

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Vliv kontaminace půdy na výnos a
metabolismus pěstovaných zelenin**

Bakalářská práce

Jakub Louda

Zahradnictví Hortib

Vedoucí práce prof. Ing. Daniela Pavlíková, CSc.

© 2024 ČZU v Praze

Vliv kontaminace půdy na výnos a metabolismus pěstovaných zelenin

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Vliv kontaminace půdy na výnos a metabolismus pěstovaných zelenin" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 25.04.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Daniele Pavlíkové, CSc. a Ing. Veronice Zemanové Ph.D. za jejich milý přístup a pomoc. Moc si vážím času který mi věnovaly při psaní této práce.

Abstrakt:

Cílem předložené bakalářské práce je hodnocení změn ve výnosu a metabolismu lociky seté (*Lactuca sativa* L.) pěstovaného na půdě kontaminované antropogenní činností z oblasti Příbramska. Kontaminace půd rizikovými prvky v této lokalitě je historickou zátěží z těžby a zpracování rud a stanovené pseudototální obsahy rizikových prvků jsou nad limitem legislativně uváděných preventivních hodnot rizikových prvků v zemědělských půdách ČR. Byl zkoumán vliv kontaminace půdy na výnos biomasy, obsah toxických prvků Cd a Zn, vliv na vodní potenciál a parametry fotosyntézy spolu s obsahem fotosyntetických pigmentů. Pro sledování vlivu Cd a Zn na fyziologii lociky seté byl založen vegetační nádobový pokus ve skleníku Katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin. V biomase lociky seté pěstované na kontaminované půdě byl zaznamenán značný nárůst obsahu zinku a kadmia v listech a kořenech rostlin. Dále byl u kontaminovaných rostlin také celkově menší výnos nadzemní a podzemní biomasy oproti kontrolním rostlinám. Byl potvrzen pokles fluorescence chlorofylu, celkový obsah chlorofylu, chlorofylu a, chlorofylu b a karotenoidů u rostlin pěstovaných na kontaminované půdě oproti půdě kontrolní. Také asimilace CO₂, stomatická vodivost a transpirační rychlost byly vyšší u kontaminovaných vzorků. Výsledky experimentu potvrdily významný vliv kontaminace půdy toxickými prvky na metabolismus lociky seté.

Klíčová slova: fotosyntéza; makroprvky; toxické prvky; výnos

Effect of soil contamination on yield and metabolism of cultivated vegetables

Abstract

The aim of the presented bachelor thesis is to evaluate the changes in yield and metabolism of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown on soil contaminated by anthropogenic activities around Příbramsko. The contamination of soils with hazardous elements in this locality is a historical burden from mining and ore processing. The determined pseudototal contents of hazardous elements are above the limit of legislatively stated preventive values of hazardous elements in agricultural soils of the Czech Republic. The effect of soil contamination on biomass yield, content of toxic elements Cd and Zn, and effect on water potential and photosynthesis parameters together with the content of photosynthetic pigments was investigated. To observe the effect of Cd and Zn on lettuce physiology, a growing pot experiment was established in the greenhouse of the Department of Agroenvironmental Chemistry and Plant Nutrition. A significant increase in zinc and cadmium content in the leaves and roots of lettuce plants was observed in the biomass of lettuce grown on contaminated soil. In addition, the contaminated plants also showed an overall lower yield of above and below-ground biomass compared to the control plants. Decrease in chlorophyll fluorescence, total chlorophyll, chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoid content was confirmed in plants grown on contaminated soil

compared to control soil. Also, CO₂ assimilation, stomatal conductance, and transpiration rate were higher in the contaminated samples.

The experimental results confirmed the significant effect of soil contamination with toxic elements on lettuce metabolism.

Keywords: photosynthesis; macro-elements; toxic elements; yield

Obsah

1 ÚVOD:	8
2 CÍL PRÁCE	8
3 LITERÁRNÍ REŠERŠE	8
ZINEK	8
V PŮDĚ	8
ZINEK V ROSTLINĚ.....	9
HNOJENÍ ZINKEM.....	9
KADMIUM	10
DOSTUPNOST TĚŽKÝCH KOVŮ V PŮDĚ	10
FOTOSYNTÉZA.....	11
EFEKT TĚŽKÝCH KOVŮ NA FOTOSYNTÉZU ROSTLIN	12
ÚČINKY ZINKU NA FOTOSYNTÉZU.....	12
ÚČINKY TĚŽKÝCH KOVŮ NA FLUORESCENCI CHLOROFYLU V ROSTLINÁCH	13
LOCIKA SETÁ (<i>LACTUCA SATIVA</i> L.).....	14
PĚSTOVÁNÍ LOCIKY SETÉ	14
4 METODIKA	15
1.1 NÁDOBOVÝ POKUS.....	15
1.2 ANALÝZY	16
5 VÝSLEDKY	18
GRAF 1.1: POROVNÁNÍ PRŮMĚRŮ HMTNOSTI LISTŮ <i>LACTUCA SATIVA</i> PĚSTOVANÝCH V KONTAMINOVANÉ PŮDĚ A V KONTROLNÍ PŮDĚ.....	18
GRAF 1.2: POROVNÁNÍ PRŮMĚRŮ HMTNOSTI KOŘENŮ LOCIKY SETÉ PĚSTOVANÉ NA KONTAMINOVANÉ A KONTROLNÍ PŮDĚ.....	20
GRAF 1.3: PRŮMĚRNÝ OBSAH KADMIA V SUCHÉ BIOMASE LISTU.....	22
GRAF 1.4: PRŮMĚRNÝ OBSAH KADMIA V SUCHÉ BIOMASE KOŘENŮ	23
GRAF 1.5: PRŮMĚRNÝ OBSAH ZINKU V SUCHÉ BIOMASE LISTU.....	23
GRAF 1.6: PRŮMĚRNÝ OBSAH ZINKU V SUCHÉ BIOMASE KOŘENŮ.....	24
GRAF 1.7 FLUORESCENCE CHLOROFYLU.....	25
GRAF 1.8 CELKOVÝ OBSAH CHLOROFYLU.....	25
GRAF 1.9 OBSAH CHLOROFYLU A V LISTECH.....	27
GRAF 2.0 OBSAH CHLOROFYLU B V LISTECH.....	28
GRAF 2.1 OBSAH KAROTENOIDŮ V LISTECH.....	29
GRAF 2.2 ASIMILACE CO ₂	30
GRAF 2.3 STOMATICKÁ VODIVOST	30
GRAF 2.4 MĚŘENÍ TRANSPIRAČNÍ RYCHLOSTI.....	31
6 DISKUZE	31
7 ZÁVĚR	33

8 ZDROJE:..... 34

1 Úvod:

Kontaminace půd je celosvětový problém, který ohrožuje nejen ekosystém ale i naše zdraví. Nejčastějšími zdroji znečištění v České republice bývají imisní spad, těžební činnost nebo odpadní vody, které se dostávají do půdy (Zemědělství, n.d.).

Nejvíce ovlivněný obor kontaminací půdy je právě zemědělství. Při kontaminaci může dojít k narušení základních funkcí půdy, jako je například humifikace nebo mikrobiální činnosti. Rostlinná produkce je obzvlášť v ohrožení, protože při kontaminaci půdy je ovlivněna jak kvalitativně, tak i kvantitativně z důvodů fytotoxického působení v půdě. Ohrožení ale mohou být i sami zemědělci a konzumenti, kteří při vysokém obsahu kontaminantů v půdě mohou sami být negativně zdravotně ovlivněni.

V této práci se zabývám vlivem kontaminace půdy na výnos a metabolismus pěstovaných rostlin z konkrétního stanoviště Příbramska (Podlesí). Právě tento region je silně zasažený kontaminací půdy důlní těžbou a z provozu Kovohutí Příbram, které do roku 1983 vypouštěly kouřový spad obsahující těžké kovy. Kontaminace zde silně překračuje doporučené limity pro těžké kovy, jako třeba je kadmium nebo olovo. Najdeme zde 0,4 - 15,0 mg kadmia a 400–5000 mg olova v 1 kg půdní sušiny (Plicka 2001). Zaměřuji se na lociku setou (*Lactuca sativa* L.) a její příjem kadmia a zinku. Locika setá je běžná plodina pěstovaná mnoha zahrádkáři, kteří si v této oblasti často pěstují zeleninu pro konzumaci.

2 Cíl práce

je hodnocení změn ve výnosu a metabolismu lociky seté pěstované na půdě kontaminované antropogenní činností.

Hypotéza

- 1) Vlivem kontaminace půdy dojde ke snížení výnosu pěstované produkce.
- 2) Kontaminace půdy zvýší obsah toxických prvků v pěstované Locice seté.
- 3) Kontaminace půdy ovlivní obsah chlorofylu a aktivitu fotosyntézy rostlin.

3 Literární rešerše

Zinek

V půdě

Zinek se nachází v půdě hlavně v minerální formě a jako součást mřížky minerálů, např. biotit, augit nebo amfibol. Zinek je rostlinami přijímán ve formě Zn^{2+} a nároky na něj se liší u různých druhů rostlin. Kritický obsah Zn v pletivech se pohybuje mezi 20-100 ppm Zn v sušině, přičemž

20 ppm je považováno za minimální. Nižší příjem Zn signalizuje deficit, který může vyvolat zjevné příznaky nedostatku při hodnotách pod 10 ppm. Příjem Zn je ovlivněn pH a množstvím fosforu v prostředí. Nedostatek Zn může nastat po hnojení vyššími dávkami fosforu. (Vaněk et al. 2012)

Vyšší hodnota pH a obsah fosforu v půdě snižují příjem Zn rostlinami. Taktéž přítomnost vyšších množství železa a mědi omezuje příjem Zn (Das & Green, 2016). Různé rostliny projevují různou citlivost na nedostatek Zn, některé, jako kukuřice, chmel, vinná réva a ovocné stromy, projevují snadněji nedostatek.

Zinek v rostlině

Zinek má fyziologický význam jako součást enzymů, které aktivují různé enzymové reakce. Je důležitý pro metabolismus glycidů a syntézu bílkovin. Nedostatek Zn může vést ke snížené syntéze bílkovin a nižší aktivitě enzymů, což ovlivňuje růst rostlin (Das & Green, 2016). Vysoký obsah Zn je spojen s jeho nezbytností při syntéze bílkovin a DNA (Broadley et al., 2007).

Celkově je tedy zinek klíčovým prvkem pro správný růst a metabolické procesy rostlin, a jeho nedostatek může mít vážné důsledky na jejich vývoj.

Přebytek zinku v půdě může nastat v důsledku pravidelného hnojení zinkem, což způsobuje výrazné zvýšení obsahu Zn v půdě. Tento nadměrný příjem lze omezit vápněním. V prostředí s vysokým obsahem Zn je narušen příjem železa rostlinami, což vede k jejich špatnému růstu a výrazné chloróze (Adriano, 2013). Rostliny vystaveny vysokým hladinám zinku mohou pociťovat příznaky toxicity, jako je zastavení růstu, chloróza listů, snížený vývoj kořenů a snížená celková vitalita rostlin. Kromě toho může vysoká hladina zinku narušit příjem živin a narušit rovnováhu dalších základních minerálů v rostlině. To může vést k nerovnováze a nedostatku živin, což dále ohrožuje zdraví a produktivitu rostliny. Kromě toho může nadbytek zinku v rostlinách ovlivnit jejich fyziologické procesy a biochemické cesty. To může mít za následek sníženou fotosyntézu, poruchu metabolismu sacharidů a změněnou aktivitu enzymů.

