

PŮSOBENÍ KADMIA NA RŮST A PRVKOVÉ SLOŽENÍ IN VITRO KULTUR OVOCNÝCH DRUHŮ

THE INFLUENCE OF CADMIUM ON THE GROWTH AND ELEMENTAL COMPOSITION OF *IN VITRO* CULTURES OF FRUIT CROPS

Alexandra Slámová, Aleš Vávra, Matěj Semerák

VÝZKUMNÝ A ŠLECHTITELSKÝ ÚSTAV OVOCNÁŘSKÝ HOLOVOUSY s.r.o.,
Holovousy 129, 508 01

e-mail: alexandra.slamova@vsuo.cz, ORCID: [0009-0007-5431-1102](https://orcid.org/0009-0007-5431-1102)

ABSTRAKT

Cílem práce bylo porovnat citlivost explantátových kultur ovocných druhů na kadmium v živném médiu a stanovit, zda jeho přítomnost ovlivňuje prvkové složení rostlinné hmoty. Pracovali jsme s jabloní 'Malinové holovouské', višňi 'Vítova', arónií 'Nero', aktinidií 'Issai', muchovníkem 'Tišnovský', jujubou 'Gagadzao' a zimolezem 'Zoluška', a to v rozmezí koncentrací 0,01 až 10 mg/L kadmia. Všechny genotypy vykazovaly na vyšších koncentracích závažné příznaky fytoxicity, přičemž aktinidie, jujuba a zimolez se ukázaly jako nejcitlivější, poněvadž na nejvyšších koncentracích odumíraly, přestože jsme u jujuby a zimolezu zaznamenali nejnižší množství akumulovaného kadmia oproti ostatním. Celkově byl obsah stanovených prvků nejnižší právě u jujuby a zimolezu, a to s výjimkou molybdenu. V přítomnosti kadmia jsme mj. zjistili mírný nárůst obsahu mědi a kobaltu v rostlinné hmotě. Naše výsledky mohou pomoci například při hodnocení citlivosti rostlinných druhů vůči stresu způsobenému kadmiiem.

Klíčová slova: těžké kovy, akumulace, fyto remediacce, fyto toxicita, prvková analýza, explantátové kultury

ABSTRACT

The aim of this work was to compare the sensitivity of fruit crop explant cultures to cadmium in the growth medium and to determine whether its presence affects the elemental composition of plant matter. We worked with the apple 'Malinové holovouské', sour cherry 'Vítova', chokeberry 'Nero', kiwiberry 'Issai', shadbush 'Tišnovský', jujube 'Gagadzao' and honeysuckle 'Zoluška', in the concentration range of 0.01 to 10 mg/L of cadmium. All genotypes showed serious symptoms of phytotoxicity at higher concentrations. Kiwiberry, jujube and honeysuckle proved to be the most sensitive and died at the highest concentrations, although we recorded the lowest amount of accumulated cadmium in jujube and honeysuckle when compared to the others. Overall, the content of the determined elements was the lowest in jujube and honeysuckle, with the exception of molybdenum. In the presence of cadmium, we found *i.a.* a slight increase in the content of copper and cobalt in plant matter. Our results may help to assess the sensitivity of plant species to cadmium stress.

Keywords: heavy metals, accumulation, phyto remediation, phyto toxicity, elemental analysis, explant cultures

ÚVOD

Kadmium se řadí mezi rizikové prvky a představuje pro životní prostředí dlouhodobý problém, protože může kontaminovat vodu, půdu i vzduch. Pro živé organismy je toxické už v malých koncentracích. Významné množství kadmia se uvolňuje antropogenními vlivy – při důlní činnosti, spalování fosilních paliv, výrobě baterií, hnojení průmyslovými hnojivy apod. (Khan *et al.* 2022). V prostředí se akumuluje a nerozkládá, takže v případě kontaminace může v půdě přetrvávat až stovky let. V ČR jsou stanoveny mezní hodnoty kadmia v půdě na 0,4 mg/kg a v ovoci na 0,03 mg/kg. Průměrná roční dávka kadmia (ve fosforečných hnojivech) nesmí přesáhnout hranici 3 g na 1 ha půdy (Ludvík *et al.* 2011). V půdách s kyselým pH se kadmium stává dostupnějším a uvolňuje se ho více (Molnárová a Fargašová 2014).

Fytoremediace, termín spojující řecké slovo *fyto* = rostlina a latinské *remedium* = lék, označuje metodu, která využívá rostliny k akumulaci polutantů v rostlinné hmotě. Některé rostliny jsou schopné tyto látky transformovat na méně škodlivé formy nebo je v sobě jako tzv. hyperakumulátory hromadí a následně jsou bezpečným způsobem zlikvidovány. Takto může dojít ke snížení koncentrace polutantů v životním prostředí. V případě kadmia se za hyperakumulátory považují rostliny, které jej na kontaminovaných půdách hromadí více než 100 µg na 1 g sušiny, aniž by se u nich projevila jeho toxicita. V některých pletivech penízku *Thlaspi praecox* bylo zjištěno až kolem 800 µg/g (Baker *et al.* 2000, Vogel-Mikuš *et al.* 2008).

U běžných rostlin může kadmium způsobit různé příznaky fytotoxicity (např. menší vzrůst, chlorózu, černání atd.). Dlouhodobá expozice ovlivňuje fotosyntézu a snižuje koncentraci fotosyntetických barviv (Petrová *et al.* 2014). Çetin *et al.* (2014) aplikovali chlorid kademnatý do buněčných suspenzí révy vinné a naměřili zvýšený obsah fenolických látek a tokoferolů v reakci na ošetření, což patrně souvisí s aktivací metabolických drah reagujících na stres. Také poukazovali na určitou míru nejistoty ohledně mechanismu působení kadmia v rostlině.

Do interakcí s těžkými kovy včetně kadmia a mechanismu jejich příjmu rostlinou vstupuje řada jiných kovů a polokovů, často patřících mezi důležité mikroprvky. V literatuře bývají v této souvislosti zmiňovány mj. zinek, měď, bór a molybden.

