

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE



Fakulta životního prostředí

Katedra ekologie

Monitoring rizikových kovů v zemědělských
ekosystémech po dlouhodobé aplikaci hnojiv

Monitoring of risk metals in agricultural
ecosystems after long-term fertilizers application

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: Doc. RNDr. Michal Hejzman, Ph.D.

Autor: Bc. Petr Šrek

2010

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Monitoring rizikových kovů v zemědělských ekosystémech po dlouhodobé aplikaci hnojiv vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v příložené bibliografii.

V Praze dne 21.4. 2010

.....

Rád bych tímto poděkoval Doc. RNDr. Michalu Hejmanovi, Ph.D. za odborné vedení práce, konzultantce Ing. Evě Kunzové CSc. za cenné rady při sběru a zpracování dat, své rodině za podporu v průběhu celého studia.

Abstrakt

Na dlouhodobém pokusu s hnojením orné půdy v Praze – Ruzyni (The Ruzyně Fertilizer Experiment - RFE), na honu číslo II, byly po 55 letech minerálního a organického hnojení stanovovány koncentrace, odběr a bilance rizikových kovů (arsenu (As), kadmia (Cd), chromu (Cr), manganu (Mn), mědi (Cu), niklu (Ni), olova (Pb) a zinku (Zn)) pro hlízy a slupky brambor (*Solanum tuberosum* L.). Hon číslo II je hon s klasickým osevním postupem (45 % obilovin, 33 % okopanin, 22 % píce). Byly vybrány varianty kontrola, N4P2K2, KK a jejich kombinace KKN4P2K2, ve kterých se hnojilo přímo pod brambory následujícími hnojivy. Dusičnanem amonným s vápencem (27 % N), v dávce 110 kg N ha⁻¹ (N4); superfosfátem (8,3 % P) v dávce 31 kg P ha⁻¹ (P2); chloridem draselným (49,8 % K) v dávce 186 kg K ha⁻¹ (K2). Kuřecí kejda (KK) byla použita jako organické hnojivo ve variantě KK a KKN4P2K2 v dávce 43 t.ha⁻¹. Nebyl zjištěn průkazný vliv hnojení na koncentrace arsenu, chromu, niklu, olova a zinku v hlízách brambor ani ve slupkách brambor. Průkazně vyšší byly koncentrace manganu ve všech variantách v hlízách, kadmia a niklu ve slupkách. Koncentrace niklu ve slupkách překročily český národní limit 2,06 mg.kg⁻¹ v sušině ve všech variantách. Bilance manganu, mědi, niklu, olova a zinku pro hlízy brambor byla záporná ve variantě s minerálním hnojením (N4P2K2). Hnojení kuřecí kejdou v množství 43 t.ha⁻¹ k bramborám má v bilanci pro hlízy za následek nadbytek arsenu (10 g.ha⁻¹), chromu (80 g.ha⁻¹), mědi (334 g.ha⁻¹) a zinku (2400 g.ha⁻¹). Hlavním výsledkem této práce je, že hnojení dusičnanem amonným s vápencem (27 % N), v dávce 110 kg N ha⁻¹, superfosfátem (8,3 % P) v dávce 31 kg P ha⁻¹, chloridem draselným (49,8 % K) v dávce 186 kg K ha⁻¹ a kuřecí kejdou v dávce 43 t.ha⁻¹ nezvyšuje koncentrace arsenu, kadmia, chromu, mědi, niklu, olova a zinku v hlízách brambor a slupkách brambor nad povolené limity.

Klíčová slova: rizikové kovy, arsen, měď, zinek, bilance těžkých kovů, kuřecí kejda

Abstract

Concentration and input – output balance was determined in peeled potato tubers and potato peel (*Solanum tuberosum* L.) for arsen (As), cadmium (Cd), copper (Cu), chrome (Cr), manganese (Mn), nickel (Ni), lead (Pb) and zinc (Zn) after 55 years inorganic and organic fertilizers regimes at the Ruzyně Fertilizer Experiment (RFE). Potato samples were collected in strip number II named Classical crop rotation“ (45 % cereals, 33 % of root crops and 22 % of legumes). Control, N4P2K2, KK and KKN4P2K2 treatments were selected. In the selected treatments, following mineral fertilizers were used directly to potatoes: Calcium ammonium nitrate (27% N) in the rate 110 kg N ha⁻¹ (N4); super phosphate (8.3 % P) in the rate 31 kg P ha⁻¹ (P2); potassium chloride (49.8% K) in the rate 186 kg K ha⁻¹ (K2). Organic fertilizer chicken slurry in the rate 43 t.ha⁻¹ (N) was used in KK and KKN4P2K2 treatments. Concentration of arsen, chrome, nickel, lead and zinc in potato tubers and peel was not significantly affected by treatment. Concentration of nickel in potato peel exceeded Czech legislation DM limit (2.06 mg kg⁻¹) in all treatments. The balances of manganese, copper, nickel, lead and zinc for potato tubers were negative in mineral treatments N4P2K2. Positive balances for arsen (10 g.ha⁻¹), copper (80 g.ha⁻¹) and zinc (2400 g.ha⁻¹) were recorded in organic treatments. The main message of this paper is that application of calcium ammonium nitrate (27% N) in the rate 110 kg N ha⁻¹, super phosphate (8.3 % P) in the rate 31 kg P ha⁻¹, potassium chloride (49.8% K) in the rate 186 kg K ha⁻¹ and chicken slurry in the rate 43 t.ha⁻¹ directly to potato do not significantly increase concentration of arsen, cadmium, copper, chrome, manganese, nickel, lead and zinc in potato tubers and peel above the Czech legislation limit.

Keywords: risk metals, arsen, copper, zinc, balances of heavy metals, chicken slurry

Obsah

1.	Úvod.....	6
2.	Metodika	10
2.1	Popis území.....	10
2.2	Uspořádání pokusu	10
2.3	Odběr vzorků a chemické analýzy	11
2.4	Analýzy dat	11
3.	Výsledky	12
3.1	Výnos brambor	12
3.2	Koncentrace rizikových kovů v bramborách	12
3.3	Odběr rizikových kovů bramborami	13
3.4	Bilance	15
3.5	Vztah mezi rizikovými kovy aplikovanými hnojivy, koncentrací rizikových kovů v bramborách, odběrem rizikových kovů a výnosem	15
4.	Diskuze	19
4.1	Koncentrace rizikových kovů v bramborách	19
4.2	Odběr rizikových kovů bramborami	20
5.	Závěr	22
6.	Literatura.....	23
7.	Přílohy.....	28

1. Úvod

Hnojiva jsou jedním z hlavních antropogenních zdrojů kontaminace životního prostředí (Adriano 1986; Fergusson, 1990). Průměrná spotřeba průmyslových hnojiv za posledních deset let činila v České republice 344 tisíc tun, v zemích Evropské Unie 1,6 milionů tun v čistých živinách N, P, K. Průměrná spotřeba statkových hnojiv byla v České republice v letech 1999-2009 15,3 milionů tun (CSU, 2009). Minerální hnojiva, zejména superfosfáty obsahují vysoké množství kadmia (Mortvedt, 1996; Oyedele et al., 2006). Koncentrace arsenu a olova v některých minerálních hnojivech překračuje povolené limity (TWG, 2000). Koncentrace arsenu, kadmia, kobaltu, chromu, mědi, molybdenu, niklu, olova, vanadu a zinku v 28 vzorcích hnojiv stanovil Franklin et al., (2005). Průměrné koncentrace ve fosforečných hnojivech byly 6,9 mg.kg⁻¹ pro arsen, 5,1 mg.kg⁻¹ pro kadmium, 3,8 mg.kg⁻¹ pro kobalt, 49,7 mg.kg⁻¹ pro chrom, 23,3 mg.kg⁻¹ pro měď, 6,8 mg.kg⁻¹ pro molybden, 28,2 mg.kg⁻¹ pro nikl, 2,5 mg.kg⁻¹ pro olovo, 96,3 mg.kg⁻¹ pro vanad a 533 mg.kg⁻¹, pro zinek. Ve vícesložkových hnojivech (NPK) byly průměrné koncentrace 7,5 mg.kg⁻¹ pro arsen, 4,6 mg.kg⁻¹ pro kadmium, 10,1 mg.kg⁻¹ pro kobalt, 169 mg.kg⁻¹ pro měď, 12,8 mg.kg⁻¹ pro molybden, 100 mg.kg⁻¹ pro nikl, 41,1 mg.kg⁻¹ pro olovo, 39,6 mg.kg⁻¹ pro vanad a 817 mg.kg⁻¹ pro zinek. Žádný z běžně používaných druhů minerálních hnojiv nezpůsobuje akumulaci rizikových kovů v půdě ani po 50 letech jejich aplikace (Franklin et al., 2005). Dlouhodobá aplikace Thomasovy moučky způsobuje akumulaci arsenu a chromu v půdě (Hejzman et al., 2009). Přídavky arsenu, mědi a zinku do potravy zvířat jsou příčinou jejich vysokého obsahu ve zvířecích kejdách (Yao et al., 2008; De la Torre et al., 2000). Nicholson et al., (1999), porovnával koncentrace mědi a zinku v 183 vzorcích krmiv hospodářských zvířat a 85 vzorcích zvířecích kejd. Koncentrace se pohybovala v rozmezí 18 – 217 mg.kg⁻¹ pro měď a 150 – 2920 mg.kg⁻¹ pro zinek v krmivech prasat, 5 – 234 mg.kg⁻¹ pro měď, 28 – 4030 mg.kg⁻¹ pro zinek v krmivech kuřat. Koncentrace mědi a zinku v krmivech skotu byla výrazně nižší než v krmivech prasat a kuřat. Prasečí kejdy obsahují 360 mg.kg⁻¹ mědi a 500 mg.kg⁻¹ zinku. Typické koncentrace mědi a zinku v kuřecích kejdách jsou 80 mg.kg⁻¹ pro měď a 700 mg.kg⁻¹ pro zinek. V kejdách skotu je to 50 mg.kg⁻¹ pro měď a 180 mg.kg⁻¹ pro zinek. V dávce 250 kg.ha⁻¹ celkového dusíku se pak prasečí kejdou aplikuje 1,6 kg.ha⁻¹ mědi a 2,2 kg.ha⁻¹ zinku, s kuřecí kejdou 0,2 – 0,5 kg.ha⁻¹ mědi a 1,1 – 2,9 kg.ha⁻¹ zinku. Kejdou dobytka se aplikuje 0,3 kg.ha⁻¹ mědi a 1,0 kg.ha⁻¹ zinku (Nicholson et al., 1999). Dlouhodobá aplikace těchto hnojiv způsobuje

akumulaci mědi a zinku v půdě (Pederson et al., 2002; Novak et al., 2004; Berenguer et al., 2008) a zvyšuje i jejich koncentraci v rostlinách (Zhou et al., 2005).

Nejvyšší koncentrace rizikových kovů se v rostlině nachází v kořenech, dále pak ve vegetativních orgánech a nejnižší v generativních orgánech (Souza a Rauser, 2003), přičemž největší riziko představuje akumulace rizikových kovů v orgánech určených pro konzumaci. Žádné rozdíly v akumulaci rizikových kovů mezi listovou a kořenovou zeleninou nenalezli (Stalikas et al., 2007). Wang et al., (2006) zjistili, že listová zelenina akumuluje v nadzemní biomase více kadmia a olova v porovnání s plodovou zeleninou. Kadmium se akumuluje nejvíce ve starých listech špenátu a salátu a zinek v mladých listech salátu (McKenna et al., 1993). Arsen je více akumulován v obilninách (pšenice, ječmen, oves) méně v řepce, lnu a bramborách (Vincenc et al., 1996). Vápnění zvyšuje půdní pH a tím snižuje přístupnost kadmia rostlinám (Lee et al., 2003). Přídavky kadmia do půdy zvyšují jeho příjem rostlinou, přídavky fosforečných hnojiv jeho příjem snižují (Panwar et al., 1999). Dlouhodobá aplikace zinku a vápníku průkazně snižuje koncentraci kadmia v zrna, listech a stoncích pšenice a odběr kadmia celou rostlinou (Lee et al., 2003). Růst výnosu na variantách ošetřenými čistírenskými kaly vedl k poklesu koncentrace kadmia a niklu v nadzemní biomase špenátu, kukuřice a ova (Tlustoš et al., 2000). Vyšší odběry zinku po aplikaci čistírenského kalu byly stanoveny pro oves, kukuřici a špenát (Tlustoš et al., 2001).

Brambory jsou považovány za jednu z nejdůležitějších zemědělských plodin na světě. 52 % celosvětové výroby brambor je využíváno pro konzumní účely, 34,5 % pro krmení zvířat 11% pro sadbu, 2,8 % na výrobu škrobu, 0,7 % na výrobu lihu. K největším pěstitelům patří Čína, Rusko, Ukrajina, Indie, Polsko a USA (FAO, 2009). V České republice byla průměrná roční spotřeba brambor 74 kg na osobu v letech 1996 – 2006 (CSO, 2009). Typické bramborářské půdy jsou lehčí až středně těžké o pH 5,5 – 6,5. V těchto půdách vykazují vysokou mobilitu některé rizikové kovy, zejména kadmium, které má nejvyšší obsahy ve slupkách (Smith, 1993; Panwar et al., 1999). Průměrné obsahy kadmia jsou v hlízách 0,032 mg.kg⁻¹ (Bokyoung et al., 1994). McLaughlin et al., (1997) považují brambory za největšího distributora kadmia do potravního řetězce v mnoha zemích světa. Antonious (2007), označuje brambory jako vhodné pro fytoremediaci olova. Aplikace fosforečných a draselných hnojiv nemá vliv na příjem kadmia bramborami, hnojení zinkem průkazně snižuje koncentraci kadmia v hlízách (McLaughlin et al., 1994). U brambor hnojených chloridem draselným jsou obsahy kadmia vyšší až o 30 % než u brambor hnojených jinými než chloridovými formami draselných hnojiv (Sparrow, 1994). O riziku pěstování brambor v blízkosti hutí na půdách kontaminovaných kadmii, olovem a zinkem píše

Dudka et al., (1995) a Piotrowska et al., (1997). Koncentrace kadmia, mědi, olova a zinku v bramborách, pěstovaných v Chorvatsku na půdách zasažených válkou, byly podobné jako v kontrolních variantách (Vitalli et al., 2007). Obsahu arsenu, chromu, mědi, niklu a manganu v hlízách brambor je věnována pozornost jen zřídka (Antonious, 2007).

Zjišťování míry znečištění životního prostředí je velkým problémem, protože aktuální stupeň znečištění kolísá v širokém rozmezí (Bencko et al., 1995). Schopnosti mechorostů, lišejníků, kaprad'orostů a některých druhů stromů poutat rizikové kovy v nadzemní biomase se využívá při biomonitoringu atmosférické depozice (Branquinho, 2001; Sucharová a Suchara, 2004; Reimann et al., 2007). Velkou fytoimediační schopnost rizikových kovů vykazují rostliny z rodu *Brassica* a *Thlaspi* (Küpper et al., 2001; di Toppo et al., 2001). Jednorázově odebrané vzorky zemědělských plodin pro zjištění obsahu rizikových kovů často nemají vypovídající hodnotu, protože se neuvažuje s množstvím aplikovaných kovů s hnojiv, formami dostupnosti rizikových prvků v půdě a fyzikálně-chemickými vlastnostmi půdy (Anonymus, osobní sdělení., 2010). Bilance makroživin je efektivní nástroj pro hodnocení udržitelnosti zemědělského hospodaření, stanovení míry půdní úrodnosti za minimálního vlivu (eutrofizace, votalizace, vyluhování živin) na životní prostředí (Kutra a Aksomaitiene, 2003), ale bilance rizikových kovů je v zemědělství používána jen málokdy (Bengtsson et al., 2003).

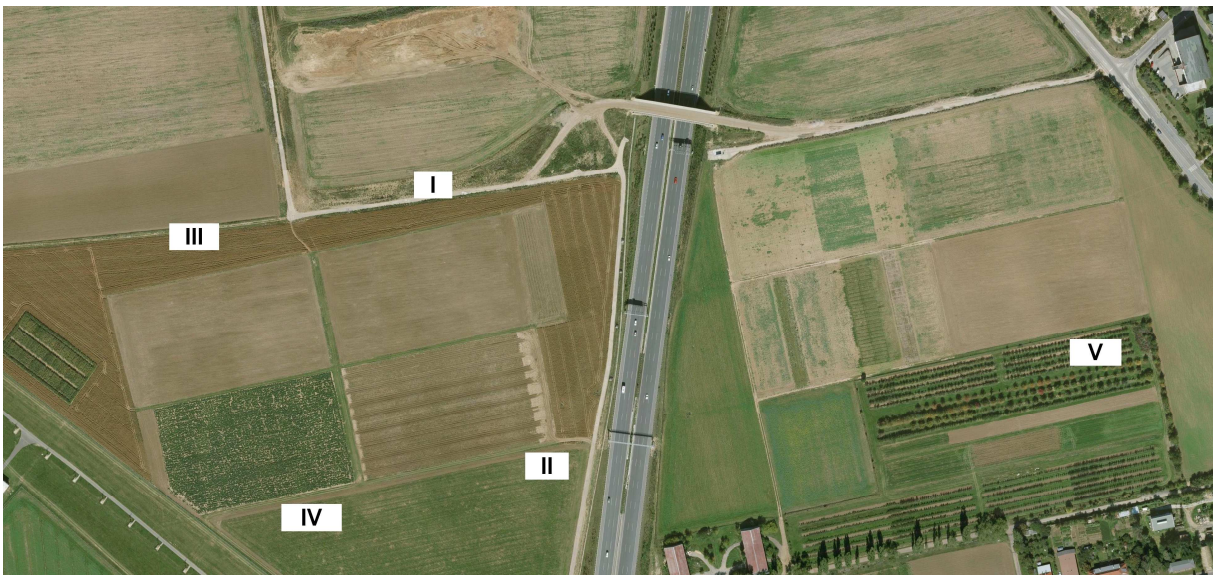
Spory o účinku statkových a minerálních hnojiv na výživu rostlin, vyvolané v polovině devatenáctého století Sprengel–Liebigovou minerální teorií (van der Ploeg et al., 1999), která popřela humusovou teorii A.D. Thaera, vedli k zakládání dlouhodobých pokusů s hnojením, které dodnes běží na celém světě (Leight a Johnston, 1994; Schellberg et al., 1999; Merbach a Deubel, 2008; Hejcman a Kunzová, 2010). Pravidelná aplikace stupňovaných dávek organických a minerálních hnojiv v kombinaci s osevními a agrotechnickými postupy v odlišných půdně klimatických podmínkách, umožňuje využít dlouhodobé pokusy s hnojením ke stanovování jak míry znečištění životního prostředí tak i vlivu hnojení na vstup rizikových kovů do potravního řetězce po kvalitativní a kvantitativní stránce.

