

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Změny v nutriční hodnotě zeleniny pěstované na půdě  
kontaminované arsenem**

**Bakalářská práce**

**Michaela Kovandová**

**Výživa a potraviny**

**prof. Ing. Daniela Pavlíková, CSc.**

**© 2022 ČZU v Praze**



## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci „Změny v nutriční hodnotě zeleniny pěstované na půdě kontaminované arsenem“ jsem vypracovala 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 autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 21.4. 2022

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala prof. Ing. Daniele Pavlíkové, CSc. za pomoc, vstřícný přístup, cenné rady a vedení bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala Ing. Veronice Zemanové, Ph.D. za umožnění realizace praktické části bakalářské práce, užitečné konzultace a mimořádnou ochotu. V neposlední řadě děkuji své rodině a blízkým za pomoc a podporu.

# Změny v nutriční hodnotě zeleniny pěstované na půdě kontaminované arsenem

## Souhrn

Bakalářská práce se zabývá vlivem arsenu (As) na zkoumané nutriční hodnoty pěstované zeleniny.

Cílem práce bylo zhodnocení působení As na nutriční hodnoty vybraných plodin. Byly definovány tři hypotézy: 1) Vlivem kontaminace půdy dojde ke snížení výnosu pěstované produkce; 2) Kontaminace půdy zvýší obsah toxického As v pěstované produkci; 3) Kontaminace půdy arsenem ovlivní obsah vybraných živin, zvýší obsah nitrátového dusíku a sníží obsah vitamínu C v obou pěstovaných zeleninách. Pro experiment byly využity dva druhy zeleniny, Locika setá (*Lactuca sativa* L. odrůda ADINAL) a ředkev setá (*Raphanus sativus* L. odrůda VIOLA).

V nádobovém pokusu byly rostliny pěstovány ve třech variantách: kontrolní bez kontaminace, varianta As1 s kontaminací As 20 mg/kg a varianta As2 s kontaminací 100 mg/kg. Oba druhy zeleniny byly sklizeny v konzumní zralosti.

Výsledky první hypotézu zcela nepotvrdily. V případě ředkvičky i salátu došlo ve variantě As1 k nárůstu množství biomasy ve srovnání s kontrolou, výjimkou byl pouze kořen ředkvičky. Ke statisticky významné změně došlo pouze u kořene salátu a bulvy ředkvičky. V případě bulvy došlo k nárůstu množství suché biomasy dokonce o 103 %. Ve variantě As2 však výnos biomasy výrazně poklesl oproti kontrole. Statisticky významné byly ve srovnání s kontrolou všechny změny, výjimku tvořil kořen ředkvičky a bulva ředkvičky.

Druhý předpoklad o kumulaci As v pěstované produkci byl potvrzen. Arsen byl u obou rostlin kumulován zejména v kořenech, ale byl translokován také do bulvy a v nejmenším množství do nadzemních částí. Translokační faktor bulvy dosáhl hodnoty 0,18 (As1), respektive 0,09 (As2), listů ředkvičky 0,02 (As2) a listů salátu 0,16 (As1) a 0,06 (As2).

Ke změně obsahu vybraných živin v pěstované produkci došlo. Procentuální nárůst podílu N i S byl pozorován ve všech konzumních částech obou plodin, nejvýraznější nárůst podílu N byl zaznamenán v listu ředkvičky mezi kontrolou a variantou As2, konkrétně o 3,68 %. Množství kyseliny askorbové v rostlinách značně kolísalo. V bulvě ředkvičky byl ve variantě As1 zaznamenán pokles o 3 % oproti kontrole, ve variantě As2 o 80 %. V kontrole bylo obsaženo 44,7 mg/kg kyseliny askorbové, ve variantě As2 8,9 mg/kg. V listu ředkvičky byl naměřen nárůst o 50 % (As1), respektive pokles o 4 % (As2) ve srovnání s kontrolou. Trend v listech salátu byl odlišný, nižší kontaminace způsobila pokles askorbové kyseliny o 14 %, zatímco vyšší nárůst o 103 %. Vývoj obsahu nitrátů v jednotlivých částech potvrdil jejich kumulaci v nadzemních částech. Vyšší kontaminace půdy způsobila u listů ředkvičky nárůst množství nitrátů o 143 % (konkrétně 1164 mg/kg) a u listů salátu o 154 % (konkrétně 1461 mg/kg) ve srovnání s kontrolou. V případě bulvy ředkvičky se jednalo o drobné výkyvy (nárůst o 17 % ve variantě As1 a pokles o 14 % ve srovnání s kontrolou).

Na základě výsledků lze říci, že kontaminace půdy As obecně způsobila pokles kvality pěstované zeleniny, zejména vyšší kontaminace půdy negativně ovlivnila růst rostlin a jejich nutriční hodnoty.

**Klíčová slova:** arsen; kvalita zeleniny; kyselina askorbová; nitráty

# The changes in nutritional value of vegetables cultivated on soil contaminated with arsenic

## Summary

The bachelor thesis is focused on impact of arsenic on selected nutritional values of grown vegetables.

The aim of this thesis was evaluation the As influence on nutritional values onto selected crops. Three hypotheses were defined: 1) Soil contamination causes yield reduction of the harvested crops; 2) Soil contamination increases amount of toxic As in harvested vegetables; 3) Soil contamination affects levels of selected nutrients, increases nitrates levels and decreases ascorbic acid amount in both grown crops. Two species of vegetables were selected, lettuce (*Latuca sativa* L., variety ADINAL) and radish (*Raphanus sativus* L., variety VIOLA).

In the pot experiment plants were grown in three variants: control without contamination, variation As1 with As contamination 20 mg/kg and variation As2 with As contamination 100 mg/kg. Both vegetables were harvested in consuming ripeness.

Results did not confirm the first hypothesis. Lower contamination (As1) caused biomass increase, both in radish and lettuce, compared to control variant. The only exception was radish root. Statistically significant change was noticed in two cases – lettuce root and radish tuber. The amount of tuber biomass increased by 103 %. The amount of biomass rapidly decreased in As2 variant compared to control variant. All changes were statistically significant compared to control, except radish root and tuber.

The second hypothesis connected to As accumulation in vegetables was confirmed. Arsenic was accumulated both in radish and lettuce especially in roots, however As was translocated into tuber and in least amount to leaves. Translocation factor reached 0.18 (As1) in tuber, respectively 0.09 (As2). Values of translocation factor counted for leaves reached 0.02 for raddish (As2), 0.16 (As1) and 0.06 (As2) for lettuce.

The change of selected nutrients was noticed. Percentage increase was registered both in contents of N and S in all edible parts of both crops. The greatest increase of N in biomass was measured in radish leaves between control and As2 variety, exactly by 3.68 %. The content of ascorbic acid considerably fluctuated. In tuber (As1) was measured decrease by 3 % compared to control variant, in variant As2 was noticed 80 % decrease. The control variant contained 44.7 mg/kg ascorbic acid, variant As 2 contained 8,9 mg/kg. In radish leaves was registered 50 % increase (As1) and 4 % decrease (As2) compared to control variant. In lettuce leaves there was noticed a different trend, lower contamination caused decrease by 14 %, however in higher contamination (As2) there was measured an increase by 103 %. The development of nitrates accumulation confirmed their accumulation in aboveground biomass. Higher soil contamination caused increase by 143 % (exactly 1164 mg/kg) in radish leaves, and increase by 154 % (exactly 1461 mg/kg) in lettuce leaves compared to control. In case of tuber there were noticed just little deflections (increase by 17 % in As1 and decrease by 14 % in As2).

Based on the results is noticeable, that soil contamination generally causes quality decrease of grown vegetables, especially higher As contamination negatively affected plant growth and their nutritional values.

**Keywords:** arsenic; vegetables quality; ascorbic acid; nitrates



# Obsah

<b>Obsah</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>11</b>
<b>2 Cíl práce a hypotéza</b> .....	<b>12</b>
<b>3 Literární rešerše</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1 Význam zeleniny ve výživě člověka</b> .....	<b>13</b>
3.1.1 Sacharidy v zelenině .....	13
3.1.2 Bílkoviny v zelenině .....	14
3.1.3 Tuky v zelenině .....	14
3.1.4 Vitaminy.....	15
3.1.5 Nitráty.....	16
<b>3.2 Esenciální prvky ve výživě člověka a jejich zdroje v potravinách rostlinného původu</b> .....	<b>17</b>
<b>3.3 Toxické prvky v potravinách rostlinného původu</b> .....	<b>19</b>
<b>3.4 Arsen jako prvek, fyzikální a chemické vlastnosti</b> .....	<b>20</b>
<b>3.5 Zdroje arsenu v přírodě</b> .....	<b>20</b>
3.5.1 Průmyslové zdroje .....	20
3.5.2 Přírodní zdroje .....	21
<b>3.6 Působení arsenu na rostliny, projevy toxicity</b> .....	<b>22</b>
3.6.1 Význam arsenu ve výživě rostlin.....	22
3.6.2 Fytotoxické působení arsenu.....	23
3.6.2.1 Anorganický arsen.....	23
3.6.2.2 Organický arsen.....	23
3.6.3 Faktory ovlivňující míru příjmu arsenu rostlinami.....	24
3.6.3.1 Struktura a složení půd .....	24
3.6.3.2 pH půd .....	24
3.6.3.3 Druh rostlin .....	25
<b>3.7 Toxické působení arsenu na lidské zdraví</b> .....	<b>25</b>
<b>4 Metodika</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1 Nádobový pokus</b> .....	<b>28</b>
4.1.1 Ředkev setá .....	28
4.1.2 Hlávkový salát.....	29
<b>4.2 Analýza rostlin</b> .....	<b>30</b>
4.2.1 Stanovení obsahu prvků .....	30
4.2.2 Stanovení obsahu kyseliny askorbové.....	31
4.2.3 Stanovení obsahu nitrátů .....	31