Zinek je známý jako růstový a obranný prvek a také hraje významnou roli jako kofaktor mnoha enzymů. V ČR se jako limitní hodnota v půdě uvádí 120 mg/kg, v rostlinách se ho nachází 20–100 mg/kg. Za kritickou nedostatečnou koncentrací zinku v rostlinách se považuje 20 mg/kg (Čermák *et al.* 2017). Hodnota pH půdy značně ovlivňuje přístupnost zinku, se vzrůstajícím pH se stává nedostupnějším. Dále může být příjem zinku ovlivněn vysokými koncentracemi dalších prvků – např. fosforu, železa nebo mědi (Vaněk *et al.* 2012). Svým působením dokáže zvýšit toleranci vůči těžkým kovům zvýšením akumulace osmolytů (prolin) a glutamátu, a naopak snížením produkce reaktivních forem kyslíku – ROS (Faran *et al.* 2019). Snížení fytotoxicity kadmia pomocí zinku je založeno na kompetitivním mechanismu účinku, který způsobuje snížení příjmu kadmia z půdy, případně sekvestraci kadmia v kořenech (Cherif *et al.* 2011, Qaswar *et al.* 2017). Elazab *et al.* (2021) se ve své studii zaměřili na mikropropagaci explantátů banánovníku a sledovali, jak zinek ovlivňuje stres způsobený kadmíem v *in vitro* kultuře. Zjistili, že přidavek zinku měl za následek stimulaci produkce flavonoidů a kyseliny askorbové v rostlinách a na druhou stranu inhiboval akumulaci prolinu, jehož obsah se při stresových podmínkách zpravidla zvyšuje. Chakravarty a Srivastava (1997) ve své studii uvádějí, že ekvimolární koncentrace obou prvků měla za následek zvýšení příjmu kadmia v kořenech, a že zinek se naopak přesunul z kořenů do výhonků *in vitro* pěstovaného lnu setého. Z těchto důvodů se vědci zabývají potenciálem nanočástic při využití ke zmírnění dopadů abiotických stresorů a polutantů kontaminujících životní prostředí. Karmous *et al.*

(2022) hodnotili přínos nanočástic oxidu zinečnatého (ZnO NP) pro *in vitro* kultury papriky seté a zjistili, že ve výhoncích se zvýšila enzymatická aktivita pro vychytávání peroxidu vodíku, což vedlo k vyrovnání se s oxidačním stresem.

Měď je klíčová pro růst rostlin, nicméně její zvýšená koncentrace v půdě může působit na rostliny toxicky a omezit jejich správný vývoj. Měď se v rámci legislativy ČR řadí mezi rizikové prvky s limitní hodnotou v půdách 60 mg/kg (Čermák *et al.* 2017). Dou *et al.* (2023) studovali vegetaci v okolí hutě, v oblasti s kyselou půdou středně a silně znečištěnou mědí a kadmii. Zjistili, že nejvyšší koncentrace mědi byly obsaženy v rostlinách *Elsholtzia splendens*, konkrétně v listech se nacházelo 269 mg/kg, což naznačuje jejich potenciál pro fytoremediaci. Naopak nejnižší koncentrace v listech byla naměřena v cukrové třtině (8,07 mg/kg). Adamczyk-Szabela *et al.* (2019) tvrdí, že po přidavku mědi a kadmia došlo u meduňky lékařské k omezení příjmu manganu, olova a zinku. Kadmium a měď (podobně jako zinek) sdílejí transportní cesty, což vede buď ke konkurenčnímu, nebo synergickému příjmu těchto prvků do rostlinné buňky (Küpper a Andresen 2016). Patra *et al.* (2025) uvádějí, že zavedení mědi nebo zinku omezilo v půdě dostupnost kadmia, což může snížit jeho toxicitu pro rostliny.

Bór, další esenciální mikroprvek, se v rostlině nachází především v buněčných stěnách, kde je důležitý pro jejich správnou funkci a udržení jejich struktury. V půdě se vyskytuje ve formě kyseliny borité a boritanu. Jeho dostupnost pro rostliny závisí na pH, v zásaditém prostředí se snižuje. Dle Vaněk *et al.* (2012) se jej v půdě nalézají 30–40 mg/kg a v rostlinách 20–100 mg/kg. Dle legislativy ČR se bór neřadí mezi rizikové prvky a neexistuje pro něj limitní hodnota. Qin *et al.* (2022) uvádějí, že aplikace bóru u pšenice seté snížila akumulaci kadmia ve fázi klíčení a prodlužování. Xin *et al.* (2023) se zabývali interakcemi mezi bórem a kadmii u papriky seté, a došli k podobným závěrům jako autoři předchozího článku. Aplikace bóru měla za následek zvýšenou fixaci kadmia v buněčných stěnách kořenů, zatímco jeho koncentrace v plodech se snížila. Kromě toho měl bór pozitivní účinek na kořenový systém. Z další studie, zabývající se koncentrací kadmia v rýži, vyplývá, že aplikace hnojiv obsahujících bór snížila koncentrace ROS díky podpoře aktivity antioxidantních enzymů. Nepřímá úměra mezi akumulací bóru a kadmia v rostlinách nabízí možnou cestu, jak získat potenciálně bezpečné plodiny v oblastech znečištěných kadmii (Long a Peng 2023).

Zajímavý vztah byl zjištěn mezi kadmii a molybdenem. U řepky bylo popsáno, že exogenní aplikace molybdenu zvýšila toleranci ke kadmii, a to snížením jeho příjmu a akumulace v rostlinné hmotě (Han *et al.* 2020). Podobné účinky molybdenu byly pozorovány u rýže; jeho přidavek vedl mj. k aktivaci antioxidantních mechanismů, a výrazně tak zmírnil oxidační stres způsobený kadmii (Imran *et al.* 2020). Benefiční role zvýšené dostupnosti molybdenu se projevila také při klíčení pšenice v podmínkách s vysokými koncentracemi kadmia (Magid a Al-Issawi 2024).

Cílem studie bylo charakterizovat odpověď explantátových kultur vybraných ovocných druhů na přítomnost kadmia v živném médiu v různých koncentracích a kvantifikovat jeho vliv na změny v prvkovém složení rostlinné biomasy pomocí metody ICP-MS.

MATERIÁL A METODY

Explantátové kultury pocházely z *in vitro* genofondu VÝZKUMNÉHO A ŠLECHTITELSKÉHO ÚSTAVU OVOCNÁŘSKÉHO HOLOVOUSY s.r.o. Živná média byla připravována dle Murashige a Skoog (1962), s přidavkem 1 mg/L 6-benzylaminopurinu, 0,1 mg/L kyseliny indol-3-máselné a 4 mg/L kyseliny askorbové. Hodnota pH byla upravena na 5,7, poté byl přidán agar v množství 8 g/L. Sterilizace byla zajištěna parním autoklávem: 15 minut při teplotě

121 °C a tlaku 230 kPa. Kultivace probíhala ve 100 mL Erlenmeyerových baňkách se 30 mL živného média, zakrytých hliníkovou fólií, v místnosti s fotoperiodou 12 h světlo / 12 h tma. Zdrojem světla byly LED bodové zdroje RGB+3000K 5W (T-LED, s.r.o.), hustota denního toku fotonů ve fotosynteticky aktivní oblasti se v úrovni kultivačních polic pohybovala kolem 60 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Teplota činila ve dne 23 °C, v noci 17 °C. Vlhkost uvnitř kultivačních baněk dosahovala téměř 100 %.

