

BILANCE A FORMY ZINKU V PŮDĚ A JEHO VSTUP DO ROSTLIN

Š. Poláková, M. Florián

Došlo: 14. června 2005

Abstract

POLÁKOVÁ, Š., FLORIÁN, M.: *Balance and forms of zinc in soil and its uptake by plants*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2006, LIV, No. 1, pp. 59–70

In this paper, zinc flows in arable soils of the Czech Republic and zinc fractions in arable soils are studied. Furthermore, a zinc uptake by agricultural plants is focused.

Based on a database of the programme *The basal soil monitoring system (BSMS)* a static zinc balance for arable soils on the national level was assessed. This programme is carried out by The Central Institute for Supervising and Testing in Agriculture (CISTA) in Brno. As a representative for the zinc balance calculation, 121 monitoring plots were chosen. The Czech Republic net zinc fluxes ranged from $-1250 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$ to $+5595 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$, median $+453 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{y}^{-1}$. The maximum zinc fluxes are typical of plots with manure applications. An atmospheric deposition is the most important input of zinc into arable soils. It makes 96,6% of the whole inputs. Leaching and run-off are neglected in this zinc balance by reason of missing credible data.

The project *Examination of zinc availability in dependence on its form in soil* was established to provide more information about behavior of zinc in soil. The first step was starting a greenhouse pot experiment, which was focused on comparison of several extraction agents (AR, 2M HNO_3 , 0.43M HNO_3 , Mehlich III, DTPA, CAT, 1M NH_4NO_3 , 0.01M CaCl_2). Four soils with increasing zinc content were picked out for this experiment (Domanínek, Chrlice, Kutná Hora, Hlízov). Total zinc contents in these selected soils ranged from 156.8 to 583.7 ppm in dry matter (Aqua regia extraction). Contents in plants were in wide range from 20.7 to 273 ppm in dry matter according to the plant variety and used soil. Strong correlations between 0.43M HNO_3 , Mehlich III, DTPA and CAT were proved. Using of weaker extraction agents enabled to distinguish geogenic and anthropogenic origin of the contamination.

zinc, zinc balance, zinc extraction, zinc contamination

Nezbytným předpokladem pro udržení kvality půdy je zajištění rovnováhy mezi vstupem látek do agroekosystému a jejich výstupem z něj. Ke zřehlednění stavu, týkajícího se akumulace určitého prvku v půdě, ať už významného z hlediska výživy nebo naopak kontaminace a následného ohrožení zemědělské produkce, slouží bilanční výpočty. Výsledků bilance lze využít ke zlepšení stavu půd, popř. alespoň k zachování stavu, k úpravě hnojivého režimu, používání přípravků na ochranu rostlin, odtokových poměrů atp. Pro většinu evropských ekosystémů bilanční

studie dokazují neudržitelnost současného využívání půdy. Tak např. Moolenaar (1998) vypočetl akumulaci kadmia v zemědělských půdách v rozsahu $0,2\text{--}3,7 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ a zinku mezi 61 a $1083 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$.

Podstatou bilančních metod jsou jednoduché kalkulace založené na zákoně o zachování hmoty. Bilanční přístupy se liší v závislosti na prostorové (bilance polní, faremní, regionální, národní) a časové škále (bilance statická, dynamická) a také podle datových databází (Keller et al., 2001; Moolenaar, 1998). V polní bilanci se sledují a kvantifikují toky živin v systému

půda-rostlina, ve faremní bilanci je hodnocenou jednotkou farma, zemědělský podnik apod.

Statická bilance (SB) počítá vzrůst koncentrace těžkých kovů v orniční vrstvě půdy jako čistý rozdíl mezi jejich vstupem a výstupem za jednotku času a výstupy nevztahuje k celkovému obsahu těžkých kovů v půdě. Statická bilance nemůže být použita k predikci vývoje obsahu těžkých kovů v půdě v čase.

Při použití dynamického přístupu (DB) je vzrůst koncentrace těžkých kovů v orniční vrstvě půdy výsledkem čisté bilance mezi vstupy a výstupy za jednotku času, děleno hmotností orniční vrstvy. Dynamická bilance odhalí, zda se objeví nějaké problémy, s kterým prvkem, v jakém půdním kompartmentu (podzemní vody, rostlinná produkce) a v jakém časovém horizontu (Moolenaar et al., 1997a).

Zmiňované bilanční přístupy nepočítají se změnami složení půdní matrix způsobenými vstupy těžkých kovů. Toto bere v úvahu třetí způsob *The Dynamic Soil Composition Balance* (DSCB), jenž umožňuje určit změny složení půdy na základě výpočtu bilancí těžkých kovů v půdě a bilancí hlavních půdních komponent (např. půdní organické hmoty) (Moolenaar et al., 1997b). Výsledkem DSCB přístupu je nižší koncentrace těžkých kovů v půdě než u statického a dynamického přístupu, což je způsobeno změnami půdního složení, které model zohledňuje.

Bilance tedy přináší informace o tocích vybraných prvků v půdě. Hovoří ale pouze o celkovém obsahu prvku v jednotlivých vstupech a výstupech a v samotné půdní matrix. Pro posouzení škodlivosti obsahu z hlediska ekotoxikologického, či z hlediska závadnosti rostlinné produkce, je důležité znát také chemické formy, v nichž se prvek v půdě vyskytuje.

Pro běžné účely dostačuje následující rozdělení na tři až čtyři hlavní frakce (Richter et Hlušek, 1994; Třebichavský et al., 1997; Düring et al., 2002; Blake et Gouling, 2002):

- vodorozpustný zinek
- výměnný zinek
- nevýmenný zinek
- reziduální zinek.

Zinek vodorozpustný, jehož podíl je velmi malý (obvykle maximálně do 1 %, může však být výrazně vyšší v antropogenně znečištěných půdách), je rozpuštěn v půdním roztoku a je okamžitě přijatelný rostlinami (Richter et Hlušek, 1994; Třebichavský et al., 1997). Patří sem zejména chloridová, dusičnanová a síranová forma. Následuje frakce výměnná, tedy zinek vázaný na sorpčním půdním komplexu (Lošák et al., 2004). Zinek se hromadí převážně v humusovém horizontu, v množství závisícím na půdních vlastnostech jako je pH, obsah koloidů atd. Třetí frakcí je zinek nevýmenný (také označován jako „vázaný“), který je ve for-

mách nerozpustných sloučenin, jakými jsou komplexy, křemičitany, fosforečnany, uhličitany a jiné. Do této skupiny bývá řazen i zinek vázaný v organické hmotě. Míra pevnosti jeho zabudování do organické hmoty je různá. Velmi často je uváděna frakce reziduální, která zahrnuje zbývající zinek, který je velmi pevně vázán, např. v matečné hornině. Zařazení do jednotlivých frakcí je dáno použitými extrakčními činidly. Jedno extrakční činidlo je obvykle používáno pro různé frakce, ale nejčastěji je pouze o něco silnější činidlo použito i pro snáze vyluhovatelnou frakci, čímž se celkový počet frakcí příslušným způsobem sníží.

