkazně změněn. Hnojení čistírenskými kaly vedlo k vyššímu přenosu Zn, Cd a As do pletiv listů i kořenů. Studie hodnotící kontaminaci prokázala, že koeficient těžkých kovů pro jednofaktorové a vícefaktorové znečištění půdy nepřekročil svou kritickou hodnotu, přestože cílový kvocient bezpečnosti Zn a Pb svou kritickou hodnotu po aplikaci čistírenských kalů překročil. Index potravinové bezpečnosti také přesáhl kritickou hodnotu.

Klíčová slova: čistírenský kal, mobilita kovů, cukrová řepa, rizika znečištění.

Literatura

- BEYCA, J. ET AL.: Wet bag composting trial yields promising results. *Biocycle*, 34, 1993 (4), s. 72–75.
- ALLOWAY, B. J.; JACKSON, A. P.: The behaviour of heavy metals in sewage sludge-amended soil. *Sci. Total Environ.*, 100, 1991, s. 151–176.
- MULCHI, C. L. ET AL.: Residual heavy metal concentrations in sludge-amended coastal plain soils. I. Comparison of extracts. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 22, 1991 (9–10), s. 919–941.
- WALLACE, A.; WALLACE, G. A.: A possible flaw in EPA's 1993 new sludge rule due to heavy metal interactions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 25, 1994, s. 129–135.
- PLANQUART, P. ET AL.: Distribution movement and plant availability of trace metals in soils applied with SS composts: application to low loadings. *The Science of the Total Environment*, 1999, 241, s. 161–179.
- YUSUF, K. A.: Sequential extraction of lead, copper, cadmium and zinc in soils near ojata waste site. *Journal of Agronomy*, 6, 2007 (2), s. 331–337.
- Directive of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture (86/278/CEE). Council of the European Communities, *Official Journal of the European Communities*, L181, 1986, s. 6–12.
- ISO 11466 *International Standard*. Soil quality-extraction of trace elements soluble in aqua regia. 1995, 03–01.

- TESSIER, A.; CAMPBELL, P. G. C.; BISON, : Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.*, 51, 1979, s. 844–851.
- SINGH, K. P. ET AL.: Studies on distribution and fractionation of heavy metals in Gomti river sediments-A tributary of the Ganges, India. *Journal of Hydrology*, 2011, 312, s. 14–27.
- CHENG, J. L.; SHI, Z.; ZHU, Y. W.: Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang province, China. *Journal of Environmental Sciences*, 19, 2007, s. 50–54.
- Integrated risk information system*. United States, Environmental Pollution Agency, 2007, [online] <http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?fuseaction=iris.showSubstanceList>.
- SOMMARE, M.; TRACK, F. M. G.; VERLAS, M. G.: Effects of a sewage sludge and mineral fertilization on plant growth in two tropical agricultural soils of Mali. *Bioresource Technology*, 2003, 86, s. 15–20.
- DAVIS, R. D.; CARLTON-SMITH, C. H.: *Crops as indicators of the significance of contamination of soils by heavy metals*. Water Research Centre, Technical Report TR140, 1980, WRd Medmenham, Marlow.
- KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H.: *Trace elements in soils and plants*. 2000, ASC Press, Boca Raton, FL.
- FAO/WHO. Codex alimentarius commission, Joint FAO/WHO Food Standards Programme, 2007, Alinorm 7/30/13, thirtieth session, Roma, Italy, 2–7 July, 2007.
- HUANG, X. ET AL.: 2011. Potential risks of heavy metal pollution in soils cultivated for different periods. In *5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, (ICBBE)*, 10–12 May 2011, [online] <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5781595>.

Topcuoğlu B.: Heavy Metal Pollution and Health Risks in Sugar Beet Plants Grown in Sewage Sludge Applied Soil

An experiment was carried out to determine heavy metal loading capacity, metal mobility and pollution risks in soil and to determine growth, heavy metal accumulation and health risks in sugar beet plants following sewage sludge application. Application of sewage sludge led to a far greater introduction of heavy metals and brought about a significant increase in their concentrations in soil. Metal speciation studies showed that soluble, exchangeable and Fe-Mn bound fractions of metals increased considerably by sewage sludge application. Sewage sludge application in soil caused higher mobility factor values for all metals with the exception of Ni. Sewage sludge treatment increased both leaf and root dry matter yields and heavy metal concentrations in sugar beet plants. Total sugar content in roots did not show any statistically significant change. Sewage sludge application led to greater transfers of Zn, Cd and As metals both into leaf and root tissue of plants. Contamination evaluation studies showed that single and composite pollution coefficient of heavy metals in soil did not exceed its critical value. However, target hazard quotient of Zn and Pb exceeded its critical value after sewage sludge treatment. Food hazard index was also above its critical value after sewage sludge treatments.

Key words: sewage sludge, metal mobility, sugar beet, pollution risks.

Kontaktní adresa – Contact address:

Prof. Dr. Bülent Topcuoğlu, Akdeniz University, Vocational School of Technical Sciences, 07058 Antalya, Turkey, e-mail: btoglu@akdeniz.edu.tr