Nedostatek Zn může způsobit různé příznaky v závislosti na druhu rostliny. Mezi ně patří světlé až bílé skvrny na listech, červenohnědé nekrotické zóny v chlorotických pásech, zakrnělý růst, stočené listy, pukání stonků a omezený růst letorostů u ovocných stromů. Nedostatek Zn může též snížit syntézu RNA, obsah bílkovin a škrobu (Thorne, 1957).

Hnojení zinkem

Aby byl zajištěn přiměřený příjem zinku rostlinami, je nutné upravit půdní podmínky, zejména pH. Na alkalických půdách se doporučuje omezit jednorázové a vyšší dávky fosforečných hnojiv a preferovat kyselá dusíkatá hnojiva, jako je síran amonný. Pro půdy s nízkým obsahem Zn se doporučuje hnojit síranem zinečnatým, přičemž doporučené dávky jsou kolem 10 kg Zn/ha pro těžší půdy a 6 kg Zn/ha pro lehké půdy, zejména pro kukuřici (Vaněk et al., 2012).

Mimokořenová aplikace Zn může být prováděna pomocí 0,1% roztoku síranu zinečnatého nebo hnojiva Zinkocit s obsahem 6,2 % Zn a 4,2 % N v koncentraci asi 0,2 %. Postřiky jsou vhodné především u trvalých kultur a při akutním nedostatku Zn, kdy není možné zajistit dostatečný příjem z půdy (Vaněk et al., 2012). Opakování postřiků a možnost sloučení hnojařského opatření s ochranou proti chorobám jsou důležité faktory (Vaněk et al. 2012).

Kadmium

Kadmium (Cd) je považováno za jedno z nejtoxičtějších kovů, které mohou negativně ovlivnit biologickou aktivitu půdy, metabolismus rostlin a zdraví lidí a zvířat. Cd má také velice dlouhý poločas rozpadu, který ho dělá o to větším rizikem pro zdraví. Studie od Clemens et al. (2013) ukázala, že Cd se může nacházet v lidských ledvinách 10 až 30 let. Cd se dostává do těla člověka dvěma hlavními způsoby, kouřením a stravou.

Sorpce různých forem kadmia půdními složkami byla široce studována. Adsorpce, nikoliv precipitace, pravděpodobně ovlivňuje koncentrace kadmia v půdních roztocích, dokud není překročena prahová hodnota pH. Sorpce kadmia je silně ovlivněna pH a oxidačním potenciálem. V kyselém prostředí je kadmium nejvíce mobilní (pH 4,5–5,5), zatímco v alkalické půdě je spíše nemobilní (Pendias & Kabata-Pendias, 2000)

Výzkumy naznačují, že organická hmota a seskvioxidy mají v kyselých půdách značný vliv na rozpustnost kadmia, zatímco v alkalických půdách dochází k precipitaci kadmiových sloučenin. Množství kadmia vázaného na organickou hmotu a v reziduální frakci se zdá být relativně stabilní, zatímco jeho směnítelné formy významně rostou při aplikaci kalů (Adriano, 2013). Mikrobiální aktivita v půdě hraje také významnou roli v chování kadmia, s pozorovaným vázáním a následným uvolňováním kadmia pod vlivem mikroorganismů (Pendias & Kabata-Pendias, 2000).

Celkově je sorpce kadmia v půdě velmi rychlý proces, který závisí na pH. Koncentrace kadmia v půdním roztoku jsou obvykle nízké, s rozmezím od 0,2 do 6 µg/L. Tato hodnota může být výrazně vyšší (až 300 µg/L) v kontaminovaných půdách. Rozpustnost kadmia je úzce spojena s kyselostí půdního roztoku, a kritická kyselost v minerálních půdách se pohybuje mezi pH 4,0 a 4,5. Zvýšení koncentrace kadmia je zaznamenáno i při malém poklesu pH (McLaughlin & Singh, 2012).

Dostupnost těžkých kovů v půdě

Příjem toxických prvků rostlinami v půdách je ovlivňován několika faktory, včetně biologické dostupnosti, absorbované dávky, pH půdy, dostupnosti živin, půdní struktury a přítomnosti organické hmoty. Tyto faktory se vzájemně ovlivňují a buď podporují, nebo omezují příjem

toxických prvků rostlinami. Jedním z klíčových faktorů, které omezuje příjem toxických prvků rostlinami v půdách, je jejich biologická dostupnost (Peralta-Videa et al., 2009). Vysoká úroveň biologické dostupnosti činí toxické prvky pro rostliny dostupnější, zvyšuje jejich příjem a potenciál toxicity. Dalším faktorem je pH půdy. Kyselé podmínky zvyšují biologickou dostupnost a toxicitu těžkých kovů, zatímco zásadité podmínky mohou vést k tvorbě nerozpustných sloučenin, což snižuje příjem rostlinami. Navíc přítomnost organické hmoty v půdě může ovlivnit příjem toxických prvků rostlinami (Ayangbenro & Babalola, 2017). Hmota může působit jako pojivo, snižuje biologickou dostupnost toxických prvků a omezuje jejich příjem rostlinami.

Dalším velmi důležitým faktorem ovlivňujícím dostupnost toxických prvků je redoxní potenciál půdy. Vysoké redoxní hodnoty se nacházejí v dobře provzdušněných půdách a v podmáčených půdách jsou redoxní hodnoty nízké. Existují ale různé názory, jak redoxní potenciál ovlivňuje dostupnost toxických prvků v půdě. Někteří uvádějí, že dostupnost Pb, Cd a Zn se zvyšuje při menším redoxním potenciálu (Thalassinos et al., 2023).

Příjem těžkých kovů rostlinami je ovlivněn různými faktory, včetně přítomnosti organických koloidních povrchů v půdě. Tyto organické koloidní povrchy mohou interagovat s těžkými kovy, což ovlivňuje jejich dostupnost pro příjem rostlinami. Osmolovskaya et al. (2018) zdůrazňuje roli organických kyselin při chelataci iontů těžkých kovů, snížení jejich biologické dostupnosti a zvýšení tolerance rostlin. To dále podporuje Clemente et al. (2005), který zjistil, že přidání organických sloučenin a vápenatých hmot do kontaminované půdy zvýšilo produkci rostlinné biomasy a změnilo akumulaci kovů. Balabane et al. (1999) potvrdil význam dynamiky půdní organické hmoty pro osud těžkých kovů, přičemž těžké kovy se nacházejí hlavně ve vrstvě půdy bohaté na organické látky. Cataldo et al. (1978) zdůrazňuje vliv půdy a rostlinných faktorů na akumulaci kovů, přičemž rozpustnost kovu v půdě a kořen rostliny působí jako klíčové determinanty. Tyto studie společně podtrhují významný vliv organických koloidních povrchů na absorpci těžkých kovů rostlinami.

Fotosyntéza

Fotosyntéza je životně důležitý proces, který rostlinám umožňuje přeměňovat sluneční světlo na chemickou energii (Britannica, 2022). Je to proces, při kterém rostliny využívají sluneční světlo, vodu a oxid uhličitý k výrobě glukózy a kyslíku. Fotosyntézu lze rozdělit do dvou hlavních fází: světelná reakce a Calvinův cyklus (neboli temná reakce) (Keller, 2015). Během světelných reakcí zachycují chlorofylové pigmenty v listech rostliny sluneční energii. Tato energie se využívá ke štěpení molekul vody na ionty kyslíku a vodíku. Kyslík se uvolňuje do atmosféry jako odpadní produkt, zatímco vodíkové ionty se používají k výrobě ATP (adenosintrifosfát) a NADPH (nikotinamid adenindinukleotidfosfát), které jsou oba nezbytné pro Calvinův cyklus (Britannica, 2022). Calvinův cyklus, také známý jako temné reakce, se vyskytuje ve stomatu chloroplastů rostliny (Cooper, Geoffrey 2000). Během Calvinova cyklu se oxid uhličitý z atmosféry kombinuje s ATP a NADPH generovanými při světelných

reakcích. Tato kombinace oxidu uhličitého a energie má za následek produkci glukózy, kterou rostlina využívá jako zdroj energie a stavební kámen pro další makromolekuly.

Efekt těžkých kovů na fotosyntézu rostlin

Vysoké koncentrace těžkých kovů mohou mít škodlivé účinky na růst a výnos plodin, stejně jako na morfologii, anatomii a fotosyntetickou aktivitu listů. Tyto kovy, jako je zinek, kadmium, měď, rtuť a chrom, mohou u rostlin vést k viditelnému poškození a fyziologickým poruchám. Kromě toho mohou těžké kovy vyvolat oxidační stres a vytvářet reaktivní formy kyslíku v listech, což může způsobit poškození buněčných struktur a narušit normální fungování chloroplastů, což ovlivňuje i fotosyntézu. (Edelstein & Ben-Hur, 2018)

Těžké kovy nejčastěji ovlivňují velikost buněk uvnitř rostlin a také narušují jejich strukturu. Nejvíce zřejmé jsou změny v chloroplastu, kde dochází k narušení struktury, vzhledu a výstavbě jednotlivých částí. Thylakoidy jsou těžkými kovy narušeny, a tím se mění obsah chlorofylu. Grana chloroplastu ubývají a bobtnají. Tyto změny způsobují menší efektivitu chloroplastu, a tudíž menší míru fotosyntézy. U bobu obecného (*Vicia faba*), který byl pěstován v půdě kontaminované těžkými kovy, jako Pb, Cd a Zn, byly objeveny zduřele tylakoidy v menším počtu než u kontrolní skupiny (Probst et al., 2009). Snížené hodnoty fotosyntézy mají za následek také snížený obsah biomasy rostlin (Lhotská et al., 2023).

Kadmium může, například, nepřímo ovlivňovat metabolické procesy a způsobovat oxidativní poškození, což má za následek snížení obsahu chlorofylu. Existují však rozpory ohledně toho, zda je kadmium inhibitorem fotosystému II nebo zda fáze fotosyntézy nereaguje na přítomnost kadmia. (Baryla et al., 2001)

Účinky zinku na fotosyntézu

Fotosyntéza je životně důležitý proces v rostlinách, který je zodpovědný za přeměnu slunečního světla na chemickou energii, což v konečném důsledku podporuje růst a vývoj rostlin. Vysoké koncentrace zinku však mohou mít škodlivé účinky na fotosyntézu. Vysoké koncentrace zinku mohou zasahovat do fotochemie rostlin, což vede k poruchám v různých fyziologických procesech včetně fotosyntézy, vodních vztahů, metabolismu iontů a příjmu minerálů. Tento zásah může významně ovlivnit celkovou fotosyntetickou kapacitu rostlin, protože zinek narušuje životně důležitý aparát zapojený do fotosyntézy. zinek narušuje fungování fotosyntetických pigmentů a fotosystémů, stejně jako systém přenosu elektronů a cesty redukce CO₂. Navíc vyšší koncentrace zinku brání absorpci a translokaci fosforu v rostlinách (Ishmaru et al. 2011). Tato překážka v absorpci živin může dále ovlivnit fotosyntézu, protože fosfor je nezbytný pro přenos energie a údržbu fotosyntetického aparátu.

Účinky těžkých kovů na fluorescenci chlorofylu v rostlinách

Fluorescence chlorofylu je důležitý proces v rostlinách, který je úzce spojen s fotosyntézou a může poskytnout cenné poznatky o zdravotním a fyziologickém stavu rostliny. Když jsou rostliny vystaveny těžkým kovům, jako je zinek a kadmium, může to ovlivnit jejich fluorescenci chlorofylu. Studie (Pandey & Gopal, 2011) ukázala, že zinek a kadmium mohou ovlivnit fotosyntetické aktivity rostlin tím, že změní jejich fluorescenční spektrum chlorofylu. Například výzkum pšenice tvrdé (*Triticum durum*), pěstované za pomoci hydroponie, vystavené působení zinku a kadmia ukázal, že různé dávky zinku a kadmia narušily přenos elektronů, a tím způsobily až pětinasobně menší účinnost transformaci energie ve fotosystému 2. V tomto výzkumu také bylo zjištěno že celkově kadmium mělo větší negativní efekt na fotochemii pšenice než zinek (Paunov et al.2018).