Za účelem experimentu byla připravena živná média s obsahem kadmia. Jako zdroj kadmia byl použit standard dusičnanu kademnatého v kyselině dusičné. Přidáván byl před úpravou pH a to v takovém množství, aby výsledné koncentrace kadmia činily 0,01; 0,1; 1 a 10 mg/L. Na takto upravená média byly v počtu dvou baněk po pěti explantátech nasazeny vybrané genotypy: jablň 'Malinové holovouské', višň 'Vítova', arónie 'Nero', aktinidie 'Issai', muchovník 'Tišnovský', jujuba 'Gagadzao' a zimolez 'Zoluška'. Kontrolní variantu tvořily tytéž genotypy na médiu bez přidaného kadmia. Nasazené explantáty měřily cca 5 mm na délku.

Po jednom měsíci kultivace byl vyhodnocen zdravotní stav kultur. Rovněž byl z každé baňky obsahující dostatečné množství rostlinné hmoty odebrán vzorek o hmotnosti min. 2,5 g za účelem stanovení prvkového složení. Nebyla-li navážka dostatečná, odebral se jeden směsný vzorek z obou baněk příslušné varianty. Slabý růst kultur na médiích s vyšší koncentrací kadmia a jejich zhoršený zdravotní stav způsobily, že v některých variantách nestačila navážka u některých genotypů ani pro jeden vzorek (počet analyzovaných vzorků uvádí Tabulka 1).

Tabulka 1. Počet analyzovaných vzorků pro jednotlivé varianty média

Table 1. The number of analysed samples for each medium variant

Genotyp ¹⁾	Počet vzorků v dané koncentraci kadmia v médiu [mg/L] ²⁾				
	Kontrola ³⁾	0,01	0,1	1	10
Malinové holovouské	2	1	1	1	1
Vítova	2	2	2	1	1
Nero	2	2	1	1	1
Issai	2	1	1	0	0
Tišnovský	2	2	1	1	1
Gagadzao	2	1	1	0	0
Zoluška	2	1	1	1	0

1) Genotype, 2) Number of analysed samples for each concentration of cadmium in medium, 3) Control

Ve vzorcích byl následně stanoven obsah arsenu (As), boru (B), draslíku (K), hořčíku (Mg), chromu (Cr), kadmia (Cd), kobaltu (Co), manganu (Mn), mědi (Cu), molybdenu (Mo), niklu (Ni), olova (Pb), sodíku (Na), vápníku (Ca) a zinku (Zn). Pro stanovení prvkového složení byly vzorky omyty v destilované vodě, mechanicky očištěny a předsušeny při 50 °C v horkovzdušném sterilizátoru do dosažení zdánlivé suchosti (po stisku rukou se materiál rozpadá). Takto předsušené vzorky byly homogenizovány v analytickém mlýnku (Grindomix GM 200, Retsch). Homogenizovaný materiál byl následně finálně sušen v horkovzdušném sterilizátoru při 65 °C po dobu 24 hodin.

Pro stanovení stopových prvků byla navážka 0,25 g rozložena v mikrovlnném zařízení (Discover SP-D 80, CEM, USA) za zvýšené teploty a tlaku v přítomnosti 6 mL koncentrované kyseliny dusičné (určené pro stopové analýzy) při definovaném teplotním programu (200 °C,

4 min). Stopové prvky byly následně analyzovány hmotnostní spektrometrií s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS, Agilent 7900, Agilent Technologies Inc., USA).

Všechny použité chemikálie a standardy byly určeny pro příslušné analýzy a splňovaly požadavky norem ISO/IEC 17025 a ISO 17034. Laboratoř zároveň pracuje v souladu s normou ISO/IEC 17025. Analytické metody byly validovány pomocí certifikovaného referenčního materiálu AN-BM01 od firmy Analytika, který splňuje požadavky normy ISO 33401, a společnost Analytika je akreditovaná dle EN ISO 17034:2017.

Výsledky analýzy prvkového složení byly zpracovány v programu MS Excel. Bylo-li v některé variantě u daného genotypu možno analyzovat dva vzorky, byly obě hodnoty zprůměrovány, aby byl každý genotyp ve všech koncentracích kadmia reprezentován jedním výsledkem. Závislost obsahu bóru, mědi, zinku, molybdenu a kobaltu v kulturách jednotlivých genotypů na koncentraci kadmia v živném médiu byla vynesena sloupcovými grafy. Kromě sloupců příslušejících každému genotypu zvláště byly v grafech zobrazeny též průměrné obsahy stanovených prvků v rostlinné hmotě, vypočítané ze všech hodnot stanovených v příslušné variantě, a to včetně standardní chyby průměru.

VÝSLEDKY A DISKUZE

U všech genotypů se fytoxicita kadmia projevila zpomalením růstu, a to tím výrazněji, čím vyšší byla jeho koncentrace v médiu. Na nejnižší koncentraci jsme v případě některých genotypů zaznamenali nárůst explantátů o 5–10 mm, v této variantě se také vytvářelo množství postranních výhonků. Na vyšších koncentracích již docházelo k chřadnutí a úhynu explantátů (Obrázek 1). U aktinidie 'Issai' jsme také zaznamenali černání kultur, u jujuby 'Gagadzao' intenzivní růst bakteriálních a houbových kontaminací. Ve variantách s 1 a 10 mg/L kadmia se toxicita zvýšila natolik, že kvůli malému nárůstu kultur již ubývalo genotypů, u nichž bylo možné provést prvkovou analýzu. Hodnota průměrného obsahu prvků, znázorněná prvními sloupci následujících grafů, byla tudíž ve variantách 1 a 10 mg/L tímto faktem ovlivněna, protože do průměru již nemohly být zahrnuty výsledky příslušející aktinidii, jujubě, resp. ani zimolezu.