Dlouhodobý polní pokus s hnojením v Praze-Ruzyni (The Ruzyně Fertilizer Experiment - RFE) byl založen v roce 1955 (obr.1). Skládá se z pěti odlišně hnojených honů, přičemž každý hon má 24 variant hnojení ve čtyřech opakováních. Jeho hlavním zaměřením je sledování působení kombinace různých druhů organických a minerálních hnojiv v jednotlivých osevních postupech. Na honech s označením I a II probíhaly od roku 2008 odběry půd a plodin pro stanovení rizikových kovů.

Tato práce se zabývá koncentrací rizikových kovů v bramborách. Její jedinečný význam spočívá v prvním odběru vzorku brambor pro stanovení rizikových kovů po 56 minerálního a organického hnojení a odpovídá na následující otázky:

Jaký je dlouhodobý vliv různých režimů hnojení na koncentraci rizikových kovů v hlízách a slupkách brambor, na odběr rizikových kovů hlízami a slupkami brambor. Jaká je bilance rizikových prvků pro hlízy brambor při dlouhodobém minerálním a organickém hnojení.

Obr. 1. Letecký snímek dlouhodobého polního pokusu s hnojením v Praze-Ruzyni (The Ruzyně Fertilizer Experiment - RFE). Latinské číslice (I-V) označují jednotlivé hony v pokusu.



2. Metodika

2.1 Popis území

Dlouhodobý polní pokus s hnojením v Praze-Ruzyni (The Ruzyně Fertilizer Experiment - RFE) byl založen v roce 1955. Nachází se v blízkosti východní přístávací dráhy letiště v Praze- Ruzyni (50°05'15''N; 14°17'28''E). Průměrná roční teplota je 8,2 °C (6,4 - 9,7°C) a průměrné srážky jsou 422 mm (255 - 701 mm), (meteorologická stanice Praha-Ruzyně, 1995 - 2007). Půdní typ byl klasifikován jako ilimerizovaná luvisol (Němeček et al., 2001). Matečné podloží je spraš smíšená se zvětralými křídami. Hladina podzemní vody je 20 m pod povrchem. Ornice 0-30 cm obsahuje 27 % jílu, horizont 30-40 cm 40 % jílu, 49 % jílu je v horizontu 40–50 cm. Půdní pH (H₂O) bylo 6,5 ve vrstvě 0-20 cm, před založením pokusu v roce 1955.

2.2 Uspořádání pokusu

Pokus se skládá z pěti honů. Každý hon se skládá z 24 hnojených parcel ve čtyřech opakováních ve zcela náhodném experimentálním uspořádání. Rozměr každého honu je 144 m x 96 m. Plocha každé parcely je 12 m x 12 m z nichž je pro experimentální účely použita centrální plocha 5 m x 5 m. V této práci byl pro analýzy využit hon II s klasickým osevním postupem (45 % obilovin, 33 % okopanin, 22 % píce). Pořadí plodin bylo vojtěška, vojtěška, ozimá pšenice, cukrová řepa, ozimý ječmen, brambory, ozimá pšenice, cukrová řepa, ozimý ječmen s podsevem vojtěšky. V pokusu bylo hnojeno přímo pod brambory následujícími hnojivy. Dusičnanem amonným s vápencem (27 % N), v dávce 110 kg N ha⁻¹ (N4); superfosfátem (8,3 % P) v dávce 31 kg P ha⁻¹ (P2); chloridem draselným (49,8 % K) v dávce 186 kg K ha⁻¹ (K2). Kuřecí kejda (KK) byla použita jako organické hnojivo ve variantě KK a KKN4P2K2 v dávce 43 t.ha⁻¹. Kuřecí kejda se aplikovala na podzim před pěstováním okopanin. Množství aplikovaných kovů přímo pod brambory je uvedeno v tab.1. Průměrné roční množství aplikovaných kovů pod všechny plodiny, způsob odběru a stanovení koncentrace prvků v hnojivech a určení půdních charakteristik jsou uvedeny v Uprety et al., (2009).

Tab. 1. Množství aplikovaných rizikových kovů pod brambory (g.ha⁻¹)

varianta	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
kontrola	-	-	-	-	-	-	-	-
N4P2K2	0,783	0,526	15,2	3,67	19,8	2,59	0,720	43,4
KK	9,40	1,38	65	334	2238	63,3	5,70	2475
KKN4P2K2	10,2	1,91	80,2	338	2258	65,9	6,42	2518

kontrola: nehnojená varianta

N4P2K2: 110 kg.ha⁻¹ N; 31 kg.ha⁻¹ P; 186 kg.ha⁻¹ K

KK: kuřecí kejda 49 t.ha⁻¹

KKN4P2K2: kombinace N4P2K2 a KK

2.3 Odběr vzorků a chemické analýzy

V této práci byly využity brambory odrůdy Ditta, konzumní odrůda varného typu AB se středně velkými hlízy. Hlízy byly vyorávány vyorávačem brambor a ručně sbírány. Pro analýzy byly odebrány dva kilogramy čerstvých hlíz z každé studované parcely v září 2009. Hlízy byly omyty dočista v deionizované vodě, oloupany, nakrájeny na kostičky a sušeny při 80 °C 24 hodin. Stejný postup byl použit pro slupky. Po té bylo určeno množství sušiny a výnos v sušině. Pro určení koncentrace prvků byla použita metoda mokrého rozkladu za zvýšeného tlaku. Přesně 1g umletých hlíz a slupek byl zalit 8 ml HN03 a 2 ml H₂O₂ a následně rozložen v mikrovlném rozkladném zařízení CEM 2000 (CEM Corporation, USA). Pro stanovení arsenu (As), vápníku (Ca), kadmia (Cd), chromu (Cr), mědi (Cu), draslíku (K) hořčíku (Mg), manganu (Mn), niklu (Ni), olova (Pb) a zinku (Zn) byl použit optický emisní spektrometr s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES Thermo Jarrell Ash, Trace Scan, Franklin, USA), vlnové délky: $\lambda = 189,0$ nm pro As, $\lambda = 370,6$ nm pro Ca, $\lambda = 214,4$ nm pro Cd, $\lambda = 206,1$ nm pro Cr, $\lambda = 324,7$ nm pro Cu, $\lambda = 766,4$ nm pro K, $\lambda = 383,8$ nm pro Mg, $\lambda = 257,6$ nm pro Mn, $\lambda = 231,6$ nm pro Ni, $\lambda = 220,3$ nm pro Pb, $\lambda = 182,6$ nm pro S, a $\lambda = 213,8$ nm pro Zn. N a P byly měřeny průtokovým kolorimetrem (SAN plus SYSTEM, SKALAR, DE Breda, NETHERLANDS).

2.4 Analýzy dat

Pro statistické vyhodnocení bylo použito programu STATISTICA 8.0 software (StatSoft, Tulsa). Rozdíly mezi variantami, hlízy a slupkami byly testovány pomocí dvoucestné analýzy variance (Factorial ANOVA). Po průkazném výsledku analýzy variance byl použit Tukey test pro mnohonásobná porovnání. Vztahy mezi výnosy a prvky v bramborách byly testovány pomocí lineární regrese (Lepš, 1996). Pro vyhodnocení všech

mnohorozměrných dat byla využita technika přímé kanonické ordinace (RDA) v programu CANOCO 4.5. Varianty hnojení byly použity jako nezávislá proměnná (proměnná prostředí). Závislé proměnné byly obsahy prvků v bramborách. Byla použita standardizace v rámci druhů a logaritmická transformace kvůli rozdílnému charakteru dat a jednotek. Dále byl použit permutační test Monte Carlo s 999 permutacemi, protože nezávislá proměnná (varianty hnojení) měla vliv na všechna analyzovaná data. Výsledkem RDA je ordinační diagram vytvořený v programu CanoDraw (ter Braak and Šmilauer, 2002).

3. Výsledky

3.1 Výnos brambor

Výnosy hlíz brambor v sušině byly 4,7 t.ha⁻¹ v kontrole, 6,0 t.ha⁻¹ ve variantě KK a 7,1 t.ha⁻¹ ve variantách N4P2K2 a KKN4P2K2. Průkazně rozdílné byly N4P2K2 a KKN4P2K2 od kontroly a KK, dále varianta KK od kontroly. Výnosy slupek v sušině byly 0,59 t.ha⁻¹ v kontrole 0,74 t.ha⁻¹ ve variantě KK a 0,89 t.ha⁻¹ ve variantách N4P2K2 a KKN4P2K2. Průkazně rozdílné byly výnosy slupek ve variantách N4P2K2 a KKN4P2K2 od kontroly a KK a varianta KK od kontroly (tab. 2).

Tab. 2. Výnosy (t.ha⁻¹)

varianta	hlízy**		slupky**	
	čerstvé	sušina	čerstvé	sušina
kontrola	17,5 ^b	4,7	3,1 ^b	0,58
N4P2K2	26,4 ^a	7,1	4,7 ^a	0,89
KK	22,1 ^c	6,0	3,9 ^c	0,76
KKN4P2K2	26,5 ^a	7,1	4,7 ^a	0,94

n: výsledek ANOVA analýzy není průkazný.

* a **: výsledek ANOVA analýzy je průkazný na hladině významnosti 0,05 a 0,001.

Dle Tukey post-hoc testu jsou varianty s odlišným písmenem průkazně rozdílné.

3.2 Koncentrace rizikových kovů v bramborách

Koncentrace arsenu, kadmia, chromu, manganu, mědi, niklu, olova a zinku ve hlízách a slupkách brambor jsou uvedeny v tab. 3. Vliv varianty na koncentraci arsenu, chromu, niklu, olova a zinku ve hlízách a slupkách brambor nebyl průkazný. Průkazný vliv měla varianta na koncentraci kadmia, mědi a manganu ve hlízách a slupkách brambor.

Koncentrace kadmia $0,032 \text{ mg.kg}^{-1}$ ve slupkách ve variantě KK se průkazně lišila od $0,050 \text{ mg.kg}^{-1}$, $0,064 \text{ mg.kg}^{-1}$ a $0,052 \text{ mg.kg}^{-1}$ v kontrole, N4P2K2 a KKN4P2K2. Koncentrace manganu $0,6 \text{ mg.kg}^{-1}$ ve slupkách ve variantě KK se průkazně lišila od $1,0 \text{ mg.kg}^{-1}$, $1,7 \text{ mg.kg}^{-1}$ a $0,6 \text{ mg.kg}^{-1}$ v kontrole, N4P2K2 a KKN4P2K2. Průkazně vyšší koncentrace kadmia, chromu, manganu, mědi a niklu byla zjištěna ve slupkách oproti hlízám. Koncentrace niklu ve slupkách je více než sedmkrát vyšší nežli ve hlízách ve všech variantách.

Tab. 3. Průměrné koncentrace rizikových kovů v hlízách brambor (mg.kg^{-1} v sušině)

varianta	hlíza	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
kontrola	H	0,048	0,029 ^a	0,085	4,2 ^{ab}	5,1 ^a	0,6 ^a	0,20	12,6
	S	0,071	0,050 ^{bc}	0,515	5,5 ^c	1,0 ^{bc}	7,6 ^b	0,84	32,7
N4P2K2	H	0,040	0,040 ^{ab}	0,095	3,6 ^a	5,5 ^a	1,0 ^a	0,22	11,6
	S	0,039	0,064 ^c	0,196	4,9 ^{bc}	1,7 ^c	7,0 ^b	0,24	15,5
KK	H	0,041	0,027 ^a	0,124	3,8 ^{ab}	5,1 ^a	0,5 ^a	0,26	11,5
	S	0,040	0,032 ^a	0,200	4,4 ^{abc}	0,6 ^b	6,3 ^b	0,23	13,2
KKN4P2K2	H	0,055	0,036 ^{ab}	0,096	3,4 ^a	5,9 ^a	1,0 ^a	0,30	13,1
	S	0,037	0,052 ^{bc}	0,234	5,5 ^c	1,5 ^{bc}	7,7 ^b	0,25	19,1
limity		1,24	0,41	0,83	12,4	-	2,06	0,61	41,3
výsledek ANOVY	varianta	0,150	<0,001 ^{**}	0,326	0,040 [*]	0,003 [*]	0,190	0,294	0,332
	H x S	0,884	<0,001 ^{**}	0,009	<0,001 ^{**}	<0,001 ^{**}	<0,001 ^{**}	0,227	0,070
interakce		0,223	0,070	0,217	0,643	0,422	0,424	0,194	0,418

H: loupaná hlíza, S: slupka

* a **: výsledek ANOVA analýzy je průkazný na hladině významnosti 0,05 a 0,001.

Dle Tukey testu jsou varianty s odlišným písmenem průkazně rozdílné.

3.3 Odběr rizikových kovů bramborami

Odběry arsenu, kadmia, chromu, mědi, manganu, niklu, olova a zinku hlízami a slupkami brambor jsou uvedeny v tab. 4. Vliv varianty na odběr arsenu, kadmia, mědi, manganu, niklu a zinku hlízami a slupkami brambor byl průkazný. Odběr arsenu $0,39 \text{ g.ha}^{-1}$ hlízami ve variantě KKN4P2K2 se průkazně lišil od $0,23 \text{ g.ha}^{-1}$, $0,29 \text{ g.ha}^{-1}$ a $0,24 \text{ g.ha}^{-1}$ arsenu v kontrole, N4P2K2 a KK. Odběr kadmia $0,29 \text{ g.ha}^{-1}$ a $0,26 \text{ g.ha}^{-1}$ ve variantách N4P2K2 a KKN4P2K2 se průkazně lišil od $0,14 \text{ g.ha}^{-1}$ a $0,16 \text{ g.ha}^{-1}$ kadmia v kontrole a variantě KK. Odběr mědi $25,5 \text{ g.ha}^{-1}$ ve variantě N4P2K2 se průkazně lišil od $19,8 \text{ g.ha}^{-1}$ mědi v kontrole. Odběr mědi $22,6 \text{ g.ha}^{-1}$ a $24,3 \text{ g.ha}^{-1}$ v KK a KKN4P2K2 se průkazně nelišil od žádné varianty ani navzájem. Odběr manganu $23,9 \text{ g.ha}^{-1}$ v kontrole se průkazně lišil od $39,6 \text{ g.ha}^{-1}$, Odběr manganu $30,6 \text{ g.ha}^{-1}$ a $42,2 \text{ g.ha}^{-1}$ v N4P2K2 a KKN4P2K2 se průkazně lišil od ostatních variant. Odběr niklu $2,7 \text{ g.ha}^{-1}$ v kontrole se průkazně lišil od $6,2 \text{ g.ha}^{-1}$ a $6,9 \text{ g.ha}^{-1}$ niklu ve variantách N4P2K2 a KKN4P2K2, které se od sebe vzájemně nelišily.

Odběr zinku 94,1 g.ha⁻¹ v KKN4P2K2 se průkazně lišil od 59,2 g.ha⁻¹ zinku v kontrole. Koncentrace 82,7 g.ha⁻¹ a 68,2 g.ha⁻¹ zinku v N4P2K2 a KK se nelišily od ostatních variant ani navzájem.

Průkazně vyšší odběr arsenu, kadmia, mědi, manganu, olova a zinku byl hlízami nežli slupkami ve všech variantách. Rozdíly v odběru niklu mezi hlízami a slupkami nebyly zjištěny. Rozdíly odběru chromu 0,40 g.ha⁻¹ v kontrole a 0,29 g.ha⁻¹ nebyly statisticky průkazné.