4.3	Statistická analýza.....	31
5	Výsledky.....	32
5.1	Vliv koncentrace As v půdě na akumulaci v rostlině.....	32
5.2	Vliv koncentrace arsenu v půdě na výnos sušiny .....	33
5.3	Vliv koncentrace As v půdě na akumulaci N a S v rostlině .....	35
5.4	Vliv koncentrace arsenu v půdě na obsah nitrátů v jedlých částech ředkvičky a salátu .....	36
5.5	Vliv koncentrace arsenu v půdě na obsah kyseliny askorbové v jedlých částech rostlin .....	37
6	Diskuze .....	39
6.1	Vliv kontaminace půdy na výnos biomasy .....	39
6.2	Vliv kontaminace půdy na obsah As v pěstované produkci .....	40
6.3	Vliv kontaminace půdy na obsah vybraných živin, nitrátového N a vitamínu C v pěstované zelenině .....	40
7	Závěr.....	43
8	Literatura .....	44
9	Internetové zdroje.....	46

# 1 Úvod

Kontaminace prostředí rizikovými prvky, mezi které řadíme arsen, olovo, rtuť, kadmium a další (Adriano 2001), je v současné době velmi aktuální a diskutované téma. Zdroje rizikových prvků jsou původu antropogenního a přírodního. Rizikové prvky se v přírodě nacházejí přirozeně, například v horninách a minerálech, v půdě, vodě a atmosféře, do prostředí se uvolňují také v důsledku lesních požárů a vulkanické činnosti. Lidská činnost má však na obsah rizikových prvků v prostředí velice negativní vliv. K uvolňování těchto prvků do prostředí dochází v důsledku těžby a zpracování rud, zemědělské činnosti, lesnictví, chemického průmyslu, farmaceutického a kosmetického průmyslu a v neposlední řadě také spalování fosilních paliv. Rizikem pro lidské zdraví je nejen přímá expozice, ale také průnik toxických prvků do potravního řetězce (Sattar et al. 2016). Rizikové prvky jsou se zvyšující se koncentrací v prostředí ve stále větší míře obsaženy také v zelenině, která je nezbytnou součástí vyváženého jídelníčku (Kopecký 2010).

Tato práce je zaměřena na problematiku arsenu, jeho vlastnostmi, schopnosti rostlin tento prvek přijímat a translokovat do konzumních částí zkoumaných plodin, ředkvičky a salátu. Arsen je toxickým polokovem V. A. skupiny se širokým spektrem účinku na rostlinný i lidský metabolismus. Anorganický As se do prostředí dostává zejména v důsledku antropogenní činnosti, nejčastěji se vyskytuje v oxidačních číslech +III a +V, přičemž arsenitany jsou pro rostliny rizikovější než arseničnany. Anorganický As v rostlinách narušuje fotosyntetické procesy, způsobuje pokles turgoru v buňkách, vadnutí, nekrózy a v krajním případě i úhyn rostlin (Eisler 2007). Hlavními zdroji organického As v přírodě byly v minulosti především přípravky na ochranu rostlin (Basu 2014). Tato forma As je navíc rizikovější z hlediska průniku do potravního řetězce (Trebichavský et al. 1998).

Na Zemi je přibližně 150 milionů osob potenciálně vystaveno otravě As (Ozturk 2022). Arsen vykazuje na lidský organismus teratogenní, karcinogenní, mutagenní, imunotoxické a genotoxické účinky. Způsobuje také útlum metabolismu sacharidů a tuků a ovlivňuje buněčné dělení (Ozturk 2022). Chronické působení As způsobuje též široké spektrum obtíží, například změny na sliznicích a kůži, neurologické a hematologické problémy, koliky a hubnutí (Trebichavský et al. 1998).

Přítomnost toxických prvků a jejich vliv na rostliny lze analyzovat a vyhodnocovat mnoha způsoby. V této práci je zanalyzován jak samotný obsah vybraných prvků v rostlinách (As, S, N), tak další ukazatelé nutričních vlastností plodin (obsah nitrátů a vitamínu C) a výnos biomasy při různých koncentracích As v půdě.

## 2 Cíl práce a hypotéza

Cílem práce je hodnocení změn v kvalitě zelenin (ředkev setá a salát setý) pěstovaných na půdě kontaminované arsenem. Pro praktickou část byly definovány tři hypotézy:

- 1) Vlivem kontaminace půdy dojde ke snížení výnosu pěstované produkce.
- 2) Kontaminace půdy zvýší obsah toxického As v pěstované produkci.
- 3) Kontaminace půdy arsenem ovlivní obsah vybraných živin, zvýší obsah nitrátového dusíku a sníží obsah vitamínu C v obou pěstovaných zeleninách.

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Význam zeleniny ve výživě člověka

Zelenina a ovoce patří mezi základní složky vyváženého jídelníčku. Na světě existuje přibližně 7000 jedlých rostlinných druhů využívaných jako potravina, přičemž přibližně 120 druhů zeleniny z různých čeledí se pěstuje ve velkém množství za účelem výživy člověka. Ke konzumaci se využívají různé části rostlin, listy, nať, kořeny a jejich modifikace, stonky a jejich modifikace, květy i plody. WHO (World Health Organisation) doporučuje denně konzumovat minimálně 400 gramů ovoce a zeleniny z důvodu prokazatelných zdravotních benefitů (Kopec 2010; WHO 2022).

Zelenina je zdrojem bílkovin, sacharidů a také tuků, ze zdravotního hlediska je významný obsah vlákniny, vitaminů (vitamin C, provitamin A a vitaminy skupiny B), bioflavonoidů, fenolických látek, antioxidantů a dalších fytochemikálií. Mezi benefity konzumace zeleniny a ovoce patří rovněž výborné nutriční hodnoty a nízká kalorická hodnota. Dostatečná konzumace ovoce a zeleniny snižuje riziko civilizačních onemocnění, zejména kardiovaskulárních onemocnění, rakoviny a obezity, pozitivně ovlivňuje funkci gastrointestinálního, kardiovaskulárního a nervového systému a je nedílnou součástí zdravého životního stylu (Kopec 2010; Wagner et al. 2016).

#### 3.1.1 Sacharidy v zelenině

Sacharidy jsou nedílnou součástí lidské výživy. Jejich obsah v zelenině je velmi variabilní v závislosti na druhu. Vysoký obsah sacharidů má fenykl obecný (52 g/100 g) a dále česnek, brambory, cibule, kukuřice. Naopak velmi malé množství sacharidů (do 4 g/100 g) obsahuje baby špenát, řapíkatý celer, cuketa, okurka, polníček a například také bílá ředkev (Kalorické tabulky potravin 2022).

V zelenině nalezneme strukturně široké spektrum sacharidů. Monosacharidy, kam řadíme glukózu, fruktózu, arabinózu a galaktózu, nalezneme ve všech druzích zeleniny, neboť se jedná o přímé produkty fotosyntézy. Disacharidy (sacharóza, maltóza, galaktóza a trehalóza) se nachází například v hrášku a rajčatech. Cukerné alkoholy, sorbitol a mannitol, se vyskytují v kořenové zelenině, tedy zejména v celeru, mrkvi a petrželi (Hounsoume et al. 2008; Kopec 2010).

Významnou skupinou sacharidů jsou oligosacharidy. Do této skupiny řadíme rafinózu, stachyózu, inulin a fruktooligosacharidy. Tuto skupinu sacharidů nacházíme zejména v pórku, cibuli, česneku, artyčoku a luštěninách. Nestravitelné oligosacharidy jsou pomocí mikroorganismů fermentovány v tlustém střevě, proto oligosacharidy patří mezi významná prebiotika (Hounsoume et al. 2008; Sharma 2018).

Škrob je zásobním polysacharidem rostlin a zároveň zdrojem energie pro člověka. Ve vysoké míře je zastoupen v bramborách, přezrálém hrášku, cukrové kukuřici a obecně ve všech hlízách a kořenech. Strukturní polysacharidy (neškrobnaté polysacharidy, celulóza,

hemicelulóza, pektin, lignin) označujeme jako vlákninu, z hlediska lidského zdraví velmi významnou součástí stravy. Vlákna není štěpena enzymy trávicího traktu, ale mikroorganismy ve střevech dokáží vlákninu částečně metabolizovat a produkovat látky, které lidské tělo může dále vstřebat a využít. Dostatečná konzumace vlákniny dále působí jako prevence zácpy, vykazuje pozitivní vliv při léčbě některých druhů kolitidy a snižuje riziko kolorektálního karcinomu. Doporučená denní dávka vlákniny se pohybuje kolem 20 – 30 g a zelenina je velmi dobrým zdrojem, neboť v 1 kg v čerstvém stavu obsahuje v rozmezí 10 – 80 g vlákniny (Hounsoume et al. 2008; Kopec 2010; Sharma 2018).

### **3.1.2 Bílkoviny v zelenině**

Bílkoviny jsou v lidské stravě zastoupeny zhruba z 20 % a z tohoto podílu by přibližně polovina měla být přijímána z rostlinných zdrojů. Zelenina v čerstvém stavu obsahuje průměrně 0,5 – 5 g bílkovin ve 100 g hmotnosti. Velmi vysoký obsah bílkovin vykazuje fenýkl obecný (15,8 g/100 g) a dále též česnek a růžičková kapusta. Luštěniny jsou též výbornými zdroji bílkovin, zejména čočka (25 g/100 g), hrách a cizrna (Kopec 2010; Kalorické tabulky potravin 2022).

Bílkoviny plní v lidském těle mnoho funkcí, zejména funkci strukturální a dále jsou součástí hormonů, enzymů a protilátek. Některé aminokyseliny si organismus dokáže syntetizovat, ale aminokyseliny, které organismus vytvářet nedokáže, je nutné přijímat stravou. Mezi tyto esenciální aminokyseliny řadíme arginin, histidin, methionin a pro děti je esenciální také fenylalanin. Arginin je ve vyšším množství obsažen v chřestu, růžičkové kapustě a bramborách, histidin se nachází v brokolici, růžičkové kapustě a květáku, fenylalanin v řepě, mrkvi, petrželi a špenátu a methionin se nachází například v zelí, květáku, ředkvi a kapustě. Potraviny rostlinného původu samostatně neposkytují plnohodnotné spektrum aminokyselin, ale při vhodně zvolené kombinaci potravin je možné docílit dostatečného příjmu všech aminokyselin. Plnohodnotné spektrum aminokyselin poskytuje z rostlinných zdrojů pouze sója (Hounsoume et al. 2008; Marounek & Havlík 2020).