Salát rostoucí na půdě kontaminované hutní činností toxickými prvky (As + Cd +Pb +Zn). Zdroj:
Ing. Veronika Zemanová Ph.D.



Locika setá (*Lactuca sativa* L.)

Locika setá (*Lactuca sativa* L.) pravděpodobně vznikla z planého druhu *Lactuca serriola*, který se přirozeně vyskytuje od Středomoří přes střední a východní Evropu až po Asii. Nejstarší zmínky o pěstování v Evropě jsou známy z antického Řecka, odkud se locika setá postupně rozšířila po celém kontinentu. V 16. století byl v Evropě již oblíbenou zeleninou. Latinský název *Lactuca sativa* může mít původ ve slově "lac" (mléko), což odkazuje na bílý latex, který se u některých odrůd může uvolňovat. Dnes existují různé odrůdy lociky seté s různými tvary a barvami listů. Locika setá je jednoletá rostlina, která začíná vytvářet přizemní růžici listů. Během růstu může rostlina vykvést, a to zejména při delším dni. Lodyha může dosáhnout výšky až 30 cm, a listy jsou často tvořeny zubatým okrajem. Květy lociky seté jsou malé, žluté a tvoří květenství na vrcholu lodyhy (Novák, Skalický 2017.). Locika setá je ceněným zdrojem živin. Obsahuje vlákninu, vitaminy (A, C, K), minerály a antioxidanty.

Pěstování lociky seté

Locika setá preferuje chladné klimatické podmínky, a proto je ideální ji pěstovat na jaře nebo na podzim, kdy teploty nejsou extrémně vysoké. Dává přednost plnému slunci, ale v teplejším

prostředí je vhodné mu poskytnout lehký stín. Půda by měla být dobře odvodněná, s dostatečným obsahem organické hmoty. Před výsadbou je vhodné aplikovat komplexní hnojivo s rovnoměrným obsahem živin, zejména dusíku, fosforu a draslíku.

Semena lze přímo vysévat do půdy nebo začínat v nádobách a později je přesazovat. Optimální hloubka pro výsev je obvykle kolem 6-10 mm. Rozestup mezi rostlinami by měl být kolem 30 cm, což umožňuje dostatečný prostor pro růst.

Mezi běžné choroby lociky patří plíseň špenátu (*Peronospora farinosa*), kterou lze řešit volbou odolných odrůd. Problémová také bývá bakteriální hniloba salátu, která se projevuje černými skvrnami na listech lociky. Škůdci mohou zahrnovat hlavně slimáky a mšice. Pravidelná kontrola a použití chemických prostředků mohou pomoci minimalizovat škody.

4 Metodika

Pro sledování vlivu Cd a Zn na fyziologii salátu hlávkového byl s antropogenně kontaminovanou půdou založen vegetační nádobový pokus ve skleníku Katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin. U tohoto zástupce listové zeleniny byl sledován obsah Cd a Zn v biomase a jejich vliv na růst, vodní potenciál a parametry fotosyntézy spolu s obsahem fotosyntetických pigmentů.

1.1 Nádobový pokus

V nádobovém pokusu byly použity dva typy půd, jejichž základní charakteristika je uvedena v tabulce 1. Půda z lokality Praha-Suchdol (50°8'8" N, 14°22'43" E) byla použita jako kontrolní varianta s ohledem na stanovené pseudototální obsahy Cd a Zn, které jsou pod limitem legislativně uváděných preventivních hodnot rizikových prvků v zemědělských půdách ČR (Vyhláška č. 153/2016 Sb.). Pokusná půda s antropogenní kontaminací byla z lokality Příbramsko-Podlesí (49°42'24" N, 13°58'32" E). Kontaminace půd rizikovými prvky v této lokalitě je historickou zátěží z těžby a zpracování rud a stanovené pseudototální obsahy rizikových prvků jsou nad limitem legislativně uváděných preventivních hodnot rizikových prvků v zemědělských půdách ČR (Vyhláška č. 153/2016 Sb.).

Tabulka 1. Základní charakteristika pokusných půd.

	Suchdol	Podlesí
Půdní typ a subtyp	Černozem modální	Kambizem modální
PH _{H2O} (-)	7,5	6,1
KVK (mmol ₍₊₎ /kg)	258	134
C _{org} (%)	1,8	2,1
Cd (mg/kg)	0,4 ± 0,01	2,4 ± 0,2
Zn (mg/kg)	103,6 ± 1,8	135,6 ± 0,2

KVK – kationtová výměnná kapacita; C_{org} – organický uhlík; limitní hodnoty: Cd – 0,5 mg/kg, Zn – 120 mg/kg

Do plastových nádob bylo odváženo 5 kg zhomogenizované půdy, která byla hnojena N (dávka 0,5 g/nádobu, ve formě NH_4NO_3), P a K (dávka 0,16 a 0,4 g/nádobu, ve formě K_2HPO_4). V případě kontrolní varianty byla půda z lokality Suchdol naředěna pískem v poměru 4:1 (w/w). Obě varianty byly provedeny ve čtyřech opakováních. Nádoby byly rozmístěny v náhodném pořadí a během pokusu byly pravidelně přemísťovány z důvodu eliminace vlivu podmínek vnějšího prostředí.

Sadba salátu hlávkového, botanickým názvem lociky seté (*Lactuca sativa L.* odrůda ADINAL) byla zakoupena ve výukovém skleníku České zemědělské univerzity v Praze. Tato poloraná odrůda máslového typu je určena pro celoroční pěstování. Její hlávky jsou kulaté a středně velké. Rostliny v sadbě byly jednotné velikosti s 8 vyvinutými listy. Do každé nádoby byla zasazena jedna rostlina salátu. Salát byl pěstován ve skleníku při parametrech: teplota vzduchu 22 °C/ 18 °C (den/noc), půdní vlhkost 60 % maximální vodní kapacity, světelný režim 16 h/ 8 h (den/noc), intenzita osvětlení 375 W/m².

Salát byl sklizen v konzumní zralosti, tj. po 35 dnech růstu v pokusných nádobách. Měření fotosyntetických parametrů bylo provedeno den před sklizní salátu. Při odběru byla biomasa salátu rozdělena na listy a kořeny, které byly omyty demineralizovanou vodou, osušeny buničitou vatou a zváženy. Z čerstvé biomasy listů byly odebrány vzorky pro stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů a vodního potenciálu. Následně byla biomasa listů a kořenů dána na sušení (40 °C, konstantní hmotnost, sušárna Venticell, BMT Medical Technology) pro zjištění výnosu suché biomasy a analýzu obsahu prvků. Po usušení byla biomasa zvážena a rozemleta na analytickém mlýnku IKA A11 basic (Werke).

1.2 Analýzy

1.2.1 Stanovení obsahu prvků

V listech a kořenech salátu (navážka suché biomasy 0,5 ± 0,05 g) byl stanoven celkový obsah Cd a Zn po nízkotlakém mikrovlnném rozkladu (přístroji Ethos 1, MLS GmbH) pomocí optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES, Agilent 720, Agilent Technologies Inc.). Biomasa byla rozložena v 10 ml směsi HNO_3 a H_2O_2 v poměru 4:1 (v/v). Proces rozkladu trval 60 min při výkonu 1000-1200 W a teplotě 120-180°C. Po kvantitativním převedení vzorků z teflonových nádob do 50 ml zkumavek byl objem doplněn po rysku demineralizovanou vodou. Certifikovaný referenční materiál (SRM 1570a, listy špenátu, Analytika) a slepé vzorky byly použity pro kontrolu kvality měření. Analýza referenčního materiálu a slepých vzorků byla provedena ve dvou opakováních. Analýza vzorků biomasy byla provedena v osmi opakováních za variantu. Hodnoty měřených obsahů v mg/l jsou přepočítány na mg/kg pomocí vzorce:

$$\text{obsah prvku (mg/kg)} = \frac{[\text{obsah prvku (mg/l)} - \text{slepý vzorek (mg/l)}] \times \text{objem (ml)}}{\text{navážka (g)}}$$

1.2.2 Měření fyziologických charakteristik

V rámci primárního metabolismu salátu byla sledována rychlost fotosyntézy (A , $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$), rychlost transpirace (E , $\text{mmol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$) a stomatální vodivost (g_s , $\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2/\text{s}$) pomocí infračerveného analyzátoru plynů LCpro+ (ADC BioScientific Ltd.). Měření se uskutečnilo mezi 9 a 12 hodinou. Teplota v měřicí komůrce byla nastavena na $25\text{ }^\circ\text{C}$ a ozáření $650\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ fotosynteticky aktivního záření. Měření probíhalo na třech listech dané rostliny v nádobě příslušné varianty. Snímací zařízení bylo připevněno na list a vždy po minutě přístroj zaznamenal hodnoty. Po 10 minutách bylo snímací zařízení přemístěno na další list.

Pomocí fluorescenční metody byla sledována změna transportních mechanismů přenosu elektronů v rámci fotosystému II na základě poměru variabilní fluorescence a maximální fluorescence (F_v/F_m). Pro měření byl využit přenosný fluorometr OS5p (Opti-Sciences Inc.). Měření se uskutečnilo s excitačním impulzem 1 s ($660\ \text{nm}$) a intenzitou nasycení $3\ 000\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ po 20 minutách temnostní adaptace plně expandovaného listu, za použití listových klipsů. Měření probíhalo na třech listech dané rostliny v nádobě příslušné varianty.

Pro stanovení obsahu fotosyntetických pigmentů byly použity spektroskopicky destruktivní metody dle postupu Porra et al. (1989) a Wellburn (1994). Jako extrakční látka byl použit dimethylformamid kyseliny mravenčí (1 ml), který byl přidán k terčíku o ploše $1\ \text{cm}^2$ (tři výřezy ze tří fotosynteticky aktivních listů dané rostliny v nádobě příslušné varianty) a extrakce probíhala 24 hod v temnu. Obsah pigmentů v extraktu byl měřen na přístroji Evolution 2000 UV-VIS (Thermo Fisher Scientific Inc.). Absorbance extraktů byla měřena při vlnových délkách 480 , $646,8$ a $663,8\ \text{nm}$ a následně byl obsah vypočítán dle vzorců:

$$\text{chlorofyl } a \text{ (nmol/ml)} = 12,0 \times A_{663,8} - 3,11 \times A_{646,8}$$

$$\text{chlorofyl } b \text{ (nmol/ml)} = 20,78 \times A_{646,8} - 4,88 \times A_{663,8}$$

$$\text{celkový chlorofyl (nmol/ml)} = 7,12 \times A_{663,8} + 17,67 \times A_{646,8}$$

$$\text{karotenoidy (nmol/ml)} = (1000 \times A_{480} - 1,12 \text{ chlorofyl } a - 34,07 \text{ chlorofyl } b) / 245$$

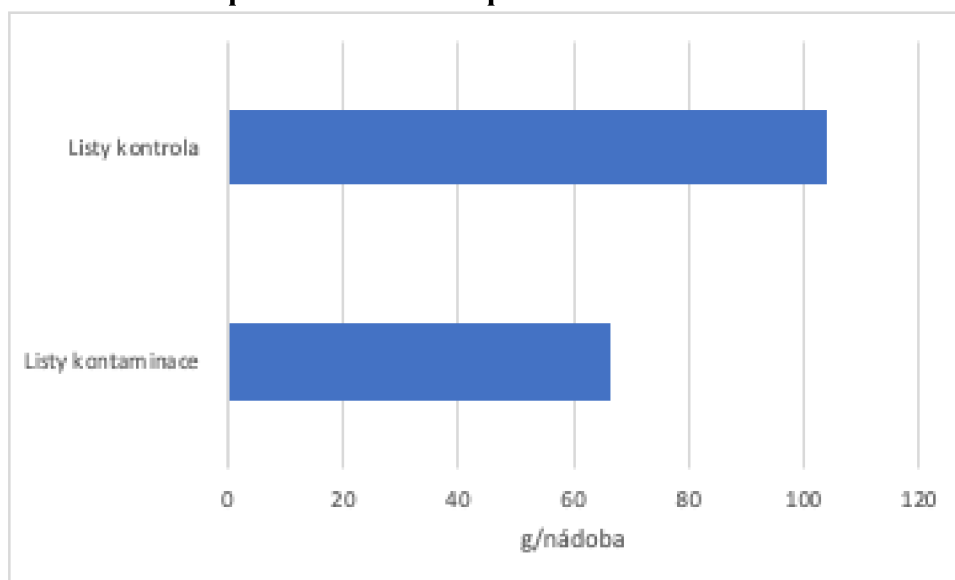
Stanovení vodního potenciálu (VP, MPa) bylo provedeno pomocí přístroje PotentiaMeter (Decagon Devices Inc.) po odebrání vzorků čerstvých listů salátu a jejich umístění do jednorázových injekčních stříkaček (1 g vzorku ze tří listů dané rostliny v nádobě příslušné varianty), které byly utěsněny parafilmem a umístěny do mrazáku ($-20\text{ }^\circ\text{C}$). Po 24 hod byl ze vzorků získán lisováním extrakt, který byl umístěn do měřicí komory přístroje.