Obrázek 1. Explantátová kultura jujuby 'Gagadzao' při koncentraci kadmia 10 mg/L

Figure 1. The explant culture of the jujube 'Gagadzao' at the cadmium concentration 10 mg/L



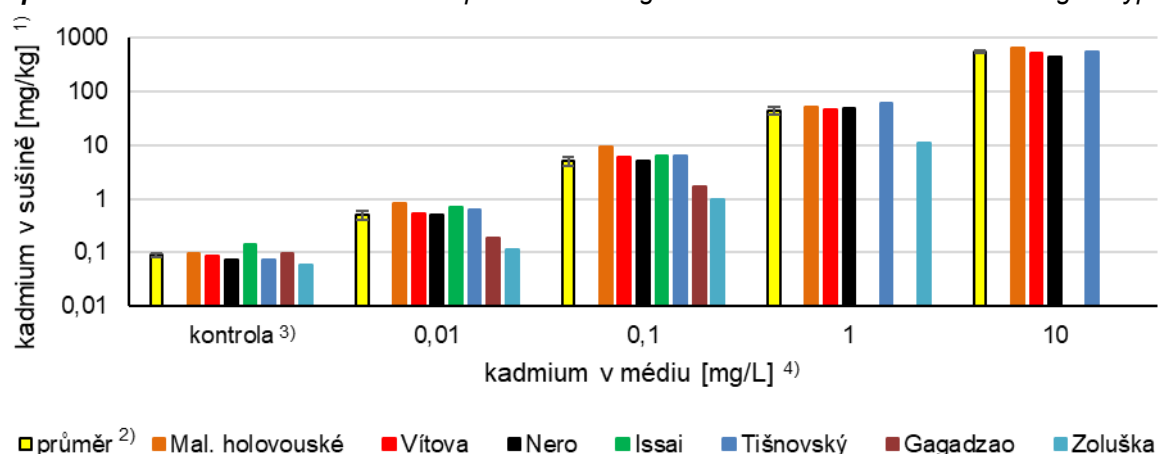
Co se týče obsahu kadmia v sušině, kultury nasazené na média s jeho rostoucí koncentrací obsahovaly řádově vyšší množství tohoto těžkého kovu než kultury v kontrolní variantě (Graf 1). I v té jsme ovšem zaznamenali poměrně vysoký obsah kadmia – průměrně 0,09 mg na 1 kg sušiny. Pravděpodobně se sloučeniny kadmia v nezanedbatelném množství nacházejí jako příměs v baleních makro- nebo mikroprvků, a odtud se dostávají do živných médií. V dalších variantách vzrůstal jeho obsah v rostlinné hmotě přímo úměrně koncentraci v médiu. Rychlý lineární nárůst obsahu přijatého kadmia, téměř přesně odpovídající jeho zvyšující se dostupnosti, patrně souvisí s nedostatečně selektivním vstupem do prýtu způsobených absencí kořenových bariér (během experimentů žádné explantáty nezakořenily) a též s formou, v níž se kadmium v živném médiu nacházelo. Zatímco v půdě bývá přítomno v různých sloučeninách, lišících se rozpustností a dostupností pro rostliny, v našich experimentech se jednalo o velmi dobře rozpustný dusičnan kademnatý.

Třebaže lineární trend příjmu se u všech genotypů projevilo stejný, lišily se absolutní hodnoty obsahu kadmia. Nejvýrazněji se od průměru odchylovaly výsledky pro jujubu 'Gagadzao' a zimolez 'Zoluška'. Na médiích s přidaným kadmíem činil jeho obsah u jujuby cca 30 %, u zimolezu jen 20 % oproti obsahu kadmia u ostatních genotypů. Mezi nejvíce akumulující naopak patřila jablň. He *et al.* (2020) uvádějí, že akumulace a tolerance kadmia u jabloní závisí na genotypu roubov a podnoží; u jabloňové podnože tolerantnější k vyššímu obsahu kadmia se např. zvýšila antioxidační kapacita naroubované jabloně. Vzhledem k charakteru experimentu v našem případě podnož roli nesehrála. Pro případné porovnání 'Malinového holovouského' s dalšími odrůdami by bylo třeba provést obdobnou analýzu u explantátových kultur jiných odrůd jabloní.

Obsah kadmia v rostlinné hmotě ve variantě s 10 mg/L v médiu byl srovnatelný s jeho obsahem v pletivech *Thlaspi praecox* rostoucího v zamořených lokalitách (Vogel-Mikuš *et al.* 2008). Na rozdíl od tohoto hyperakumulátoru, který je schopen takovou situaci dlouhodobě přežívat, však námi zkoumané druhy vykazovaly při této koncentraci v médiu závažné příznaky toxicity kadmia.

Graf 1. Množství kadmia ve vzorcích: průměrný obsah a obsah v jednotlivých genotypech

Graph 1. The amount of cadmium in samples: the average content and the content in each genotype



1) Cadmium content in dry sample, 2) The average value, 3) Control, 4) Cadmium in the medium

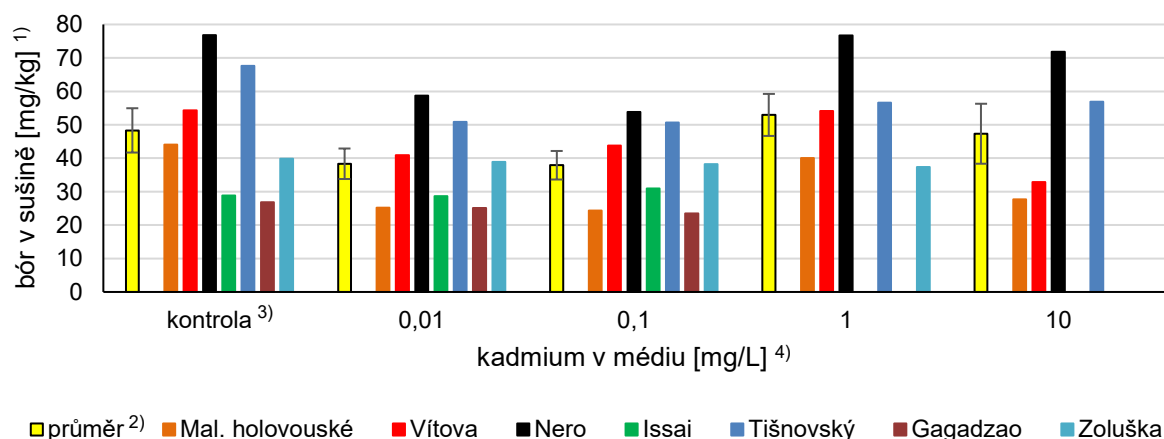
Grafy 2 až 6 znázorňují výsledky analýz prvků, které bývají v souvislosti s toxicitou kadmia často studovány (zinku, mědi, boru a molybdenu, viz kapitola Úvod), a také výsledky stanovení kobaltu.