Volné aminokyseliny též ovlivňují chuť zeleniny. Glycin a alanin mají sladkou chuť, valin a leucin hořkou a kyselina asparagová a glutamová navozují chuť umami (Hounsoume et al. 2008)

### **3.1.3 Tuky v zelenině**

Tuky přijaté stravou plní v lidském organismu funkci zdroje energie, jsou nositeli v tucích rozpustných vitaminů, dále plní strukturální funkci v buněčných membránách a tuky a jejich sloučeniny jsou také prekurzory hormonů a účastní se imunitních reakcí. V potravinách také plní funkci nositelů chuti (Hounsoume et al. 2008; Marounek & Havlík 2020).

Zelenina obecně obsahuje malé množství tuku (do 1 g /100 g), výjimku tvoří fenýkl obecný (15 g/100 g) a luštěniny, zejména sója a cizrna. Vysoké množství tuků obsahují semena, především dýňová (49 g/100 g) a slunečnicová (51,5 g/100 g) Kalorické tabulky potravin 2022).

Ve stravě je nutné přijímat široké spektrum mastných kyselin, včetně esenciálních, tedy kyselinu  $\alpha$ -linolenovou a linolovou. Kyselinu  $\alpha$ -linolenovou nalezneme v sóje, kukuřičném a slunečnicovém oleji. Na kyselinu linolovou je bohatá rovněž sója a dále například pšeničné klíčky a dýňová semena. Nutričně významné a ze zdravotního hlediska přínosné polynenasycené kyseliny obsahuje zelená zelenina (čínské zelí, řeřicha, růžičková kapusta). V těchto druzích zeleniny se vyskytuje relativně malé množství těchto látek (v řádu desetin gramů na 100 gramů čerstvé zeleniny), přesto jsou z nutričního hlediska nezanedbatelné (Hounsoume et al. 2008; Vidrih et al. 2009).

### 3.1.4 Vitaminy

Vitaminy jsou nezastupitelnou složkou potravy a organismus je nedokáže syntetizovat. Vitaminy jsou obecně součástí enzymů, plní antioxidační funkci, podílí se na správné funkci tkání a účastní se mnoha metabolických pochodů. Některé skupiny vitaminů jsou ve významné míře obsaženy v rostlinných zdrojích, proto je dostatečná konzumace zeleniny v tomto ohledu zásadní. Rozlišujeme vitaminy rozpustné v tucích (A, D, E, K) a ve vodě (C a vitaminy skupiny B) (Kopec 2010; Marounek & Havlík 2020).

Vitamin A (retinol) je v zelenině obsažen ve formě cis- $\beta$ -karotenu, který vykazuje vyšší účinky než syntetický trans- $\beta$ -karoten (Kopec 2010). Jeho příjem (doporučený denní příjem se pohybuje kolem 1 – 2 mg/den) je zásadní pro správnou činnost rhodopsinu, sítnicového pigmentu citlivého na světlo. Vitamin A dále vykazuje protinfekční, antioxidační a protirakovinné účinky. Nezbytný je také pro správný vývoj a růst organismu (Marounek & Havlík 2020; Mourek 2012). Retinol je obsažen v rajčatech (276  $\mu$ g/100 g), mrkvi (8280  $\mu$ g/100 g), kapustě (2870  $\mu$ g/100 g) a další žluté, červené a listové zelenině (U. S. Department of Agriculture 2022).

Mezi vitaminy skupiny B, které můžeme ve významném množství najít v zelenině, patří vitamin B<sub>1</sub> (thiamin), B<sub>2</sub> (riboflavin), B<sub>6</sub> (pyridoxin) a B<sub>7</sub> (biotin) (Kopec 2010). Thiamin je vitamin potřebný pro metabolismus sacharidů a činnost nervové soustavy, doporučený denní příjem se pohybuje v rozmezí 1 – 2 mg (Mourek 2012). Vyskytuje se například ve fazolích (0,44 mg/100 g) a listové zelenině (U. S. Department of Agriculture 2022). Riboflavin je kofaktorem enzymů dýchacího řetězce a denně by měl být přijímán v množství 1 – 2 mg/den (Mourek 2012). Zelenina obsahující významné množství riboflavinu je například špenát (0,19 mg/100 g) a z luštěnin například čočka (0,21 mg/100 g) (U. S. Department of Agriculture 2022). Doporučený denní příjem pyridoxinu se pohybuje kolem 2 mg (Mourek 2012). Podílí se na metabolismu aminokyselin a sacharidů a napomáhá správné funkci jater a nervové soustavy. Zajímavým zdrojem je například červená paprika (0,32 mg/100 g) (U. S. Department of Agriculture 2022). Biotin, někdy též nazýván vitamin H, by měl být přijímán v množství 30 – 70  $\mu$ g/den. Biotin se účastní metabolických pochodů a je koenzymem karboxylačních reakcí. Je obsažen například v čočce, ale také obilninách a mnoha dalších potravinách (Marounek & Havlík 2020).

Vitamin C (kyselina askorbová) je obsažen téměř ve všech druzích zeleniny. Doporučený denní příjem se pohybuje v rozmezí 70 – 100 mg (Mourek 2012). V organismu plní vitamin C velké množství funkcí. Kyselina askorbová je důležitým antioxidantem, podílí se na vstřebávání železa a syntéze mnoha látek (například žlučových kyselin, kolagenu a adrenalinu), pevnosti kapilár a sliznic (Kopec 2010). Ve 100 g obsahuje vitaminu C žlutá paprika 184 mg, růžičková kapusta 85 mg a brokolice 91,3 mg (U. S. Department of Agriculture 2022), ale i další druhy zeleniny obsahují vitaminu C významné množství, a proto při dostatečné konzumaci zeleniny avitaminóza nehrozí (Marounek & Havlík 2020).

Vitamin E (tokoferol) plní funkci antioxidantu, napomáhá správné funkci nervové soustavy, svalů, jater a červených krvinek a je také nezbytný pro správný vývoj plodu. Denně by mělo být přijímáno 20 – 30 mg, ale vzhledem k jeho dostatku ve většině potravin bývá deficit vzácný (Chow 2004). Významnější zdroje v potravě představují živočišné produkty, ale tokoferol je obsažen například v hlávkovém salátu (0,41 mg/100 g), špenátu (0,18 mg/100 g) a také v luštěninách a semenech, zejména slunečnicových (U. S. Department of Agriculture 2022).

Vitamin K (fytochinon) je nezbytný při tvorbě koagulačních faktorů a při tvorbě kostí. Denní příjem by se měl pohybovat kolem 100 µg. Mezi zdroje rostlinného původu můžeme zařadit jarní cibulku (207 µg/100 g), brokolici (102 µg/100 g) a zelenou listovou zeleninu (Sharma 2018; Marounek & Havlík 2020).

### 3.1.5 Nitráty

Dusík je rostlinami přijímán ve vysoké míře ve formě  $\text{NO}_3^-$ , tedy nitrátu, který je redukován na amonnou a následně amidickou formu a využíván v aminokyselinách, nezbytných sloučeninách pro růst biomasy. Nitráty mohou být v rostlinách (především ve vakuolách) hromaděny v důsledku kombinace jejich nadbytku v půdě a méně vhodných podmínek pro růst rostlin. Kumulace nitrátů v rostlinách je podmíněna obsahem  $\text{NO}_3^-$  v prostředí, mírou hnojení, druhem rostliny, vnějším prostředím, půdními procesy a také termínem sklizně (raná zelenina obsahuje více nitrátů, než zelenina sklizená v plné zralosti) (Vaněk et al. 2012).

Nitráty samy o sobě nejsou toxické, rizikovější jsou metabolity, které jsou tvořeny endogenně po jejich konzumaci. Redukcí dusičnanů vznikají dusitany (nitrity), které reagují s hemoglobinem za vzniku methemoglobinu, čímž je narušen transport kyslíku do tkání, který se projevuje cyanózou. Nitráty však mohou být dále transformovány na oxid dusnatý (NO), který naopak působí příznivě, má antimikrobiální účinky, jedná se také o signální molekulu při zánětech a účastní se vasoregulace. Oxid dusnatý dokonce dle Santamaria (2006) redukuje riziko kardiovaskulárních onemocnění a působí proti hypertenzi. Naopak velmi škodlivými metabolity nitrátů jsou nitrososloučeniny, které jsou považovány za karcinogenní (Hmelak Gorenjak & Cencič 2013).

Nízký obsah nitrátů (do 200 mg/kg) lze detekovat v artyčoku, chřestu, cibuli a paprikách. Naopak velmi vysoký obsah (nad 2500 mg/kg) nitrátů lze zaznamenat u celeru,



salátu, špenátu a ředkvičky. Nitráty se nejvýznamněji kumulují ve vegetativních částech rostliny (řapík, stonek, listy) a nejméně v orgánech generativních (plod, semena) (Santamaria 2006; Vaněk et al. 2012).

ADI (Acceptable daily intake) u nitrátů je stanoven na 0 – 3,7 mg/kg hmotnosti, v případě rizikovějších nitritů na 0 – 0,07 mg/kg hmotnosti. Povolené množství nitrátů v zelenině je stanoveno i legislativně, pro salát sklizený v období od 1. 4. do 30. 9. pěstovaný ve skleníku je stanoven nejvyšší povolený obsah nitrátů na 3500 mg/kg, pro salát pěstovaný na poli je stanovena hodnota 2000 mg/kg (Hmelak Gorenjak & Cencič 2013; EUR-Lex 2022).