Tab. 4. Průměrný odběr rizikových kovů hlízami brambor (g. ha⁻¹ v sušině)

varianta	hlíza	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
kontrola	H	0,23 ^b	0,14 ^b	0,40 ^{abc}	19,8 ^b	23,9 ^c	2,7 ^a	0,97 ^{ab}	59,2 ^b
	S	0,04 ^a	0,03 ^a	0,29 ^{abc}	3,2 ^a	0,6 ^a	4,4 ^{ab}	0,47 ^a	18,5 ^a
N4P2K2	H	0,29 ^b	0,29 ^c	0,68 ^{bc}	25,5 ^c	39,6 ^b	7,4 ^d	1,60 ^{ab}	82,7 ^{bc}
	S	0,03 ^a	0,06 ^a	0,17 ^a	4,3 ^a	1,5 ^a	6,2 ^{bcd}	0,22 ^a	13,8 ^a
KK	H	0,24 ^b	0,16 ^b	0,74 ^c	22,6 ^{bc}	30,6 ^d	3,2 ^a	1,56 ^{ab}	68,9 ^{bc}
	S	0,03 ^a	0,02 ^a	0,15 ^a	3,2 ^a	0,5 ^a	4,6 ^{abc}	0,17 ^a	9,8 ^a
KKN4P2K2	H	0,39 ^c	0,26 ^c	0,69 ^{bc}	24,3 ^{bc}	42,2 ^b	7,2 ^{cd}	2,17 ^b	94,1 ^c
	S	0,03 ^a	0,05 ^a	0,21 ^{ac}	4,9 ^a	1,3 ^a	6,9 ^{bcd}	0,23 ^a	16,9 ^a
výsledek ANOVY	varianta	0,002*	<0,001**	0,736	0,015*	<0,001**	<0,001**	0,498	0,023*
	H x S	<0,001**	<0,001**	<0,001**	<0,001**	<0,001**	0,302	<0,001**	<0,001**
	interakce	<0,001**	<0,001**	0,120	0,230	<0,001**	0,050	0,156	0,026*

H: loupnaná hlíza, S: slupka

* a **: výsledek ANOVA analýzy je průkazný na hladině významnosti 0,05 a 0,001.

Dle Tukey testu jsou varianty s odlišným písmenem průkazně rozdílné.

Tab. 5. Bilance rizikových kovů (g.ha⁻¹)

varianta	AsA	AsO	AsV	CdA	CdO	CdV	CrA	CrO	CrV
kontrola	0,000	0,268	-0,268	0,000	0,167	-0,167	0	0,689	-0,689
N4P2K2	0,783	0,320	0,463	0,526	0,346	0,180	15,2	0,852	14,3
KK	9,40	0,274	9,13	1,38	0,182	1,20	65,0	0,890	64,1
KKN4P2K2	10,2	0,426	9,76	1,91	0,302	1,60	80,2	0,894	79,3
varianta	CuA	CuO	CuV	MnA	MnO	MnV	NiA	NiO	NiV
kontrola	0	23,0	-23,0	0	24,5	-24,5	0,00	7,14	-7,14
N4P2K2	3,67	29,8	-26,1	19,8	41,1	-21,3	2,59	13,6	-11,0
KK	334	25,8	308	2238	31,0	2207	63,3	7,78	55,5
KKN4P2K2	338	29,2	308	2258	43,5	2214	65,9	14,0	51,9
varianta	PbA	PbO	PbV	ZnA	ZnO	ZnV			
kontrola	0	1,44	-1,44	0	77,7	-77,7			
N4P2K2	0,720	1,82	-1,10	43,4	96,5	-53,0			
KK	5,70	1,74	3,96	2475	78,7	2396			
KKN4P2K2	6,42	2,39	4,03	2518	111	2407			

A: aplikováno hnojivem; O: odběr neloupanou hlízou; V: výsledná bilance

3.4 *Bilance*

Bilance arsenu, kadmia, chromu, manganu, mědi, niklu, olova a zinku jsou uvedeny v tab. 5. Nedostatek arsenu ($-0,268 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$), kadmia ($-0,167 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$), chromu ($-0,689 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$), manganu ($-24,1 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$), mědi ($23,0 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$), niklu ($-7,14 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$), olova ($-1,44 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$) a zinku ($-77,7 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$) byl zjištěn v kontrole. Nedostatek manganu ($-21,3 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$), mědi ($-26,1 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$), niklu ($-11,1 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$), olova ($-1,1 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$) a zinku ($-53,0 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$) byl ve variantě N4P2K2. Přebytek arsenu se pohyboval od $0,783 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ v N4P2K2 do $10,2 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ v KKN4P2K2. Přebytek kadmia se pohyboval od $0,180 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ v N4P2K2 do $1,60 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ v KKN4P2K2. Přebytek chromu se pohyboval od $14,3 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ v N4P2K2 do $79,3 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ v KKN4P2K2. Přebytek manganu byl $2207 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ a $2214 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ v KK a KKN4P2K2. Přebytek mědi byl $308 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ v KK a KKN4P2K2. Přebytek niklu byl $55,5 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ a $51,9 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ v KK a KKN4P2K2. Přebytek olova byl $3,96 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ a $4,03 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ v KK a KKN4P2K2. Přebytek zinku byl $2396 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ a $2407 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ v KK a KKN4P2K2.

3.5 *Vztah mezi rizikovými kovy aplikovanými hnojivy, koncentrací rizikových kovů v bramborách, odběrem rizikových kovů a výnosem*

Vztahy mezi arsenem, kadmiem, chromem, manganem, mědí, niklem, olovem a zinkem aplikovanými hnojivy, jejich koncentrací v hlízách, výnosem a odběrem ukazuje diagram 1. Dle RDA analýzy byl vliv varianty na analyzovaná data průkazný ($F=3,2$; $P=0,001$) a vysvětloval 99,6 % celkové variability dat. Silná pozitivní korelace, vyjádřená úhlem mezi jednotlivými druhy byla mezi výnosem a koncentrací kadmia (CdK), manganu (MnK), mědi (CuK), niklu (NiK) v hlízách, dále mezi výnosem a odběrem arsenu (AsO), kadmia (CdO), manganu (MnO), mědi (CuO), niklu (NiO), olova (PbO) a zinku (ZnO) hlízami v levé spodní části diagramu. Silná pozitivní korelace byla také mezi koncentrací arsenu (AsK), kadmia (CdK), chromu (CrK), manganu (MnK), niklu (NiK), olova (PbK), zinku (ZnK) v hlízách a odběrem arsenu (AsO), kadmia (CdO), manganu (MnO), mědi (CuO), niklu (NiO), olova (PbO) a zinku (ZnO) hlízami.

Vztahy mezi arsenem, kadmiem, chromem, manganem, mědí, niklem, olovem aplikovanými hnojivy, jejich koncentrací ve slupkách, výnosem a odběrem ukazuje diagram 2. Silná pozitivní korelace byla mezi koncentrací arsenu (AsK) a odběrem (AsO), koncentrací chromu (CrK) a odběrem chromu (CrO), koncentrací olova (PbK) a odběrem olova (PbO), přičemž jejich šipky ukazují příslušnost ke nehnojené kontrole. Silná negativní korelace byla

mezi aplikovanými arsenem (AsA), chromem (CrA) a olovem (PbA) koncentrací arsenu (AsK), chromu (CrK), olova (PbK) a odběrem arsenu (AsO), chromu (CrO), olova (PbO). To jasně dokazuje schopnost slupek akumulovat a odebírat toxické kovy v tomto případě (arsen, olovo, chrom), v půdě obvykle těžko mobilizovatelné a pro rostlinu nedostupné. Jednotlivé korelace byly průkazné dle lineární regresní analýzy (tab. 7).

Diagram 1. Ordinační diagram RDA ukazuje vztah mezi rizikovými kovy aplikovanými hnojivy, koncentrací rizikových kovů v hlízách, odběrem rizikových kovů hlízami a výnosem hlíz

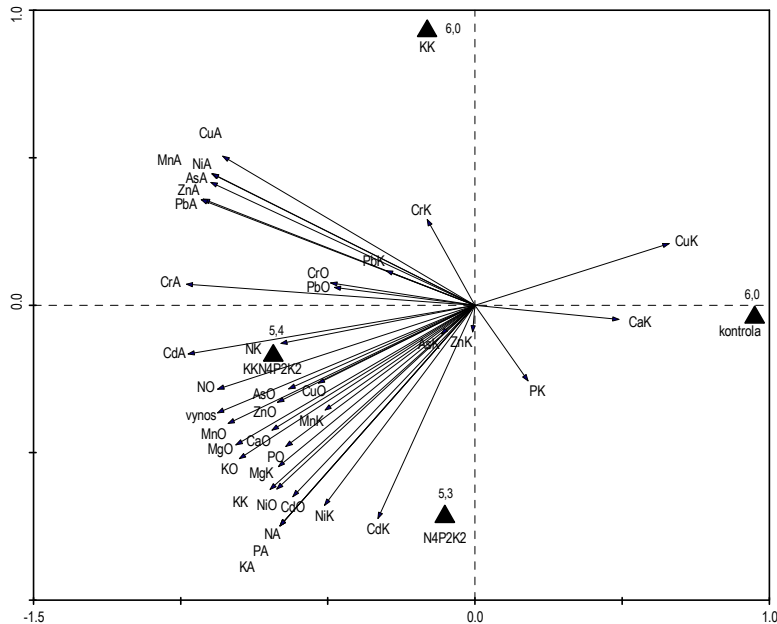
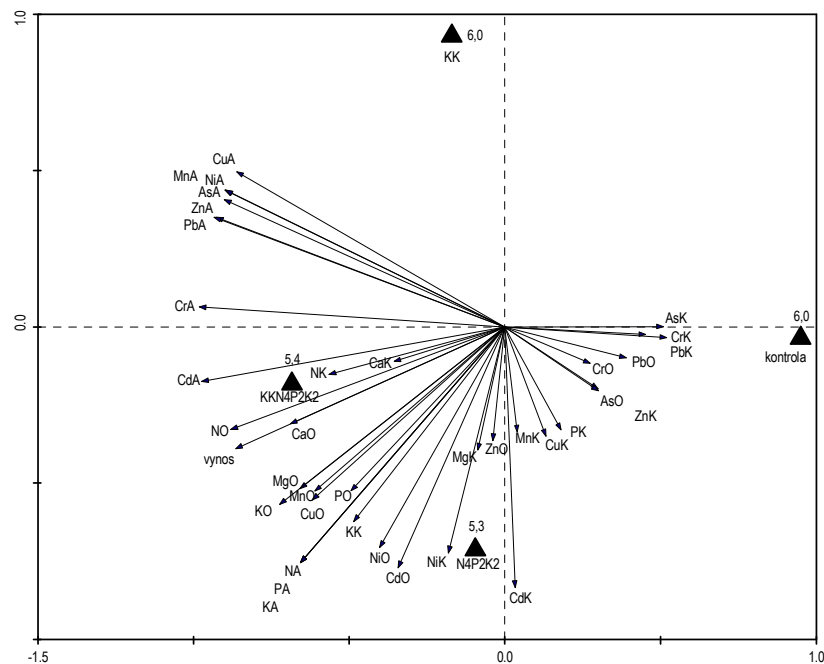


Diagram 2. Ordinační diagram RDA ukazuje vztah mezi rizikovými kovy aplikovanými hnojivy, koncentrací rizikových kovů ve slupkách, odběrem rizikových kovů slupkami a výnosem slupek



Čísla nad trojúhelníky vyjadřují pH (H₂O): Zkratky za značkami prvků: aplikováno (A), koncentrace prvku (K), odběr prvku (O)

Tabulka 7. Souhrnné výsledky regresních analýz

Hlízy				Slupky			
nezávislá	závislá	R	P	nezávislá	závislá	R	P
AsA	AsK	0,215	0,350	AsA	AsK	-0,382	0,141
	AsO	0,538	0,031		AsO	-0,214	0,433
CdA	CdK	0,022	0,110	CdA	CdK	0,306	0,644
	CdO	0,633	0,008		CdO	0,467	0,072
CrA	CrK	0,225	0,610	CrA	CrK	-0,321	0,143
	CrO	0,400	0,124		CrO	-0,223	0,395
CuA	CuK	-0,350	0,160	CuA	CuK	-0,147	0,591
	CuO	0,138	0,610		CuO	0,207	0,449
MnA	MnK	0,198	0,440	MnA	MnK	-0,123	0,314
	MnO	0,310	0,241		MnO	0,187	0,498
NiA	NiK	0,036	0,900	NiA	NiK	-0,203	0,701
	NiO	0,132	0,625		NiO	-0,061	0,842
PbA	PbK	0,321	0,204	PbA	PbK	-0,426	0,134
	PbO	0,448	0,080		PbO	-0,333	0,215
ZnA	ZnK	0,069	0,780	ZnA	ZnK	-0,247	0,346
	ZnO	0,334	0,210		ZnO	-0,160	0,553
AsK	AsO	0,779	<0,001	AsK	AsO	0,913	<0,001
CdK	CdO	0,941	<0,001	CdK	CdO	0,895	<0,001
CrK	CrO	0,919	<0,001	CrK	CrO	0,978	<0,001
CuK	CuO	0,120	0,657	CuK	CuO	0,572	0,021
MnK	MnO	0,835	<0,001	MnK	MnO	0,607	0,012
NiK	NiO	0,983	<0,001	NiK	NiO	0,971	<0,001
PbK	PbO	0,953	<0,001	PbK	PbO	0,980	<0,001
ZnK	ZnO	0,673	0,004	ZnK	ZnO	0,971	<0,001
výnos	AsK	-0,020	0,932	výnos	AsK	-0,521	0,037
	AsO	0,605	0,012		AsO	-0,181	0,501
výnos	CdK	0,623	0,012	výnos	CdK	0,335	0,204
	CdO	0,848	<0,001		CdO	0,714	<0,001
výnos	CrK	0,055	0,842	výnos	CrK	-0,543	0,032
	CrO	0,431	0,091		CrO	-0,392	0,132
výnos	CuK	-0,576	0,019	výnos	CuK	-0,151	0,572
	CuO	0,739	<0,001		CuO	0,720	<0,001
výnos	MnK	0,576	0,019	výnos	MnK	-0,111	0,697
	MnO	0,929	<0,001		MnO	0,717	<0,001
výnos	NiK	0,744	<0,001	výnos	NiK	0,497	0,049
	NiO	0,847	<0,001		NiO	0,680	0,003
výnos	PbK	0,317	0,231	výnos	PbK	-0,540	0,032
	PbO	0,552	0,026		PbO	-0,425	0,113
výnos	ZnK	0,067	0,815	výnos	ZnK	-0,411	0,112
	ZnO	0,778	<0,001		ZnO	-0,161	0,025

A: aplikováno hnojivem

K: koncentrace kovu hlízách a slupkách

O: odběr kovu hlízami a slupkami

4. Diskuze

4.1 Koncentrace rizikových kovů v bramborách

Průměrné koncentrace arsenu v hlízách od 0,040 mg.kg⁻¹ do 0,055 mg.kg⁻¹ v N4P2K2 a KKN4P2K2, ve slupkách od 0,037 mg.kg⁻¹ do 0,071 mg.kg⁻¹ v KKN4P2K2 a kontrole byly pod stanoveným českým národním limitem 1,24 mg.kg⁻¹. Hodnoty byly srovnatelné s koncentracemi arsenu od 0,03 mg.kg⁻¹ do 0,07 mg.kg⁻¹ v hlízách brambor z honu I (Šrek et al., submitted paper). Přestože se ve variantách s kuřecí kejdou aplikují vysoké dávky arsenu (okolo 10 g.ha⁻¹), nebyl zjištěn průkazný vliv varianty hnojení na koncentraci arsenu v hlízách a slupkách ani průkazný rozdíl koncentrací arsenu v hlízách a slupkách. To je pravděpodobně způsobeno podobností chemismu fosforečných a arseničných iontů, které jsou pevně vázány na jílové částice a hydridy železa a hliníku, celkovou inhibicí příjmu arsenu fosforečnanovými ionty a nízkou translokací arsenu do kořenů rostliny (McLaughlin et al., 1999).

Průměrné koncentrace kadmia v hlízách byla od 0,027 mg.kg⁻¹ do 0,040 mg.kg⁻¹, v KK a N4P2K2, ve slupkách od 0,032 mg.kg⁻¹ do 0,064 mg.kg⁻¹ v KK a N4P2K2. Hodnoty byly srovnatelné s koncentracemi kadmia od 0,02 mg.kg⁻¹ do 0,07 mg.kg⁻¹ v hlízách brambor z honu I (Šrek et al., submitted paper). O řád vyšší koncentrace kadmia naměřil při stejném pH 5,4 – 6 v hlízách i slupkách při hnojení čistírenským kalem Smith (1993), Dudka et al., (1995) a Piotrowska et al., (1997) po přidání popílku i McLaughlin et al., (1997) v hlízách brambor v Austrálii. Nízké hodnoty kadmia v bramborách v této studii i přes vysokou dostupnost kadmia v půdě (Uprety et al., 2009) jsou pravděpodobně zapříčiněny použitou poloranou odrůdou, která akumuluje menší koncentrace oproti ranným odrůdám (McLaughlin et al., 1997), vysokým obsahem zinku manganu a mědi v půdě, které blokují odběr kadmia rostlinou, vysokým obsahem organických látek v půdě a neutrálním pH (Uprety et al., 2009).

V případě mědi, průměrná koncentrace byla v hlízách od 3,4 mg.kg⁻¹ do 4,2 mg.kg⁻¹ v KKN4P2K2 a kontrole, ve slupkách od 4,4 mg.kg⁻¹ do 5,5 mg.kg⁻¹ v KK a KKN4P2K2. Průkazně vyšší koncentrace byla ve slupkách ve všech variantách.

V případě zinku byla průměrná koncentrace v hlízách od 11,5 mg.kg⁻¹ do 13,1 mg.kg⁻¹ v KK a KKN4P2K2. Některé studie uvádějí, že aplikace zvířecí kejdy zvyšuje koncentraci mědi a zinku v rostlinách (Zhou et al., 2005) V této studii bylo aplikováno ve variantě KK a KKN4P2K2 s kuřecí kejdou více než 330 g.ha⁻¹ mědi a 2500 g.ha⁻¹ zinku, ale průkazný vliv

varianty na koncentraci mědi a zinku ve hlízách a slupkách brambor nebyl zjištěn. Podobného výsledku dosáhl i Šrek et al., (submitted paper) při aplikaci prasečí kejdy. Průměrná koncentrace manganu se pohybovala od 5,1 mg.kg⁻¹ do 5,9 mg.kg⁻¹ v kontrole, KK a KKN4P2K2 v hlízách a od 0,6 mg.kg⁻¹ do 1,7 mg.kg⁻¹ v kontrole a N4P2K2 ve slupkách. Výsledky byly podobné s výsledky Mansour et al., (2009).