1.2.3 Statistická analýza

Výsledky analýz byly statisticky vyhodnoceny pomocí programu Statistica 12.0 (StatSoft Inc.). Pro hodnocení homogenity rozptylu a normality byl použit Levenův a Shapiro-Wilkův test. Diference průměrů sledovaných parametrů mezi variantami byla hodnocena pomocí analýzy rozptylu jednoduchého třídění (one-way ANOVA) s Fisherovým LSD post-hoc testem ($p < 0,05$). Pro vizualizaci výsledků byl použit program Excel (Microsoft Office).

5 Výsledky

Graf 1.1: Porovnání průměrů hmotnosti listů *Lactuca sativa* pěstovaných v kontaminované půdě a v kontrolní půdě.



*v nádobě byla 1 rostlina

Průměrná hmotnost listů v kontrolní skupině je 103,8 g/nádoba. Průměrná hmotnost listů v kontaminované půdě je 66,4 g/nádoba. Tato data naznačují, že rostliny pěstované v nekontaminované půdě mají tendenci mít větší hmotnost listů ve srovnání s rostlinami pěstovanými v kontaminované půdě.

Výsledky ANOVA potvrzují statistickou významnost rozdílů mezi skupinami. Hodnota $P < 0,05$ znamená, že rozdíly ve hmotnosti listů mezi kontrolní a kontaminační skupinou nejsou pravděpodobně náhodného původu. F-kritérium (F crit) též potvrzuje statistickou významnost tohoto rozdílu na hladině významnosti 0,05.

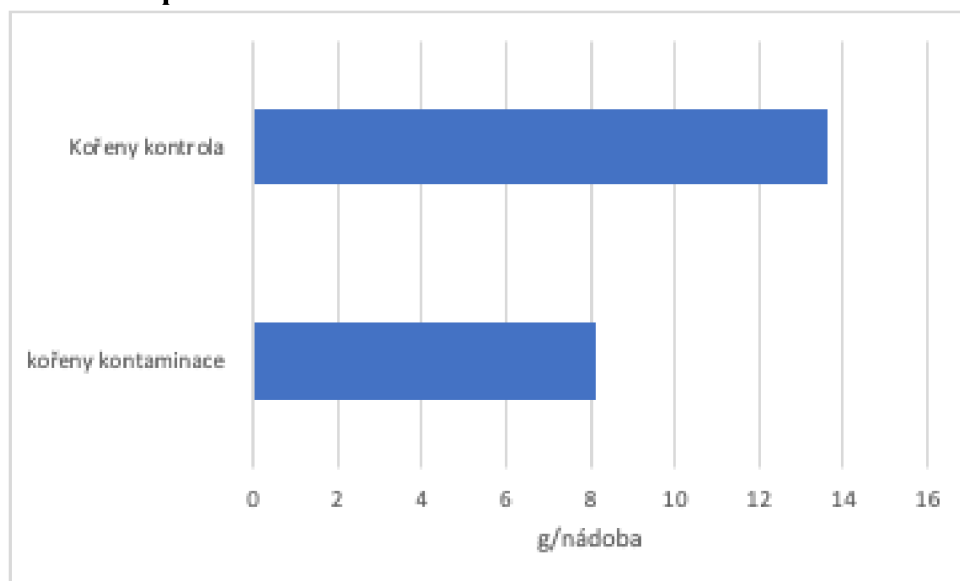
Celkově lze interpretovat, že kontaminace půdy má negativní vliv na hmotnost listů u salátu zahradního. Tento jev by mohl být způsoben například nedostatkem živin v kontaminované

půdě nebo přímým toxickým účinkem látek obsažených v kontaminaci, což brání správnému růstu a vývoji rostlin.

Obrázek 1.0 Fotografie listů Salátu setého pěstovaného na kontaminované a kontrolní půdě.
Zdroj: Ing. Veronika Zemanová Ph.D.



Graf 1.2: Porovnání průměrů hmotnosti kořenů lociky seté pěstované na kontaminované a kontrolní půdě.



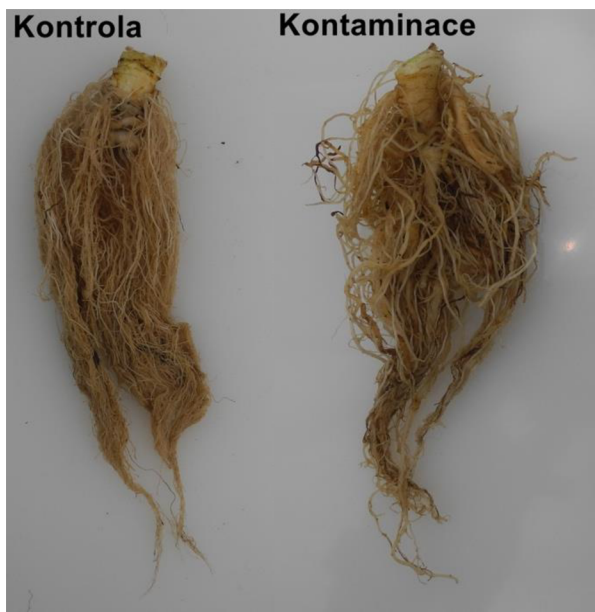
**v nádobě byla 1 rostlina*

Průměrná hmotnost kořenů v kontrolní skupině je 13,65 g/nádoba. Průměrná hmotnost kořenů v kontaminované půdě je 8,1 g/nádoba. Tato data naznačují, že rostliny pěstované v nekontaminované půdě mají tendenci mít větší hmotnost kořenů ve srovnání s rostlinami pěstovanými v kontaminované půdě.

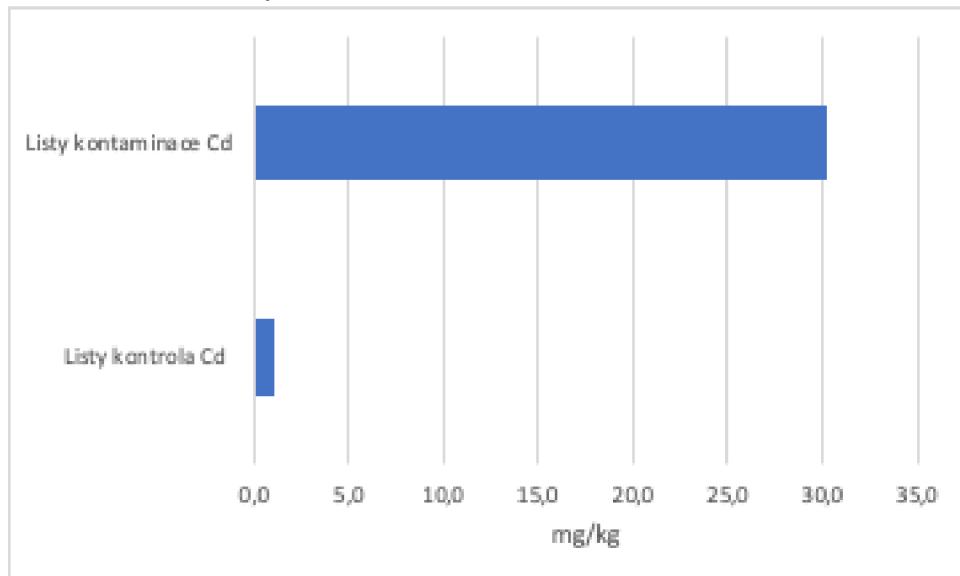
Výsledky ANOVA potvrzují statistickou významnost rozdílů mezi skupinami. Hodnota $P < 0,05$ znamená, že rozdíly v hmotnosti kořenů mezi kontrolní a kontaminační skupinou nejsou pravděpodobně náhodného původu. F-kritérium (F crit) též potvrzuje statistickou významnost tohoto rozdílu na hladině významnosti 0,05.

Celkově lze říci, že kontaminace půdy má negativní vliv na hmotnost kořenů u salátu zahradního. Tento jev by mohl být způsoben například nedostatkem živin v kontaminované půdě nebo přímým toxickým účinkem látek obsažených v kontaminaci, což brání správnému růstu a vývoji kořenů rostlin.

Obrázek 1.2, fotografie kořenů lociky seté pěstované v kontrolní půdě a kontaminované půdě.
Zdroj: Ing. Veronika Zemanová Ph.D.



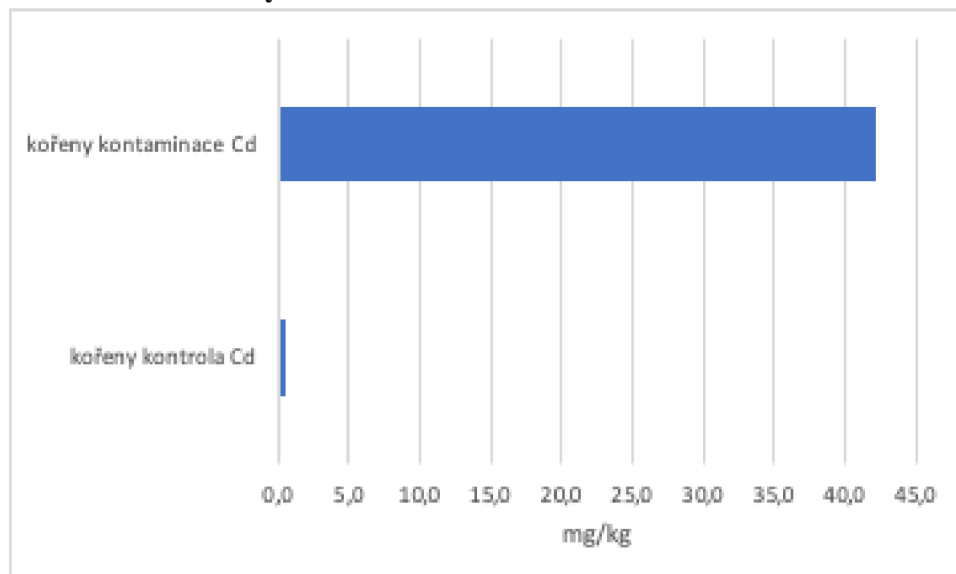
Graf 1.3: Průměrný obsah kadmia v suché biomase listu.