### **3.2 Esenciální prvky ve výživě člověka a jejich zdroje v potravinách rostlinného původu**

Člověk musí potravou přijímat široké spektrum prvků. Základní biogenní prvky (uhlík, vodík, kyslík, dusík) jsou běžně přijímány ve všech potravinách. Pro správnou funkci organismu je však nutné v dostatečné míře přijímat také prvky makrobiogenní, kam řadíme vápník, sodík, draslík, hořčík, fosfor, chlor a síru. Mikrobiogenní prvky, přijímané v nízkých dávkách (zhruba v řádu jednotek mg za den) se rovněž podílí na velkém množství biochemických procesů a jejich příjem potravou je nezbytný. Mezi mikroelementy řadíme železo, měď, zinek, mangan, křemík, jód, selen, chrom a další prvky (Sharma 2018; Marounek & Havlík 2020).

Vápník (Ca) je nejvíce zastoupeným makrobiogenním v lidském těle, tvoří 1 – 2 % tělesné hmotnosti. Z tohoto množství je až 99 % deponováno v kostech a zubech. Vápník se podílí na regulaci krevního tlaku, správné funkci nervové soustavy a svalů, plní funkci transmitterů, podílí se na diferenciaci buněk, koagulaci a je také součástí enzymů. Denní potřeba Ca se pohybuje kolem 1 g, v období růstu, těhotenství a laktace jsou nároky na příjem vyšší (přibližně 1,3 g/den) (Mesías et al.; Sharma 2018). Mezi zdroje rostlinného původu bohaté na Ca řadíme například fazole (240 mg/100 g), kapustu (254 mg/100 g) a brokolici (47 mg/100 g) (U. S. Department of Agriculture 2022).

Sodík (Na) je hlavním kationtem extracelulární tekutiny, podílí se na regulaci osmotického tlaku a acidobazické rovnováhy (Kopec 2010). Doporučený denní příjem je přibližně 1,5 g. Tento doporučený příjem je však běžně překračován, průměrný denní příjem se pohybuje kolem 3 – 5 g. Nadměrný příjem Na přímo souvisí se srdečními chorobami, hypertenzí a poškozením ledvin (Marounek & Havlík 2020). Zelenina obsahuje Na malé množství, proto se efektivně podílí na kompenzaci nadbytku ve stravě (Informační centrum bezpečnosti potravin 2022).

Draslík (K) je hlavním kationtem nitrobuňkové tekutiny. Podílí se na acidobazické rovnováze organismu, regulaci osmotického tlaku a je nezbytným prvkem pro šíření nervového vzruchu a kontrakci svalů (Sharma 2018). Marounek & Havlík (2020) uvádějí, že průměrný denní příjem K se pohybuje kolem 2 – 3 g. Mezi zeleninu bohatou na K řadíme špenát (558 mg/100 g), brambory (413 mg/100 g), celer (260 mg/100 g) a dále také fazole, červenou řepu a rajčata (U. S. Department of Agriculture 2022).

Hořčík (Mg) je kofaktorem enzymů, je esenciální pro správnou funkci svalů, nervové soustavy a srdce. Hořčík se podílí na snižování hladiny stresových hormonů a snižuje nervosvalovou a srdeční dráždivost. Doporučený denní příjem pro dospělého člověka je přibližně 400 mg (Vormann 2016). Mezi zdroje Mg můžeme řadit vařený hrách (41 mg/100 g), kapustu (33 mg/100 g) a květák (v syrovém stavu 15 mg/100 g) (U. S. Department of Agriculture 2022).

Fosfor (P) je významným intracelulárním aniontem, podílí se na správné stavbě kostí a buněčných membrán. Fosfor je nezbytný pro metabolické procesy, tvoří energetické vazby v molekule ATP (adenosintrifosfát) a je také součástí DPG (kyselina 2,3-difosfoglycerová), která zajišťuje uvolňování kyslíku z hemoglobinu do tkání. Doporučený denní příjem je přibližně 1,2 g (Mourek 2012; Kraft 2015). Fosfor je obsažen ve většině potravin, z rostlinných zdrojů můžeme vybrat například špenát (41 mg/100 g), hrášek (108 mg/100 g) a dýňová semena (1230 mg/100 g) (U. S. Department of Agriculture 2022).

Chlor (Cl) řadíme mezi anionty extracelulární tekutiny. V organismu se podílí na udržování acidobazické rovnováhy a je nezbytný pro tvorbu žaludeční kyseliny. V zelenině tento prvek téměř obsažen není, hlavním zdrojem příjmu je kuchyňská sůl (Mourek 2012; Marounek & Havlík 2020).

Síra (S) je přijímána zejména ze sirných aminokyselin, methioninu a cysteinu. V bílkovinách tvoří disulfidické můstky, které se významně podílí na struktuře. Marounek & Havlík (2020) uvádí, že konzumace pestré stravy tak bez obtíží zajistí dostatečný denní příjem (přibližně 1 g) tohoto prvku. Síra je přítomna v mnoha dalších sloučeninách (například thiamin, biotin, koenzym A, kyselina hyaluronová, homocystein a další) i tkáních, kde se podílí především na jejich ochraně (kůže, vlasy, nehty, chrupavky). Síra je rovněž přítomna v látkách, které ovlivňují chuť a aroma, tyto látky obsahují brukvovité rostliny, cibule, česnek a mnoho dalších druhů ovoce i zeleniny (Komarnisky et al. 2003; Vaněk et al. 2012; Sharma 2018).

Spektrum esenciálních mikroelementů je velmi široké. Železo (Fe) je pro organismus naprosto nezbytné, neboť je centrálním atomem hemoglobinu a je také součástí enzymů dýchacího řetězce. Doporučený denní příjem je 10 – 15 mg (Marounek & Havlík 2020). Zdrojem rostlinného původu Fe je červená řepa, obsahuje 0,8 mg/100 g (U. S. Department of Agriculture 2022).

Měď (Cu) je obsažena v enzymech, podílí se na metabolismu železa a tvorbě pojivové tkáně (Sharma 2018). Kromě živočišných zdrojů je Cu obsažena také například v čočce (1,3 mg/100 g) (U. S. Department of Agriculture 2022).

Jod (I) je esenciálním prvkem pro hormony štítné žlázy, tyroxin a trijodthyronin. Jod je nepostradatelným prvkem pro správný vývoj nervové soustavy a mozku, zejména v prenatálním stadiu. Nedostatek I může způsobit mentální retardaci, poruchy nervové soustavy a v krajním případě i úmrtí plodu. Denní příjem I je doporučen v množství 100 – 200 µg, těhotné a kojící ženy by měly přijímat 200 – 250 µg (Gunnarsdottir & Dahl 2017). Dobrymi zdroji jsou mořské plody a řasy (Sharma 2018).

Zinek (Zn) plní v organismu katalytické, regulační a stavební funkce, je nezbytný pro správné fungování imunitního systému, metabolické pochody v buňkách, tvorbu buněčných

membrán a je součástí enzymů (Hambidge 2000; Sharma 2018). Bohatá jsou na Zn například dýňová semena (5 mg/100 g) (U. S. Department of Agriculture 2022).

Selen (Se) je součástí aminokyselin selenocysteinu a selenomethioninu. Selen se účastní metabolických procesů a je obsažen v enzymech ovlivňujících syntézu DNA (Sharma 2018). Rostlinné zdroje Se jsou brambory, lusky a celer, selenu obsahují 1 – 3 µg/100 g (Informační centrum bezpečnosti potravin 2022).

Chrom (Cr) se uplatňuje v metabolismu sacharidů a lipidů, doporučený denní příjem je odhadován na 30 – 100 µg (Marounek & Havlík 2020). Na Cr jsou bohatá rajčata, fazole a brokolice (Informační centrum bezpečnosti potravin 2022).

### 3.3 Toxické prvky v potravinách rostlinného původu

Z hlediska bezpečnosti potravin je nezbytné monitorovat rizikové prvky, které pronikají do potravního řetězce. Mezi majoritní zdravotně rizikové prvky řadíme rtuť, olovo, kadmium, arsen, beryllium a thallium (Vaněk et al. 2012). Do skupiny minoritních toxických prvků lze zařadit například antimon, baryum, cín a uran. Potenciálně nebezpečné chemické látky a prvky intenzivně monitoruje Codex Alimentarius Commission, která si dává za cíl charakterizovat tyto látky a predikovat a monitorovat jejich vliv na lidské zdraví (De la Guardia Salvador Garrigues & Garrigues 2015). Dalšími systémy monitorujícími bezpečnost potravin a umožňujícími rychlou globální komunikaci je RASFF (Systém rychlého varování pro potraviny a krmiva) a EFSA (Evropský úřad pro bezpečnost potravin) (Informační centrum bezpečnosti potravin 2022).

Olovo (Pb) v krvi v koncentraci 1,93 µmol/l způsobuje potíže hematologické, neurologické, postihuje gastrointestinální trakt, inhibuje funkci enzymů, zpomaluje šíření nervových vzruchů a poškozuje játra. Pb je rovněž rizikovým prvkem pro těhotné ženy, neboť souvisí s vyšším výskytem potratů (Lockitch, 1993). Zdrojem Pb je především voda, v případě zeleniny se většinou jedná o kontaminaci z prachu, kterou lze eliminovat dostatečným opláchnutím potravin (Informační centrum bezpečnosti potravin 2022). Evropská komise stanovila limity pro koncentraci Pb v zelenině (kromě brukvovité) na 0,1 mg/kg, pro brukvovité je limit 0,3 mg/kg (De la Guardia Salvador Garrigues & Garrigues 2015).

Kadmium (Cd) je na rozdíl od Pb přijímáno kořeny rostlin. Akutní otrava Cd se projevuje nevolností, zvracením a bolestmi hlavy. Dlouhodobé působení Cd má karcinogenní a mutagenní účinky, poškozuje DNA a zapříčiňuje chromozomové aberace. Cd rovněž souvisí s poškozením ledvin a hypertenzí. Překročení povolených limitů stanovených nařízením Evropské Komise se často týká máku (0,8 mg/kg) a hub (1,0 mg/kg) (Satoh et al. 2002; Informační centrum bezpečnosti potravin 2022).