Z hlediska výživy, nebo také možné kontaminace rostlin je podle Podlešákové et al. (2001) nejdůležitější určení obsahu mobilního (vodorozpustného, výměnného), případně snadno mobilizovatelného zinku. Pro tento účel se používá řada extrakčních činidel (Schaecke et al., 2002; McBride et al., 2003; Wenger et al., 2002; Vácha, 2001). Nejčastěji jsou to: CaCl_2 , MgCl_2 , NH_4NO_3 , NaNO_3 , KNO_3 a NH_4OAc . Další důležitou skupinou jsou činidla, která extrahují potenciálně mobilizovatelnou frakci. Sem se řadí EDTA, DTPA, Na_2EDTA a někdy také vyluhovalo pro Mehlich III. Za potenciálně mobilizovatelný zinek se dá považovat i zinek v organických vazbách, který se nejčastěji zjišťuje výluhem NaOH , případně NH_4EDTA .

Tento příspěvek slouží k vyhodnocení situace týkající se akumulace zinku v orných půdách ČR. K bilančním výpočtům byla využita databáze programu Monitoring zemědělských půd ČR, který je uskutečňován Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem zemědělským v Brně. Na problematiku frakcionace zinku v půdě byl zaměřen vegetační nádobový pokus, jež měl být prvním krokem k získání vhodného postupu pro vyhodnocování potenciálních rizik, vyplývajících z aplikací materiálů se zvýšeným obsahem zinku, jakými mohou být kaly ČOV, statková a organická hnojiva a některé další.

V příspěvku používaná terminologie týkající se hnojiv vychází ze zákona č. 156/1998 Sb., o hnojivech, ve znění pozdějších předpisů.

MATERIÁL A METODY

Výpočet bilance zinku a vegetační nádobový pokus byly uskutečněny s využitím dat z následujících zdrojů:

- Monitoring atmosférické depozice (ÚKZÚZ)
- Bazální monitoring zemědělských půd (ÚKZÚZ)
- Registr hnojiv (ÚKZÚZ)
- Registr přípravků na ochranu rostlin (SRS).

Bazální monitoring zemědělských půd byl založen Ústředním kontrolním a zkušebním ústavem v Brně v roce 1992 na 190 pozorovacích plochách. V roce

1997 vznikl subsystém kontaminovaných ploch na 27 pozorovacích plochách charakteristických anorganickým znečištěním jak antropogenního, tak geogenního původu. V rámci tohoto programu je sledován na stálých, reprezentativních plochách zemědělské půdy soubor půdních vlastností (obsah těžkých kovů, obsah přístupných živin, fyzikální parametry, ale také chemické složení pěstovaných plodin a vybrané vlastnosti mikrobiální biomasy) stálými měřicími postupy. Půdní typy pozorovacích ploch odpovídají poměrnému zastoupení hlavních genetických půdních typů, stejně tak zastoupení jednotlivých kultur. Rozložení ploch respektuje rovnoměrné rozložení v rámci regionu. Monitorovací plochy jsou součástí zemědělských ploch s běžnými agrotechnickými zásahy.

V rámci Bazálního monitoringu půd je sledováno celkem 217 ploch. Pro účely této práce byly zahrnuty pouze plochy s ornou půdou. Vyloučeny byly dále plochy, jejichž údaje nebyly úplné, popř. nemohly být považovány za hodnověrné. Celkově bylo k bilančním výpočtům využito údajů ze 121 ploch, v letech 1998–2002.

Bilance zinku

Databáze pro bilancování zinku v zemědělských agroekosystémech má čtyři oddíly:

- základní/vstupní data (informace o aplikovaných hnojivech, atmosférické depozici, pěstovaných plodinách),
- přepočtové koeficienty (koeficienty pro přepočet vstupních dat na množství prvku vstupujícího do systému nebo vystupujícího z něj),
- obsah prvku (celkové množství prvku aplikované na půdu prostřednictvím daného vstupu/výstupu),
- bilance.

Základní bilanční rovnice pro všechny typy bilančních výpočtů:

$$dM/dt = I - O, \text{ kde}$$

dM/dt změna obsahu prvku za časovou jednotku (nejčastěji rok),

- I vstupy (zvětrávání, atmosférická depozice, hnojiva, kaly, přípravky na ochranu rostlin, aplikace říčních a rybníčních sedimentů, závlahová voda, ...),
- O výstupy (odběr pěstovanými plodinami, vyluhování, povrchový odtok, eroze).

Statická bilance je výsledkem součtu vstupů a výstupů, přičemž na kvalitě vstupních dat závisí věrohodnost výsledné bilance. Prezentovaná bilance zinku využívá následující bilanční rovnici:

$$dM/dt = I_{AD} + I_{MM} + I_{MS} + I_{PEST} - O_{PL}, \text{ kde}$$

- I_{AD} vstup zinku prostřednictvím atmosférické depozice ($\text{g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$),
- I_{MM} vstup zinku prostřednictvím minerálních hnojiv ($\text{g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$),
- I_{MS} vstup zinku prostřednictvím statkových hnojiv ($\text{g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$),
- I_{PEST} vstup zinku prostřednictvím přípravků na ochranu rostlin ($\text{g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$),
- O_{PL} výstup zinku prostřednictvím zemědělských plodin ($\text{g} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$),
- dM/dt změna obsahu zinku v půdě ($\text{g} \cdot \text{ha}^{-1}$),
- dt čas (rok^{-1}).

Atmosférická depozice (I_{AD}) je sledována metodou bulk pomocí záchytné sběrné nádoby. Sledování probíhá od roku 1992, kdy byla metoda ověřena na 32 plochách bazálního monitoringu půd. V následujících letech se počet stanovišť pohyboval v rozmezí 30–160 a od roku 2000 je hodnoceno 49 pozorovacích ploch, včetně kontaminovaných. Sběr vzorků probíhá 2× ročně. Vzorky se vyhodnocují vždy za 1 rok.

Aplikace minerálních (I_{MM}) a statkových (I_{MS}) hnojiv je součástí monitoringu zemědělských půd. Prostřednictvím dotazníků, jež jsou každoročně rozepisovány subjektům hospodařícím na pozemcích s monitorovacími plochami, jsou ze všech těchto ploch zjišťovány následující údaje:

Minerální hnojiva: název hnojiva
datum aplikace
dávka č.ž. ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

Statková hnojiva: druh hnojiva
datum aplikace
dávka hnojiva ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Množství zinku aplikované jedním typem minerálního hnojiva na jednotku plochy ($\text{g} \cdot \text{ha}^{-1}$) je rovno:

$$[I_{MM}] = [DAVKA] * [M_{TK}] / 100,$$

kde $[M_{TK}]$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) je obsah zinku v hnojivu a $[DAVKA]$ ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) je množství hnojiva aplikovaného na jednotku plochy vypočtené jako:

$$[DAVKA] = [O_{VYP}] / [k] * 100 / [\%_M],$$

kde $[O_{VYP}]$ ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) je obsah prvku v čistých živinách, $[k]$ je koeficient běžně používaný k přepočtům mezi oxidovou (příp. uhličitánovou) formou a prvkem a $[\%_M]$ je procentuální obsah prvku v hnojivu.