**v nádobě byla 1 rostlina*

Extrémní zvýšení koncentrace v kontaminované půdě: Průměrná koncentrace kadmia v listech salátu pěstovaných v kontaminované půdě je extrémně vyšší než v kontrolní půdě. Toto výrazné zvýšení koncentrace naznačuje, že kadmium bylo účinně přeneseno do rostlin z kontaminované půdy. Kadmium může být absorbováno kořeny rostlin a transportováno do nadzemní části rostliny, zejména do listů. Vlivem kontaminované půdy došlo k výrazné akumulaci kadmia v listech salátu.

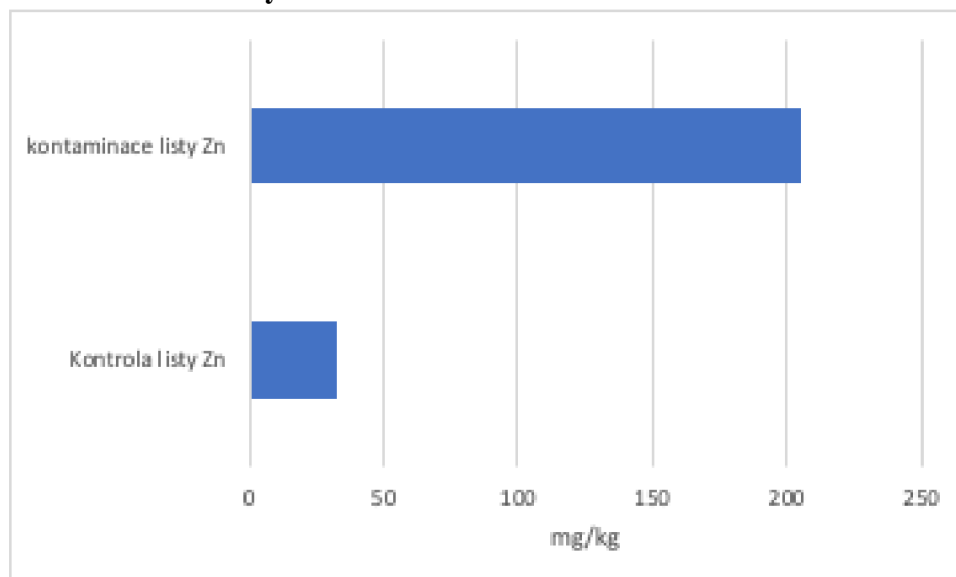
Graf 1.4: Průměrný obsah kadmia v suché biomase kořenu



**v nádobě byla 1 rostlina*

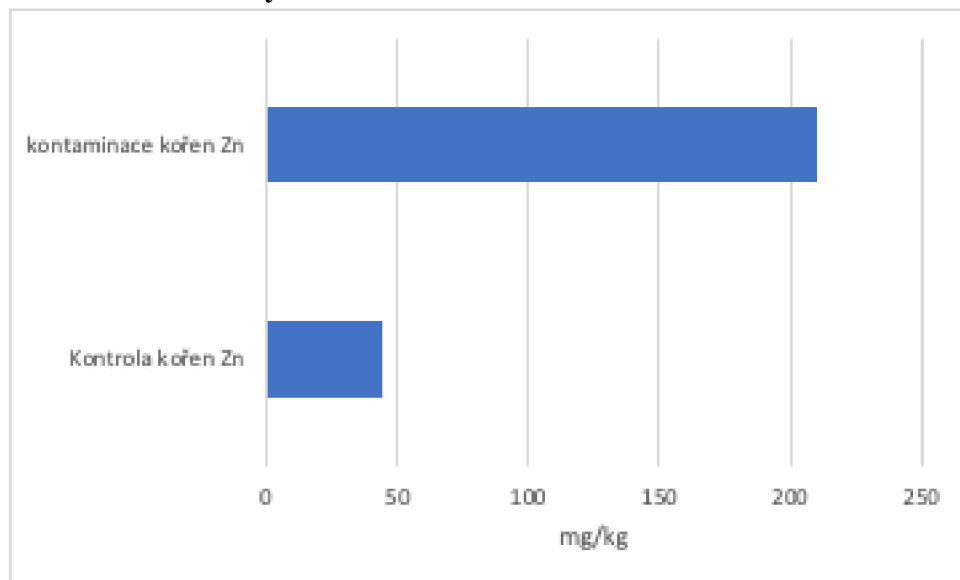
Průměrná koncentrace kadmia v kořenech lociky pěstované v kontaminované půdě je více než 75x vyšší než v kontrolní půdě. Toto zvýšení je výrazné a ukazuje na významný přenos kadmia z půdy do rostlin. Průměrný obsah kadmia v kořenech lociky v kontaminované půdě přesahuje bezpečnostní normy pro potraviny. Při konzumaci těchto rostlin může být vystavení kadmia lidskému zdraví významné.

Graf 1.5: Průměrný obsah zinku v suché biomase listu



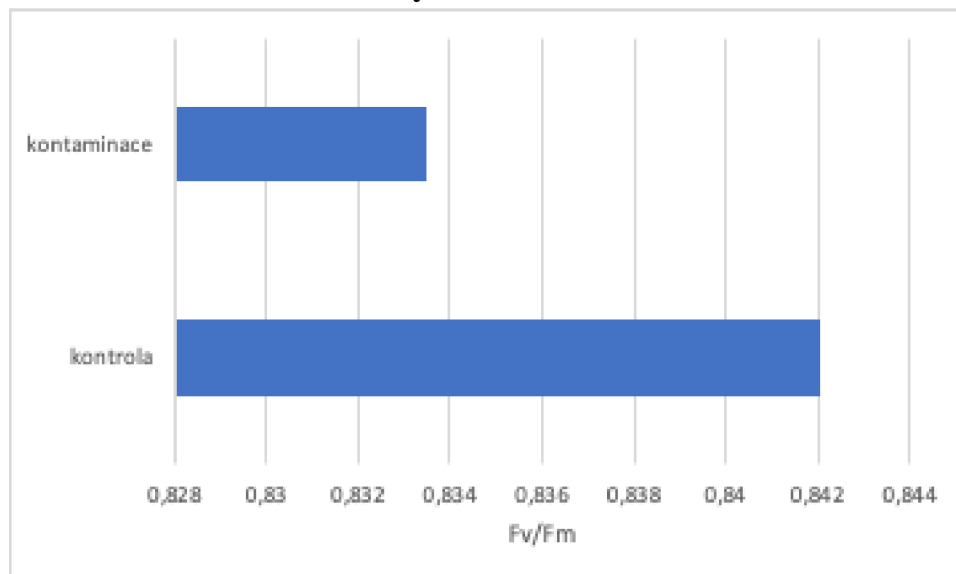
Průměrný obsah zinku v listech lociky pěstované v kontaminované půdě je přibližně šestkrát vyšší než v kontrolní půdě. Konkrétně průměr v kontaminované půdě je 205,2 mg/kg oproti 32,6 mg/kg v kontrolní půdě. Výsledky v kontaminované půdě vykazují rozsah od 140,0 mg/kg do 292,1 mg/kg. Tato variabilita může být způsobena nerovnoměrným rozložením kontaminace v půdě nebo rozdíly v absorpci zinku jednotlivými rostlinami.

Graf 1.6: Průměrný obsah zinku v suché biomase kořenů



Průměrný obsah zinku v kořenech salátu pěstovaných v kontaminované půdě je přibližně pětkrát vyšší než v kontrolní půdě. Konkrétně průměr v kontaminované půdě je 210,2 mg/kg oproti 44,4 mg/kg v kontrolní půdě. Výsledky v kontaminované půdě vykazují rozsah od 185,8 mg/kg do 235,3 mg/kg. Tato variabilita může být způsobena nerovnoměrným rozložením kontaminace v půdě nebo rozdíly v absorpci zinku jednotlivými rostlinami.

Graf 1.7 Fluorescence chlorofylu

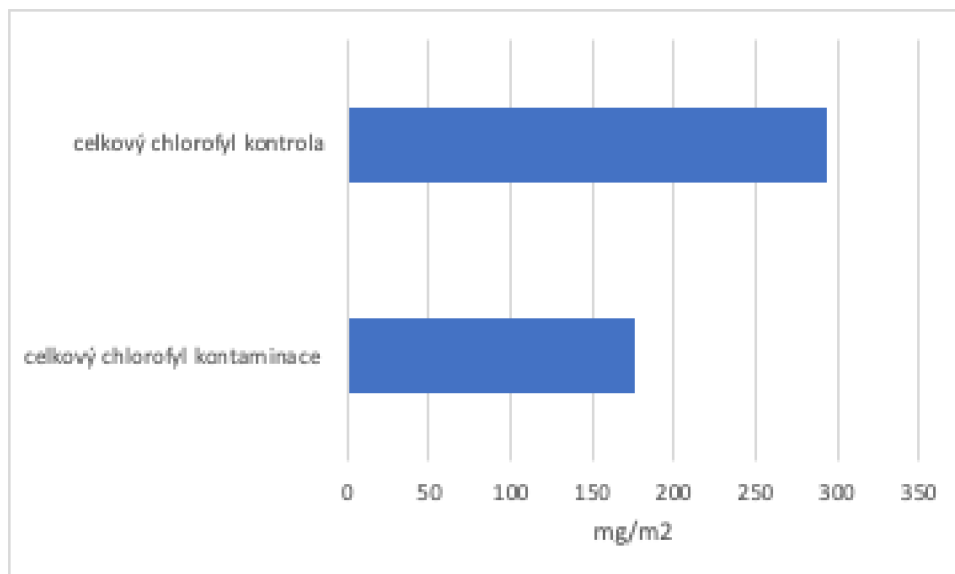


Průměrné hodnoty Fv/Fm pro kontrolní skupinu jsou přibližně 0,842, zatímco pro rostliny pěstované v kontaminované půdě jsou kolem 0,833. Tato data naznačují, že rostliny pěstované v kontaminované půdě vykazují sníženou hodnotu Fv/Fm ve srovnání s kontrolními rostlinami. Fv/Fm je poměr maximální fluorescence (Fv) a maximální fluorescence při nízké světelné intenzitě (Fm), který poskytuje informace o efektivitě fotosyntetického aparátu.

Výsledky ANOVA (analýza rozptylu) potvrzují statistickou významnost rozdílu mezi skupinami. Hodnota $P < 0,05$ naznačuje, že rozdíly ve Fv/Fm mezi kontrolní a kontaminační skupinou jsou pravděpodobně skutečné a nenáhodné. F-kritérium (F crit) stanovené na úrovni 0,05 podporuje závěr o statistické významnosti rozdílu mezi skupinami.

Celkově lze interpretovat, že kontaminace půdy má negativní vliv na fotochemickou efektivitu fotosystému II u lociky seté, což může indikovat možné poškození fotosyntetického aparátu vlivem přítomnosti kontaminantů v půdě.