Rtuť (Hg) bývá v potravinách rostlinného původu obsažena jen zřídka, výjimku tvoří houby (hřiby a žampiony). Hg poškozuje centrální nervovou soustavu, mozek a ledviny. Chronické působení se projevuje diabetem, roztroušenou sklerózou a revmatickými chorobami (Informační centrum bezpečnosti potravin 2022).

### 3.4 Arsen jako prvek, fyzikální a chemické vlastnosti

Arsen (As), prvek s protonovým číslem 33, ležící ve čtvrté periodě a V. A. skupině, řadíme do skupiny polokovů. Arsen se nejčastěji vyskytuje ve třech barevných podobách, žluté, černé a kovově šedé. Relativní atomová hmotnost arsenu je 74,92, hustota 5,73 g/cm<sup>3</sup>, teplota tání 613°C a teplota varu 817°C. Nejčastěji se vyskytuje v oxidačních stupních As<sup>-III</sup>, As<sup>0</sup>, As<sup>+III</sup> a As<sup>+V</sup> (Adriano 2001). Trojmocné sloučeniny As jsou považovány za nejrizikovější z hlediska toxicity pro živé organismy (Sattar et al. 2016).

Arsen vykazuje nízkou elektrickou vodivost a diamagnetické vlastnosti. Na vzduchu As sublimuje a tvoří molekuly As<sub>4</sub>. Plynný As tvoří žluté páry, při jejich ochlazení vzniká žlutý arsen, který těká s vodní párou a vykazuje silné redukční účinky. Při působení světla vzniká kovový As, přechodným produktem je černý As (Trebichavský et al. 1998).

Hoření As je doprovázeno modrým plamenem a vznikem bílého dýmu (As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). S halogenidy tvoří látky plynného, kapalného i pevného skupenství, s vodíkem tvoří As plynný AsH<sub>3</sub>. Většina sloučenin As je rozpustná ve vodě s výjimkou některých sloučenin se sírou a arsenitanů. Sloučeniny As byly využívány zejména jako barviva, pigmenty, nachází se v pesticidech a jedech. Arsen v oxidačních číslech As<sup>III</sup> i As<sup>V</sup> se kovalentně váže s kovy a nekovy za vzniku stabilních organických sloučenin (Trebichavský et al. 1998; Adriano 2001).

### 3.5 Zdroje arsenu v přírodě

#### 3.5.1 Průmyslové zdroje

Odhaduje se, že celosvětová roční produkce As se pohybuje v rozmezí 75–100 x 10<sup>3</sup> t/rok. Majoritní část tvoří As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a kovová forma As, která je zejména využívána ve slitinách společně s olovem a mědí (Adriano 2001).

Arsen je v prostředí všudypřítomný, avšak kontaminací jeho koncentrace řádově vzrůstají. Významným problémem je kontaminace podzemních vod, ke které dochází zejména v důsledku těžby rud a jejich následnému zpracování, neboť koncentrace As ve strusce se může pohybovat až v řádu tisíců mg/kg. V důsledku ukládání strusky a kalů z hutního průmyslu a odtoku odpadních vod z hutí a rafinérií dochází k přímé kontaminaci povrchových i podzemních vod (Sattar et al. 2016). Legislativa stanovuje nejvyšší přípustnou koncentraci As v pitné vodě na 10 µg/l, k překročení limitů v České republice běžně nedochází (Pomykačová et al. 1990; Zákony pro lidi 2022).

Významným zdrojem As v prostředí je také zemědělství a lesnictví. V zemědělství byly v minulosti hojně využívány pesticidy obsahující As, v lesnictví a dřevozpracujícím průmyslu byly využívány ochranné nátěry s obsahem As. Velké množství těchto látek je v současné době zakázáno, případně jsou tyto látky prodávány velmi zřídka (například insekticidy arseničnan vápenatý a Pařížská zeleň, v minulosti častý zdroj otrav). Arsen je v některých rozvojových zemích rovněž využíván jako aditivum v krmných směsích pro drůbež pro své kokcidistatické účinky a v prostředcích na vyhubení tasemnice u ovcí a skotu. Trendem je nahrazovat

anorganické arseničnany za organické sloučeniny As, případně vyvíjet účinné látky bez použití As (Adriano 2001).

Hlavním důvodem upouštění od používání těchto látek je průnik As do potravního řetězce, což představuje riziko pro lidské zdraví. Arsen je kumulován zejména v hovězím a vepřovém mase, rýži a obilovinách. V historii došlo k mnoha kontaminacím potravin, kromě zmíněných surovin například také sušeného mléka, piva a sójové omáčky (Naidu et al. 2006).

Další zdroje As v prostředí jsou procesy spojené s chemickým průmyslem, výrobou skla a keramiky, barviva a pigmenty, kosmetika a cigarety (Sattar et al. 2016). Nezanedbatelným zdrojem je také uhlí a jeho spalování, například v Číně došlo k mnoha otravám v důsledku pálení uhlí s obsahem As 100 až 9600 mg/kg (Naidu et al. 2006). Arsen je rovněž využíván ve sloučenině s vodíkem (AsH) jako polovodič v elektronice (Adriano 2001).

### 3.5.2 Přírodní zdroje

Arsen je v přírodě přirozeně se vyskytující prvek, nachází se v půdě, vodě, horninách, uhlí, rostlinách a vodě. Jedná se o 52. nejhojnější prvek v zemské kůře, je vázán zejména v arsenidech, arseničnanech, oxidech, sulfidech a sulfosolích a nachází se ve více než 245 minerálech (Adriano 2001).

V horninách magmatického původu se As nachází přirozeně v relativně nízkých koncentracích, přibližně v rozmezí 0,5 – 2,5 mg/kg. Horniny sedimentárního typu (břidlice a jílovité horniny) obsahují As více, přibližně v rozsahu 1 – 13 mg/kg. Nejčastěji se vyskytujícím minerálem je arsenopyrit, dále například realgar a arsenolit (Trebichavský et al. 1998; Adriano 2001).

V nekontaminované půdě je přirozený obsah As v řádu jednotek mg/kg. Koncentrace As v kontaminovaných půdách může dosahovat řádů desítek až stovek mg/kg. Z hlediska vlivu na živé organismy je rozhodující vodorozpustná, tedy biodostupná forma (Basu et al. 2004). O míře dostupnosti As, ale i jiných mikroprvků pro rostliny a mikroorganismy, rozhoduje mnoho faktorů, kam řadíme pH půd, složení, zrnitost a pórovitost půdy a míru sorpce prvku v půdě. Rizikem vyšších koncentrací vodorozpustného As je nejen průnik do potravního řetězce, ale také sestup prvku do podzemních vod a kontaminace pitné vody (Adriano 2001; Vaněk et al. 2012).

Nezanedbatelným zdrojem As v prostředí je také uhlí a popílek, který vzniká při spalování. V uhlí je průměrně obsaženo 13 mg/kg (Adriano, 2001), ale hodnoty koncentrace As mohou dosahovat až v řádu tisíců mg/kg. V popítku, který vzniká spalováním uhlí, je koncentrace vyšší než v případě uhlí, naměřené hodnoty se mohou pohybovat v řádu stovek až tisíců mg/kg (Trebichavský et al. 1998).

Pitná voda přirozeně obsahuje minimum As (průměrně 0,004 mg/l), průměrný obsah ve sladkých vodách je 0,001 mg/l. Vyšší obsah As vykazují geotermální a důlní vody (desítky až stovky mg/l). Velmi vysoké koncentrace As byly naměřeny v sedimentech na dně řek, hodnoty koncentrace dosahovaly řádů tisíců mg/kg (Trebichavský et al. 1998).

Obsah As v atmosféře je přirozeně velmi nízký (přibližně  $10^{-3} - 10^{-5} \text{ g/m}^3$ ), avšak lidskou činností, spalováním fosilních paliv a vulkanickou aktivitou dochází ke zvyšování koncentrace As v ovzduší až k hodnotám  $0,003 - 0,18 \text{ g/m}^3$ . Roční depozice As je odhadována na  $1 - 1000 \mu\text{g/m}^2/\text{rok}$  v závislosti na zatížení ovzduší antropogenní činností (Adriano 2001; Basu et al. 2014). V ČR je dle ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav) (2022) stanoven roční imisí limit na  $6 \text{ ng/m}^3$ . Roční průměr imisí As v ČR v roce 2020 byl  $2,4 \text{ ng/m}^3$ .

## 3.6 Působení arsenu na rostliny, projevy toxicity

### 3.6.1 Význam arsenu ve výživě rostlin

Příjem As rostlinou je ovlivňován mnoha faktory, a to druhem rostliny, formou As, hodnotou pH půdy, obsahem dalších prvků a sloučenin v půdě (například železa a oxidů hliníku) a obsahem jílových materiálů a humusových látek (Naidu et al. 2006). Neexistuje důkaz, že by As byl esenciálním prvkem pro rostliny, Adriano (2001) však uvádí, že byly provedeny výzkumy, které prokazovaly stimulační účinky nižších koncentrací As na růst rostlin. Koncentrace As v půdě o hodnotě  $1 \text{ mg/kg}$  prokazovaly kladný účinek na růst, ale koncentrace přesahující  $5 \text{ mg/kg}$  již negativně působily na růst podzemní i nadzemní části, u rostlin citlivých k vyšším koncentracím As (kukuřice, brambory a pšenice) bylo dokonce pozorováno mírné snížení produkce (Adriano 2001).

Příčiny stimulace růstu nízkými koncentracemi As si lze vysvětlit dvěma způsoby. Prvním je analogie s herbicidy s obsahem As, které mají stimulační účinky na růst rostlin, tudíž As obsažený v půdě v nízkých koncentracích vykazuje obdobné účinky. Druhým principem je sorpce iontů As místo fosfátových iontů na sorpční komplex, konkrétně se jedná o sorpci výměnnou, což způsobuje vyšší dostupnost P pro rostliny a zlepšení růstu (Adriano 2001; Vaněk et al. 2012).