Dávka zinku aplikovaná na jednotku plochy prostřednictvím jednoho typu statkového hnojiva ($\text{g} \cdot \text{ha}^{-1}$) odpovídá:

$$[I_{MS}] = [\%_{SUS}] / 100 * [DAVKA_SH] * 1000 * [M_{TK}] / 1000,$$

kde $[\%_{SUS}]$ je procentuální obsah sušiny v daném hnojivu, $[DAVKA_SH]$ ($t \cdot ha^{-1}$) je aplikovaná dávka statkového hnojiva a $[M_{TK}]$ ($mg \cdot kg^{-1}$) je obsah zinku v daném hnojivu.

Obsahy zinku v minerálních hnojivech použité pro potřeby bilančních výpočtů byly stanoveny podle hodnot uváděných Benešem (1994), obsahy zinku ve statkových hnojivech a příslušné procento sušiny pochází z prací ÚKZÚZ Brno a z literárních údajů (Bálik et al., 2004; Beneš, 1994).

Používání přípravků na ochranu rostlin (I_{PEST}) je rovněž sledováno v rámci monitoringu zemědělských půd. Každoročně jsou jednotlivým subjektům hospodařícím na pozemcích s pozorovacími plochami monitoringu půd rozesílány dotazníky s následujícími položkami:

| | | |
|-----------------|----------------|--------|
| název přípravku | datum aplikace | dávka. |
|-----------------|----------------|--------|

V současné době je zinek v přípravcích na ochranu rostlin součástí účinné látky mancozeb, který obsahuje 1,8 % zinku. Přípravky použité na vybraných pozorovacích plochách v letech 1998–2002 obsahující mancozeb zobrazuje Tab. I.

Zinek vstupující do půdy prostřednictvím přípravků na ochranu rostlin (I_{PEST}) je roven:

$$[I_{PEST}] = 1,8 / 100 * [MANC] / 100 * [DAVKA_PR] * 1000,$$

kde $[MANC]$ (%) je obsah mancozebu v daném přípravku a $[DAVKA_PR]$ ($kg \cdot ha^{-1}$) je množství přípravku aplikované na jednotku plochy.

Jedinou odečitatelnou položkou v uváděné bilanci zinku je odčerpávání prvku pěstovanými plodinami (O_{PL}). Kvalita zemědělských plodin je monitorována na 50 pozorovacích plochách Monitoringu zemědělských půd a probíhá od roku 1997. Plodiny jsou odebírány ve stadiu zralosti těsně před sklizní z celé pozorovací plochy. Odebírá se jak hlavní, tak vedlejší produkt. V odebraných vzorcích se stanovuje řada chemických prvků. Množství zinku odčerpaného danou plodinou z půdy odpovídá:

$$[O_{PL}] = [\%SUS] / 100 * [VYNOS] * [M_{PL}],$$

kde $[\%SUS]$ (%) je procentuální obsah sušiny v pěstované plodině, $[VYNOS]$ ($t \cdot ha^{-1}$) je výnos plodiny a $[M_{PL}]$ ($mg \cdot kg^{-1}$ suš.) je obsah zinku v sušině dané plodiny.

Do bilancí nebyly započítány vstupy a výstupy, jež byly považovány za nevýznamné, jen obtížně měřitelné, popř. nebyly tyto látky na půdu aplikovány. Jedná

se o následující kategorie vstupů a výstupů: zvětrávání, aplikace říčních a rybníčních sedimentů, aplikace odpadních kalů, závlahová voda, vyluhování, splach povrchovou vodou, erozní činnost.

Vegetační nádobový pokus

Čtyři vybrané monitorovací plochy (pro které byla také vypočtena bilance zinku) byly určeny jako vhodné k odběru půdy pro vegetační nádobový pokus. Experiment byl zaměřen na otestování a porovnání několika extrakčních činidel, která měla umožnit určení mobilních frakcí zinku v daných půdách a tuto konfrontovat s příjmem zinku jednotlivými pěstovanými plodinami.

Pokus byl proveden jako jednoletý nádobový ve vegetační hale ÚKZÚZ Brno. Předmětem sledování byly čtyři půdy se stupňujícím se obsahem zinku. Vzorky byly odebrány z monitorovacích ploch Domanínek, Chrlice, Kutná Hora a Hlízov. Obsahy zinku v půdách byly stanovovány sadou extrakčních činidel o rozdílné síle (Tab. VII.). Pěstované rostliny byly analyzovány na obsah zinku a zjišťovala se závislost obsahu zinku v rostlinách na jeho obsahu v půdě. Rovněž se posuzoval poměr frakcí zinku v půdách získaný jednotlivými činidly a vliv původu kontaminace na tento poměr.

Schéma pokusu:

1. přirozený obsah zinku (Domanínek)
2. antropogenní kontaminace zinkem (Chrlice)
3. zvýšený obsah zinku – geogenní původ (Hlízov)
4. velmi vysoký obsah zinku – geogenní původ (Kutná Hora).

Všechny čtyři půdy byly osety následujícími plodinami:

- pšenice jarní – Vinjett,
- jarní řepka – Mascot,
- kukuřice na siláž – Tiara 235,
- jetel luční – Tempus,
- mrkev – Berjo,
- špenát – Matador.

Každá plodina byla 8× opakována. Celkový rozsah pokusu činil 192 nádob.

Vegetační nádobový pokus byl založen v plastových nádobách s naplní 8 kg zeminy. Před výsevem bylo provedeno vyhnojení základními živinami (Tab. II). Dusík byl dodán ve formě NH_4NO_3 , fosfor ve formě $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ a draslík ve formě KCl. Po základním vyhnojení byl proveden výsev plodin. Dávkování živin, výsev i následné vyjednání bylo provedeno podle metodického pokynu ÚKZÚZ (1999) k provádění vegetačních nádobových pokusů.

Použité zeminy byly vybrány na základě obsahu zinku v DTPA a výměnné půdní reakce. Ve vzorcích půd před založením pokusu bylo stanoveno zrnitostní složení, druh půdy, Cox, obsah základních živin ve výluhu Mehlich III, pH/CaCl₂ (Tab. III). Dále obsah zinku v lučavce královské, 2M HNO₃, 0,43M HNO₃, Mehlich III, DTPA, CAT, 1M NH₄NO₃, 0,01M CaCl₂. Po sklizni plodin byl stanoven ve vzorcích z každé nádoby obsah základních živin ve výluhu Mehlich III (Tab. IV), pH/CaCl₂, a zinek ve stejných činidlech, jako před založením (Žbírál, 1995; Žbírál, 1996).