Graf 1.8 Celkový obsah chlorofylu



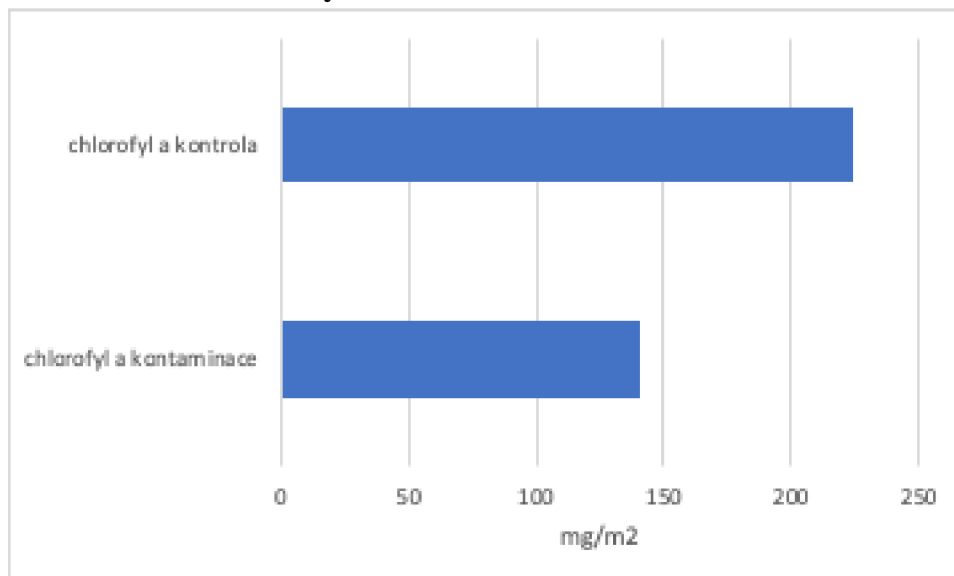
Výsledky měření obsahu chlorofylu u lociky seté naznačují potenciální vliv kontaminace půdy na celkový obsah chlorofylu v listech rostlin. Průměrný celkový obsah chlorofylu v listech rostlin pěstovaných v nekontaminované půdě je 277,65 mg/m².

Průměrný celkový obsah chlorofylu v listech rostlin pěstovaných v kontaminované půdě je 185,16 mg/m².

Tato data naznačují, že rostliny pěstované v nekontaminované půdě mají tendenci mít vyšší celkový obsah chlorofylu ve srovnání s rostlinami pěstovanými v kontaminované půdě.

Tento rozdíl mezi skupinami byl podroben statistické analýze pomocí testu ANOVA, který potvrdil statistickou významnost rozdílů mezi celkovým obsahem chlorofylu v listech rostlin pěstovaných v kontaminované a nekontaminované půdě. Hodnota $P < 0,05$ naznačuje, že rozdíly jsou pravděpodobně náhodného původu. F-kritérium (F crit) též podporuje statistickou významnost tohoto rozdílu na hladině významnosti 0,05.

Graf 1.9 Obsah chlorofylu a v listech

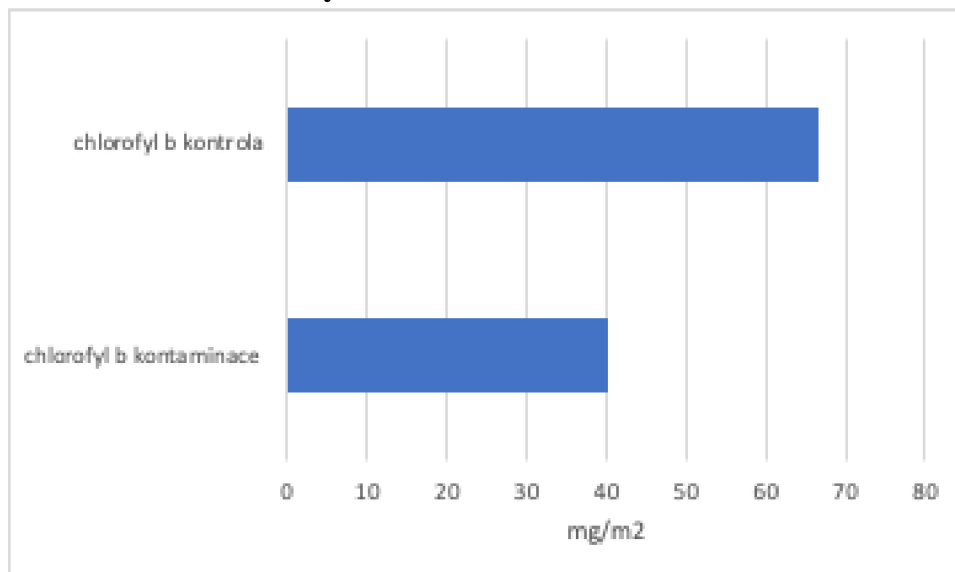


Výsledky měření obsahu chlorofylu A u lokiky seté naznačují možný vliv kontaminace půdy na obsah chlorofylu A v listech rostlin. Průměrný obsah chlorofylu A v listech rostlin pěstovaných v nekontaminované půdě je 215,05 mg/m². Průměrný obsah chlorofylu A v listech rostlin pěstovaných v kontaminované půdě je 143,71 mg/m².

Tato data naznačují, že rostliny pěstované v nekontaminované půdě mají tendenci mít vyšší obsah chlorofylu A ve srovnání s rostlinami pěstovanými v kontaminované půdě.

Tento rozdíl mezi skupinami byl podroben statistické analýze pomocí testu ANOVA, který potvrdil statistickou významnost rozdílů mezi obsahem chlorofylu A v listech rostlin pěstovaných v kontaminované a nekontaminované půdě. Hodnota $P < 0,05$ naznačuje, že rozdíly jsou pravděpodobně náhodného původu. F-kritérium (F crit) též podporuje statistickou významnost tohoto rozdílu na hladině významnosti 0,05.

Graf 2.0 Obsah chlorofylu b v listech

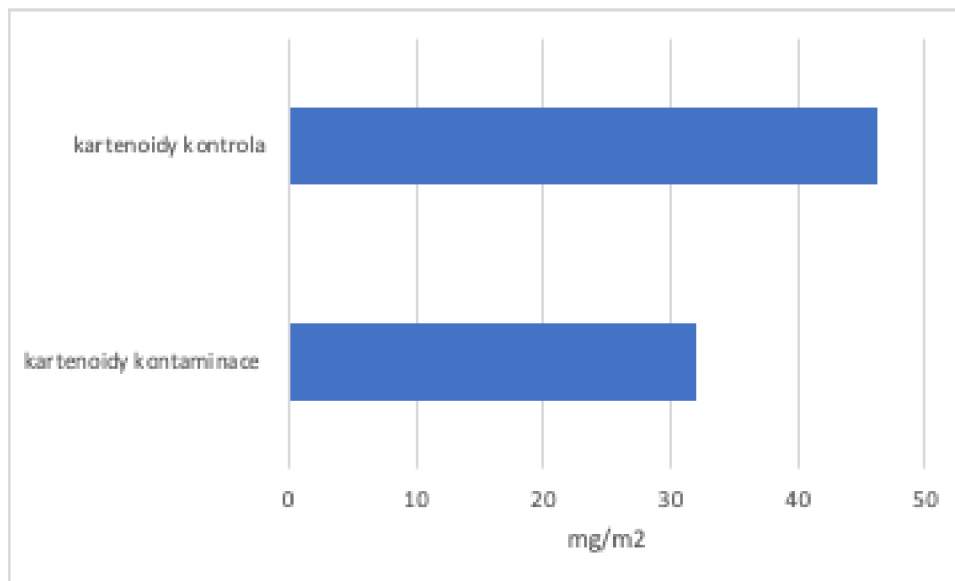


Výsledky měření obsahu chlorofylu B u lociky seté naznačují, že kontaminace půdy může mít vliv na obsah chlorofylu B v listech rostlin. Průměrný obsah chlorofylu B v listech rostlin pěstovaných v nekontaminované půdě je 62,60 mg/m². Průměrný obsah chlorofylu B v listech rostlin pěstovaných v kontaminované půdě je 41,45 mg/m².

Tato data naznačují, že rostliny pěstované v nekontaminované půdě mají tendenci mít vyšší obsah chlorofylu B ve srovnání s rostlinami pěstovanými v kontaminované půdě.

Test ANOVA prokázal statisticky významné rozdíly mezi obsahem chlorofylu B v listech rostlin pěstovaných v kontaminované a nekontaminované půdě. Hodnota $P < 0,05$ naznačuje, že rozdíly jsou pravděpodobně náhodného původu. F-kritérium (F crit) též podporuje statistickou významnost tohoto rozdílu na hladině významnosti 0,05.

Graf 2.1 Obsah karotenoidů v listech

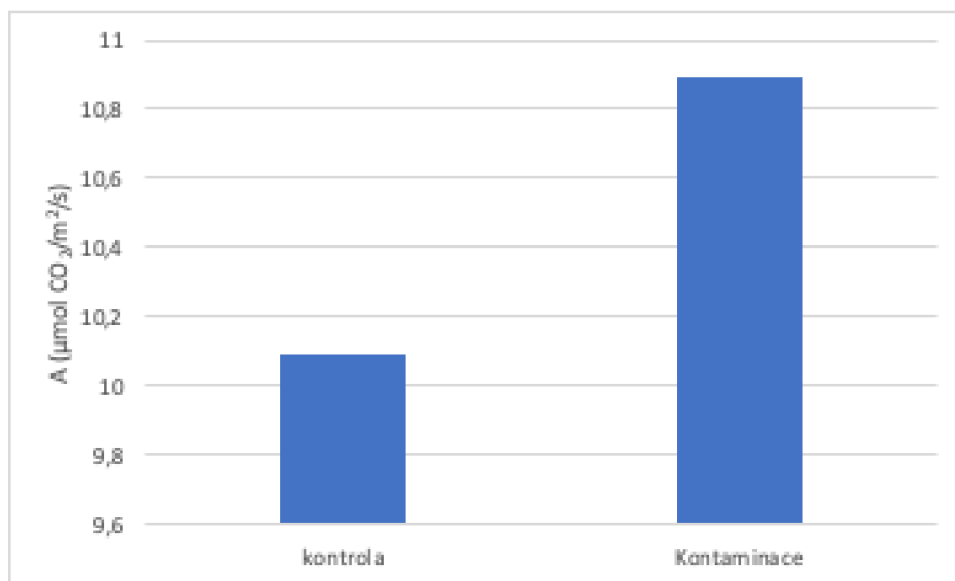


Výsledky měření obsahu karotenoidů u lociky seté naznačují, že kontaminace půdy může mít vliv na obsah karotenoidů v rostlinách. Průměrný obsah karotenoidů v rostlinách pěstovaných v nekontaminované půdě je 46,19 mg/m². Průměrný obsah karotenoidů v rostlinách pěstovaných v kontaminované půdě je 31,98 mg/m².

Tato data naznačují, že rostliny pěstované v nekontaminované půdě mají tendenci mít vyšší obsah karotenoidů ve srovnání s rostlinami pěstovanými v kontaminované půdě.

Test ANOVA prokázal statisticky významné rozdíly mezi obsahem karotenoidů v rostlinách pěstovaných v kontaminované a nekontaminované půdě. Hodnota $P < 0,05$ naznačuje, že rozdíly jsou pravděpodobně náhodného původu. F-kritérium (F crit) též podporuje statistickou významnost tohoto rozdílu na hladině významnosti 0,05.

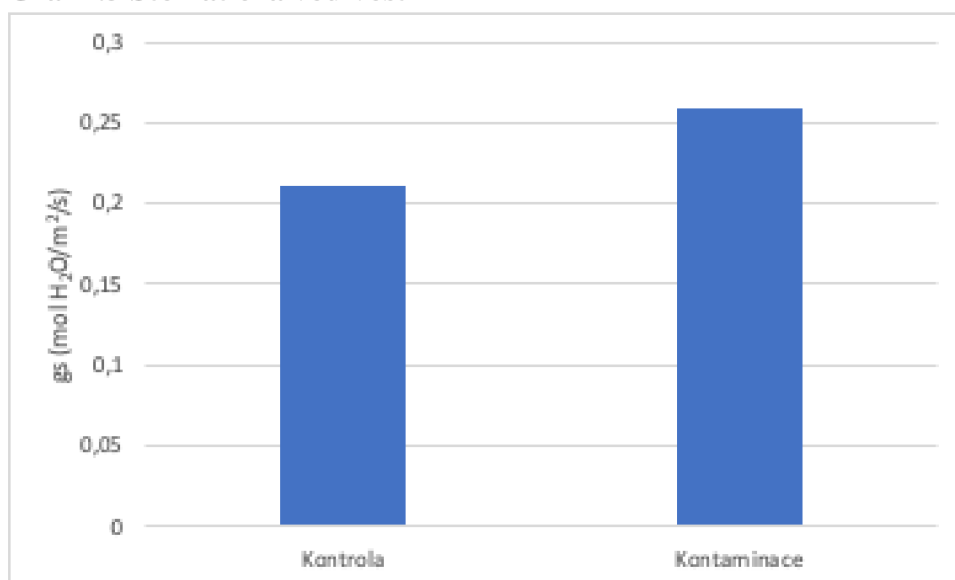
Graf 2.2 Asimilace CO₂



Průměrná hodnota asimilace CO₂ u kontrolní skupiny byla 10,09 μmol CO₂/m²/s.