Varianta neměla průkazný vliv na obsah manganu v hlízách, průkazný až pětikrát vyšší obsah byl ve všech variantách ve slupkách, což je v rozporu s Dudka et al., (1995), jehož koncentrace manganu ve hlízách a slupkách nebyly rozdílné.

Průměrná koncentrace chromu v hlízách byla od 0,085 mg.kg⁻¹, do 0,124 mg.kg⁻¹ v kontrole a KK, od 0,196 mg.kg⁻¹ do 0,515 mg.kg⁻¹ v N4P2K2 a kontrole ve slupkách. Koncentrace olova se pohybovala od 0,20 mg.kg⁻¹ do 0,30 mg.kg⁻¹ v kontrole a KKN4P2K2 ve hlízách i slupkách. Průkazný vliv varianty na obsah chromu a olova v hlízách nebyl zjištěn, rozdíl mezi hlízami a slupkami také nebyl průkazný. V případě chromu byly obsahy stejné jako u Šrek et al., (submitted paper) a Dudka et al., (1995). V případě olova byly průměrné koncentrace čtyřikrát nižší nežli v práci Šrek et al., (submitted paper) a byly hluboko pod Českým národním limitem pro olovo 0,61 mg.kg⁻¹ v sušině. Průměrné koncentrace olova ve hlízách a ve slupkách ve všech variantách byla srovnatelná s nehnojenou kontrolou v práci Dudka et al., (1996).

Průměrná koncentrace niklu se pohybovala od 0,6 mg.kg⁻¹ do 1,0 mg.kg⁻¹ v KK a KKN4P2K2 v hlízách a od 7,0 mg.kg⁻¹ do 7,7 mg.kg⁻¹ v N4P2K2 a KKN4P2K2 ve slupkách. Vliv varianty na obsah niklu v hlízách a slupkách nebyl průkazný. Z výnosem hlíz v rozmezí 7,0 - 7,5 t.ha⁻¹ se koncentrace niklu v hlízách zvýšila z 0,8 mg.kg⁻¹ na 1,4 mg.kg⁻¹. Slupky obsahovaly až sedmkrát vyšší obsah niklu a překročily Český národní limit 2,06 mg.kg⁻¹ v sušině. Tento výsledek koresponduje s Dudka et al., (1995), který zjistil vyšší obsah niklu ve slupkách. Na druhou stranu, přirozený obsah cizorodých prvků v bramborových hlízách po jejich oloupaní a kuchyňské úpravě nepředstavuje žádnou hrozbu pro zdraví člověka (Davies a Crews, 1983).

4.2 Odběr rizikových kovů bramborami

Rozdíly v odběru arsenu, kadmia, mědi, manganu, niklu, olova a zinku hlízami mezi variantami byly dány více výnosem nežli jejich koncentracemi v hlízách. Rozdíly v odběru arsenu, chromu a olova mezi variantami slupkami byly dány jejich koncentrací ve slupkách.

Rozdíly mezi odběrem manganu, mědi, niklu a zinku slupkami byly dány výnosem více nežli koncentrací těchto prvků ve slupkách. Výsledné roční bilance arsenu, kadmia a chromu pro celou neloupanou hlízu byly záporné pouze v nehnojené kontrole. Přídavek $140 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ dusíku, $31 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ fosforu a $186 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ draslíku ve variantě N4P2K2 měl za následek přebytek arsenu ($0,463 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$), kadmia ($0,180 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$) chromu ($14,3 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$). U mědi, manganu, niklu, olova a zinku byly výsledné roční bilance záporné i ve variantě N4P2K2. U mědi, manganu a zinku, minerální hnojení $140 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ dusíku, $31 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ fosforu a $186 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ draslíku nedostačuje pokrýt vysoké nároky polorané odrůdy brambor (Ditta) na výživu mědí, manganem a zinkem.

U brambor, ve variantě N4P2K2, byl průkazně vyšší odběr olova nežli v ostatním variantách, stejně jak tomu uvádí (Antonious 2007). Minerální hnojení $140 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ dusíku, $31 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ fosforu a $186 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ draslíku má za následek i zvýšenou schopnost hlíz brambor odebírat z půdy nikl. Aplikace kuřecí kejdy v dávce $43 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ variantách KK a KKN4P2K2 k poloraným bramborám (Ditta) má za následek nadbytek arsenu, kadmia, mědi, manganu, niklu, olova a zinku. Podobných výsledků dosáhl u kadmia, mědi a zinku při hnojení statkovými hnojivy i Bengtsson et al., (2003), který zároveň zaznamenal u brambor největší nadbytky kadmia, mědi a zinku oproti jiným plodinám. V porovnání s Šrek et al., (submitted paper) z honu I, kde se aplikovalo $49 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ prasečí kejdy, byly nadbytky kadmia, chromu a niklu, při podobných výnosech brambor, dvojnásobné Z výsledků vyplývá, že aplikace kuřecí kejdy může mít za následek vysoké obsahy těchto prvků v půdě. Ale jak uvádí Moolenaar a Lexmond (1998), průměrné hodnoty vyplavování kadmia, mědi a zinku $0,5 - 2,8$, $5 - 87$ a $2,6 - 88 \text{ g}\cdot\text{ha}^{-1}$ ročně. Z hlediska rizika kontaminace životního prostředí kadmiem, chromem a niklem je na této půdě vhodnější použít prasečí kejdy jako organického hnojiva k bramborám. Na druhou stranu, v této studii byly odebrány pouze hlízy což vysvětluje nadbytek prvků v bilanci, protože jak uvádí (He, 2007) nároky rostlin na výživu se mění během růstu vegetace a rizikové kovy se akumulují především v kořenech a nadzemních částech rostliny (Souza a Rauser, 2003).

5. Závěr

Celková koncentrace rizikových kovů v loupáných hlízách byla v pořadí zinek>mangan>měď>nikl>olovo>kadmium>arsen. Celková koncentrace rizikových kovů ve slupkách byla v pořadí zinek>nikl>měď>mangan>olovo>chrom>arsen>kadmium. Nebyl zjištěn průkazný vliv varianty hnojení na obsah arsenu, kadmia, chromu, mědi, niklu, olova a zinku v loupáných hlízách brambor. Průkazný vliv měla varianta hnojení na obsah kadmia, mědi a manganu ve slupkách. Koncentrace niklu ve slupce překročila České limity pro jeho obsah v bramborách $2,06 \text{ mg.kg}^{-1}$ v sušině ve všech variantách hnojení. Minerální hnojení 140 kg.ha^{-1} dusíku, 31 kg.ha^{-1} fosforu a 186 kg.ha^{-1} draslíku nedostačuje pokrýt nároky polorané odrůdy brambor (Ditta) na výživu mědí, manganem a zinkem na ilimerizovaných luvisolích. Hlavní výsledkem této práce je, hnojení dusičnanem amonným s vápencem (27 % N), v dávce 110 kg N ha^{-1} , superfosfátem (8,3 % P) v dávce 31 kg P ha^{-1} , chloridem draselným (49,8 % K) v dávce 186 kg K ha^{-1} a kuřecí kejdou v dávce 43 t.ha^{-1} nezvyšuje koncentrace arsenu, kadmia, chromu, mědi, niklu, olova a zinku v loupáných hlízách brambor a slupkách brambor.

6. Literatura

- Adriano, D.C., 2001.** Trace elements in the terrestrial environment. Springer, New York.
- Antonious, G.F., Snyder, C.J., 2007.** Accumulation of heavy metals in plants and potential phytoremediation of lead by potato, *Solanum tuberosum* L. Journal of Environmental Science and Health. 42: 811–816.
- Bencko, V., Cikrt, M., Lener, J., 1995.** Toxické kovy v životním a pracovním prostředí člověka. Grada: Praha.
- Bengtsson, H., Öborn, I., Jonsson, S., Nilsson, I., Andersson, A., 2003.** Field balances of some mineral nutrients and trace elements in organic and conventional dairy farming a case study at Öjebyn, Sweden. European Journal of Agronomy. 20: 101 – 116.
- Berenguer, P., Cela, S., Santiveri, F., Boixadera, J., Lloveras, J., 2008.** Copper and zinc soil accumulation and plant concentration in irrigated maize fertilized with liquid swine manure. Agronomy Journal. 100: 1056–1061.
- Bokyoung, K., 1994.** Survey on the natural content of heavy metal in potato and sweet potato and their cultivated soils. The Journal of Agricultural Science. 36: 302- 309.
- Branquinho, C., 2001.** Lichens. In Metals in the Environment. Prasad, M.N.V. New York: Marcel Dekker: 117-158.
- CSU., 2009.** Statistická ročenka České republiky. Český statistický úřad, Praha.
- Davies, B.E., Crews, H.M., 1983.** The contribution of heavy metals in potato peel to dietary intake. Science of the Total Environment. 30: 261 – 264.
- De la Torre, A.I., Jiménez, J.A., Carballo, M., Fernandez, J.R., Munoz, M.J., 2000.** Ecotoxicological evaluation of pig slurry. Chemosphere. 4: 1629–1635.
- de Wries, W., Groenenberg, B.J., Reinds, G.J., Curlik, J., Sefcik, P., Murányi, A., Kádár, I., 2005.** Long-term impacts of different fertilisers scenarios on metal leaching and metal uptake in Slovakian and hungarian agricultural soils. Ekologia-Bratislava 24: 314-335.
- di Toppi, L.S., Favali, A.M., Gabbrielli, R., Gremigni, P. 2001.** Brassicaceae. In Metals in the Environment. Prasad, M.N.V. New York: Marcel Dekker: 219-257.
- Dudka, S., Piotrowska, M., Chlopecka, A., Witek, T., 1995.** Trace metal contamination of soil and crop plants by the mining and smelting industry in Uppper Silesia, South Poland. Journal of Geochemical Exploration. 52: 237–250.

- Fageria, N.K., Stone, L.F., 2006.** Physical, Chemical, and Biological Changes in the Rhizosphere and Nutrient Availability. *Journal of Plant Nutrition*. 29: 1327-1356.
- FAO., 2009.** FAOSTAT. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Ferguson, J.E., 1990.** The heavy elements. Chemistry environmental impact and health effects. Pergamon. Oxford. *Food Chemistry*. 5:1446–1453.
- Franklin, R.E., Duis, L., Brown, R., Kemp, T., 2005.** Trace Element Content of Selected Fertilizers and Micronutrient Source Materials. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 36: 1591-1609.
- He, M.M., Tian, G.M., Liang, X.G., Yu, Y.T., Wu., J.Y., Zhou, G.D., 2007.** Effects of two sludge application on fractionation and phytotoxicity of zinc and copper in soil. *Journal of Environmental Sciences*. 19: 1482–1490.
- Hejzman, M., Kunzová, E., 2010.** Sustainability of winter wheat production on sandy-loamy Cambisol in the Czech Republic: Results from a long-term fertilizer and crop rotation experiment. *Field Crops Research*. In press.
- Hejzman, M., Száková, J., Schellberg, J., Šrek, P., Tlustoš P. 2009.** The Rengen Grassland Experiment: soil contamination by trace elements after 65 years of Ca, N, P and K fertiliser application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 83: 39–50.
- Küpper, H., Lombi, E., Zhao, J.F., Wieshammer, G., McGrath, P.S., 2001.** Cellular compartmentation of nickel in the hyperaccumulators *Alyssum lesbiacum*, *Alyssum bertolonii* and *Thlaspi goesingense*. *Journal of Experimental Botany*. 52: 2291-2300.
- Kutra, G., Aksomaitiene, R., 2003.** Use of nutrient balances for environmental impact calculations on experimental field scale. *European Journal of Agronomy*. 20: 127 – 135.
- Lee, T.M., Lai, H.Y., Chen, Z.S., 2003.** Effect of chemical amendments on the concentration of cadmium and lead in long-term contaminated soils. *Chemosphere*. 57: 1459–1471.
- Leight, R.A., Johnston, A.E., 1994.** Long-term Experiments in Agricultural and Ecological Sciences. Cambridge: 53-83.
- Lepš, J., Šmilauer, P., 2003.** Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge University Press, Cambridge..
- Mansour, A.S., Mohamed B.H., Abou-Arab, A.A.K., Ashour, H.M., Gad, F.M., 2009.** Evaluation of some pollutant levels in conventionally and organically farmed potato tubers and their risk to human health. *Food and Chemical Toxicology*. 47: 615–624.

- McKenna, I.M., Chaney, L.R., Williams, F.M., 1993.** The effects of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue distribution of zinc and cadmium in lettuce and spinach. *Environmental Pollution*. 79: 113-120.
- McLaughlin, J.M., Maier, A.N., Rayment, E.G., Sparrow, A.L., Berg, G., McKay, A., Milham, P., Merry, H.R., Smart, K.M., 1997.** Cadmium in Australian potato tubers and soils. *Journal of Environmental Quality*. 26: 1644–1649.
- McLaughlin, M.J., Palmer, L.T., Tiller, K.G., Beech, T.A., Smart, M.K., 1994.** Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers. *Journal of Environmental Quality*. 23: 1013–1018.
- McLaughlin, M.J., Parker, D.R., Clarke, J.M., 1999.** Metals and micronutrients - food safety issues. *Field Crops Research*. 60: 143 – 163.
- Merbach, W., Deubel, A., 2008.** Long-term field experiments- museum relics or scientific challenge? *Plant, Soil and Environment*. 54: 219-226.
- Moolenaar, S.W., Lexmond, Th.M., 1998.** Heavy-metal balances of agroecosystems in the Netherlands. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 46: 171 – 192.
- Mortvedt, J.J., 1996.** Heavy metal contaminants in inorganic and organic fertilizers. *Fertilizer Research*. 43: 55-61.
- Němeček, J., Macků, J., Vokoun, Vavříček D., Novák, P., 2001.** Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. ČZU, Prague.
- Nicholson, F.A., Chambers, B.J., Williams, J.R., Unwin, R.J., 1999.** Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales. *Bioresource Technology*. 70: 23-31.
- Novak, J.M., Watts, D.W., Stoke, K.C., 2004.** Copper and zinc accumulation, profile distribution and crop removal in coastal plain soils receiving long-term intensive applications of swine manure. *Transaction of the ASAE*. 47: 1513–1522.
- Oyedelele, D.J., Asonugho, C, Awotoye, O.O., 2006.** Heavy metals in soil and accumulation by edible vegetables after phosphate fertilizer application. *Electron Journal of Environmental Agricultural*.
- Panwar, B.S., Singh, J.P., Laura, R.D., 1999.** Cadmium uptake by cowpea and mungbean as affected by Cd and P application. *Water, Air, and Soil Pollution*. 112: 163-169.
- Pederson, G.A., Brink, G.E., Fairbrother, T.E., 2002.** Nutrient uptake in plant parts of sixteen forages fertilized with poultry litter: nitrogen, phosphorus, potassium, copper and zinc. *Agronomy Journal*. 94: 895–904.

- Piotrowska, M., Kabata-Pendias A., 1997.** Impact of soil amended with Zn and Pb smelter dust on Cd concentrations in potatoes. *Journal of Geochemical Exploration*.58: 319–322.
- Reimann, C., Arnoldussen, A., Boyd, R., Finne, E.T., Koller, F., Englmaier, P., Nordgulen, Ø., 2007.** Element contents in leaves of four plant species (birch, mountain ash, fern and spruce) along anthropogenic and geogenic concentration gradients. *Science of the Total Environment*. 377: 416–433.
- Schellberg, J., Hejcman, M., 2007.** The Rengen Grassland Experiment (1941-2006) and its contribution to grassland ecology. *Grassland Science in Europe* 12: 512-515.
- Smith, S.R., 1993.** Effect of soil pH on availability to crops of metal in sewage sludge-treated soils. II. Cadmium uptake by crops and implications for human dietary intake. *Environmental Pollution*. 86: 5–13.
- Souza, J.F., Rauser, W.F., 2003.** Maize and radish sequester excess cadmium and zinc in different ways. *Plant Science*. 165: 1009 – 1022.
- Sparrow, L.A., Salardini, A.A., Johnstone, J., 1994.** Field studies of cadmium in potatoes (*Solanum tuberosum* L.). III. Response of cv. Russet Burbank to sources of banded potassium. *Australian Journal of Agricultural Research*. 45: 243-249.
- Stalikas, C.D., Mantalovas A.Ch., Pilidis, A.G., 1997.** Multielement concentrations in vegetable species grown in two typical agricultural areas of Greece. *Science of the Total Environment*. 206: 17–24
- StatSoft., 1995.** Statistica for Windows. StatSoft, Tulsa
- Sucharová, J., Suchara, I., 2004.** Current multi-element distribution in forest epigeic moss in the Czech Republic—a survey of the Czech national biomonitoring programme 2000. *Chemosphere*. 57: 1389–1398.
- Šrek, P., Hejcman, M., Kunzová, E., 2010.** Multivariate analysis of relationship between potatoes (*Solanum tuberosum* L.) yield, amount of applied elements, their concentrations in tubers and uptake in the long-term fertilizer experiment. Submitted to *Field Crop Research*.
- ter Braak, C.J.F., Smilauer, P., 2002.** CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5) Microcomputer Power, Ithaca, NY, USA.
- Tlustoš, P., Balík, J., Dvořák, P., Száková, J., Pavlíková, D., 2001.** Zinc and lead uptake by three crops planted on different soils treated by sewage sludge. *Rostlinná Výroba*. 47: 129-134.