Vzorky rostlin byly odebírány jako sláma a zrno pšenice a řepky, zelená hmota kukuřice, jetele a špenátu a kořen a nať mrkve. Při odběru vzorků rostlin byla provedena dekontaminace rostlin od prachu a zbytků půdy omytím destilovanou vodou. K analýzám byly použity průměrné vzorky z každé kombinace. Odběry a analýzy vzorků byly provedeny v souladu s JPP ÚKZÚZ (Žbírál, 1994).

Data získaná rozborů půd jednotlivými činidly byla zpracována pomocí statistického programu NCSS (verze 2001).

VÝSLEDKY

Bilance zinku

Vyhodnocením souboru dat z 121 vybraných monitorovacích ploch byl získán přehled o celkové bilanci zinku v České republice i na vybraných plochách (Tab. V). Bilance zinku je při použití výše uvedených vstupů a výstupů kladná. Vypočtená bilance zinku pro ornou půdu v ČR je +453 g Zn.ha⁻¹.rok⁻¹. Rozsah hodnot činí -1250 až +5595 g Zn.ha⁻¹.rok⁻¹. Obr. 1 zachycuje graficky velikost jednotlivých kladných a záporných položek a výslednou bilanci (medián celého souboru dat, průměr).

V celém souboru ploch se vyskytují plochy, jejichž medián přesahuje vysoko medián celého souboru (453 g Zn.ha⁻¹.rok⁻¹), a to čtyřikrát až pětkrát. Pro tyto plochy je charakteristické opakované hnojení stájovými hnojivy. Záporná bilance zinku byla v průběhu pěti sledovaných let zjištěna na šesti plochách. Pro tyto plochy je typický vysoký odběr plodinami, většinou kukuřicí.

Rozsah vypočtených hodnot na vybraných plochách (Hlízov, Kutná Hora, Chrlice, Domanínec) je nižší než u celého souboru ploch: -82 až +2052 g Zn.ha⁻¹.rok⁻¹. Stejně tak mediány hodnot bilanci pro vybrané plochy nedosahují hodnoty vypočtené pro ČR. Nejvyšší hodnota byla vypočtena pro Hlízov v roce 1999 a je způsobena aplikací 40 t.ha⁻¹ chlévského hnoje. V následném roce bylo na téže ploše dosaženo záporné hodnoty (minimální), a to vysokým odběrem zinku rostlinami kukuřice, jež činil 618 g Zn.ha⁻¹.

Výše vstupů vyjádřená procenticky je uvedena v ta-

bulce VI. Z hlediska vstupů tvoří atmosférická depozice nejvýznamnější položku – 96,6 % pro ČR, pro vybrané plochy v rozsahu 88–98,2 % (med. 96,7 %). Tedy podíl toku zinku prostřednictvím tohoto vstupu na vybraných plochách je shodný s mediánem ČR. Vstup prostřednictvím minerálních hnojiv je 1,6 % pro ČR, vstup minerálními hnojivy na vybraných plochách je v rozsahu 0,9–2,4 %. Medián pro vybrané plochy (1,7 %) je shodný s mediánem pro ČR. Procentuální rozsah toků zinku ze statkových hnojiv na vybraných plochách je 0–6,2 % (medián pouze 0,6 %). Tato vstupní položka je nižší než hodnota pro ČR (1,7 %).

Vegetační pokus

Tabulka VII uvádí obsahy zinku získané měřením v různých extraktech. Posuzováno podle vyhlášky č. 13/1994 Sb., mají půdy z Chrlice, Kutné Hory a Hlízova nadlimitní obsahy zinku, Domanínec má zinek podlimitní. Zatímco výluhem lučavkou a 2M HNO₃ je nejkontaminovanější půda z Kutné Hory, již extrakce 0,43M HNO₃ dává rozdílné pořadí. S velkým rozdílem je nejvyšší obsah zinku, hodnocený v tomto extrakčním činidle, v půdě z Chrlice, což potvrzují i další méně agresivní vyluhovadla. Vysvětlením by mohlo být to, že lokalita Chrlice byla po dlouhou dobu cílovým prostorem pro aplikace kalů z čistírny odpadních vod v Modřicích. Jednoznačně to ukazuje i vysoký obsah fosforu a draslíku v této půdě. Zatímco vyšší koncentrace zinku v Hlízově a Kutné Hoře (a pravděpodobně i Domanínku) jsou původu geogenního, kontaminace půdy v Chrlicích lze jednoznačně přičíst na vrub aplikace kalů ČOV.

Z hlediska DTPA, jakožto vyluhovadla užívaného pro hodnocení obsahu zinku jako mikroelementu, můžeme konstatovat, že obsahy jsou velmi vysoké. Koncentrace v lučavce na vysoké hladině statistické významnosti velmi pevně korelují s 2M HNO₃ ($r = 0,95$), ale již s žádným dalším rozpouštědlem. 2M HNO₃ koreluje kromě lučavky ještě s 0,43M HNO₃ ($r = 0,72$), ale již méně pevně. Zbývající méně agresivní rozpouštědla (vyjma NH₄NO₃, který nemohl být použit pro nejistotu dat – hodnoty pod mezí stanovitelnosti) spolu korelují velmi pevně (r od 0,95 do 0,99) a na vysoké hladině statistické významnosti (Obr. 2).

Pohled na tabulku obsahů zinku v jednotlivých pokusných plodinách ilustruje složitost problému (Tab. VIII). V podstatě každá plodina reagovala odlišně, což je poměrně běžné, ale na druhé straně by se daly očekávat alespoň jasnější tendence. Nať mrkve a listy špenátu kumulovaly nejvyšší množství zinku, zatímco kukuřice, od které by se dal zvýšený příjem tohoto prvku rovněž očekávat, vykazovala v podstatě běžné hodnoty. Nejvíce zinku bylo v zrnu pšenice a řepky pěstovaných na půdě z Chrlice, dále v jeteli, mrkvi a špenátu na půdě z Domanínku. Obsahy v rostlinách

příliš nekorespondují s hodnotami zjištěnými v půdách, snad s výjimkou zrna pšenice a řepky, kdy byly nejvyšší obsahy na půdě s Chrlic, jež má nejvíce potenciálně mobilizovatelného zinku. Literatura ovšem nejčastěji popisuje korelace s obsahy ve slabých výluzech (mobilní frakce) jako CaCl_2 nebo NH_4NO_3 , které však v našem případě neposkytly validní údaje.