Průměrná hodnota asimilace CO₂ u kontaminované skupiny byla 10,89 μmol CO₂/m²/s. Tyto výsledky naznačují, že salát pěstovaný na půdě kontaminované zinkem a kadmiiem má mírně vyšší míru asimilace CO₂ ve srovnání s kontrolní skupinou.

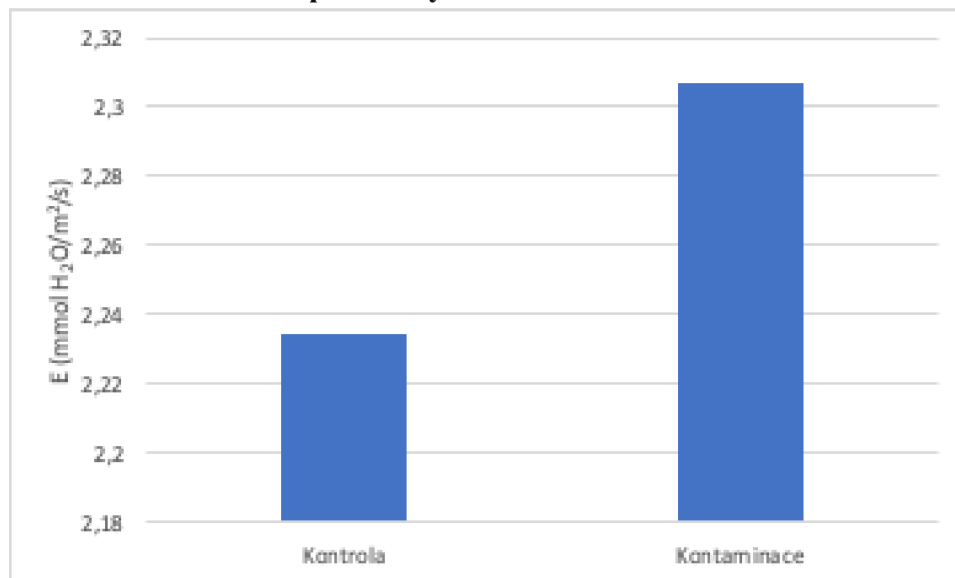
Graf 2.3 Stomatická vodivost



Průměrná stomatická vodivost u kontrolní skupiny byla 0,21 mol H₂O/m²/s.

Průměrná stomatická vodivost u kontaminované skupiny byla 0,26 mol H₂O/m²/s. Tyto výsledky ukazují, že salát pěstovaný na kontaminované půdě má vyšší stomatickou vodivost ve srovnání s kontrolní skupinou.

Graf 2.4 Měření transpirační rychlosti



Průměrná transpirační rychlost u kontroly byla 2,23 mmol H₂O/m²/s.

Průměrná transpirační rychlost u kontaminovaných vzorků byla 2,31 mmol H₂O/m²/s.

Tato data naznačují, že salát pěstovaný na kontaminované půdě vykazuje mírně vyšší transpirační rychlost ve srovnání s kontrolní skupinou. Tento rozdíl by mohl naznačovat určitou reakci rostlin na přítomnost zinku a kadmia v půdě, která může ovlivnit jejich fyziologické procesy, včetně transpirace.

6 Diskuze

Toxické prvky přijímané rostlinami z kontaminované půdy mohou významně ovlivnit výnos biomasy, fyziologii rostlin i její metabolismus. Experiment potvrdil, že vlivem kontaminace půdy dojde ke snížení výnosu pěstované zeleniny. Ke snížení výnosu biomasy došlo jak v nadzemní části rostlin, tak i v kořenech. Listy kontaminovaných rostlin vážily v průměru 66.4 gramů a listy rostlin pěstovaných v kontrolní půdě vážily v průměru 103.8 gramů. Tyto výsledky odpovídají zjištění Lhotské et al. (2022, 2023), které potvrdily pokles výnosu biomasy salátu rostoucího v podmínkách kontaminace půdy toxickými prvky. Také studie Mangal et al. (2013) ukázala, že tyto těžké kovy mohou inhibovat růst a fotosyntetickou aktivitu u různých druhů rostlin a výrazně snížit hmotnost vyprodukovaných listů a kořenů. U další zeleniny – mrkve byl sledován pokles výnosu biomasy (Novák et al. 2023). Kombinace kadmia a zinku může mít za následek synergické a aditivní účinky, které dále zvyšují negativní dopad kontaminace na růst rostlin (Chaoui et al., 1997). V experimentu Chaoui et al. (1997) bylo také zjištěno, že při přidání pouze kadmia nebo zinku do substrátu, má kadmium silnější

negativní účinek než zinek. Akumulace těchto kovů v rostlinách může vést ke snížení délky kořenů a obsahu chlorofylu v listech (Symeonidis, Karataglis 1992).

Jak ukazují výsledky řady autorů, kontaminace půdy ovlivní aktivitu fotosyntézy rostlin. Výsledky našeho experimentu ukazují, že celkový obsah chlorofylu byl nižší v kontaminovaných vzorcích. To je podpořeno i dalšími studiemi například od Bano et al. (2018). Tato studie zjistila, že tyto kovy významně ovlivnily funkci oxidačních enzymů a obsah fotosyntetických pigmentů v mechu, což bylo potvrzeno snížením obsahu chlorofylu. Podobně Acharya et al. (2012) pozoroval významný pokles obsahu chlorofylu v semenáčcích ořechů vystavených těmto kovům. Také Zhou et al. (2018) potvrdil pokles koncentrace chlorofylu v klíčících rostlinách *Kosteletzkya pentacarpos* vystavených kadmium a zinku. Ebbs (2008) také zaznamenal úbytek chlorofylu b v rostlinách *Kosteletzkya pentacarpos* ošetřených těmito kovy, které vedlo k chloróze. Tato zjištění společně naznačují, že kontaminace zinkem a kadmium může skutečně snížit obsah chlorofylu v rostlinách.

Obsah chlorofylu A a B byl také nižší v rostlinách, které byly pěstovány na kontaminované půdě. Je známo, že zejména kadmium inhibuje fotosyntetický aparát, což vede k poklesu obsahu chlorofylu A (Andresen, Küpper 2013). Tento těžký kov může také způsobit oxidační stres v rostlinách, také přispívá ke snížení chlorofylu A (Gallego et al. 2012). Podobně chrom, další těžký kov, může negativně ovlivnit fyziologické procesy rostlin, včetně fotosyntézy, což může vést k poklesu chlorofylu A (Shanker et al. 2005). Vliv dalších půdních faktorů, jako je pH, obsah fosforu a zinku, může také ovlivnit dostupnost kadmia v rostlinách a potenciálně zhoršit jeho dopad na obsah chlorofylu A (Kirkham, 2006).

Různé studie také potvrdily, že zinek a kadmium se akumuluje v rostlinách, které rostou na kontaminované půdě. Bo (2002) zjistil, že zinek, kadmium a olovo se akumuluje v rostlinách a že vysoké hladiny těchto kovů v půdě mohou poškodit rostliny, což vede ke snížení růstu a produkce. Zupan et al. (1997) pozoroval, že různé rostliny akumuluje různé hladiny kadmia, olova a zinku, přičemž nejvyšší koncentrace se nacházejí v jedlých zelených částech zeleniny a kořenů. Shute a Macfie (2006) také zjistil, že přítomnost zinku v půdě kontaminované kadmium může zvýšit příjem a akumulaci kadmia v nadzemních tkáních.

Jak tato práce ukázala, i karotenoidy jsou ovlivněny zinkem a kadmium. Ke stejnému závěru došel i Santos et al. (2011). Tato studie pozorovala, že expozice zinku snížila obsah chlorofylu a β -karotenu v *Brachiaria decumbens* Stapf, zatímco nejvyšší dávka kadmia snížila pigmenty cyklu VAZ a hladiny tokoferolu. Bano et al. (2018) uvádí, že jak zinek, tak kadmium významně zvýrazňují oxidační enzymy a fotosyntetické pigmenty v meších, přičemž celkový obsah chlorofylu je vyšší v *Brachythecium rutabulum* než v *Mnium cuspidatum* při ošetření zinkem.

U asimilace CO₂, stomatické vodivosti a měření transpirační rychlosti jsou různá vysvětlení. Jedním z nich je že při měření těchto parametrů u rostlin rostoucích v kontaminované půdě se měření provádí na těch listech, které jsou stále na živu. Zde rostlina koncentruje veškerou svoji aktivitu při snaze zůstat na živu. Kvůli tomu jsou tyto parametry vyšší u rostlin pěstovaných na kontaminované půdě než u rostlin pěstovaných na půdě kontrolní.

7 Závěr

Tato práce měla dva hlavní cíle: a to zjistit změny ve výnosu a metabolismu zelenin pěstovaných na půdě kontaminované antropogenní činností. Z výsledků jsme byli schopni vyvodit tyto závěry:

- Kontaminace půdy kadmíem a zinkem měla vliv na výnos pokusných rostlin. Jak nadzemní části, tak i kořeny měly menší hmotnost v kontaminovaných vzorcích. Toto potvrzuje i naši první hypotézu která předpovídala, že vlivem kontaminace půdy dojde ke snížení výnosu pěstované produkce.
- Kontaminace půdy také zvýšila obsah toxických prvků v rostlinách. Rostliny pěstované na kontaminované půdě měly významně vyšší obsah kadmia a zinku v kořenech a listech než rostliny pěstované v kontrolní půdě. Toto potvrzuje naši třetí hypotézu, a to že kontaminace půdy zvýší obsah toxických prvků v pěstované ložice seté
- Metabolismus rostlin byl ovlivněn kontaminací půdy. Všechny měřené parametry zaznamenaly rozdíl mezi rostlinami pěstovanými na kontaminované půdě a kontrolní půdě. Fotosyntéza byla také ovlivněna kontaminací zinku a kadmia. Výsledky potvrzují i naši třetí hypotézu, a to že kontaminace půdy ovlivní obsah chlorofylu a aktivitu fotosyntézy rostlin.