- Tlustoš, P., Pavlíková, D., Balík, J., Száková, J., Hanč, A., 2000.** The availability of sewage sludge derived cadmium and nickel by crops planted on soils of different types. *Rostlinná Výroba*. 46: 555-561.
- TWG., 2000.** Health Risk Evaluation of Select Metals in Inorganic Fertilizers Post Application. Report to the Fertilizer Institute, Washington, D.C.
- Upřety, D., Hejman, M., Száková, J., Kunzová, E., Tlustoš, P., 2009.** Concentration of trace elements in arable soil after long-term application of organic and anorganic fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 85: 241–252.
- van der Ploeg, R.R., Böhm, W., Kirkham, M.B., 1999.** History of soil science, on the Origin of the Theory of Nutrition of Plants and the Law of the Minimum. *Soil Science Society*. 63: 1055-1062.
- Vincenc, J., Belan, F., Adamec, V., 1996.** Kontaminace polních plodin v okolí Světlé nad Sázavou. *Acta Univ. Agric. et Silvicult. Mendel. Brunensis* 44: 1-4.
- Vitali, D., Dragojević, I.V., Šebečić, B., Validžić, K., 2007.** Assessment of toxic and potentially toxic elements in potato and cabbage grown in different locations in Croatia. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau*. 103: 424–430.
- Wang, G., Su, M.Y., Chen, Y.H., Lin, F.F., Luo, D., Gao, S.F., 2006.** Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in southeastern China. *Environmental Pollution*. 144: 127 – 135.
- Yao, L.X., Li, G.L., He, Z.H., Zhou, Ch.M., Yang, B.M., 2008.** Arsenic uptake by two vegetables grown in two soils amended with As-bearing animal manures. *Journal of Hazardous Materials*: In press.
- Zhou, D.M., Hao, X.Z., Wang, Y.J., Dong, Y.H., Cang, L., 2005.** Copper and Zn uptake by radish and pakchoi as affected by application of livestock and poultry manures. *Chemosphere*. 59: 167-175.

7. Přílohy

Příloha 1. Obsah prvků v hlízách brambor (mg kg^{-1})

Příloha 2. Obsah prvků ve slupkách brambor (mg kg^{-1})

Příloha 3. Průměrné koncentrace makro prvků v hlízách brambor (mg. kg^{-1} v sušině)

Příloha 4. Průměrný odběr makro prvků hlízami brambor (kg. ha^{-1} v sušině)

Příloha 5. Vliv výnosu na koncentraci niklu, kadmia a mědi v hlízách

Příloha 6. Vliv výnosu na obsah niklu, olova a arsenu ve slupkách brambor

Příloha 7. Multivariate analysis of relationship between potatoes (*Solanum tuberosum* L.)

yield, amount of applied elements, their concentrations in tubers and uptake in the long-term fertilizer experiment

Příloha 1. Obsah prvků v hlízách brambor (mg kg⁻¹)

vzorek	dílec	varianta	N	P	K	Ca	Mg	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
1	111	kontrola	13120,37	1888,13	9930,7	581,33	772,48	0,0529	0,0298	0,1229	3,9965	5,300	0,6264	0,0987	13,463
27	112	kontrola	12339,28	2066,47	10889,2	575,76	804,07	0,0433	0,0290	0,0521	4,2113	5,209	0,7135	0,3829	14,420
55	113	kontrola	10940,94	1865,81	10459,1	571,01	728,86	0,0466	0,0292	0,0758	4,3350	4,852	0,4760	0,2324	10,559
81	114	kontrola	13193,36	1864,32	10853,5	469,87	843,13	0,0503	0,0287	0,0899	4,2055	4,931	0,4791	0,0913	11,815
15	161	N4P2K2	11715,72	1602,26	16515,1	465,85	1008,44	0,0497	0,0338	0,0804	3,1413	5,259	0,8517	0,0025	10,804
38	162	N4P2K2	13135,26	1590,86	15715,6	470,48	1030,58	0,0532	0,0406	0,1333	3,5503	5,413	1,0632	0,1440	11,644
69	163	N4P2K2	11673,49	1783,53	17915,1	525,41	1201,28	0,0350	0,0528	0,0664	4,2201	6,466	1,4424	0,4283	13,754
92	164	N4P2K2	16702,13	1550,99	15429,9	518,19	958,44	0,0226	0,0347	0,0993	3,3436	5,017	0,7736	0,3107	10,087
10	711	KK	13522,18	1579,03	10150,7	432,87	785,71	0,0413	0,0273	0,1370	3,5955	5,171	0,5523	0,2564	10,795
36	712	KK	10468,75	1367,20	12563,9	536,54	907,20	0,0388	0,0251	0,0522	3,4657	4,927	0,4680	0,2053	9,698
52	713	KK	16268,63	1766,84	12633,5	531,92	939,66	0,0374	0,0270	0,0944	4,0441	5,380	0,5886	0,3029	13,537
78	714	KK	15448,54	1501,51	10502,6	469,30	750,97	0,0460	0,0267	0,2137	3,9920	4,986	0,5138	0,2798	11,932
24	761	KKN4P2K2	10949,98	1551,01	15723,1	474,16	1002,55	0,0509	0,0363	0,0709	2,8900	5,094	0,8388	0,2687	9,663
47	762	KKN4P2K2	9934,261	2377,10	16196,2	527,42	1055,07	0,0613	0,0341	0,1135	3,6909	6,325	0,8683	0,2246	14,729
66	763	KKN4P2K2	15062,74	1861,85	14571,8	512,12	989,88	0,0557	0,0402	0,0855	3,7386	6,208	1,1760	0,4038	13,906
89	764	KKN4P2K2	13324,25	1913,65	18301,6	457,36	1098,44	0,0520	0,0330	0,1143	3,2711	5,945	1,1047	0,3104	14,177

Příloha 2. Obsah prvků ve slupkách brambor (mg kg⁻¹)

vzorek	dílec	varianta	N	P	K	Ca	Mg	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
1	111	kontrola	20494,52	2028,82	17268,7	309,41	891,27	0,1343	0,0613	1,2547	6,0732	10,075	1,4347	2,1075	82,063
27	112	kontrola	17690,65	2332,61	23550,6	1167,99	1119,68	0,0421	0,0474	0,3514	5,4275	7,412	1,1305	0,5523	18,786
55	113	kontrola	16640,21	1745,40	24318,8	1234,77	1076,10	0,0416	0,0449	0,2192	5,4721	7,028	0,8169	0,2883	16,216
81	114	kontrola	20100,27	2083,29	22515,5	998,78	1045,29	0,0661	0,0474	0,2329	5,0696	5,899	0,8107	0,4025	13,590
15	161	N4P2K2	17007,07	1790,17	28895,5	1003,29	994,38	0,0413	0,0571	0,2839	4,4778	6,682	1,2783	0,1654	13,339
38	162	N4P2K2	18103,06	1869,11	24495,8	915,00	728,16	0,0214	0,0745	0,1044	4,7312	6,835	2,0374	0,2599	14,229
69	163	N4P2K2	16294,19	1823,97	33076,6	923,01	1178,73	0,0324	0,0696	0,1427	5,8384	7,714	2,5904	0,0323	17,958
92	164	N4P2K2	23463,92	1608,81	29494,9	969,72	1111,54	0,0623	0,0530	0,2523	4,4666	6,800	1,0056	0,5164	16,607
10	711	KK	18559,32	1883,58	21777,1	1023,53	903,66	0,0349	0,0374	0,2225	5,0754	7,396	0,6723	0,3384	14,833
36	712	KK	16920,79	1667,31	21333,5	1160,18	941,71	0,0291	0,0331	0,2604	4,8618	7,598	0,6393	0,0963	15,978
52	713	KK	21825,72	980,51	14489,0	723,74	659,37	0,0653	0,0223	0,1185	3,0988	4,178	0,4351	0,0519	9,088
78	714	KK	20111,9	1759,68	24533,5	759,89	977,40	0,0316	0,0337	0,1983	4,5792	5,869	0,7071	0,4531	13,050
24	761	KKN4P2K2	16166,86	1517,33	28483,6	1174,56	1068,41	0,0355	0,0411	0,2555	5,1545	7,077	0,7087	0,1283	16,239
47	762	KKN4P2K2	15229,63	2649,64	31866,5	1132,55	1149,28	0,0374	0,0457	0,3262	6,4048	8,339	1,7068	0,4044	20,585
66	763	KKN4P2K2	22239	1817,41	33073,6	1174,90	1241,51	0,0305	0,0638	0,2137	5,3665	7,896	1,9204	0,1486	18,566
89	764	KKN4P2K2	18170,67	2020,67	31845,4	1207,58	1101,03	0,0466	0,0556	0,1423	5,2387	7,650	1,6304	0,3316	20,842

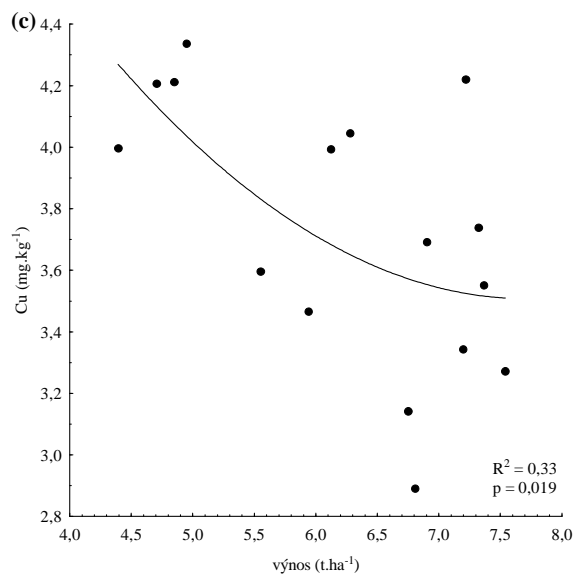
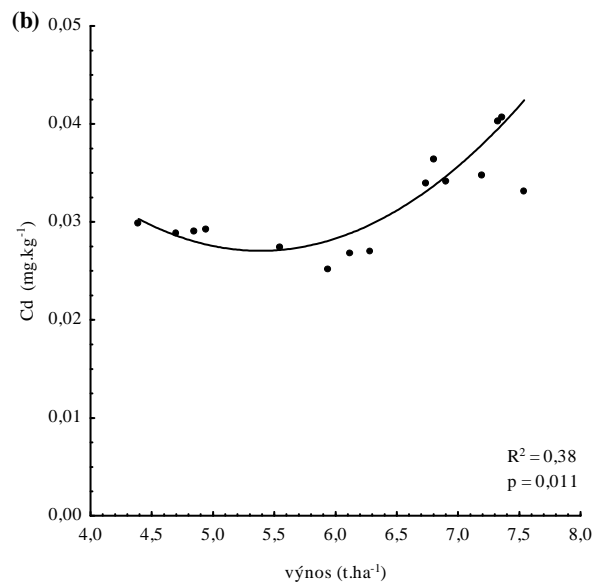
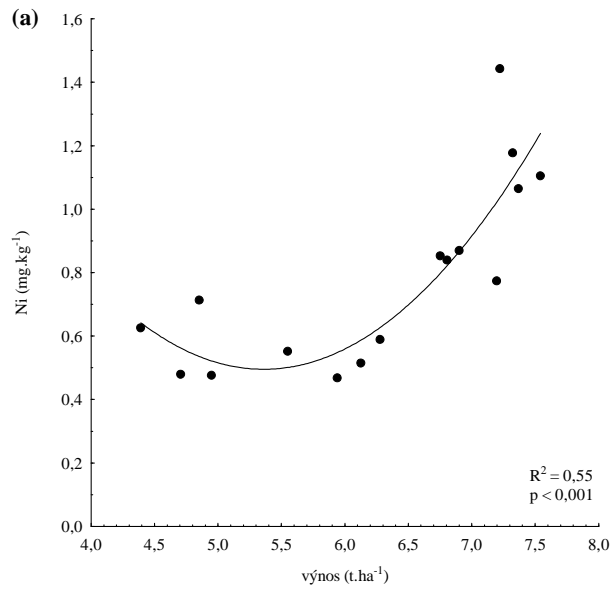
Příloha 3. Průměrné koncentrace makro prvků v hlízách brambor (mg. kg⁻¹ v sušině)

varianta	hlíza	N**	P ⁿ	K**	Ca**	Mg*
kontrola	H	11310 ^b	1921	10533 ^a	549 ^{ac}	787 ^a
	S	17413 ^a	2048	21913 ^b	928 ^{bc}	1033 ^{abc}
N4P2K2	H	12847 ^{bc}	1632	16394 ^{ab}	495 ^a	1050 ^{bc}
	S	17804 ^a	1773	28991 ^c	953 ^b	1003 ^{abc}
KK	H	12487 ^{bc}	1554	11463 ^a	493 ^a	846 ^{ab}
	S	17630 ^a	1573	20533 ^b	917 ^{bc}	871 ^{ab}
KKN4P2K2	H	15307 ^{ac}	1926	16198 ^{ab}	493 ^a	1036 ^{abc}
	S	21907 ^d	2001	31317 ^c	1172 ^b	1140 ^c

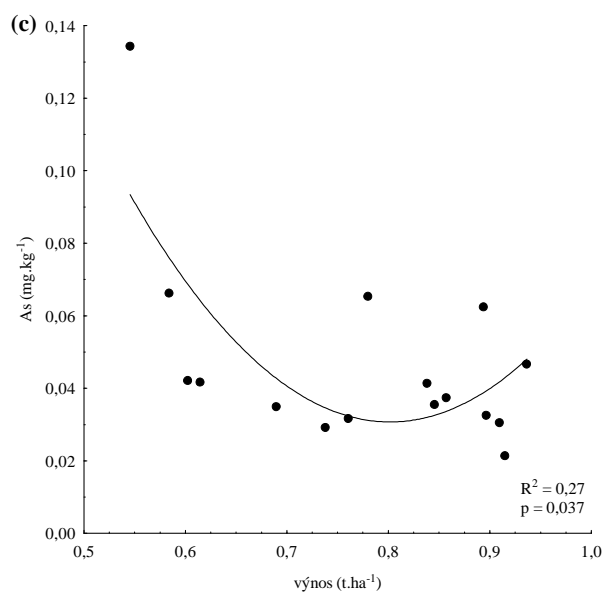
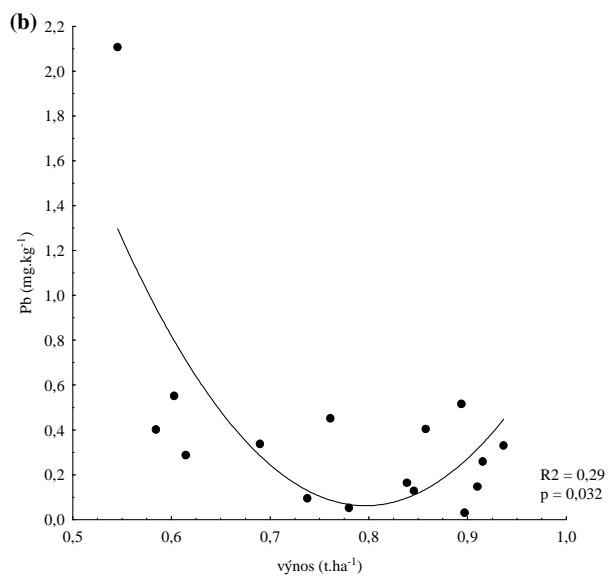
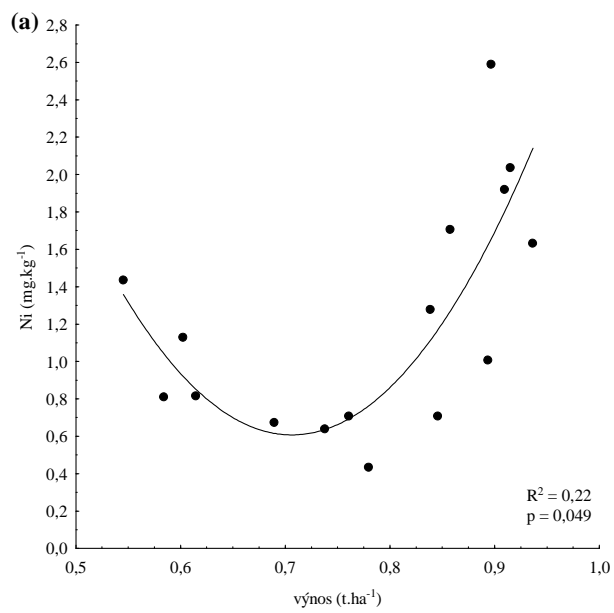
Příloha 4. Průměrný odběr makro prvků hlízami brambor (kg. ha⁻¹ v sušině)

varianta	hlíza	N**	P**	K**	Ca**	Mg**
kontrola	H	53,3 ^d	9,1 ^b	49,8 ^c	2,6 ^b	3,7 ^c
	S	10,2 ^a	1,2 ^a	12,9 ^a	0,6 ^a	0,6 ^a
N4P2K2	H	91,8 ^{bc}	11,6 ^{cd}	116,9 ^b	3,5 ^d	7,5 ^b
	S	15,8 ^a	1,6 ^a	25,7 ^a	0,8 ^a	0,9 ^a
KK	H	74,6 ^b	9,3 ^{bc}	68,7 ^d	3,0 ^{bc}	5,1 ^d
	S	13,1 ^a	1,2 ^a	15,2 ^a	0,7 ^a	0,6 ^a
KKN4P2K2	H	109,5 ^c	13,8 ^d	115,9 ^b	3,5 ^{cd}	7,4 ^b
	S	19,4 ^a	1,8 ^a	27,8 ^a	1,0 ^a	1,0 ^a

Příloha 5. Vliv výnosu na koncentraci niklu, kadmia a mědi v hlízách



Příloha 6. Vliv výnosu na obsah niklu, olova a arsenu ve slupkách brambor



Příloha 7.