DISKUSE

Bilance zinku

Celková bilance zinku pro orné půdy v ČR je $+453 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. Pro Finsko uvádí Moolenaar (1999) hodnotu $267,5 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. Bengtsson et al. (2001) vypočetli bilance zinku zvlášť pro systémy s organickým zemědělstvím $+277 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ a v konvenčním zemědělství $+407 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. Na experimentální farmě Minderhoudhoeve byla vypočtena záporná bilance zinku $-131 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ (Moolenaar et Lexmond, 1998). Keller et al. (2001) rozdělili sledované území (Švýcarsko, region Sundgau, cca 95 km^2 , 1992–1997) podle tří typů farem v závislosti na počtu DJ/ha a bilanci hodnotili zvlášť pro každý typ hospodaření. Navíc rozlišovali ornou půdu a trvalé travní porosty. Pro ornou půdu na farmách zaměřených na rostlinnou výrobu vypočetli bilanci zinku $220 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$, na farmách mléčných bylo rozpětí $349\text{--}614 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$, průměr celého regionu činil $605 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. Ve výzkumu ve stejném regionu pokračovali Keller et Schulín (2003) a vypočetli bilanci pro orné půdy farem orientujících se především na rostlinnou výrobu $206+170 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$, mléčných farem $412+188 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. Pro půdy Dánska uvádí Kabata-Pendias et Pendias (2001) hodnoty $130 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$, pro půdy Polska (Pulawy, polní pokusy) $360 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. Beneš (1994) uvádí $411 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$; $231\text{--}2800 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ je rozpětí udávané Reiner et al. (1996) pro půdy Rakouska. Pro půdy Evropy uvádí Moolenaar (1998) rozsah $61\text{--}1083 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$.

Vypočtená bilance patří k vyšším. Z uvedeného vyplývá, že velikost čistého toku zinku závisí na způsobu hospodaření na půdě, resp. na managementu hnojení. Farmy s živočišnou výrobou, které dotují zásoby živin do půdy formou stájových hnojiv, vykazují vyšší bilanci zinku. Na farmách s výhradně rostlinnou produkcí je významnějším vstupem atmosférická depozice.

Největší vstupní položkou v uvedené bilanci zinku je atmosférická depozice. Medián hodnot činí $558 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. Naměřené hodnoty se z hlediska literárních údajů řadí k vyšším, i když rozsah hodnot uváděný různými autory v literatuře je značný: $15,7\text{--}1001 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$.

Hnojiva a přípravky na ochranu rostlin představují z hlediska vstupů zinku do půdy v generalizovaném měřítku zanedbatelné položky. Vstup zinku prostřed-

nictvím minerálních hnojiv činí $9,3 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$, prostřednictvím statkových hnojiv $10,1 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ – sumárně $19,4 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$, maximální vstupy zinku prostřednictvím statkových hnojiv však dosahují kilogramů (Tab. V). Mnohonásobně vyšší vstupy hnojiv uvádí ostatní autoři – Beneš (1994) $387 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$, Moolenaar et Lexmond (1998) $543,3 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ na experimentální farmě v Minderhoudhoeve, Moolenaar (1999) pro Finsko $380,6 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$, Keller et Schulín (2003) dokonce $14,6\text{--}25,3 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$, Keller et Schulín (2001) $2\text{--}18056 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ vstupy hnojem, minerálními hnojivy $<1\text{--}25 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$.

Jediným hodnoceným výstupem ze systému byl odběr zinku pěstovanými plodinami. Hodnota mediánu pro zinek činí $141 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. Údaje v literatuře se liší, uváděné hodnoty jsou v rozsahu $20,5\text{--}249 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. K dalším záporným položkám patří vyluhování, povrchový splach a erozní činnost. Tyto položky nebyly do bilance zahrnuty z důvodu neexistujících podkladů, mohou však mít i zásadní význam pro celou bilanci. Např. Beneš (1994) uvádí pro vyluhování, povrchový splach a erozní činnost sumárně $-256 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$. Hodnoty vyluhování zinku uvádí Keller et al. (2001) $115\pm 96 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ a považují tuto položku za významnou pro celkovou bilanci zinku; $63,3 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$ zjistili Moolenaar et Lexmond (1998) na farmě Minderhoudhoeve, pro Finsko uvádí Moolenaar (1999) pouze $8 \text{ g.ha}^{-1}.\text{rok}^{-1}$.

Bilanční výpočty je možné dělat v různém časovém horizontu. Přesnost a věrohodnost vypočtené bilance dále závisí na způsobu získávání dat. Různí autoři používají odlišné zdroje. Mohou to být údaje z meteorologických ústavů, zemědělské statistiky, databáze, informační systémy, metodiky hnojení, údaje z experimentálních farem, vlastní měření a analýzy (monitoring), údaje z půdních map a půdních průzkumů.

Dalším faktorem ovlivňujícím velikost vypočtených toků vybraného prvku je způsob bilančního výpočtu. U některých autorů není způsob výpočtu známý, jiní ve svých pracích používají téměř výhradně dynamickou bilanci, popř. DSCB přístup (Keller et al., 2001; Moolenaar et Lexmond, 1998).

Vegetační pokus

Důležitým výsledkem je potvrzení v literatuře prezentovaného předpokladu, že vysoký celkový obsah zinku v půdě nemusí automaticky znamenat vysoké obsahy v pěstovaných rostlinách (McBride et Evans, 2002; Schaecke et al., 2002). Jedinou výjimkou byly poměrně vysoké koncentrace ve špenátu.

Omezení vstupu zinku z půdy do rostlin je možné přičítat poměrně vysokému pH (od 6,0 do 7,2) půd. Půda z Domanínku, která měla o něco nižší pH – 6,0, vedla v případě jetele, mrkve i špenátu k nejvyšším koncentracím zinku. Obvykle je efekt půdní reakce

vysvětlován tak, že nižší pH vede ke zvýšení podílu přijatelných frakcí a tím vyššímu příjmu rostlinami. U této půdy jsou však koncentrace mobilní frakce zinku v půdě nejnižší ze všech lokalit. Koncentrace H^+ iontů zřejmě působí přímo na příjem rostlinou nebo jsou použita vyluhovadla stále příliš silná pro popis přijatelné frakce. Je možné, že při získání údajů slabšími vyluhovadly by se změnila poměry mezi frakcemi jednotlivých půd ve prospěch Domanínku.

Velmi dobrým výsledkem je prokázání pevných korelací mezi 0,43M HNO_3 , Mehlich III, CAT a DTPA. Ukazuje to na vysokou srovnatelnost výsledků dosažených s použitím těchto vyluhovadel.

Zcela v souladu s literárními prameny (Chander et al., 1993; Guang Wen et al., 2002; McBride et al., 2002) je potvrzen efekt použitých kalů (půda Chrlice) na zvýšení podílů méně stabilních (potenciálně mobilizovatelných) frakcí zinku v půdě. Ačkoli celkový obsah není extrémně vysoký, téměř čtvrtina je vyluhovatelná roztokem DTPA. U půdy z Kutné hory je to pouze něco přes 5 %. Vzhledem k tomu, že vstup do rostlin sice byl poněkud zvýšený, avšak

nikoli mimořádný, lze souhlasit i s dalším poznatkem z literatury (Schaecke et al., 2002; Guang Wen et al., 2002; McBride et al., 2002), že aplikace vysokých dávek zinku do kvalitních půd vede k částečné imobilizaci zinku do méně přijatelných forem. Půdy s vyšším pH tak lépe chrání produkci před kontaminací.