U bóru jsme jasnou souvislost s koncentrací kadmia nepozorovali. Jistý trend byl pozorovatelný u mědi – se zvyšující se koncentrací kadmia byl zaznamenán i mírný nárůst jejího obsahu. To by souhlasilo se studií Petrové et al. (2014), kteří v rostlinách huseníčku rolního (*Arabidopsis thaliana*) zjistili pozitivní korelaci mezi akumulací kadmia a obsahem zinku, železa a právě mědi. Nárůst obsahu zinku nebyl v našem experimentu přesvědčivý a výrazněji se týkal pouze jabloně při nižších dávkách kadmia. Výsledky ve variantách s 1 a 10 mg/L mohou u jabloně odrážet celkový rozvrat prvkové rovnováhy v podmínkách extrémního působení stresoru. Nápadný byl nízký obsah zinku u jujuby a zimolezu ve srovnání s ostatními druhy na médiích s přidaným kadmíem, obzvlášť ve spojitosti s nižším obsahem akumulovaného kadmia, což by mohlo naznačovat druhově specificky omezený příjem dvojmocných kationtů ve stresových podmínkách.

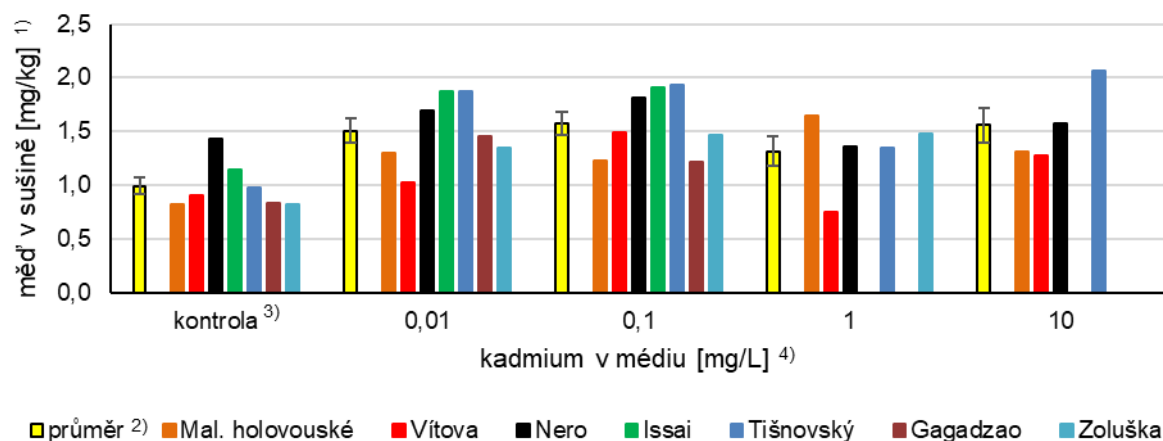
Překvapivé výsledky jsme zaznamenali u molybdenu. Jujuba a zimolez, jinak spíše chudší na mikroprvky, jej obsahovaly výrazně více než ostatní druhy. V kombinaci s nízkou hladinou kadmia u těchto druhů by to mohlo poukazovat na roli molybdenu coby prvku, který je schopen omezit jeho příjem. Na druhou stranu právě jujuba a zimolez patřily k druhům s nejnižší tolerancí vyšších koncentrací kadmia. Druhým prvkem s pozoruhodnými výsledky analýz byl kobalt. Jeho příjem u většiny genotypů při nízkých dávkách kadmia skokově vzrostl, při vysokých odpovídal hodnotám srovnatelným s kontrolou. Tento trend by např. mohl naznačovat aktivaci některých enzymatických drah zahrnujících kobalt, ale v podmínkách nadměrného stresu jejich selhání. O interakcích kobaltu s kadmíem však není k dispozici mnoho informací. Přestože se kobalt řadí mezi mikroprvky, např. je klíčový pro syntézu vitamínu B12, jsou dostupné spíše studie popisující toxické působení jeho nadbytku v některých průmyslových oblastech (Salam et al. 2023, Shedeed a Farahat 2023).

Graf 2. Množství bóru ve vzorcích: průměrný obsah a obsah v jednotlivých genotypch

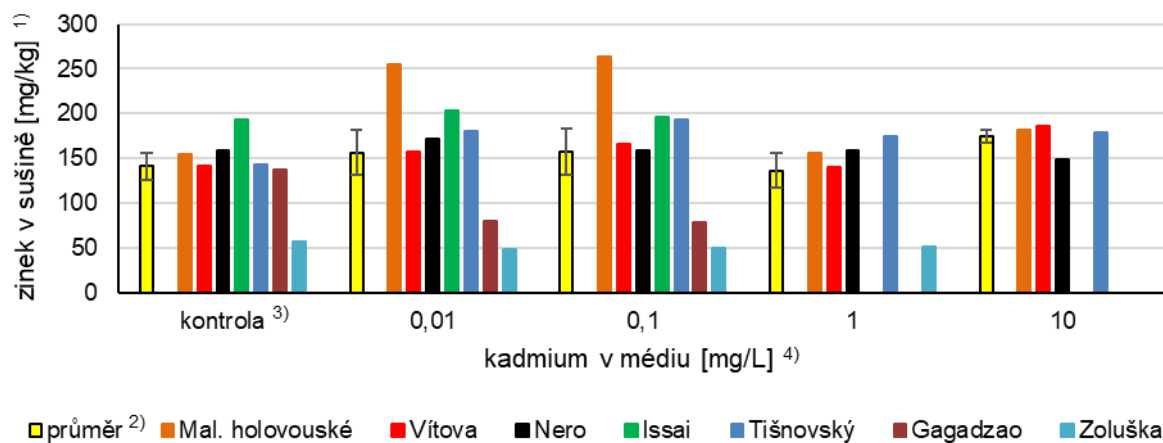
Graph 2. The amount of boron in samples: the average content and the content in each genotype