Příjem As rostlinami nemá na jeho celkový obsah v půdě významný vliv, avšak existují rostliny s mimořádnou schopností As akumulovat. Mezi tyto rostliny, které nazýváme hyperakumulátory, řadíme kapradinu *Pteris vittata*, jenž vykazuje mimořádnou schopnost akumulace As (obsah As v rostlině může dosahovat až  $8\,000 \text{ mg/kg}$ ) (Naidu et al. 2006).

Absorpce As rostlinou je podmíněna formou As v prostředí, zdroji a dalšími přidanými látkami. Adriano (2001) uvádí rozdíly v příjmu As v závislosti na jeho formě ve vodném roztoku. V případě přidání As do roztoku  $\text{As}_2\text{O}_3$  byl ve vodním prostředí As kořeny snadno přijímán, ale nebyl translokován do výhonku. Při přidání kakodylové kyseliny byl As translokován do stonku a výhonku. Použití herbicidů, kyseliny methylarseničné (MMA) a kyseliny dimethylarseničné (DMA) způsobilo také translokaci As z kořenů do výhonku. Některé rostliny mají vyvinuté ochranné mechanismy blokující translokaci rizikových prvků z kořenů do dalších pletiv, což představuje efektivní způsob zabránění průniku těchto prvků do potravního řetězce (Naidu et al. 2006).

## 3.6.2 Fytotoxické působení arsenu

### 3.6.2.1 Anorganický arsen

Anorganický As, vyskytující se v oxidačních číslech  $As^{+III}$  a  $As^{+V}$ , je převládající formou vyskytující se v rostlinách, přičemž vyšší míru fytotoxicity vykazují arsenitany, které snáze poškozují kutikulu a vykazují vyšší mobilitu v půdě (Eisler 2007; Dai et al. 2013). Hlavními zdroji kontaminace anorganickým As v půdě jsou pesticidy a odpadní produkty antropogenní činnosti. Anorganické pesticidy navíc vykazují schopnost bioakumulace a perzistence v životním prostředí, proto jejich toxický účinek v půdě trvá mnoho let i po ukončení aplikace na zemědělské půdy (Eisler 2007).

Rostliny přijímají anorganický As převážně kořeny, kde je i akumulován, což představuje nebezpečí při konzumaci kořenové zeleniny. Naopak nejnižší množství As je kumulováno v plodech a semenech (Adriano 2001). Mechanismy toxického působení As na rostlinná pletiva nejsou ještě zcela přesně známy, ale dle Adriano (2001) a Eisler (2007) As narušuje pentózo – fosfátový cyklus a inhibuje fotosyntetické procesy, což vede k poklesu turgoru v buňkách, smrti buněk, vadnutí listů, odbarvení kořene a nekrotám. Arsenitany ( $As^{+III}$ ) také reagují s dithioly na proteinech, což způsobuje inhibici enzymatických reakcí, degradaci buněčných membrán a smrt buněk. Arsenitany jsou vysoce toxické především pro kořeny. Arseničnany ( $As^{+V}$ ) v půdě soupeří s fosforem a při vstupu do rostliny rozpojují oxidační fosforylaci, což způsobuje nedostatečné energetické zásobení buněk a poruchy růstu rostlin (Naidu et al. 2006).

### 3.6.2.2 Organický arsen

Organickými zdroji As jsou především pesticidy a další látky využívané v zemědělství pro ochranu rostlin. Mezi významné zástupce řadíme MMA a DMA. Obě látky se v půdě vyskytují ve formě aniontů, přičemž DMA dle Basu (2014) může být všudypřítomná a přirozeně se vyskytující látka. DMA a MMA jsou rostlinami přijímány zejména nadzemní částí ve formě ochranných postřiků, proto vykazují vyšší míru translokace než anorganický As (Adriano 2001; Basu et al. 2014).

Organické arseničnany působí negativně na syntézu proteinů, což má za následek poruchy růstu, poškození vzrostného vrcholu a kořene, nekrózy, chlorózu, dehydrataci, v krajním případě až úhyn rostlin, například u rýže dochází k poruchám odnožování (Adriano 2001; Basu et al. 2014). Organické sloučeniny As jsou více rizikové z hlediska průniku do potravního řetězce, například použití arsenového pesticidu proti molu jablečnému způsobilo vyšší obsah As ve víně a moštu. Podobný problém se týká i tabáku, který může obsahovat As až 50 mg/kg sušiny (Trebichavský et al. 1998).

### 3.6.3 Faktory ovlivňující míru příjmu arsenu rostlinami

#### 3.6.3.1 Struktura a složení půd

Vlastnosti půd ovlivňuje velké množství faktorů, které se současně podílí na dostupnosti As pro rostliny. Základním měřitelným parametrem je celkové množství As v půdě. Ve světě je v půdách obsaženo nejčastěji 0,2 – 40 g/t zeminy, v ČR průměrně 1,8 – 18,4 g/t. V místech aplikace pesticidů s obsahem As stoupaly hodnoty množství As do řádu stovek g/t. V oblastech zasažených průmyslem či těžbou stoupalo množství As do extrémních hodnot, například v oblasti Mokrska byly naměřeny hodnoty 85 – 1145 g/t (Trebichavský et al. 1998; Naidu et al. 2006).

Rozhodující pro příjem rostlinou je však podíl vodorozpustné, a tedy pro rostlinu dostupné, frakce. Podíl vodorozpustného As úzce souvisí se strukturou půdy a zastoupením dalších prvků, zejména železa a hliníku (Trebichavský et al. 1998).

Železo se v půdě vyskytuje ve formě hydroxidů, oxyhydroxidů a oxidů na povrchu půdních částic a kořenů rostlin, které vykazují vysokou afinitu k As. Za redukčních podmínek v půdě dochází k uvolňování adsorbovaného As, čímž se zvyšuje jeho dostupnost pro rostliny. Železo je hojně obsaženo v jílových půdách. Arsen v oxidačním čísle +V je na sloučeniny železa sorbován nejsilněji, což značí, že jílovité půdy mají vyšší obsahy než půdy písčitého charakteru. Hlinitopísčité půdy jsou proto z hlediska obsahu vodorozpustného As rizikovější, neboť je z nich As snáze vyplavován. Pro příjem kořeny je důležitý vodorozpustný As, který vzniká za redukčních podmínek v půdě rozpouštěním oxyhydroxidů železa (Trebichavský et al. 1998; Naidu et al. 2006; Chakraborty et al. 2006).

Arsen je kromě železa silně sorbován také na oxidy hliníku. Při nepřítomnosti oxidů železa a hliníku proto dochází k biologické redukci (methylaci) As, čímž vznikají silně toxické akrylové sloučeniny As. Půdní bakterie dále napomáhají oxidaci  $\text{AsO}_3^{3-}$  na  $\text{AsO}_3^-$  a dále produkují methylarsen, který těká do ovzduší. Methylové formy As vznikají především při použití DMA (Trebichavský et al. 1998).

Významným prvkem je také síra, která má schopnost navazovat As do komplexů, které dále snižují translokaci As z kořenů do dalších částí rostlin. Fosfor se nachází ve stejné skupině periodické tabulky prvků jako As, a proto se v prostředí vyskytuje ve stejných oxidačních číslech. Fosfor proto s As soupeří o vazebná místa v půdě, ale také si jsou konkurenty v příjmu rostlinou. Při přidání fosforu do půdy je tudíž nutné věnovat pozornost rovnováze mezi sorpcí v půdě a vstřebávání do rostlin u obou prvků (Chakraborty et al. 2014).

#### 3.6.3.2 pH půd

pH půd významně ovlivňuje nejen růst rostlin, ale také dostupnost a rozpustnost prvků v půdě. Rozpustnost As závisí na jeho oxidačním čísle a také na pH půdního roztoku. Mírně zásadité pH (7 – 8,5) způsobuje vyšší afinitu  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  k arsenitanovému aniontu, což má za důsledek navazování As a jeho nepřístupnost pro rostliny. Při zvýšení pH nad 8,5 dochází ke snížení adsorpce  $\text{As}^{+V}$  a zvýšení adsorpce  $\text{As}^{+III}$  (Chakraborty et al. 2014).



Kyselé až neutrální pH působí příznivě na adsorpci  $As^{+V}$  na  $FeOOH$  a další amorfní sloučeniny železa a hliníku v jílovitých půdách. Adsorpce  $As^{+III}$  je při těchto hodnotách pH inhibována. Při vazbě na kalcit se optimální pH pro adsorpci pětimocného  $As$  pohybuje v rozmezí 10 – 12, přičemž hodnoty pH převyšující 12 mají na adsorpci  $As$  negativní vliv. Podstatnou roli při adsorpci  $As$  v hodnotách pH nad 9 hrají také uhličitany (Adriano 2001; Chakraborty et al. 2014).

### 3.6.3.3 Druh rostlin

Rostlinné druhy vykazují rozdílnou míru tolerance vůči dostupnému  $As$  v prostředí. Nejcitlivější jsou k  $As$  obecně luskoviny, především fazole a hrách, dále rýže, broskvoně a meruňky. Vyšší toleranci k  $As$  naopak vykazují rajčata, ředkvičky, zelí, špenát, jabloně a hrušně (Adriano 2001). Zajímavé srovnání vlivu arsenu na rajčata (*Lycopersicon esculentum*) a fazole (*Phaseolus vulgaris*) uvádějí Carbonell-Barrachina et al. (1997). Experiment ukázal, že fazole jsou vůči působení  $As$  mnohem méně rezistentní než rajčata, neboť fazole rovnoměrně translokují  $As$  do všech částí rostliny. Fazole vykazovaly výrazně snížené výnosy, při koncentraci  $As$  5 mg/kg půdy došlo k poklesu výnosu na 4,5 % ve srovnání s kontrolním vzorkem. Rajčata naopak akumulovala  $As$  převážně v kořenech, rostliny nevykazovaly známky nekrózy a chlorózy. Byl pozorován úbytek sušiny a pokles výnosnosti, při koncentraci  $As$  10 mg/kg půdy byl zaznamenán pokles na 54,1 % ve srovnání s kontrolním vzorkem. Rostliny translokující  $As$  do všech orgánů (vegetativních i generativních) jsou tedy výrazně citlivější vůči  $As$  a dalším rizikovým prvkům oproti rostlinám kumulujícím rizikové prvky v kořenech.