Multivariate analysis of relationship between potatoes (*Solanum tuberosum* L.) yield, amount of applied elements, their concentrations in tubers and uptake in the long-term fertilizer experiment

Petr Šrek^{1,2}, Michal Hejcman^{1,2*}, Eva Kunzová²

¹Department of Ecology, Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences, Kamýcká 129, CZ-165 21 Prague 6 - Suchdol, Czech Republic

²Crop Research Institute, Drnovská 507, CZ-161 06 Prague 6 - Ruzyně, Czech Republic

* Corresponding author at: Department of Ecology, Czech University of Life Sciences, Kamýcká 1176, CZ-16521 Prague 6, Suchdol, Czech Republic.

E-mail address: hejcman@fzp.czu.cz (M. Hejcman).

Submitted to Field Crops Research

ABSTRACT

The Ruzyně Fertilizer Experiment (RFE, the Czech Republic) was established on a permanent arable field (illimerized Luvisol) in 1955. The aim of this study was to investigate how are concentrations and uptake of elements and potatoes yield affected by mineral N, P and K fertilizers, straw and pig slurry application.

Fifty three years of fertilizer application resulted in high gradient of P and K availability in studied treatments. Plant available (Mehlich III) soil P concentration below 30 mg kg⁻¹ and K below 150 mg kg⁻¹ were not adequate for satisfactory tuber production. No positive effect of long-term straw application on tuber yield was recorded. Optimal application rate of mineral fertilizers resulting in tuber yield above 30 t ha⁻¹ was 140 kg N, 63 kg P and 186 kg K per ha. The highest environmentally acceptable N application rate for potatoes was 120 kg N ha⁻¹ applied in the form of mineral fertilizer. Substantially higher production efficiency of mineral N, P and K fertilizers than production efficiency of pig slurry was recorded. Concentration of As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb and Zn in tubers was not significantly affected by fertilizer treatment although pig slurry supplied the soil by substantially higher amount of Cu and Zn than was taken up by tubers. Concentration of Pb exceeded Czech legislation DM limit (0.61 mg kg⁻¹) in 83% of samples, but there was no significant effect of fertilizer treatment. The main message of this paper is that in the Czech Republic, normal cropping practices do not significantly increase concentrations of trace elements in potatoes on neutral soils.

Keywords:

Arsen and Lead

Heavy metals

Nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers

Pig slurry

Redundancy analysis

Illimerized Luvisol

Trace and risk elements

1. Introduction

Potatoes (*Solanum tuberosum* L.) are one of the most important agricultural crops in the world. In the Czech Republic, potatoes has belonged among the main food crops as average annual consumption of tubers was 74 kg per capita in 1999 - 2006 (CSO, 2009). Potatoes cropping area was 30 000 ha representing 0.8% of total agricultural land in 2008 (CSO, 2009). Additionally to official cropping area, potatoes are frequently planted on privat gardens on approximately 5 000 ha. Average potatoes yield increased substantially from 11 t ha⁻¹ in 1920s to 23 t ha⁻¹ in period from 2000 to 2008 (CSO, 2009). An increase in potatoes yield was substantially lower in the Czech Republic than in Germany with comparable soil and climatic conditions especially because of lower NPK application rates and worse crop protection in the last decades. In Germany for example, average yield of potatoes was 36 t ha⁻¹ in 2000 (Chloupek et al., 2004). This is substantially higher than world average yield estimated on 17 t ha⁻¹ in the last decade (FAO, 2009).

Potatoes yield is highly affected by nutrient availability that is why search of appropriate fertilizer regime has received high attention worldwide (Westermann, 2005; Hamouz et al., 2007; Kulhánek et al., 2008). Phosphorus fertilizer application increased total tuber yield and yield of undersized tubers below 85 g but decreased the proportion of large-sized tubers above 285 g in study by Rosen and Bierman (2008). Increases in tuber number with P application have been found by many authors (Freeman et al., 1998; Jenkins and Ali 2000; Maier et al., 2002). Inadequate N fertilization leads to poor potato growth and yield, while excessive N application leads to delayed maturity, poor tuber quality, excessive nitrate leaching and occasionally reduction in tuber yield (Sharifi et al., 2005; Li et al., 2006; Haase et al., 2007; Kumar et al., 2007; Sincik et al., 2008; Arriaga et al., 2009).

Long-term application of various fertilizers can increase concentration of trace elements (heavy metals especially) in plant biomass because many fertilizers contain trace elements or can increase their mobility in the soil (Keller and Schulin 2003; Micó et al., 2006; Hejzman et al., 2009a; Hejzman et al., 2009b). Cadmium concentration in potatoes has received high attention as tubers accumulate Cd and their consumption in high quantity contributes substantially to human dietary Cd intake in many countries (McLaughlin et al., 1997). Concentration of Cd in plant tissues is a function of plant available Cd concentration in the soil (Panwar et al., 1999). Plant available Cd concentration can be high especially on soils with pH (H₂O) ranging from 4.5 to 5.5 that is why negative correlation between Cd concentration in tubers and soil pH was recorded by Smith (1993). Lime application increase

soil pH and can be used if decrease in Cd availability is required on acid soils (Lee et al., 2003). In addition to acid soils, high Cd concentration in potatoes has frequently been recorded on saline neutral or alkaline soils because of high Cl^- concentration in soil solution mobilize soil Cd and increase thus Cd availability to plants (McLaughlin et al., 1994; Maier et al., 1997; Smolders et al., 1998). Research of As, Cr and Pb concentrations in potatoes received substantially lower attention than Cd, although all these elements are highly toxic to crops as well as to human (Gichner et al., 2006; Pruvot et al., 2006; Luan et al., 2008; Zhuang et al., 2009).

Techniques of multivariate data analysis such ordinations (Lepš and Šmilauer, 2003) enable simultaneous analysis of wide range of data together. The advantage of ordination approach is that results can be visualized in the form of one ordination diagram enabling simple identification of relationships among all analyzed data. Using the ordination approach, the aim of this study was to investigate how concentrations and uptake of elements and potatoes yield are affected by long-term fertilizer application and how concentrations and uptake of elements and tuber yield are related each other?

2. Materials and methods

2.1. Site description

The Ruzyně Fertilizer Experiment (RFE) was established on permanent arable field in 1955. RFE is situated in close vicinity of east runway of the Prague-Ruzyně international airport ($50^{\circ}05'15''\text{N}$; $14^{\circ}17'28''\text{E}$) on the west edge of Prague, capital of the Czech Republic.

In the study site, mean annual temperature is 8.2°C (range from 6.4°C to 9.7°C) and mean annual precipitation is 422 mm (range from 255 mm to 701 mm; Prague-Ruzyně meteorological station, 1955-2007). According to the Czech taxonomic soil classification system (Němeček et al., 2001) the soil type was classified as illimerized luvisol (syn. illimerized gray-brown soil). The parent material is loess mixed with highly weathered chalk. The ground water level is 20 m below field surface. The upper 30 cm (arable layer) contains 27 % of clay, increasing to 40 % clay in soil layer 30 – 40 cm (subsoil) and to 49 % clay in soil layer 40 – 50 cm. Soil pH (H_2O) was 6.5 in the top 20 cm before establishment of the experiment in 1955.

2.2. Experimental design

The Ruzyně Fertilizer Experiment (RFE) is a large scale experiment consisted of five field strips (Fig. 1). Each field strip consists of 24 fertilizer treatments replicated four times and arranged in complete randomized block design (96 individual monitoring plots). Individual plot size is 12 m x 12 m and only central 5 m x 5 m plot have been used for experimental purposes. In this study, analysis of potatoes was performed only in strip number I named “Cereal crop rotation“ (67 % cereals, 11 % of root crops and 22 % of legumes). Crop sequence was alfalfa, alfalfa, winter wheat, winter wheat, spring barley, potatoes, winter wheat, winter wheat and spring barley with alfalfa under-sowing. In the experiment, following mineral fertilizers were used directly to potatoes: Calcium ammonium nitrate (27% N) in the rate 80 (N1), 100 (N2), 120 (N3) and 140 (N4) kg N ha⁻¹; super phosphate (8.3 % P) in the rate 43 (P1) and 63 (P2) kg P ha⁻¹, potassium chloride (49.8% K) in the rate 133 (K1) and 186 (K2) kg K ha⁻¹. Further in treatments with straw application marked as sII, 80% of N was applied as calcium ammonium nitrate and 20% as ammonium sulphate.

Following organic fertilizers were used: straw in low (sI) and high application rate (sII) and pig slurry mixed with straw (PSs). Pig slurry was applied in autumn before planting of root crops. List of treatments and amount of elements applied directly to potatoes is given in Table 1. Mean annual application of elements over all crops is given in Table 2.

Concentration of elements in applied mineral fertilizers used for calculations of application rates was taken from Uprety et al., (2009). Three samples of pig slurry were collected directly in the farm supplying the experiment by fertilizers. An each sample was a mixture of four sub-samples taken from different part of the fertilizer store. Slurry was dried in 60 °C up to total desiccation and 4.0% of dry matter content was determined. Concentration of As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn in dry matter was 0.36, 0.36, 9.5, 207, 497, 9, 2.4 and 1196 mg kg⁻¹, respectively. Determination of all elements was performed in the same way as in tubers described below.

In 2007 the soil chemical properties were analyzed according to the Mehlich III method (Mehlich, 1984) in selected treatments in autumn before planting of potatoes. Soil samples were taken as a mixture of ten sub-samples from the plough layer of selected treatments. The organic C and total N contents were determined by the NIRS method in an accredited national laboratory. To measure pH (KCl), 0.2 M solution was used and 20 g of soil was mixed with 50 ml of the solution.

2.3. *Potato tubers sampling and chemical analysis*

Ware salad medium-early and medium-size tuber variety Ditta was used in this study. Tubers were plough up by potato-digger and collected manually from soil surface. Two kilograms of fresh potatoes were collected from each plot during the harvest 10th September 2008. Tubers were washed carefully in deionized water, cut on strips and dried in 80°C up to total dessication. Dry matter content and dry matter yield of tubers was determined after dessication. The concentrations of elements in the potato tubers were determined by wet ashing procedur with increased pressure. Exactly 1 g of melted tubers was decomposed in a mixture of HNO₃ and H₂O₂. The ash was then decomposed by microwave ashing device CEM 2000 (CEM Corporation, USA) and diluted in *aqua regia*. The determination of As, Ca, Cd, Cr, Cu, K, Mg, Mn, Ni, Pb, S and Zn was carried out by optical emission spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-OES Thermo Jarrell Ash, Trace Scan, Franklin, USA), spectral lines: $\lambda = 189.0$ nm for As, $\lambda = 370.6$ nm for Ca, $\lambda = 214.4$ nm for Cd, $\lambda = 206.1$ nm for Cr, $\lambda = 324.7$ nm for Cu, $\lambda = 766.4$ nm for K, $\lambda = 383.8$ nm for Mg, $\lambda = 257.6$ nm for Mn, $\lambda = 231.6$ nm for Ni, $\lambda = 220.3$ nm for Pb, $\lambda = 182.6$ nm for S, and $\lambda = 213.8$ nm for Zn. N and P in potato tubers were measured by flow colorimeter (SAN plus SYSTEM, SKALAR, DE Breda, NETHERLANDS).

2.4. *Data analysis*

All univariate analyses were performed using the STATISTICA 8.0 software (StatSoft, Tulsa). One-way ANOVA followed by post-hoc comparison using Tukey's test was used to identify significant differences among treatments. Relationship between amount of N, P and K in tubers and yield of tubers or effect of N, P and K application rate on yield of tubers was analyzed by polynomial regression. A redundancy analysis (RDA) in the CANOCO 4.5 program (ter Braak and Šmilauer, 2002) was applied to evaluate all obtained data together. RDA was used because environmental variables (treatments) were in the form of categorical predictors (dummy variables). Standardization by species (dependant variables) was used because analyzed data were of various character and units. Further, a Monte Carlo permutation test with 999 permutations was used to reveal whether the treatments had a significant effect on all analyzed data. Results of the multivariate analyses were visualized in the form of a bi-plot ordination diagram by the CanoDraw program.

3. Results

3.1. Soil analysis

Basic soil chemical properties in selected treatments are given in Table 3. Long-term fertilizer application resulted in high gradient of P and K availability in studied treatments. Concentration of plant available P ranged from 21 to 112 mg ha⁻¹ in control and PSsN4P2K2 treatments, respectively and concentration of plant available K ranged from 122 to 353 mg ha⁻¹ in control and PSsN4P2K2 treatments.

3.2. Yield of tubers

Fresh matter yield of tubers ranged from 15.3 to 31.9 t ha⁻¹ in control and PSsN4P2K2 treatments, respectively (Table 4). There were no significant differences among control, sI and sII treatments which were significantly different from all other treatments. Mean dry matter content of tubers was 24.2 % and ranged from 22.8% to 25.8% in PSsN1P1K1 and control, respectively. Increase in potatoes yield was recorded up to N, P and K application rate 157, 43 and 210 kg ha⁻¹, respectively (Fig. 2). The highest tuber yield above 30 t ha⁻¹ was recorded in plots where approximately 150 kg N ha⁻¹, 15 kg P ha⁻¹ and 175 kg K ha⁻¹ was fixed in collected tubers (Fig. 3).

3.3. Concentration of elements in tubers

Concentrations of N, P, K, Ca, Mg and S in tubers are given in Table 4. Significant effect of treatment on concentration of N and P was recorded. Concentration of N ranged from 1.5 to 2.1 % in P2K2 and sIIP2K2 treatments, respectively. Concentration of P ranged from 0.15 to 0.22 % in PSs and PSsN4P2K2, respectively. Effect of treatment on concentration of K, Ca, Mg and S was not significant. Concentration of K ranged from 1.6 to 2.3 %, concentration of Ca ranged from 0.09 to 0.12 %, concentration of Mg ranged from 0.07 to 0.11 %, and concentration of S ranged from 0.08 to 0.10 %.

Concentrations of trace elements in potato tubers are given in Table 5. Effect of treatment on concentration of Ni was significant. Concentration of Ni ranged from 0.29 to 1.29 mg kg⁻¹ in sI and sIIP2K2 treatments, respectively. Concentration of As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, and Zn was not significantly affected by treatment.

3.4. Uptake of elements

Uptakes of N, P, K, Ca, Mg and S are given in Table 6. Significant effect of treatment on uptake of N, P, K, Ca, Mg and S was recorded. Uptake of N ranged from 63 to 150 kg ha⁻¹ in sII and PSsN4P2K2 treatments, respectively. Uptake of P ranged from 6.1 to 15.5 kg ha⁻¹ in control and PSsN4P2K2 treatments, respectively and uptake of K ranged from 63 to 159 kg ha⁻¹ in control and sIN2P1K1 treatments, respectively. Uptake of Ca ranged from 3.6 to 8.4 kg ha⁻¹ in sII and sIIN4P2K2 treatments, respectively and uptake of Mg ranged from 3.2 to 8.2 kg ha⁻¹ in control and sIIN4P2K2 treatments, respectively. Uptake of S ranged from 3.6 to 7.2 kg ha⁻¹ in control, sII and PSsN3P2K2 treatments, respectively.

Uptakes of trace elements are given in Table 7. Effect of treatment on uptake of Cu, Fe, Ni and Zn was significant, but effect of treatment on uptake of As, Cd, Cr, Mn and Pb was not significant.

3.5. Relationship among yield of tubers, amount of applied elements, their concentrations in tubers and uptake

Calculated by RDA, effect of treatment on all analyzed data together was significant ($F = 4.0$; $P = 0.001$) and explained 69 % of total data variability. Relations among all analyzed data and their relations to investigated treatments are clearly visible from ordination diagram in Fig. 4. In the diagram, the length and direction of the vectors relating to the individual elements indicate the association of elements with their respective treatments. Further, angle between two selected elements indicate their mutual relationship and vector length indicate importance for the result of the analysis. For example there was a positive correlation between N application (NA), N concentration in tubers (NC), N uptake (NU) and yield of tubers as angles among all N vectors and yield were acute. To demonstrate these correlations, simple linear regressions were calculated - N concentration in tubers and N uptake was significantly related to N application (Table 8). The similar positive correlations were recorded for P and K as well. In the case of trace elements, significantly positive correlation between amount of applied element, concentration in tubers and uptake was recorded only in the case of As. There was no obvious relation between amount of applied Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn and their concentrations in tubers and their uptake (Table 8).