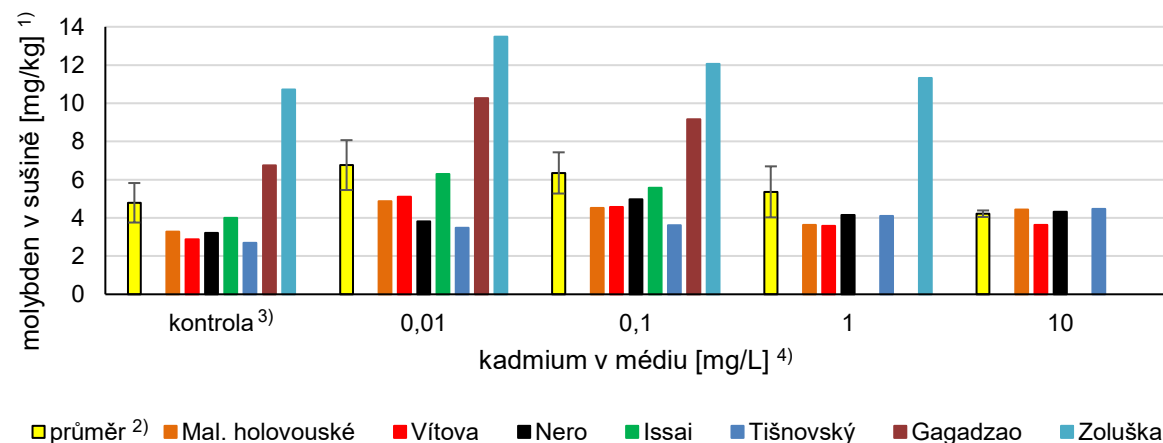
1) Boron content in dry sample, 2) The average value, 3) Control, 4) Cadmium in the medium

Graf 3. Množství mědi ve vzorcích: průměrný obsah a obsah v jednotlivých genotypech**Graph 3.** The amount of copper in samples: the average content and the content in each genotype

1) Copper content in dry sample, 2) The average value, 3) Control, 4) Cadmium in the medium

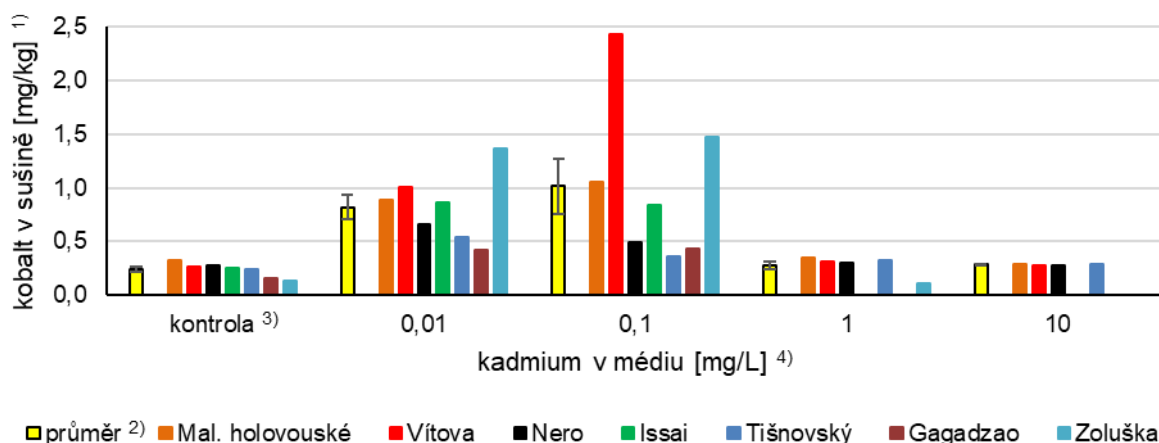
Graf 4. Množství zinku ve vzorcích: průměrný obsah a obsah v jednotlivých genotypech**Graph 4.** The amount of zinc in samples: the average content and the content in each genotype

1) Zinc content in dry sample, 2) The average value, 3) Control, 4) Cadmium in the medium

Graf 5. Množství molybdenu ve vzorcích: průměrný obsah a obsah v jednotlivých genotypech**Graph 5.** The amount of molybdenum in samples: the average content and the content in each genotype

1) Molybdenum content in dry sample, 2) The average value, 3) Control, 4) Cadmium in the medium

Graf 6. Množství kobaltu ve vzorcích: průměrný obsah a obsah v jednotlivých genotypech
Graph 6. The amount of cobalt in samples: the average content and the content in each genotype



1) Cobalt content in dry sample, 2) The average value, 3) Control, 4) Cadmium in the medium

Výsledky stanovení obsahu dalších prvků jsou uvedeny v tabulce 2. Celkově se opět projeví mezidruhové rozdíly v prvkovém složení:

Tabulka 2. Obsah prvků ve vzorcích v závislosti na koncentraci kadmia v médiu

Table 2. The element content in samples depending on the cadmium concentration in the medium

Genotyp ¹⁾	Cd v médiu [mg/L] ²⁾	Obsah v sušině [mg/kg] ³⁾								
		Mg	K	Ca	Mn	Na	Cr	Ni	As	Pb
Malinové holovouské	kontrola ⁴⁾	1769	34971	4677	175	1680	0,45	0,83	0,11	0,19
	0,01	1665	30762	2578	101	1993	0,30	0,43	0,13	0,78
	0,1	2172	35263	3588	122	2105	0,29	0,17	0,10	0,40
	1	1892	41022	6142	220	2814	0,14	0,87	0,10	0,52
	10	2478	39231	5039	189	2030	0,04	0,11	0,12	0,39
Vítova	kontrola	1555	29899	4008	155	2220	0,37	0,84	0,14	0,39
	0,01	1456	35521	3758	134	3328	0,47	0,28	0,10	0,54
	0,1	1657	43291	4924	168	3938	0,68	0,92	0,10	0,64
	1	1850	40573	5408	203	3450	0,05	0,10	0,09	0,37
	10	1302	38322	2976	115	1951	0,10	0,09	0,41	0,43
Nero	kontrola	1429	21548	2572	102	1590	0,39	0,52	0,15	0,43
	0,01	1522	29899	3124	126	4505	0,26	0,35	0,11	0,43
	0,1	1625	31800	3089	126	4261	0,21	0,43	0,10	0,41
	1	1680	35486	4279	163	3417	0,03	0,26	0,14	0,56
	10	1840	37597	3378	134	3254	0,03	0,16	0,15	0,38
Issai	kontrola	1620	22497	3100	149	1792	0,37	0,82	0,16	0,08
	0,01	1295	26929	3149	142	2943	0,41	0,82	0,11	0,61
	0,1	1307	28787	3213	211	2571	0,47	0,47	0,10	0,59
	1	nedostatečná navážka ⁵⁾								
	10	nedostatečná navážka								