8 Zdroje:

1. Ali, Muhammad & Mu'azu, Lurwan. (2020). A Review on the Effects of Cadmium Stress on Growth and Development of Plants. *South Asian Research Journal of Biology and Applied Biosciences*. 2. 33-37. 10.36346/sarjbab.2020.v02i03.002.
2. Acharya, S., Sharma, D., & Joshi, H. (2012,). *Phytotoxicity of zinc, chromium (VI) and cadmium in purging nut (Jatropha curcas) seedlings grown in hydroponics*. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. <https://doi.org/10.56093/ijas.v82i8.23046>
3. Adriano, D. C. (2013,). *Trace Elements in Terrestrial Environments*. Springer Science & Business Media. http://books.google.ie/books?id=J1FWBgAAQBAJ&pg=PT4&dq=trace+elements+in+terrestrial+enviroments&hl=&cd=1&source=gbs_api
4. Andresen, E., & Küpper, H. (2013). *Cadmium toxicity in plants*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Cadmium-toxicity-in-plants.-Andresen-K%C3%BCpper/178135b8b94afc09c0110ebf2e0ee10fbb5b9308>
5. Ayangbenro, A. S., & Babalola, O. O. (2017,). *A New Strategy for Heavy Metal Polluted Environments: A Review of Microbial Biosorbents*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph14010094>
6. Balabane, M., Faivre, D., Oort, F., & Dahmani-Muller, H. (1999). *Mutual effects of soil organic matter dynamics and heavy metals fate in a metallophyte grassland*. *Environmental Pollution* 105, 45-54 [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(98\)00209-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00209-7)
7. Bano, S., Rao, A., & Agnihotri, N. (2018). EFFECT OF ZINC AND CADMIUM ON CHLOROPHYLL CONTENT OF MOSSES BRACHYTHECIUM RUTABULUM AND MNIUM CUSPIDATUM.
8. Bo, L. (2002). *Research advance in effects of cadmium, lead and zinc on plants in soils contaminated with these metals*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Research-advance-in-effects-of-cadmium%2C-lead-and-on-Bo/c4cc2071b6d1208982cc39fe3178ab12e1c8d118>
9. Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lee, A. (2007,). *Zinc in plants*. *New Phytologist*. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>
10. Cataldo, D. A., & Wildung, R. (1978). *Soil and plant factors influencing the accumulation of heavy metals by plants*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Soil-and-plant-factors-influencing-the-accumulation-Cataldo-Wildung/f2b2d6f63d44f8ea062b9be4f965c1e37bef73ce>

11. Chaoui, A., Ghorbal, M.H., & Ferjani, E.E. (1997). Effects of cadmium-zinc interactions on hydroponically grown bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Science*, 126, 21-28
12. Cherif, J., Derbel, N., Nakkach, M., Bergmann, H., Jemal, F., & Lakhdar, Z. B. (2012,). *Spectroscopic studies of photosynthetic responses of tomato plants to the interaction of zinc and cadmium toxicity*. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2012.03.002>
13. Clemente, R., Walker, D. J., & Bernal, M. (2005). *Uptake of heavy metals and As by Brassica juncea grown in a contaminated soil in Aznalcóllar (Spain): the effect of soil amendments*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Uptake-of-heavy-metals-and-As-by-Brassica-juncea-in-Clemente-Walker/d1ccd3709c029e1b361e709583e427820766e786>
14. Das, S., & Green, A. (2016,). *Zinc in Crops and Human Health*. Springer eBooks. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2716-8_3
15. Ebbs, S., & Uchil, S. (2008). *Cadmium and zinc induced chlorosis in Indian mustard [Brassica juncea (L.) Czern] involves preferential loss of chlorophyll b*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Cadmium-and-zinc-induced-chlorosis-in-Indian-juncea-Ebbs-Uchil/df98d3810bb73291f31f64e170e80e5ef9375d02>
16. Edelstein, M., & Ben-Hur, M. (2018,). *Heavy metals and metalloids: Sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops*. *Scientia Horticulturae*. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.039>
17. Farrah, H., & Pickering, W. (1977,). *The sorption of lead and cadmium species by clay minerals*. *Australian Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.1071/ch9771417>
18. Gallego, S., Pena, L., Barcia, R. A., Azpilicueta, C., Iannone, M., Rosales, E., Zawoznik, M., Groppa, M. D., & Benavides, M. (2012). *Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Unravelling-cadmium-toxicity-and-tolerance-in-into-Gallego-Pena/37dbc2ce26d5ef1ebd2076e048a7c05c496c4ae6>
19. Ishimaru, Y., Bashir, K., & Nishizawa, N. K. (2011,). *Zn Uptake and Translocation in Rice Plants*. *Rice*. <https://doi.org/10.1007/s12284-011-9061-3>
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12284-011-9061-3>
20. Keller, M. (2015, January 1). *Photosynthesis and Respiration*. Elsevier eBooks. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-419987-3.00004-2>

21. COOPER, Geoffrey M, 2000. Photosynthesis. *The Cell - NCBI Bookshelf* [online]. 2000. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK9861/>
22. Kirkham, M. (2006, December 1). *Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments*. *Geoderma* (Amsterdam). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.024>
23. Lhotská, M., Zemanová, V., Pavlíková, D., & Hnilička, F. (2023). *Changes in the photosynthetic response of lettuce exposed to toxic element multicontamination under hydroponic conditions*. *Photosynthetica*. <https://doi.org/10.32615/ps.2023.034>
24. Mangal, M., Agarwal, M., & Bhargava, D. (2013). *Effect of Cadmium and Zinc on growth and biochemical parameters of selected vegetables*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Effect-of-Cadmium-and-Zinc-on-growth-and-parameters-Mangal-Agarwal/a72c538d3b1557135fc1d7ff1b6c30b4adfd68dc>
25. McLaughlin, M., & Singh, B. (2012). *Cadmium in Soils and Plants*. Springer Science & Business Media. http://books.google.ie/books?id=vzHpCAAQBAJ&pg=PA193&dq=cadmium+in+s oils+and+plants&hl=&cd=1&source=gs_api
26. Novák, Jan & Skalicky, Milan. (2017). *Botanika: cytologie, histologie, organologie a systematika - 4. ed.*
27. Osmolovskaya, N., Dũng, V. V., & Kuchaeva, L. (2018). *The role of organic acids in heavy metal tolerance in plants*. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-role-of-organic-acids-in-heavy-metal-tolerance-Osmolovskaya-D%C5%A9ng/5b220aaa1ce16ab52b514ae7e51172c28306aeba>
28. Paunov, M., Koleva, L., Vassilev, A., Vangronsveld, J., & Goltsev, V. (2018). *Effects of Different Metals on Photosynthesis: Cadmium and Zinc Affect Chlorophyll Fluorescence in Durum Wheat*. *International Journal of Molecular Sciences*. <https://doi.org/10.3390/ijms19030787> <https://www.mdpi.com/1422-0067/19/3/787>
29. Pendas, H., & Kabata-Pendas, A. (2000). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press eBooks. <https://doi.org/10.1201/9781420039900>
30. Peralta-Videa, J. R., López, M. L., Narayan, M., Saupe, G. B., & Gardea-Torresdey, J. L. (2009). *The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain*. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2009.03.005>

31. Porra, R. J., Thompson, W. A., Kriedemann, P. E. 1989. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta - Bioenergetics*. 975 (3). 384–39
32. Přírodní podmínky Příbrami - Město Příbram. (n.d.). <https://pribram.eu/zivot-ve-meste/zivotni-prostredi/prirodni-podminky-pribrami.html?setfontsize=big#:~:text=Kontaminace%20p%C5%AFdy%20siln%C4%9B%20p%C5%99ekra%C4%8Duje%20doporu%C4%8Den%C3%A9,v%201%20kg%20p%C5%AFdn%C3%AD%20su%C5%A1iny>
33. Probst, A., Liu, H., Fanjul, M., Liao, B. H., & Hollande, E. (2009). *Response of Vicia faba L. to metal toxicity on mine tailing substrate: Geochemical and morphological changes in leaf and root*. *Environmental and Experimental Botany*. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.02.003>
34. Remans T, Thijs S, Truyens S, Weyens N, Schellingen K, Keunen E, Gielen H, Cuypers A, Vangronsveld J. Understanding the development of roots exposed to contaminants and the potential of plant-associated bacteria for optimization of growth. *Ann Bot*. 2012 Jul;110(2):239-52. doi: 10.1093/aob/mcs105. Epub 2012 May 25. PMID: 22634257; PMCID: PMC3394651.
35. Santos, F. S., Moura, N., Mazur, N., & Becerril, J. M. (2011). *RESPOSTA ANTIOXIDANTE, FORMAÇÃO DE FITOQUELATINAS E COMPOSIÇÃO DE PIGMENTOS FOTOPROTETORES EM Brachiaria decumbens Stapf SUBMETIDA À CONTAMINAÇÃO COM Cd E Zn*. <https://www.semanticscholar.org/paper/RESPOSTA-ANTIOXIDANTE%2C-FORMA%3%87%3%83O-DE-FITOQUELATINAS-E-Santos-Moura/6d580e57e75a629ea676fec64b54b7fdd30c66a4>
36. Sarkar S 1998 Sarkar S., Yadav P., Bhatnagar D. Lipid peroxidative damage on cadmium exposure and alterations in antioxidant system in rat erythrocytes: A study with relation to time. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9542068/>
37. SHANKER, A., CERVANTES, C., LOZA-TAVERA, H. and AVUDAINAYAGAM, S., 2005. Chromium toxicity in plants. [online]. 2005. <https://www.semanticscholar.org/paper/Chromium-toxicity-in-plants.-Shanker-Cervantes/e19d5d6969d493cad696d5db9f74ec620ffafa09>
38. Shute, T., & Macfie, S. (2006). *Cadmium and zinc accumulation in soybean: A threat to food safety?* <https://www.semanticscholar.org/paper/Cadmium-and-zinc-accumulation-in-soybean%3A-A-threat-Shute-Macfie/049354dc9ce55ffd32a5a844031ccb405c32ad60>

39. Symeonidis, L., & Karataglis, S. (1992). *The Effect of Lead and Zinc on Plant Growth and Chlorophyll Content of Holcus lanatus L.* <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Effect-of-Lead-and-Zinc-on-Plant-Growth-and-of-Symeonidis-Karataglis/5bf858922efa9da611d1264bed06167fa964bb0a>
40. Thalassinou, G., Petropoulos, S., Grammenou, A., & Antoniadis, V. (2023). *Potentially Toxic Elements: A Review on Their Soil Behavior and Plant Attenuation Mechanisms against Their Toxicity.* Agriculture. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091684>
41. Thorne, W. (1957). *Zinc Deficiency and its Control.* Advances in Agronomy. [https://doi.org/10.1016/s0065-2113\(08\)60108-x](https://doi.org/10.1016/s0065-2113(08)60108-x)
42. Vaněk, V. (2012). *Výživa zahradních rostlin.* http://books.google.ie/books?id=ykUKmQEACAAJ&dq=V%C3%BD%C5%BEiva+zahradn%C3%ADch+rostlin&hl=&cd=1&source=gbs_api
43. Wellburn, A. R. 1994. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal of plant physiology.* 144 (3). 307–313.
44. *Why is photosynthesis important?* (n.d.). Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/question/Why-is-photosynthesis-important>
45. Zemědělství, M. (n.d.). *Kontaminace půdy.* EAGRI. Available from: [https://eagri.cz/public/portal/mze/puda/ochrana-pudy-a-krajiny/degradace-pud/kontaminace-pudy#:~:text=Je%20mo%C5%BEn%C3%A9%20konstatovat%2C%20%C5%BEe%20v,nivn%C3%AD%20oblasti%20pod%C3%A9%20vodn%C3%ADch%20tok%C5%AF\).](https://eagri.cz/public/portal/mze/puda/ochrana-pudy-a-krajiny/degradace-pud/kontaminace-pudy#:~:text=Je%20mo%C5%BEn%C3%A9%20konstatovat%2C%20%C5%BEe%20v,nivn%C3%AD%20oblasti%20pod%C3%A9%20vodn%C3%ADch%20tok%C5%AF).) Accessed March 2024
46. Zhou, M., Dailly, H., Renard, M. V., Han, R., & Lutts, S. (2018). *NaCl impact on Kosteletzkya pentacarpos seedlings simultaneously exposed to cadmium and zinc toxicities.* Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1865-x>
47. Zupan, M., Hudnik, V., Lobnik, F., & Kadunc, V.K. (1997). Accumulation of pb, Cd and Zn from contaminated soil to various plants and evaluation of soil remediation with indicator plant (*Plantago lanceolata L.*).