4. Discussion

4.1. Yield of tubers

In the climatic and soil conditions of the study site, optimal application rate of mineral fertilizers resulting in tuber yield above 30 t ha⁻¹ was 140 kg N, 63 kg P and 186 kg K per ha (treatment N4P2K2). Based on results of regression analyses, further increase in application of N, P and K by combination of mineral together with organic fertilizers did not result in economically and environmentally viable additional increase in tuber yield. Maximal tuber yield (31 t ha⁻¹) was lower than average potatoes yield in Germany in 2000 (36 t ha⁻¹, Chloupek et al., 2004) and substantially lower than yields (45 t ha⁻¹) recorded by Hamouz et al. (2005) under intensive cropping system in the Czech Republic. Further in the RFE, the year 2008 was not as favorable for potato production as year 2007, but was similar to year 2009 because potatoes yield ranged from 23.8 to 41.8 t ha⁻¹ in 2007 and from 20.6 to 32.7 t ha⁻¹ in 2009 (unpublished data from other field strips). This indicates lower suitability of the study site for potatoes production probably due to shortage of moisture and low predictability of precipitation during the vegetation season. In the Czech Republic, the main potatoes cropping area is in altitudes ranging from 400 to 700 m a. s. l. where precipitation is higher and slightly acid soils are developed (Hejcman and Kunzová, 2010). Further, there was probably an effect of variety because variety Ditta used in this study is known to be lower yielding than varieties used in study by Hamouz et al. (2005). Yield of Ditta variety was 93 % of average yield of 28 medium-early varieties commonly planted in 2004 - 2007 in the Czech Republic (ÚKZÚZ, 2008). In addition to N4P2K2 treatment, the yields of tubers above 30 t ha⁻¹ were recorded in treatments with combination of high rates of mineral NPK fertilizers with straw (treatments sIN4P2K2 and sIIN4P2K2) or mineral NPK fertilizers combined with pig slurry (treatments PSsN1P1K1, PSsN2P1K1, PSsN3P2K2, PSsN4P2K2). This result clearly demonstrates no positive effect of long-term straw application on tuber yields. This enables alternative (energetic for example) use of straw without detrimental effect on potatoes production. Pig slurry combined with straw increased tuber yield by almost 7 t ha⁻¹ in comparison to the control, but this increase was substantially lower than in the case of lower amount of N supplied by mineral fertilizers in N4P2K2 treatment. This result clearly indicates higher production efficiency of mineral fertilizers than production efficiency of pig slurry. Although pig slurry was applied in high application rate (245 kg N ha⁻¹), pig slurry was not able to fully substitute mineral fertilizers. This conclusion is consistent with other studies demonstrating substantially higher tuber yields under use of mineral than organic fertilizers (Hamouz et al., 2005; Haase et al., 2007). The release of nutrients from pig slurry was

probably not synchronized with nutritional requirements of the potatoes similarly as in the study by van Delden (2001). Further, pig slurry was applied in the autumn and potatoes were planted in the following spring. Availability of N and K was therefore probably reduced by leaching because winter is the most sensitive time for elements leaching in Central Europe (Kayser et al., 2009).

4.2. Concentration of elements in tubers

Concentration of Cd in tubers ranging from 0.02 to 0.07 mg kg⁻¹ was substantially lower than concentrations recorded by many other authors: 0.3 – 1.0 mg kg⁻¹ by Dudka et al. (1995), 0.15 – 3.88 mg kg⁻¹ by Dudka et al. (1996), 0.11 – 3.72 mg kg⁻¹ by Piotrowska and Kabata-Pendias (1997) or 0.24 – 1.12 mg kg⁻¹ by McLaughlin et al. (1997).

The possible explanation of different results is application of low amount of Cd by fertilizers in the current study as well as by neutral soil pH resulting in low Cd mobility in the study site (Uprety et al., 2009). Interesting was low concentration of Cd in tubers although concentration of total Cd in the soil was above Czech legislation limit. This indicates low connection between total content of Cd in the soil and Cd concentration in tubers.

Concentration of Pb ranging from 0.49 to 1.37 mg kg⁻¹ was higher or comparable with concentrations recorded by other authors: 0.3 – 0.4 mg kg⁻¹ by Pruvot et al., (2006), 0.5 – 4.5 mg kg⁻¹ by Dudka et al. (1995), 0.2 – 15.4 mg kg⁻¹ by Dudka et al. (1996), 3.19 by Antonious and Snyder (1997) or 0.12 – 1.52 mg kg⁻¹ by Vitali et al. (2007). Concentration of Pb exceeded Czech legislation limit 0.61 mg kg⁻¹ in 19 from 23 investigated treatments although total Pb concentration in the soil was far below legislation limit (Uprety et al., 2009). The possible explanation of high Pb concentrations in tubers is probably increased aerial deposition of Pb within the study site, because the experiment is in close vicinity of Prague-Ruzyně international airport and highway (see Fig. 1). According to experiences of other authors (Hayashi, 1980) aerial transport and road traffic is connected with increase in Pb deposition. Further, unpeeled tubers were used in this study and peeling may reduce Pb concentration in tubers markedly (Dudka et al., 1996). On the other hand, similarly high Pb concentrations in 45% of potato tubers marked in Croatia were recorded by Vitali et al. (2007).

Concentrations of Cu, Mn and Zn ranging from 3.5 to 5.7 mg kg⁻¹, 5.8 to 9.3 mg kg⁻¹ and from 13.6 to 24.5 mg kg⁻¹ were comparable with values published by Mansour et al. (2009). Although pig slurry supplied the soil by considerable amount of Cu, Mn and Zn, there was no

significant effect of pig slurry application on Cu, Mn and Zn concentrations in tubers. Concentrations of As ranging from 0.03 to 0.07 mg kg⁻¹ and was deep below Czech legislation limit 1.24 mg kg⁻¹ in all investigated treatments. Concentration of As was comparable with values for cabbage (0.083 mg kg⁻¹), beet bulb (0.033 mg kg⁻¹), tamarind (0.045 mg kg⁻¹) and sugar cane (0.05 mg kg⁻¹) published by Stalikas et al. (1997) and Zarcinas et al. (2004). On the other hand, concentration of As in potato tubers was often below detection limit in study by Vitali et al. (2007). Although there was no significant effect of treatment on As concentrations in tubers, revealed significant positive correlation between amount of applied As and As concentration in tubers indicate slightly positive effect of fertilizers application on As concentration in tubers. Concentrations of Cr and Ni were below the Czech legislation limit and are consistent with concentrations recorded by Dudka et al. (1995) and Mansour et al. (2009).

4.3. Uptake of elements

Differences in N uptake between treatments were predetermined by tuber yields rather than by N concentration in tubers. Difference between amount of applied N and amount of removed N was negative in control, straw treatments as well as in mineral fertilizer treatments up to N application rate 120 kg N ha⁻¹. Additional increase in N application resulted in N surplus ranging from 5 kg ha⁻¹ to 235 kg in N4P2K2 and PSsN4P2K2 treatments, respectively. The highest N surplus was recorded in all treatments with pig slurry application indicating possible risks of N leaching and ground water pollution. Based on this result, the highest environmentally acceptable N application rate for potatoes was determined on 120 kg N ha⁻¹ applied in the form of mineral fertilizer. Highly negative balance for N in low N treatments must be taken with caution as nitrogen fixing legumes were included in crop rotation and study site is in close vicinity of airport, highway and city centre with high N deposition.

Similarly to N, differences in P and K uptake between treatments were predetermined rather by tuber yield than by P and K concentrations in tubers. In control and straw treatments, annual balance for P ranged from -5 to -6 kg ha⁻¹ and for K ranged from -55 to -64 kg ha⁻¹. This was well reflected by low plant available P and K concentrations in the soil after 57 year of the experiment. Evidently soil P and K concentrations (Mehlich III) below 30 mg kg⁻¹ and below 150 mg kg⁻¹ indicate P and/or K colimitation of tuber production as significantly higher tuber yield was recorded in P2K2 treatment with higher P and K application and P and K soil concentrations than in control and straw treatments.

No differences in As, Cd, Cr, Mn and Pb uptake between treatments were recorded. Uptake of Cd, Cr, Ni and Pb ranged from 0.12 to 0.47 g.ha⁻¹, 0.6 to 2.9 g.ha⁻¹, 1.3 to 8.8 g.ha⁻¹ and 2.1 to 8.0 g.ha⁻¹, were markedly lower than uptake of Cd (0.3 to 2.35 g.ha⁻¹), Cr (0.17 – 6.11 g.ha⁻¹), Ni (0.77 to 5.05 g.ha⁻¹) and Pb (1.55 to 12.3 g.ha⁻¹) recorded by Lafond and Simard (1999). In the case of As, Cd, Cr and Mn, slight surplus was recorded only in several treatments with pig slurry combined with mineral fertilizers application. Surplus of As was 1.10 g.ha⁻¹ in PSsN4P2K2, surplus of Cd was 1.09 g ha⁻¹ in PSsN3P2K2, surplus of Cr was 33.3 g ha⁻¹ in PSsP2K2 and surplus of Mn was 941 g ha⁻¹ in PSsN4P2K2. Further, uptake of Pb was higher than amount supplied by fertilizers to potatoes almost in all treatments with exception of slight surplus (<1 g ha⁻¹) in PSs, PSsN4P2K2 and PSsN3P2K2 treatments. This probably explains why no soil contamination by Pb was recorded by Uprety et al., (2009) in the study site and why aerial deposition seems to be main source of Pb for potatoes. Uptake of Cu was clearly predetermined by tuber yield and was relatively independent on amount of Cu supplied by fertilizers. In treatments with pig slurry application, annual surplus of Cu was higher than 350 g ha⁻¹. Differences of Ni and Zn uptake between treatments were predetermined by both - concentration of Ni and Zn in tubers as well as by tuber yield. Uptake of Ni and Zn was higher than amounts supplied to potatoes in all mineral fertilizer treatments. On the other hand, in treatments with pig slurry application, surplus of Ni ranged from 14.8 to 17.4 g ha⁻¹ in PSs and PSsN3P2K2 treatments respectively and surplus of Zn ranged from 2260 to 2281 g ha⁻¹ in PSs and PSsN3P2K2 treatments. Accumulation of Zn and Cu in the soil due to pig slurry application is in agreement with many other studies (De la Torre et al., 2000; Novak et al., 2004; Berenguer et al., 2008).

5. Conclusions

Long-term fertilizer application resulted in high gradient of P and K availability in studied treatments. Plant available (Mehlich III) soil concentrations of P below 30 mg kg⁻¹ and K below 150 mg kg⁻¹ are not adequate for satisfactory tuber production. No positive effect of long-term straw application on tuber yield was recorded. Optimal application rate of mineral fertilizers resulting in tuber yield above 30 t ha⁻¹ was 140 kg N, 63 kg P and 186 kg K per ha. The highest environmentally acceptable N application rate for potatoes was determined on 120 kg N ha⁻¹ applied in the form of mineral fertilizer. Substantially higher production efficiency of mineral NPK fertilizers that production efficiency of pig slurry was recorded. Concentration of As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, and Zn in tubers was not significantly affected

by fertilizer treatment although pig slurry supplied the soil by substantially higher amount of Cu and Zn than was taken up by tubers. Concentration of Pb exceeded Czech legislation DM limit (0.61 mg kg^{-1}) in 83% of samples but there was no significant effect of fertilizer treatment. The main message of this paper is that in the Czech Republic, normal cropping practices do not significantly increase concentrations of trace elements in potatoes on neutral soils.

Acknowledgement

The authors are deeply indebted to Ing. Milan Škarda, CSc., the founder of the experiment. We gratefully acknowledge the financial support provided by the Czech Ministry of Agriculture enabling the long-term existence of the experiment. Special thanks go to Mr. Ivičic for their technical support and to anonymous reviewers for their useful comments. Data collection and finalization of the paper was supported by the projects MZE 0002700604 and GAČR 521/08/1131.

References

- Antonious, G.F., Snyder, C.J., 2007. Accumulation of heavy metals in plants and potential phytoremediation of lead by potato, *Solanum tuberosum* L. J. Environ. Sci. Heal. 42, 811–816.
- Arriaga, F.J., Lowery, B., Kelling, K.A., 2009. Surfactant impact on nitrogen utilization and leaching in potatoes. Am. J. Pot. Res. 86, 383–390.
- Berenguer, P., Cela, S., Santiveri, F., Boixadera, J., Lloveras, J., 2008. Copper and zinc soil accumulation and plant concentration in irrigated maize fertilized with liquid swine manure. Agron J. 100, 1056–1061.
- CSO, 2009. Statistical yearbook of the Czech Republic. Czech Statistical Office, Prague.
- De la Torre, A.I., Jiménez, J.A., Carballo, M., Fernandez, J.R., Munoz, M.J., 2000. Ecotoxicological evaluation of pig slurry. Chemosphere 4, 1629–1635.
- Dudka, S., Piotrowska, M., Chlopecka, A., Witek, T., 1995. Trace metal contamination of soil and crop plants by the mining and smelting industry in Upper Silesia, South Poland. J. Geochem. Explor. 52, 237–250.
- Dudka, S., Piotrowska, M., Terelak, H., 1996. Transfer of cadmium, lead and zinc from industrially contaminated soil to crop plants: a field study. Environ. Pollut. 94, 181–188.
- FAO, 2009. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization, Rome.
- Freeman, K.L., Franz, P.R., de Jong, R.W., 1998. Effect of phosphorus on the yield, quality, and petiolar phosphorus concentrations of potatoes (cvv. Russet Burbank and Kennebec) grown in the krasnozem and duplex soils of Victoria. Aust. J. Exp. Agric. 38, 83–93.
- Gichner, T., Patková, Z., Száková, J., Demnerová, K., 2006. Toxicity and DNA damage in tobacco and potato plants growing on soil polluted with heavy metals. Ecotox. Environ. Safe. 65, 420–426.
- Haase, T., Schüller, C., Hess, J., 2007. The effect of different N and K sources on tuber nutrient uptake, total and graded yield of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) for processing. Europ. J. Agron. 26, 187–197.
- Hamouz, K., Lachman, J., Dvořák, P., Pivec, V., 2005. The effect of ecological growing on the potatoes yield and quality. Plant Soil Environ. 51, 397–402.
- Hayashi, M., 1980. Metal concentrations in tissues of dogs living in an airport area. Bulletin Environ. Contam. Toxic. 25, 246–251.

- Hejcman, M., Kunzová, E., 2010. Sustainability of winter wheat production on sandy-loamy Cambisol in the Czech Republic: Results from a long-term fertilizer and crop rotation experiment. *Field Crops Res.* In press.
- Hejcman, M., Száková, J., Schellberg, J., Šrek, P., Tlustoš P. 2009a. The Rengen Grassland Experiment: soil contamination by trace elements after 65 years of Ca, N, P and K fertiliser application. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 83, 39–50.
- Hejcman, M., Száková, J., Schellberg, J., Šrek, P., Tlustoš, P., Balík, J., 2009b. The Rengen Grassland Experiment: bryophytes biomass and element concentrations after 65 years of fertilizer application. *Environ. Monit. Assess.* In press.
- Chloupek, O., Hrstková, P., Schweigert, P., 2004. Yield and its stability, crop diversity, adaptability and response to climate change, weather and fertilisation over 75 years in the Czech Republic in comparison to some European countries. *Field Crop Res.* 85, 167–190.
- Jenkins, P.D., Ali, H., 2000. Phosphate supply and progeny tuber numbers in potato crops. *Annals Appl. Biol.* 135, 431–238.
- Kayser, M., Müller, J., Isselstein, J., 2009. Nitrogen management in organic farming: comparison of crop rotation residual effects on yield, N leaching and soil conditions. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* In press.
- Keller, A., Schulín, R., 2003. Modelling heavy metal and phosphorus balance for farming systems. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 66, 271–284.
- Kulhánek, M., Balík, J., Černý, J., Schweitzer, K., Vaněk, V., Prášilová, M., 2008. Evaluating of phosphorus quantity/intensity parameters in soil with different systems of organic fertilising. *Plant Soil Environ.* 54, 389–394.
- Kumar, P., Pandey, S.K., Singh, B.P., Singh, S.V., Kumar, D., 2007. Effect of nitrogen rate on growth, yield, economics and crips quality of Indian potato processing cultivars. *Am. J. Pot. Res.* 50, 143–155.
- Lafond, J., Simard, R.R., 1999. Effect of cement kiln dust on soil and potato crop quality. *Am. J. Pot. Res.* 75, 83–90.
- Lee, T.M., Lai, H.Y., Chen, Z.S., 2003. Effect of chemical amendments on the concentration of cadmium and lead in long-term contaminated soils. *Chemosphere* 57, 1459–1471.
- Lepš, J., Šmilauer, P., 2003. *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO.* Cambridge University Press, Cambridge.

- Li, H., Parent, L.E., Karam, A., 2006. Simulation modeling of soil and plant nitrogen use in a potato cropping system in the humid and cool environment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 115, 248–260.
- Luan, Z.Q., Cao, H.C., Yan, B.X., 2008. Individual and combined phytotoxic effects of cadmium, lead and arsenic on soybean in Phaeozem. *Plant Soil Environ.* 54, 403–411.
- Maier, A.M., McLaughlin, J.M., Heap, M., Butt, M., Smart, K.M., Williams, C.J.M., 1997. Effect of current-season application of calcitic lime on soil pH, yield and cadmium concentration in potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 47, 29–40.
- Maier, N.A., McLaughlin, M.J., Heap, M., Butt, M., Smart, M.K., 2002. Effect of current-season application of calcitic lime and phosphorus fertilization on soil pH, potato growth, yield, dry matter content, and cadmium concentration. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33, 2145–2165.
- Mansour, A.S., Mohamed B.H., Abou-Arab, A.A.K., Ashour, H.M., Gad, F.M., 2009. Evaluation of some pollutant levels in conventionally and organically farmed potato tubers and their risk to human health. *Food Chem. Toxicol.* 47, 615–624.
- McLaughlin, J.M., Maier, A.N., Rayment, E.G., Sparrow, A.L., Berg, G., McKay, A., Milham, P., Merry, H.R., Smart, K.M., 1997. Cadmium in Australian potato tubers and soils. *J. Environ. Qual.* 26, 1644–1649.
- McLaughlin, M.J., Palmer, L.T., Tiller, K.G., Beech, T.A., Smart, M.K., 1994. Increased soil salinity causes elevated cadmium concentrations in field-grown potato tubers. *J. Environ. Qual.* 23, 1013–1018.
- Mehlich, A., 1984. Mehlich No. 3 soil test extractant: A modification of Mehlich No. 2. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 15, 1409–1416.
- Micó, C., Peris, M., Recatalá, L., Sánchez, J., 2006. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere* 65, 863–872.
- Němeček, J., Macků, J., Vokoun, J., Vavříček, D., Novák, P., 2001. Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. ČZU, Prague.
- Novak, J.M., Watts, D.W., Stoke, K.C., 2004. Copper and zinc accumulation, profile distribution and crop removal in coastal plain soils receiving long-term intensive applications of swine manure. *Trans ASAE.* 47, 1513–1522.
- Panwar, B.S., Singh, J.P., Laura, D.R., 1999. Cadmium uptake by cowpea and mungbean as affected by Cd nad P application. *Water Air Soil Pollut.* 112, 163–169.