Tišnovský	kontrola	1872	26290	4557	172	1345	0,38	0,55	0,12	0,59
	0,01	1570	35843	3706	132	2540	0,21	0,33	0,11	0,47
	0,1	1582	37249	3576	138	2432	0,43	0,39	0,10	0,42
	1	1762	37321	5239	162	2493	0,08	0,63	0,13	0,50
	10	1266	35231	3026	119	1349	0,05	0,11	0,13	0,42
Gagadzao	kontrola	1044	18798	2081	83,1	760	0,32	0,47	0,10	0,03
	0,01	781	16992	1944	69,8	858	0,23	0,33	0,10	0,50
	0,1	813	16790	1923	71,2	771	0,26	0,88	0,09	0,40
	1	nedostatečná navážka								
	10	nedostatečná navážka								
Zoluška	kontrola	1102	22793	2551	103	810	0,39	0,57	0,12	0,04
	0,01	1114	21039	2959	102	1851	0,49	0,29	0,13	1,21
	0,1	1099	22174	2477	87,7	1595	1,35	0,41	0,11	0,75
	1	1219	24441	2187	89,9	1887	0,03	2,45	0,16	0,48
	10	nedostatečná navážka								

1) Genotype, 2) Cd in medium, 3) Content in dry sample, 4) Control, 5) Insufficient sample weight

Zmiňovaná jujuba a zimolez obecně vykazovaly spíše nižší obsah makroprvků i mikroprvků ve srovnání s ostatními druhy. Tento obecný fakt však patrně nesouvisel se stresem způsobeným kadmíem, neboť jsme srovnatelné rozdíly zaznamenali i v kontrolní variantě bez přidaného kadmia.

ZÁVĚR

Kadmium v živných médiích v koncentracích 0,01 až 10 mg/L vyvolalo u studovaných explantátových kultur projevy fytoxicity. Některé genotypy (aktinidie 'Issai', jujuba 'Gagadzao' a zimolez 'Zoluška') projeví v přítomnosti tohoto rizikového kovu obzvláštní citlivost, a při jeho vyšších koncentracích odumíraly. Na druhou stranu právě jujuba a zimolez akumulovaly ve svých pletivech nejméně Cd ve srovnání s ostatními studovanými druhy. Obecně jsme na médiích s přidavkem Cd zaznamenali zvýšení obsahu mědi a kobaltu, ale při vyšších dávkách už výsledky ovlivňovala přílišná fytoxicita a také úbytek dat. Nezávisle na koncentraci Cd se pak projeví mezidruhové rozdíly v prvkovém složení – jujuba a zimolez vykazovaly poměrně nízké obsahy většiny makro- a mikroprvků, zato nápadně vysoký obsah molybdenu.

Náš výzkum nabízí porovnání odolnosti různých ovocných druhů vůči zvýšenému obsahu kadmia v prýtu a zabývá se možným ovlivněním příjmu dalších prvků. Jedná se o pilotní studii; za účelem robustnějšího statistického zpracování bude třeba zaměřit se na jednotlivé genotypy a provést analýzy většího množství vzorků.

PODĚKOVÁNÍ

Výsledek byl vytvořen za podpory projektu institucionální podpory RO1525 (Ministerstvo zemědělství). Děkujeme Lence Pácalové a Kateřině Šubrtové za pomoc při zpracování vzorků.

LITERATURA

- ADAMCZYK-SZABELA, D.; LISOWSKA, K.; ROMANOWSKA-DUDA, Z. a WOLF, W.M. Associated Effects of Cadmium and Copper Alter the Heavy Metals Uptake by *Melissa Officinalis*. Online. *Molecules*. 2019, vol. 24, no. 13, p. 2458. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/molecules24132458> [cit. 15. 9. 2025].
- BAKER, A.; MCGRATH, S.; REEVES, R. a SMITH, J.A.C. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. In: *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. Online. CRC Press, 2000, p. 85. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/284669331_Metal_hyperaccumulator_plants_a_review_of_the_ecology_and_physiology_of_a_biological_resource_for_phytoremediation_of_metal-polluted_soils [cit. 15. 9. 2025].
- ČERMÁK, P.; MÜHLBACHOVÁ, G.; KÁŠ, M.; VAVERA, R.; PECHOVÁ, M. Metodický postup pro stanovení obsahu mikroelementů metodou Mehlich 3 a návrh hodnocení kritérií jejich obsahu v zemědělských půdách. Online. Praha: VÚRV Ruzyně, 2017. ISBN 978-80-7427-266-0. Dostupné z: https://www.vurv.cz/wp-content/uploads/2021/06/ISBN-978-80-7427-266-0_2017_certifikovana_metodika_Mikroelementy.pdf [cit. 15. 9. 2025].
- ÇETİN, E.S.; BABALIK, Z.; HALLAC-TURK, F. a GÖKTÜRK-BAYDAR, N. The effects of cadmium chloride on secondary metabolite production in *Vitis vinifera* cv. cell suspension cultures. Online. *Biological Research*. 2014, vol. 47, no. 1, p. 47. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/0717-6287-47-47> [cit. 15. 9. 2025].
- DOU, C.; CUI, H.; ZHANG, W.; YU, W.; SHENG, X. et al. Copper and Cadmium Accumulation and Phytoremediation Potential of Native and Cultivated Plants Growing around a Copper Smelter. Online. *Agronomy*. 2023, vol. 13, no. 12, p. 2874. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/agronomy13122874> [cit. 15. 9. 2025].
- ELAZAB, D.S.; ABDEL-WAHAB, D.A. a EL-MAHDY, M.T. Iron and zinc supplies mitigate cadmium toxicity in micropropagated banana (*Musa* spp.). Online. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2021, vol. 145, no. 2, p. 367–377. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11240-021-02013-6> [cit. 15. 9. 2025].
- FARAN, M.; FAROOQ, M.; REHMAN, A.; NAWAZ, A.; SALEEM, M.K.; ALI, N.; a SIDDIQUE, K.H.M. High intrinsic seed Zn concentration improves abiotic stress tolerance in wheat. Online. *Plant and Soil*. 2019, vol. 437, no. 1/2, p. 195–213. Dostupné z: <https://www.jstor.org/stable/48703743> [cit. 15. 9. 2025].
- HAN, Z.; WEI, X.; WAN, D.; HE, W.; WANG, X. et al. Effect of Molybdenum on Plant Physiology and Cadmium Uptake and Translocation in Rape (*Brassica napus* L.) under Different Levels of Cadmium Stress. Online. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020, vol. 17, no. 7, p. 2355. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijerph17072355> [cit. 15. 9. 2025].
- HE, J.; ZHOU, J.; WAN, H.; ZHUANG, X.; LI, H. et al. Rootstock–Scion Interaction Affects Cadmium Accumulation and Tolerance of *Malus*. Online. *Frontiers in Plant Science*. 2020, vol. 11, p. 1264.. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01264> [cit. 15. 9. 2025].
- CHAKRAVARTY, B. a SRIVASTAVA, S. Effect of cadmium and zinc interaction on metal uptake and regeneration of tolerant plants in linseed. Online. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 1997, vol. 61, no. 1, p. 45–50. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/s0167-8809\(96\)01078-x](https://doi.org/10.1016/s0167-8809(96)01078-x) [cit. 15. 9. 2025].
- CHERIF, J.; MADIOUNI, C.; AMMAR, W.B. a JEMAL, F. Interactions of zinc and cadmium toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (*Solanum lycopersicum*). Online. *Journal of Environmental Sciences*. 2011, vol. 23, no. 5, p. 837–844. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(10\)60415-9](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(10)60415-9) [cit. 15. 9. 2025].
- IMRAN, M.; HUSSAIN, S.; EL-ESAWI, M.A.; RANA, M.S.; SALEEM, M.H. et al. Molybdenum Supply Alleviates the Cadmium Toxicity in Fragrant Rice by Modulating Oxidative Stress and Antioxidant Gene Expression. Online. *Biomolecules*. 2020, vol. 10, no. 11, p. 1582. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/biom10111582> [cit. 15. 9. 2025].