Mimořádnou toleranci vůči  $As$  vykazuje *Pteris vittata*, v sušině může obsahovat až tisíce miligramů  $As$  na kilogram biomasy. Tato rostlina je proto potenciálně vhodná pro fytoremediaci půd s vysokým obsahem  $As$ . Rostliny rostoucí v nekontaminovaných půdách obsahují pro srovnání přibližně 1 - 5 mg  $As$  v kilogramu sušiny (Trebichavský et al. 1998; Naidu et al. 2006).

## 3.7 Toxické působení arsenu na lidské zdraví

Arsen se v lidském těle přirozeně vyskytuje, neboť je denně přijímán v množství přibližně 0,01 – 0,17 mg. Vyšší příjem  $As$  souvisí se zvýšenou konzumací mořských ryb, kontaminací ovzduší a pitné vody a kouřením. Do potravního řetězce proniká z přirozených i antropogenních zdrojů. Do organismu je  $As$  přijímán gastrointestinálním traktem, dýchací soustavou, sliznicemi a pokožkou. Do buněk pak  $As$  proniká aktivním transportem, tedy stejným způsobem, jakým vstupuje do buněk fosfor. Vylučován je pevnými výkaly a močí (Trebichavský et al. 1998; Adriano 2001; Ozturk et al. 2022).

Míra toxicity jednotlivých forem  $As$  pro lidský organismus je různá. Nejtoxičtější účinky vykazuje arsan, a dále sestupně anorganické arsenitany, organické sloučeniny trojmocného  $As$ , anorganické arseničnany, organické sloučeniny pětimocného  $As$ , arsoniové sloučeniny a

nejméně toxický je elementární As. Úroveň toxicity také určuje rozpustnost ve vodě a tělesných tekutinách. Zásadním parametrem ovlivňujícím toxické účinky na člověka je délka expozice a množství přijaté toxické látky (Adriano 2001; Eisler 2007).

Akutní otrava vzniká při krátkodobém vystavení organismu vyšší dávce toxické látky. Arsen je pro průměrného člověka toxický již při dávce 30 – 50 mg, letální dávka se pohybuje okolo 250 mg. Jednorázová vysoká dávka As způsobuje prudké bolesti hlavy, kolaps krevního oběhu a smrt. Mezi příznaky otravy nižší dávkou As patří závratě, pocit slabosti, sucho v ústech, zápach z úst připomínající česnek, gastrointestinální obtíže (bolesti břicha, zvracení, průjem). Projevem otravy je také tzv. arseniková cholera, která se vyznačuje dehydratací, snížením krevního tlaku, poškozením jater, cyanózou a v krajním případě i smrtí (Trebichavský et al. 1998; Ozturk et al. 2022).

Inhalační expozice způsobuje pálení na prsou, dráždivý kašel, cyanózu a edém plic. Velmi toxický arsin ( $\text{AsH}_3$ ) vzniká při rozpouštění kovů s obsahem arsenu v kyselinách. Mezi projevy otravy plynným As patří bolesti hlavy, zvracení, cyanóza, žloutenka, hemolýza, postižení centrální nervové soustavy a srdce a edém plic. Koncentrace 3 – 5 ppm způsobuje lehkou otravu, koncentrace 25 – 50 ppm je smrtelná po třiceti minutách a dávka 250 ppm usmrcuje okamžitě (Trebichavský et al. 1998).

Chronické toxické působení As na lidský organismus se projevuje mnoha nespecifickými příznaky. Dlouhodobý denní příjem As v množství 10 mg za den má již negativní účinky na lidské zdraví (Trebichavský et al. 1998). Na Zemi je zhruba 150 milionů lidí ohroženo potenciální otravou As, v Bangladéši je dokonce 70 milionů lidí vystaveno chronickému působení As (Ozturk 2022). Zvýšené riziko chronické otravy hrozí u lidí žijících v těžebních oblastech a pracovníků v dolech, na hutích a u osob, které jsou v častém kontaktu s organickými pesticidy. Dlouhodobý účinek As se projevuje změnami na kůži a sliznicích, neurologickými a hematologickými problémy, kolikami, hubnutím a poškozením zraku (Trebichavský et al. 1998). Včasná řešení chronické otravy As je léčitelné, avšak při zanedbání léčby dochází k ireverzibilním změnám a poškození zejména jater a ledvin (Eisler 2007; Ozturk 2022).

Arsen v organismu vyvolává celé spektrum účinků. Řadí se mezi teratogenní, karcinogenní (zejména anorganický As), mutagenní, imunotoxické a genotoxické látky. Rovněž významným způsobem ovlivňuje metabolismus buněk. Arsen má tendenci v buňce nahrazovat fosfor, čímž narušuje biochemické procesy v buňce. Váže se na skupinu  $-\text{SH}$ , což má za následek útlum metabolismu tuků a sacharidů a zpomalení buněčného dýchání. Arsen dále ovlivňuje produkci růstových faktorů, buněčné dělení a reparaci DNA (deoxyribonukleová kyselina) (Trebichavský et al. 1998; Ozturk 2022).

Účinek na imunitní funkce pravděpodobně souvisí s karcinogenními účinky As. Arsen způsobuje vyšší výskyt infekcí v organismu, rozvoj autoimunitních onemocnění a karcinomu (Ozturk 2022). Eisler (2007) uvádí, že v oblastech s vyšší koncentrací As v pitné vodě (koncentrace 0,6 ppm), zejména v oblastech Taiwanu a Chile, se prokázala souvislost mezi konzumací kontaminované vody a nezhoubnými nádory kůže.

Velmi závažné jsou účinky arsenu na vývoj plodu a DNA. Arsen způsobuje chromozomální aberace v lymfocytech, poškozují DNA a zárodečné buňky. Anorganický As ( $\text{As}^{+III}$  a  $\text{As}^{+V}$ ) má schopnost pronikat placentou, způsobuje malformace a v krajním případě i smrt plodu. Toxické účinky se projevují poškozením neurální trubice, vystouplýma očima, nedokončeným vývojem lebky a malými čelistmi (Trebichavský et al. 1998; Eisler 2007).

## 4 Metodika

Pro sledování vlivu As na růst dvou druhů zelenin, jejich metabolismus a obsah rizikových prvků v konzumních částech, byl založen vegetační nádobový pokus ve skleníku Katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin. Pro pokus byla vybrána ředkvička jako zástupce kořenové zeleniny a salát hlávkový jako zástupce listové zeleniny. Zelenina byla pěstována na půdě uměle kontaminované nízkou a vysokou dávkou As.

### 4.1 Nádobový pokus

V nádobovém pokusu byla použita půda z lokality Praha-Suchdol (50°8'8" N, 14°22'43" E), jejíž základní charakteristika je uvedena v tabulce 1. Pseudo-totální obsah As v této půdě je pod limitem legislativně uváděné preventivní hodnoty As běžných zemědělských půd ČR (Vyhláška č. 153/2016 Sb.) a lze půdu tedy považovat za antropogenně nekontaminovanou.

Tabulka 1. Základní charakteristika pokusné půdy.

Půdní typ a subtyp	Suchdol
	Černozem haplická
pH <sub>H2O</sub> (-)	7,1
KVK (mmol <sub>(+)</sub> /kg)	258
C <sub>org.</sub> (%)	1,8
As (mg/kg)	16 ± 1,7
As <sub>ws</sub> (mg/kg)	0,10 ± 0,01

KVK – kationtová výměnná kapacita; C<sub>org.</sub> – organický uhlík; As<sub>ws</sub> – vodorozpustná frakce As v půdě; preventivní hodnota As v běžných půdách: 20 mg/kg DM

Do plastových nádob bylo odváženo 2,5 kg zhomogenizované půdy, která byla hnojena N (dávka 0,5 g/nádobu, ve formě NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), P a K (dávka 0,16 a 0,4 g/nádobu, ve formě K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>). Arsen byl do půdy přidáván jako roztok Na<sub>2</sub>HAsO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O ve dvou dávkách – 20 mg As/kg půdy (nízká kontaminace, As1) a 100 mg As/kg půdy (vysoká kontaminace, As2). Kontrolní variantou byla půda bez přídatku As, jenž byla provedena ve čtyřech opakováních. Kontaminované varianty byly provedeny ve dvou opakováních. Nádobky byly rozmístěny v náhodném uspořádání a během pokusu byly pravidelně přemísťovány z důvodu eliminace vlivu podmínek vnějšího prostředí.

#### 4.1.1 Ředkev setá

Osivo ředkve seté (*Raphanus sativus* L. odrůda VIOLA) firmy Nohel Garden a.s. bylo zakoupeno v maloobchodu. V každé nádobě bylo vytvořeno 7 důlků se semeny této odrůdy ředkvičky, pro níž jsou charakteristické větší, kulovité a jasně fialové bulvy s bílou jemnou dužninou. Po vzejití (obrázek 1) byly ředkvičky vyjednoceny na 7 rostlin na nádobu. Ředkvička byla pěstována ve skleníku při těchto parametrech: teplota vzduchu den/noc 22 °C/ 18 °C,

půdní vlhkost 60 % maximální vodní kapacity, světelný režim den/noc 16 h/ 8 h, intenzita osvětlení 375 W/m<sup>2</sup>.



Obrázek 1. Nádoby před vyjednocením ředkviček.