Při použití slabších vyluhovadel je možné rozlišit geogenní kontaminaci od antropogenní. Relativní obsahy zinku v půdách měřené ve výluzích méně agresivních vyluhovadel byly v antropogenně kontaminované půdě (Chrlice) 3–4,5krát vyšší než v půdě z Kutné Hory, kontaminované přirozeně. Například zatímco podíl zinku v DTPA byl na půdě z Kutné Hory pouze 5,3 % celkového (lučavka), v půdě z Chrlice to bylo 22,8 %.

Výluh Mehlich III by bylo možné použít pro zjištění potenciálně mobilizovatelné frakce u většího souboru vzorků. Měření by bylo velmi levné, protože by se mohl použít extrakt, který se běžně používá pro měření přístupných živin při agrochemickém zkoušení zemědělských půd.

I: Přípravky na ochranu rostlin a procentuální obsah mancozebu v nich

| Obchodní název přípravku | Obsah mancozebu |
|--------------------------|-----------------|
| Dithane | 80 |
| Novozir MN 80 | 80 |
| Novozir MN 79 | 79 |
| Curzate M | 68 |
| Galben | 65 |
| Ridomil Gold MZ 68 WP | 64 |
| Ridomil MZ 72 WP | 64 |
| Acrobat MZ | 60 |

II: Dávky čistých živin v g na 8 kg půdy ve vegetační nádobě

| Plodina | N (NH_4NO_3) | P ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$) | K (KCl) |
|---------------|------------------|-----------------------------|---------|
| pšenice jarní | 0,7 | 0,7 | 0,8 |
| jarní řepka | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| kukuřice | 0,8 | 0,7 | 0,8 |
| jetel luční | 0,4 | 0,7 | 0,8 |
| mrkev | 0,6 | 0,6 | 0,7 |
| špenát | 0,4 | 0,6 | 0,7 |

III: Výbrané půdní parametry stanovené před začátkem pokusu

| | Domanínek | Chrlice | Kutná Hora | Hlízov |
|---------------------------|-----------|---------|------------|---------|
| Půdní druh | střední | střední | střední | střední |
| pH/CaCl ₂ | 6 | 6,7 | 7,2 | 7,1 |
| C _{ox} (%) | 1,36 | 0,6 | 1,09 | 0,42 |
| P (mg.kg ⁻¹) | 176 | 538 | 162 | 209 |
| K (mg.kg ⁻¹) | 285 | 663 | 315 | 287 |
| Ca (mg.kg ⁻¹) | 2390 | 7930 | 8190 | 4550 |
| Mg (mg.kg ⁻¹) | 132 | 148 | 246 | 158 |

IV: Výbrané půdní parametry stanovené po ukončení pokusu

| | Domanínek | Chrlice | Kutná Hora | Hlízov |
|---------------------------|-----------|---------|------------|--------|
| pH/CaCl ₂ | 5,4 | 6,8 | 7,3 | 7,0 |
| P (mg.kg ⁻¹) | 136 | 491 | 104 | 218 |
| K (mg.kg ⁻¹) | 212 | 549 | 220 | 270 |
| Ca (mg.kg ⁻¹) | 1510 | 7628 | 8577 | 4190 |
| Mg (mg.kg ⁻¹) | 90 | 137 | 234 | 145 |

V: Jednotlivé položky a výsledná bilance zinku pro Českou republiku a vybrané plochy (g/ha/rok)

| | | atm. depozice | min. hnojiva | statková hnojiva | přípravky | plodina | vstup | výstup | bilance |
|------------|--------|---------------|--------------|------------------|-----------|---------|-------|--------|---------|
| medián ČR | | 558 | 9,3 | 10,1 | 0,0 | -141 | 592 | -141 | 453 |
| průměr ČR | | 544 | 16,5 | 261 | 1,5 | -169 | 823 | -169 | 654 |
| minimum ČR | | 449 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 449 | 0 | -1250 |
| maximum ČR | | 624 | 487,0 | 5045,0 | 146,0 | -1708 | 5672 | -1708 | 5595 |
| Hlízov | medián | 558 | 9,4 | 0,0 | 0,0 | -599 | 634 | -599 | 276 |
| | průměr | 544 | 12,0 | 412,0 | 0,0 | -420 | 968 | -420 | 547 |
| Kutná Hora | medián | 558 | 13,0 | 6,6 | 0,0 | -163 | 568 | -163 | 409 |
| | průměr | 544 | 33,0 | 17,0 | 0,0 | -253 | 595 | -253 | 342 |
| Chrlice | medián | 558 | 5,9 | 38,0 | 0,0 | -174 | 622 | -174 | 443 |
| | průměr | 544 | 5,6 | 31,0 | 0,0 | -150 | 581 | -150 | 432 |
| Domanínek | medián | 505 | 13,0 | 0,0 | 0,0 | -133 | 553 | -133 | 371 |
| | průměr | 497 | 24,0 | 12,0 | 0,0 | -130 | 533 | -130 | 403 |

VI: Procentuální podíl vstupů

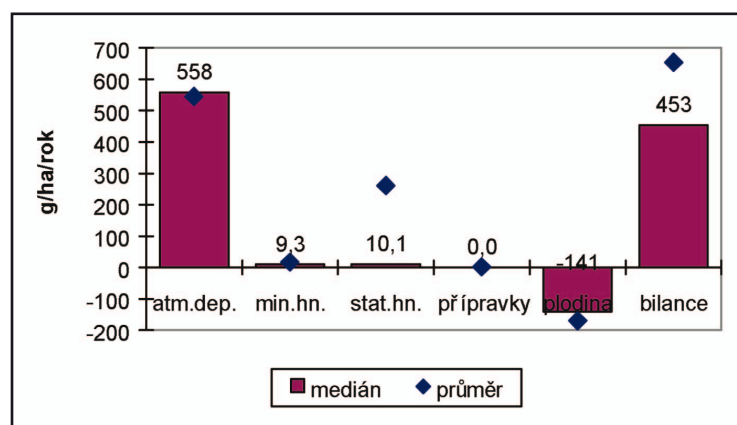
| | atm. depozice | min. hnojiva | statková hnojiva | přípravky |
|------------|---------------|--------------|------------------|-----------|
| medián ČR | 96,6 | 1,6 | 1,7 | 0,0 |
| průměr ČR | 66,1 | 2,0 | 31,7 | 0,2 |
| Hlízov | 88,0 | 1,5 | 0,0 | 0,0 |
| Kutná Hora | 98,2 | 2,3 | 1,2 | 0,0 |
| Chrlice | 89,7 | 0,9 | 6,2 | 0,0 |
| Domanínek | 91,4 | 2,4 | 0,0 | 0,0 |

VII: Obsahy zinku (mg.kg^{-1} sušiny) v jednotlivých extrakčních činidlech v půdách před založením pokusu