- Piotrowska, M., Kabata-Pendias A., 1997. Impact of soil amended with Zn and Pb smelter dust on Cd concentrations in potatoes. *J. Explor.* 58, 319–322.
- Pruvot, C., Douay, F., Hervé, F., Waterlot, C., 2006. Heavy metals in soil, crops and grass as a source of human exposure in the former mining areas. *J. Soils Sediments* 6, 215–220.
- Rosen, C.J., Bierman P.M., 2008. Potato yield and tuber set as affected by phosphorus fertilization. *Am. J. Pot. Res.* 85, 110–120.
- Sharifi, M., Zebarth, B.J., Hajabbasi, M.A., Kalbasi, M., 2005. Dry matter and nitrogen accumulation and root morphological characteristics of two clonal selections of ‘Russet Norkotah’ potato as affected by nitrogen fertilization. *J. Plant Nutr.* 28, 2243–2253.
- Sincik, M., Turan, Z.M., Göksoy, A.T., 2008. Responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to green manure cover crop and nitrogen fertilization rates. *Am. J. Pot. Res.* 85, 150–158.
- Smith, S.R., 1993. Effect of soil pH on availability to crops of metal in sewage sludge-treated soils. II. Cadmium uptake by crops and implications for human dietary intake. *Environ. Pollut.* 86, 5–13.
- Smolders, E., Lambregts, R.M., McLaughlin, M.J., Tiller, K.G., 1998. Effect of soil solution chloride on cadmium availability to Swiss chard. *J. Environ. Qual.* 27, 426–431.
- Stalikas, C.D., Mantalovas A.Ch., Pilidis, A.G., 1997. Multielement concentrations in vegetable species grown in two typical agricultural areas of Greece. *Sci. Total Environ.* 206, 17–24.
- ter Braak, C.J.F., Smilauer, P., 2002. CANOCO Reference Manual and CanoDraw for Windows User’s Guide: Software for Canonical Community Ordination (Version 4.5) Microcomputer Power, Ithaca, NY, USA.
- ÚKZÚZ, 2008. Přehled odrůd bramboru. Národní odrůdový úřad, Brno.
- Uprety, D., Hejzman, M., Száková, J., Kunzová, E., Tlustoš, P., 2009. Concentration of trace elements in arable soil after long-term application of organic and inorganic fertilizers. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 85, 241–252.
- van Delden, A., 2001. Yield and growth components of potato and wheat under organic nitrogen management. *Agron. J.* 93, 1370–1385.
- Vitali, D., Dragojević, I.V., Šebečić, B., Validžić, K., 2007. Assessment of toxic and potentially toxic elements in potato and cabbage grown in different locations in Croatia. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau* 103, 424–430.
- Westermann D.T., 2005. Nutritional requirements of potatoes. *Am. J. Pot. Res.* 82, 301–307.
- Zarcinas, B.A., Pongsakul, P., McLaughlin, M.J., Cozens, G., 2004. Heavy metals in soils and crops in southeast Asia. 2. Thailand. *Environ. Geochem. Health* 26, 359–371.

Zhuang, P., McBride, M.B., Xia, H., Li, N., Li, Z., 2009. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. *Sci. Total Environ.* 407, 1551–1561.

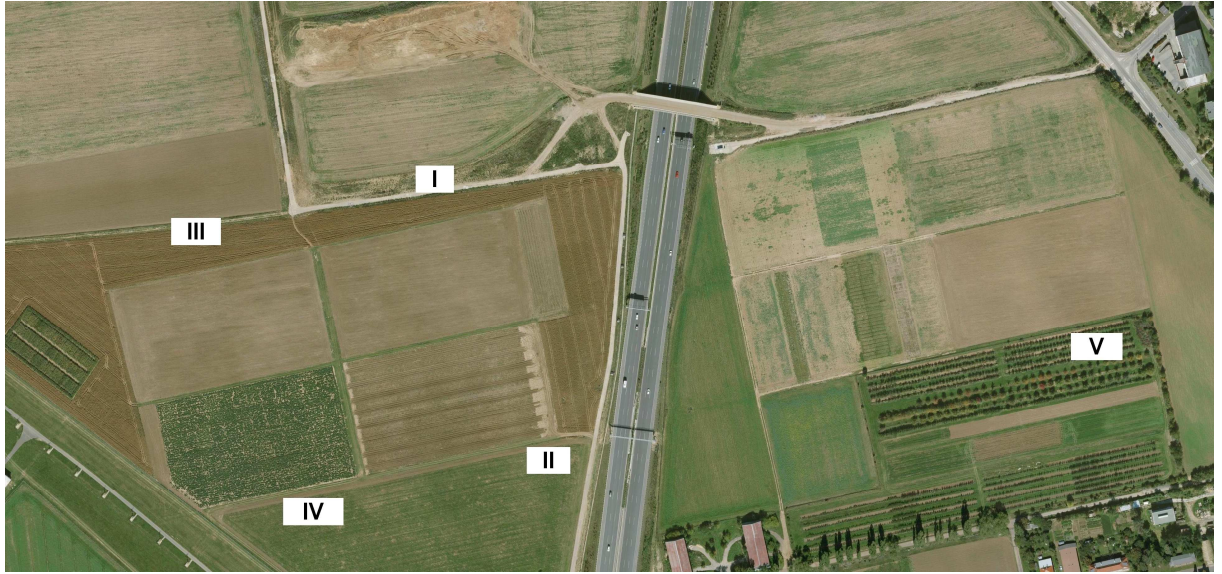


Fig. 1. Aerial photograph of the Ruzyně Fertilizer Experiment (RFE) established in 1955. Latin numbers (I – V) indicate still existing experimental strips. Potatoes were planted in strip number I in 2008. Five experimental strips were lost due to highway construction in 1990s. Runway centre-line lights in the bottom left hand corner of the photograph indicate close vicinity of the international airport Prague-Ruzyně.

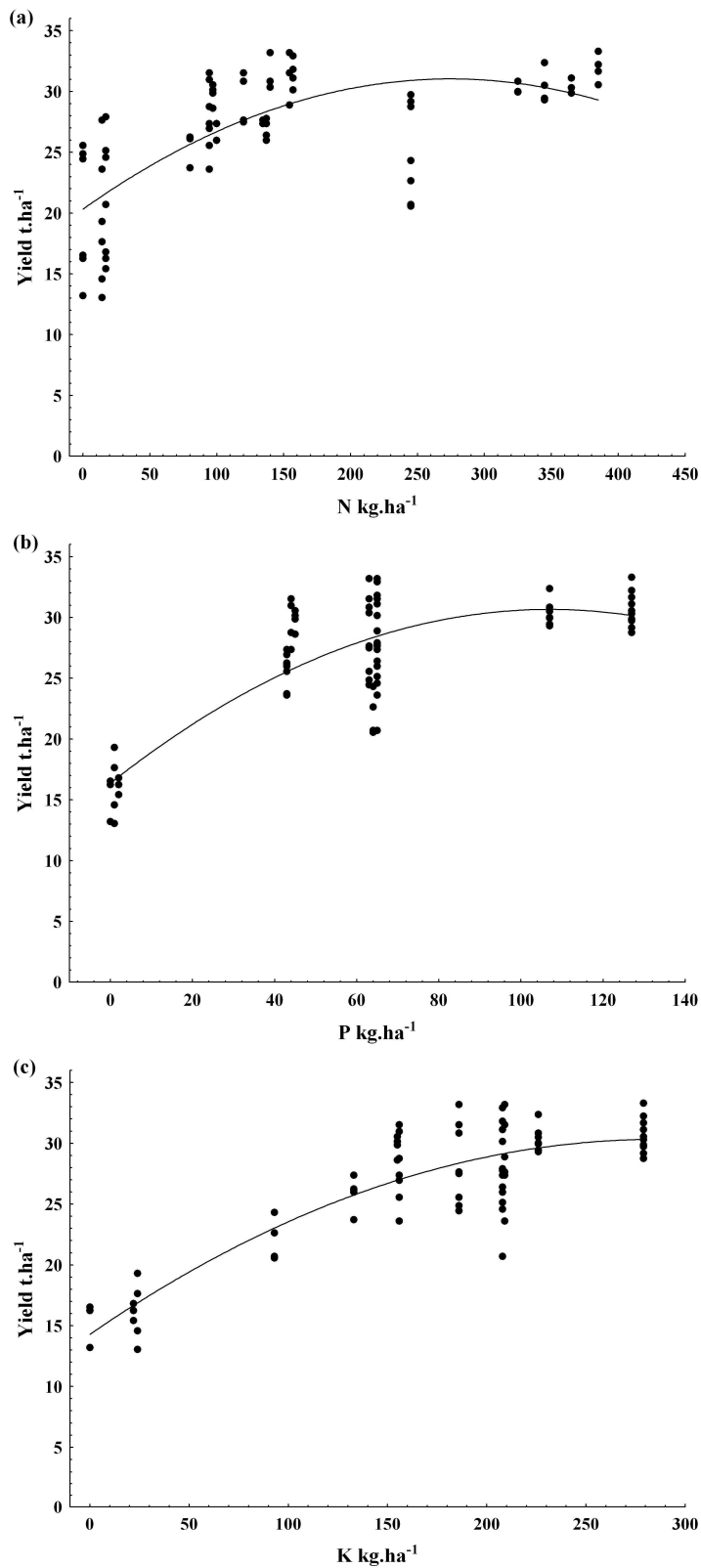


Fig. 2. Effect of N (a), P (b) and K (c) application rate on yield of potatoes.

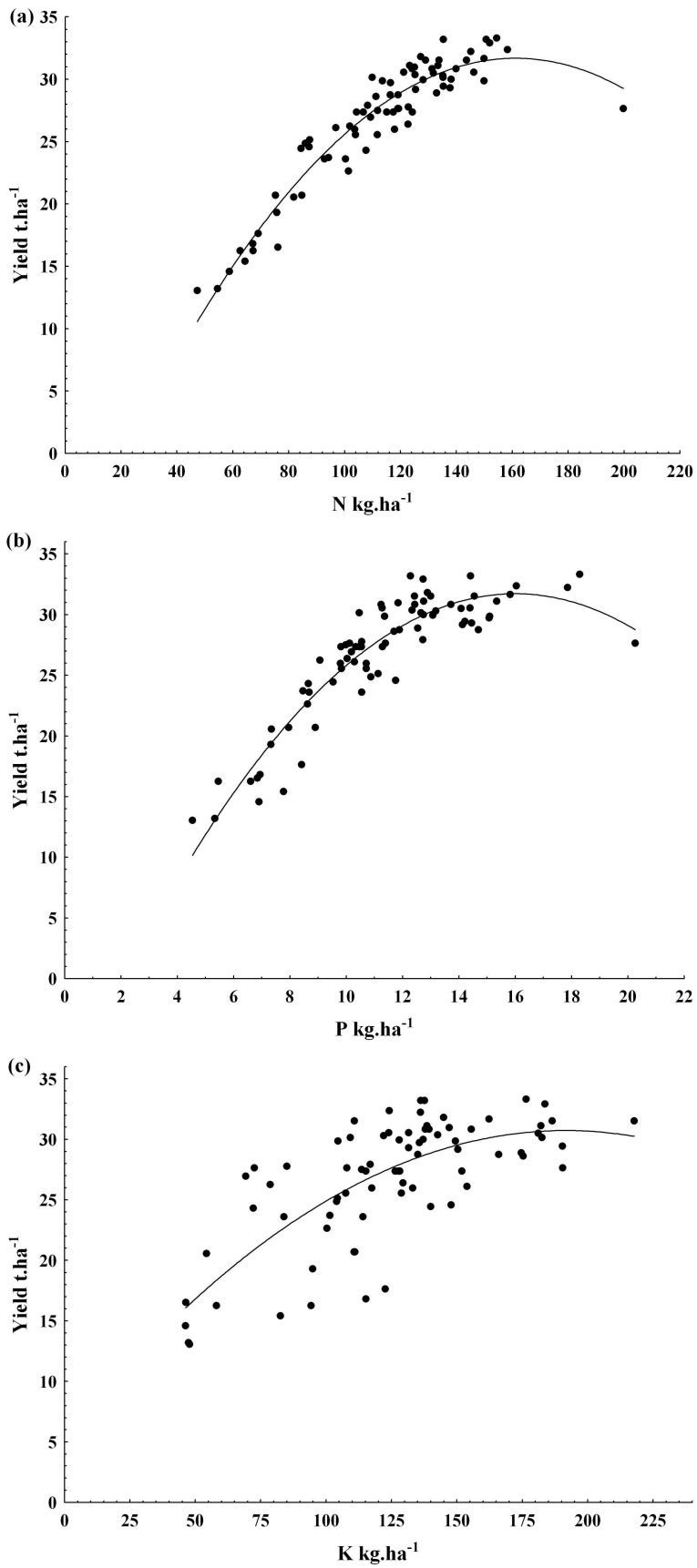


Fig. 3. Potatoes yield as a function of amount of N (a), P (b) and K (c) in collected tubers.

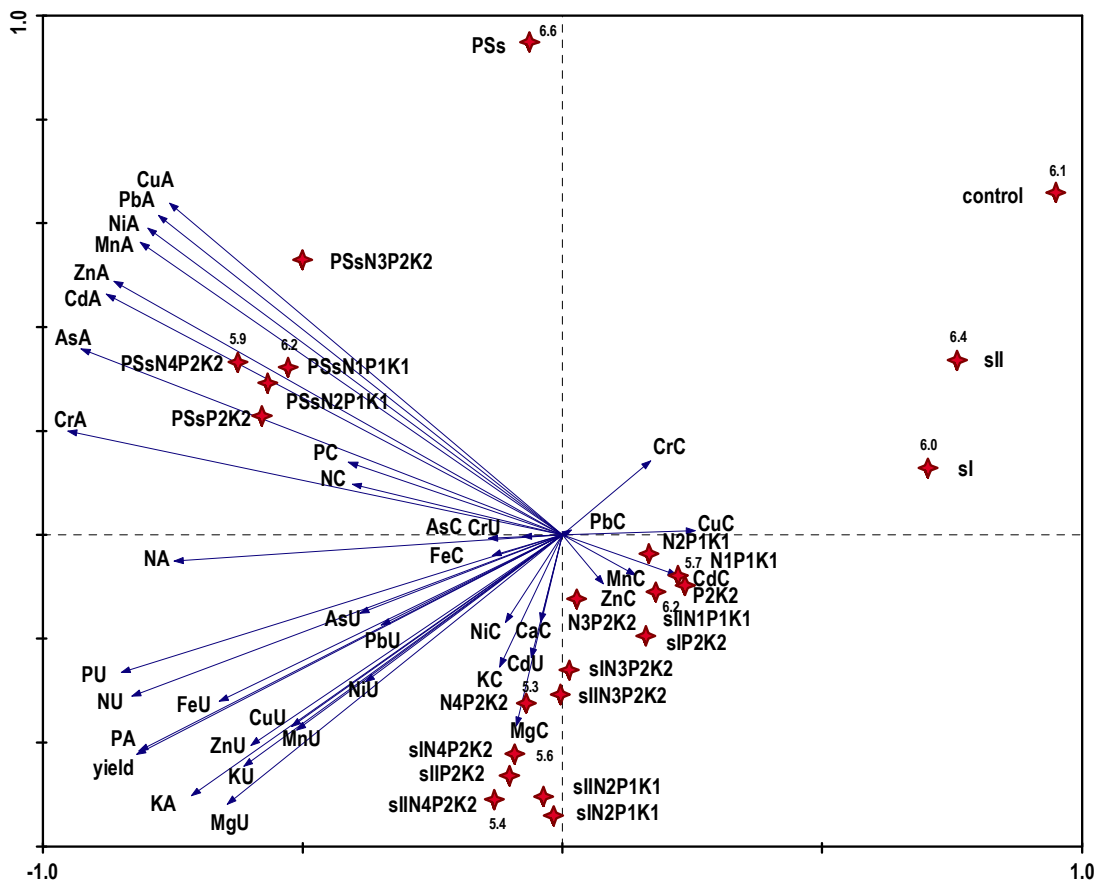


Fig. 4. Ordination diagram showing the results of RDA analysis of tubers yield, applied elements by fertilizers (abbreviation of an each element supplemented by A), concentration of elements in tubers (abbreviation of an each element supplemented by C) and uptake of elements by tubers (abbreviation of an each element supplemented by U). Treatment abbreviations are given in Table 1. Numbers above stars indicate pH (KCl) values in particular treatments.