- KARMOUS, I.; GAMMOUDI, N. a CHAOUI, A. Assessing the Potential Role of Zinc Oxide Nanoparticles for Mitigating Cadmium Toxicity in *Capsicum annuum* L. Under In Vitro Conditions. Online. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2022, vol. 42, no. 2, p. 719–734. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10579-4> [cit. 15. 9. 2025].
- KHAN, Z.; ELAHI, A.; BUKHARI D.A.; REHMAN A. Cadmium sources, toxicity, resistance and removal by microorganisms – A potential strategy for cadmium eradication, *Journal of Saudi Chemical Society*. 2022, vol. 26, no. 6, p. 101569. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101569> [cit. 15. 9. 2025].
- KÜPPER, H. a ANDRESEN, E. Mechanisms of metal toxicity in plants. Online. *Metallomics*. 2016, vol. 8, no. 3, p. 269–285. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/c5mt00244c> [cit. 15. 9. 2025].
- LONG, Y. a PENG, J. Interaction between Boron and Other Elements in Plants. Online. *Genes*. 2023, vol. 14, no. 1, p. 130. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/genes14010130> [cit. 15. 9. 2025].
- LUDVÍK, V.; BLAŽEK, J.; KLOUTVOROVÁ, J.; KNĚŽÁČEK, L.; KOSINA, J. *et al.* Metodika pro integrované systémy pěstování ovoce. Online. Holovousy: VŠÚO Holovousy s.r.o., 2011. ISBN 978-80-87030-19-6. Dostupné z: <https://www.sispo.cz/wp-content/uploads/2024/07/metodika-SISPO-2011.pdf> [cit. 15. 9. 2025].
- MAGID, K.M. a AL ISSAWI H.M. Molybdenum mitigates cadmium stress for bread wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. Online. *Ratarstvo i povrtarstvo*. 2024, vol. 61, no. 2, p. 47–60. Dostupné z: <https://doi.org/10.5937/ratpov61-49728> [cit. 15. 9. 2025].
- MOLNÁROVÁ, M. a FARGAŠOVÁ, A. Vplyv abiotických faktorov (Se a Cd) na *Sinapis alba* L. Vliv abiotických a biotických stresorů na vlastnosti rostlin. Online. Praha: ČZU v Praze, 2014. ISBN 978-80-213-2475-6. Dostupné z: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20183145292> [cit. 15. 9. 2025].
- MURASHIGE, T. a SKOOG, F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia plantarum*. 1962, vol. 15, no. 3, p. 473–497. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x> [cit. 15. 9. 2025].
- PATRA, S.K.; SENGUPTA, S.; DAS, S.S. a MAZUMDAR, D. Assessment of the interaction of copper and zinc with cadmium to reduce its toxicity in heavy metal-contaminated river basin soils. Online. *Discover Soil*. 2025, vol. 2, no. 1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00030-x> [cit. 15. 9. 2025].
- PETROVÁ, Š.; SOUDEK P. a VANĚK, T. Vliv esenciálních kovů na toxicitu polutantů u rostlin. Vliv abiotických a biotických stresorů na vlastnosti rostlin. Online. Praha: ČZU v Praze, 2014. ISBN 978-80-213-2475-6. Dostupné z: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20183145316> [cit. 15. 9. 2025].
- QASWAR, M.; HUSSAIN, S. a RENGEL, Z. Zinc fertilisation increases grain zinc and reduces grain lead and cadmium concentrations more in zinc-biofortified than standard wheat cultivar. Online. *Science of The Total Environment*. 2017, vol. 605/606, p. 454–460. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.242> [cit. 15. 9. 2025].
- QIN, S; XU, Y; NIE, Z; LIU, H; GAO, W et al. Effect of boron on cadmium uptake and expression of Cd transport genes at different growth stages of wheat (*Triticum aestivum* L.). Online. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022, vol. 241, p. 113834. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113834> [cit. 15. 9. 2025].
- SALAM, A.; AFRIDI, M.S.; KHAN, A.R.; AZHAR, W.; SHUAIQI, Y. et al. Cobalt Induced Toxicity and Tolerance in Plants: Insights from Omics Approaches. Online. In: *Heavy Metal Toxicity and Tolerance in Plants*. Online. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 2023, p. 207–229. ISBN 9781119906469. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/9781119906506.ch10> [cit. 15. 9. 2025].
- SHEDEED, Z.A. a FARAHAT, E.A. Alleviating the toxic effects of Cd and Co on the seed germination and seedling biochemistry of wheat (*Triticum aestivum* L.) using *Azolla pinnata*. Online. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023, vol. 30, no. 30, p. 76192–76203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27566-1> [cit. 15. 9. 2025].
- VANĚK, V.; BALÍK, J.; ČERNÝ, J.; PAVLÍK, M.; TLUSTOŠ, P. a VALTERA, J.: *Výživa zahradních rostlin*. Praha: Academia Praha, 2012. ISBN 978-80-200-2147-2.

- VOGEL-MIKUŠ, K.; REGVAR, M.; MESJASZ-PRZYBYŁOWICZ, J.; PRZYBYŁOWICZ, W.J.; SIMČIČ, J. *et al.* Spatial distribution of cadmium in leaves of metal hyperaccumulating *Thlaspi praecox* using micro-PIXE. Online. *New Phytologist*. 2008, vol. 179, no. 3, p. 712–721. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02519.x> [cit. 15. 9. 2025].
- XIN, J.; YUAN, H.; YANG, L.; LIAO, Q.; LUO, J. *et al.* Effect of boron supply on the uptake and translocation of cadmium in *Capsicum annuum*. Online. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2023, vol. 257, p. 114925. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114925> [cit. 15. 9. 2025].