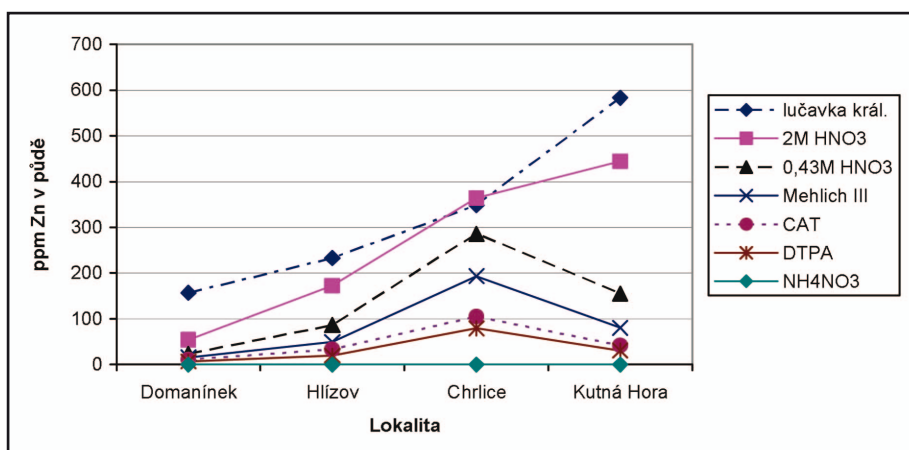
| Lokalita | lučavka královská | 2M HNO_3 | 0,43M HNO_3 | Mehlich III | CAT | DTPA | NH_4NO_3 |
|------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------|-------|------|--------------------------|
| Domanínek | 156,8 | 54,7 | 24,3 | 15,8 | 11,3 | 6,9 | 0,017 |
| Chrlice | 348,5 | 364,0 | 286,2 | 193,1 | 105,3 | 79,7 | 0,186 |
| Kutná Hora | 583,7 | 444,5 | 155,6 | 80,8 | 42,3 | 31,1 | 0,042 |
| Hlízov | 232,9 | 172,5 | 86,4 | 49,5 | 33,9 | 19,9 | 0,000 |

VIII: Průměrné obsahy zinku v pěstovaných plodinách

| | Plodina (zinek v mg.kg^{-1} sušiny) | | | | | | | | | | | |
|------------|--|-------|-------|-------|----------|-----------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|
| | Pšenice | | Řepka | | Kukuřice | | Jetel | | | Mrkev | | Špenát |
| | zrno | sláma | zrno | sláma | ½ veg. | suchá hm. | 1. seč | 2. seč | 3.seč | nať | kořen | nať |
| Domanínek | 39,9 | 24,2 | 56,6 | 53,7 | 78,9 | 29,6 | 83,0 | 66,1 | 126,0 | 219,0 | 42,3 | 273,0 |
| Chrlice | 51,5 | 34,9 | 88,5 | 54,4 | 48,9 | 55,5 | 63,9 | - | - | 121,0 | 24,9 | 81,0 |
| Kutná Hora | 29,4 | 34,6 | - | 31,3 | 103,0 | 73,4 | 64,0 | 54,1 | 103,0 | 145,0 | 19,7 | 158,0 |
| Hlízov | 26,0 | 27,0 | 60,1 | 23,3 | 102,0 | 62,2 | 46,0 | 40,6 | 98,3 | 131,0 | 20,7 | 169,0 |



1: Celková bilance zinku (medián ČR) a jednotlivé položky (g/ha/rok)



2: Obsah zinku v půdě po extrakci jednotlivými extrakčními činidly

SOUHRN

Databáze sestavená na základě Bazálního monitoringu půd ČR byla základním zdrojem dat pro výpočet bilancí zinku a sloužila také jako podklad pro výběr ploch k vegetačnímu nádobovému pokusu. K danému účelu bylo hodnoceno 121 monitorovacích ploch. Celková bilance zinku byla vypočtena jako statická bilance, jejímž výsledkem je hodnota udávající změnu obsahu zinku v půdě. Pro orné půdy ČR byla stanovena hodnota $+453 \text{ g Zn} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$, rozsah -1250 až $+5595 \text{ g Zn} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Maximálních hodnot bilancí je dosaženo na plochách po aplikaci stájových hnojiv. Záporné hodnoty bilance mají různé příčiny, nejčastěji se jedná o plochy, na kterých nebyla aplikována stájová hnojiva a pěstované plodiny (často kukuřice) vykazovaly vysoký obsah zinku. Nejvýznamnějším zdrojem zinku je atmosférická depozice. Její podíl na vstupech do půdy činí 96,6 %. Podíl ostatních vstupů je v republikovém měřítku zanedbatelný. Dá se však očekávat nárůst výroby a s ní spojené aplikace průmyslových kompostů, což by mohlo poměr mezi vstupy výrazně ovlivnit. Vyluhování a splach povrchovou vodou nebyly do bilancí zahrnuty. Podle některých autorů může jít o významnou zápornou položku bilančních výpočtů. Sledování těchto procesů by významně přispělo ke zpřesnění vypočtených toků vybraných prvků, v našem případě zinku.

Vegetační pokus prokázal rozdílné rozdělení frakcí zinku v půdách v závislosti na jeho původu. Zatímco zinek geogenního původu byl poměrně pevně vázán, zinek dodaný v kalech ČOV byl značně mobilnější. Přesto kvalita půdy, zejména vyšší pH a obsah organické hmoty, zabránila výraznějšímu transferu do rostlin. Ukázalo se, že stanovení obsahu Zn ve výluhu Mehlich III poskytuje velmi dobrý odhad podílu potenciálně mobilizovatelných forem. Protože toto činidlo se velmi široce používá v rámci státem prováděného Agrochemického zkoušení zemědělských půd; zinek lze hodnotit v rámci jednoho výluhu, což by znamenalo značné úspory.

Zinek se v poslední době dostává do popředí celoevropského zájmu vzhledem k rostoucím vstupům do půd prostřednictvím statkových a organických hnojiv, případně kalů ČOV. Zinek je prvkem, který má na základě akumulačních scénářů zpracovaných pro DG Environment nejkratší dobu pro překročení limitů pro lehké půdy. Je tedy nanejvýš žádoucí věnovat tomuto prvku co největší pozornost.

zinek, bilance zinku, extrakční činidla

LITERATURA

- BALÍK, J., PAVLÍKOVÁ, D., HLUŠEK, J., PROVAZNÍK, K.: Zdroje rizikových prvků v životním prostředí. In *Racionální použití hnojiv, sborník z konference konané na ČZU v Praze dne 25. 11. 2004*. ČZU v Praze, Katedra agrochemie a výživy rostlin, 2004, 22–29, ISBN 80-213-1232-7. 2004
- BENEŠ, S.: *Obsahy a bilance prvků ve sférách ŽP, II. část*. Ministerstvo zemědělství České republiky, Praha, 1994, 159 s., ISBN 80-7084-090-0.
- BENGTTSSON, H., OBORN, I., NILSSON, I., ANDERSSON, A., SALOMON, E., JONSSON, S.: Cadmium and zinc field balances in organic and conventional dairy farming – variation in manure application and crop removal. In *Element balances as a sustainability tool*. Workshop in Uppsala March 16–17, 2001, Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering, 2001, 69–70 pp, ISSN 1401-4963.
- BLAKE, L., GOULDING, K. W. T.: Effect of atmospheric deposition, soil pH and acidification on heavy metal contents in soils and vegetation of semi-natural ecosystems at Rothamsted Experimental Station, UK. *Plant and Soil*, 2002, 240, 235–251.
- DÜRING, R. A., HOSS, T., GÄTH, S.: Depth distribution and bioavailability of pollutants in long-term differently tilled soils. *Soil & Tillage Research*, 2002, 66, 183–195.
- GUANG WEN, BATES, T. E., VORONEY, R. P., YAMAMOTO, T., CHIKUSHI, J., CURTIN, D.: A yield control approach to assess phytoavailability of Zn and Cu in irradiated, composted sewage sludges and composted manure in field experiments: I. Zinc. *Plant and Soil*, 2002, 246, 231–240.
- CHANDER, K., BROOKES, P. C.: Residual effects of zinc, copper and nickel in sewage sludge on mineral biomass in a sandy loam. *Soil Biol. Biochem.*, 1993, 25, 9: 1231–1239.
- KABATA-PENDIAS, A., PENDIAS, H.: *Trace Elements in Soils and Plants*. Third Edition. CRC Press, Boca Raton, 2001, 413 pp, ISBN 0-8493-1575-1.
- KELLER, A., SCHULIN, R.: Modelling regional-scale mass balance of phosphorus, cadmium and

- zinc fluxes on arable and dairy farms. *Europ. J. Agronomy*, 2003, 20, 181–198.
- KELLER, A., SCHULIN, R.: The influence of changes in P fertilization plans on Cd and Zn balances for farming systems. In *Element balances as a sustainability tool*. Workshop in Uppsala March 16–17, 2001, Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering, 2001, 61 pp, ISSN 1401-4963.
- KELLER, A., VON STEIGER, B., VAN DER ZEE, S. E. A. T. M., SCHULIN, R.: A Stochastic Empirical Model for Regional Heavy-Metal Balances in Agroecosystems. *J. Environ. Qual.*, 2001, 30, 1976–1989.
- LOŠÁK, T., RICHTER, R., HLUŠEK, J.: Options of using Zn – contaminated soil for the production of some agricultural crops. *Chemia i Inżynieria Ekologiczna*, T. 11, Nr 7, 2004, 639–645
- MCBRIDE, M. B., EVANS, L. J.: Trace metal extractability in soils and uptake by bromegrass 20 years after sewage sludge application. *Can. J. Soil Sci.*, 2002, 82, 323–333.
- MCBRIDE, M. B., NIBARGER, E. A., RICHARDS, B. K., STEENHUIS, T.: Trace metal accumulation by red clover grown on sewage sludge-amended soils and correlation to Mehlich III and Calcium Chloride-extractable metals. *Soil Science*, 2003, 168, 1: 29–38.
- MOOLENAAR, S. W., LEXMOND, T. M.: Heavy-metal balances of agro-ecosystems in the Netherlands. *Neth. J. Agri. Sci.*, 1998, 46, 171–192.
- MOOLENAAR, S. W., VAN DER ZEE, S. E. A. T. M., LEXMOND, T. M.: Indicators of the sustainability of heavy-metal management in agro-ecosystems. *The Science of the Total Environment*, 1997(a), 201, 155–169.
- MOOLENAAR, S. W., LEXMOND, T., VAN DER ZEE, S. E. A. T. M.: Calculating heavy metal accumulation in soil: a comparison of methods illustrated by a case-study on compost application. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1997(b), 66, 71–82.
- MOOLENAAR, S. W.: Heavy-Metal Balances, Part II. Management of Cadmium, Copper, Lead, and Zinc in European Agro-Ecosystems. *Journal of Industrial Ecology*, 1999, 3, 1: 41–53.
- MOOLENAAR, S.: *Sustainable management of heavy metals in agro-ecosystems*. Ph.D. Thesis, Wageningen Agriculture University, Wageningen, 1998, 191 p, ISBN 90-5485-835-4.
- PODLEŠÁKOVÁ, E., NĚMEČEK, J., VÁCHA, R.: Mobility and Bioavailability of Trace Elements in Soils. In ISKANDAR, I., K. and KIRKHAM, M., B.(ed.) *Trace Elements in Soil: bioavailability, flux, and transfer*. Lewis Publishers, CRC Press LLC, 2001, 21–41, ISBN 1-56670-507-X.
- REINER, I. C., PITERKOVA, M., BRUNNER, P. H.: *Stoffbilanzen landwirtschaftlicher Boden von ausgewählten Betriebstypen bei Verwendung von Klarschlamm und Kompost*. BKK2-Endbericht. TU Wien. Institut für Wassergute und Abfallwirtschaft (AWS)., Wien, Austria, 1996.
- RICHTER, R., HLUŠEK, J.: *Výživa a hnojení rostlin*. VŠZ v Brně, 1994, 171 s.
- SCHAECKE, W., TANNEBERG, H., SCHILING, G.: Behavior of heavy metals from sewage sludge in Chernozem of the dry belt in Saxony-Anhalt/Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2002, 165, 609–617.
- TŘEBICHA VSKÝ, J., HAVRDOVÁ, D., BLOHBERGER, M.: *Toxické kovy*. Kutná Hora, 1997, 483 s.
- ÚKZÚZ: *Metodický pokyn pro biologické zkoušky účinnosti hnojiv, pomocných půdních látek, pomocných půdních přípravků a substrátů při registraci*. ÚKZÚZ, Odbor agrochemie, půdy a výživy rostlin, Brno, 1999, 17p.
- VÁCHA, R.: Remediací zemědělských půd kontaminovaných rizikovými prvky. Disertační práce. ČZU Praha, Agronomická fakulta, VÚMOP, 2001, 138 s.
- WENGER, K., GUPTA, S. K., FURRER, G., SCHULIN, R.: Zinc Extraction potential of two common plants, *Nicotiana tabacum* and *Zea mays*. *Plant and Soil*, 2002, 242, 217–225.
- ZBÍRAL, J.: Jednotné pracovní postupy, Analýza rostlinného materiálu. ÚKZÚZ, Odbor agrochemie, půdy a výživy rostlin, Brno, 1994.
- ZBÍRAL, J.: Jednotné pracovní postupy, Analýza půd I. ÚKZÚZ, Odbor agrochemie, půdy a výživy rostlin, Brno. 1995.
- ZBÍRAL, J.: Jednotné pracovní postupy, Analýza půd II., ÚKZÚZ, Odbor agrochemie, půdy a výživy rostlin, Brno, 1996.

Adresa

Mgr. Šárka Poláková, Ing. Miroslav Florián, ÚKZÚZ Brno, Odbor agrochemie, půdy a výživy rostlin, Hroznová 2, 656 06 Brno, Česká republika