Ředkvičky byly sklizeny v konzumní zralosti, tj. po 50 dnech růstu v pokusných nádobách. Biomasa ředkviček byla rozdělena na listy, bulvu a kořen. Listy byly zváženy a biomasa byla alikvotně rozdělena pro jednotlivé analýzy. Část biomasy byla dána na sušení pro analýzu obsahu prvků a z části čerstvé biomasy byla extrahována šťáva, která byla uchována při -80 °C pro budoucí stanovení obsahu kyseliny askorbové a orientační stanovení obsahu nitrátů. Bulvy byly po omytí demineralizovanou vodou a osušení pomocí buničité vaty zváženy a následně byla biomasa bulv nastrouhána a alikvotně rozdělena pro jednotlivé analýzy jako u biomasy listů. Kořen ředkviček byl po omytí demineralizovanou vodou a osušení pomocí buničité vaty zvážen a následně dán na sušení pro analýzu obsahu prvků.

#### 4.1.2 Hlávkový salát

Sadba hlávkového salátu, botanickým názvem locika setá (*Lactuca sativa* L. odrůda ADINAL), byla zakoupena ve výukovém skleníku České zemědělské univerzity v Praze. Rostliny v sadbě byly jednotné velikosti s 8 vyvinutými listy (obrázek 2). Do každé nádoby byla zasazena jedna rostlina této odrůdy hlávkového salátu, pro níž jsou charakteristické kulaté a středně velké hlávky. Pro pěstování salátu byly použity nádoby s půdou po pěstování ředkviček, která byla po jejich sklizni homogenizována. Salát byl pěstován ve skleníku při těchto parametrech: teplota vzduchu den/noc 22 °C/ 18 °C, půdní vlhkost 60 % maximální vodní kapacity, světelný režim den/noc 16 h/ 8 h, intenzita osvětlení 375 W/m<sup>2</sup>.



Obrázek 2. Salát hlávkový v den zasazení do nádob.

Salát byl sklizen po 45 dnech růstu v pokusných nádobách. Biomasa salátu byla rozdělena na listy a kořeny. Listy byly zváženy a biomasa byla alikvotně rozdělena pro jednotlivé analýzy. Část biomasy byla dána na sušení pro analýzu obsahu prvků a z části čerstvé biomasy byla extrahována šťáva, která byla uchována při  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  pro budoucí stanovení obsahu kyseliny askorbové a orientační stanovení obsahu nitrátů. Kořeny byly po omytí demineralizovanou vodou a osušení pomocí buničité vaty zváženy a následně byla biomasa dána na sušení pro analýzu obsahu prvků.

## 4.2 Analýza rostlin

Pro zjištění výnosu suché biomasy a přípravu stanovení obsahu prvků byla biomasa ředkviček a salátu sušena do konstantní hmotnosti 7 dní při  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (sušárna Venticell, BMT Medical Technology). Následně byly vzorky zváženy pro výnos suché biomasy a rozemlety na analytickém mlýnku IKA A11 basic (Werke). Po homogenizaci materiálu byl ve vzorcích stanoven obsah prvků.

Stanovení obsahu kyseliny askorbové a orientační stanovení obsahu nitrátů bylo provedeno v extraktech získaných z čerstvé biomasy ředkviček (listy a bulvy) a salátu (listy). Z alikvotní části čerstvé biomasy byl získán 1 ml extraktu pomocí lisování v plastové injekční stříkačce, který byl po extrakci do zkumavek uchován v hlubokomrazícím boxu.

### 4.2.1 Stanovení obsahu prvků

Ve vzorcích rostlin (navážka suché biomasy  $0,5 \pm 0,05\text{ g}$ ) byl stanoven obsah As po nízkotlakém mikrovlnném rozkladu v 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  $\text{HNO}_3$  a  $\text{H}_2\text{O}_2$  v poměru 4:1 (v/v). Proces rozkladu trval 60 min při výkonu 1000-1200 W a teplotě  $120\text{-}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 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 pro obsah As byla provedena v osmi

opakováních za variantu. Hodnoty měřených obsahů v mg/l jsou přepočítány na mg/kg pomocí vzorce:

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

Obsah dusíku a síry byl stanoven po vysokoteplotním (1150 °C) spálení vzorků (navážka biomasy 25 ± 5 mg) pomocí elementárního analyzátoru CHNS Vario MACRO cube (Elementar Analysensysteme GmbH). Měření bylo provedeno v osmi opakováních za variantu.

#### **4.2.2 Stanovení obsahu kyseliny askorbové**

V extraktech ředkviček (listy a bulvy) a salátu (listy) byl kolorimetricky stanoven obsah kyseliny askorbové pomocí komerčně prodáváného setu Ascorbic Acid Assay Kit II (Sigma-Aldrich) dle dodávaného návodu. Tato sada využívá pro měření barevné změny při redukci Fe<sup>3+</sup> iontů na Fe<sup>2+</sup> ionty za přítomnosti antioxidantů ve vzorku, jejíž absorbance byla měřena při 593 nm přístrojem TECAN Infinite® M200 (Tecan). Analýza vzorků byla provedena ve dvou opakováních.

#### **4.2.3 Stanovení obsahu nitrátů**

V extraktu z čerstvé biomasy ředkviček (listy a bulvy) a salátu (listy) byl orientačně stanoven obsah nitrátů pomocí přístroje LAQUAtwin NO<sub>3</sub><sup>-</sup> meter (HORIBA Advanced Techno Co., Ltd.). Měření bylo provedeno ve třech opakováních.

### **4.3 Statistická analýza**

Výsledky analýz byly statisticky vyhodnoceny pomocí programu Statistica 12.0 (StatSoft Inc.). 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

### 5.1 Vliv koncentrace As v půdě na akumulaci v rostlině

Prvotním parametrem pro zhodnocení vlivu obsahu As v půdě na rostlinu je míra akumulace tohoto prvku v jednotlivých částech rostliny.

Jasně patrným trendem je vyšší akumulace v podzemních částech rostlin, zejména kořenech, jak je zobrazeno v tabulce 2. Arsen obsažený v kořenech ředkvičky varianty As0 je důsledkem přirozené kontaminace vzorku půdy. Se vzrůstající koncentrací As v půdě je zřejmá i vyšší míra akumulace As. Statisticky významný rozdíl je v případě kořenů ředkvičky mezi variantami As0 a As2, mezi variantami As0 a As1 statisticky významný rozdíl není. Obdobný trend se objevuje také u kořenu salátu, kde rovněž vyšší koncentrace As způsobila výrazné navýšení akumulace tohoto prvku, oproti variantě As1 došlo k více než sedminásobně vyšší akumulaci.

V případě ředkvičky i salátu je zřejmé, že k translokaci As z kořenů do konzumních částí rostliny dochází. Míru translokace lze vyjádřit translokačním faktorem (TF), který spočítáme podle vzorce

$$TF = \frac{\text{obsah As v dané části}}{\text{obsah As v kořenech}}$$

TF bulvy v případě varianty As1 dosáhl hodnoty 0,18, ve variantě As2 dosáhl TF bulvy 0,09. Do listů ředkvičky bylo translokováno menší množství As než v případě bulvy, nad mezí detekce se pohybovala pouze varianta As2 s hodnotou TF 0,02. Hodnota TF listů salátu ve variantě As1 je 0,16, ve variantě As2 dosáhl TF hodnoty 0,06.

Obecně lze říci, že se zvyšující se koncentrací As v půdě dochází k vyšší akumulaci As ve všech částech rostlin, nejvyšší množství akumulují kořeny, dále v případě ředkvičky bulva a nejméně As (v případě ředkvičky i salátu) je translokováno do listů. Tento trend potvrzují také snižující se hodnoty translokačního faktoru.

Tabulka 2. Akumulace As v jednotlivých částech ředkvičky a salátu.

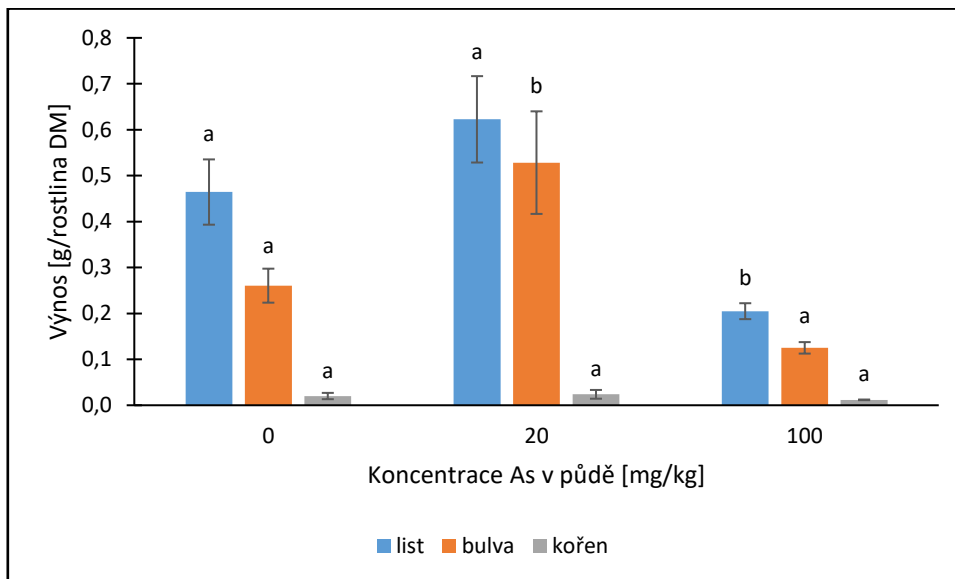
		Množství arsenu v sušině (mg/kg DM)				
		Ředkvička			Salát	
Označení varianty	Koncentrace As v půdě [mg/kg]	List	Bulva	Kořen	List	Kořen
As0	0	ND	ND	11,6 ± 1,1 <sup>a</sup>	ND	ND
As1	20	ND	4,4 ± 0,4 <sup>a</sup>	24,4 ± 6,3 <sup>a</sup>	6,7 ± 1,4 <sup>a</sup>	42,6 ± 1,1 <sup>a</sup>
As2	100	6,4 ± 0,8	30,8 ± 0,5 <sup>b</sup>	346,9 ± 48,2 <sup>b</sup>	17,6 ± 3,6 <sup>b</sup>	305,5 ± 44,4 <sup>b</sup>

ND – koncentrace prvku byla pod mezí detekce přístroje (mez detekce 3 mg/kg)



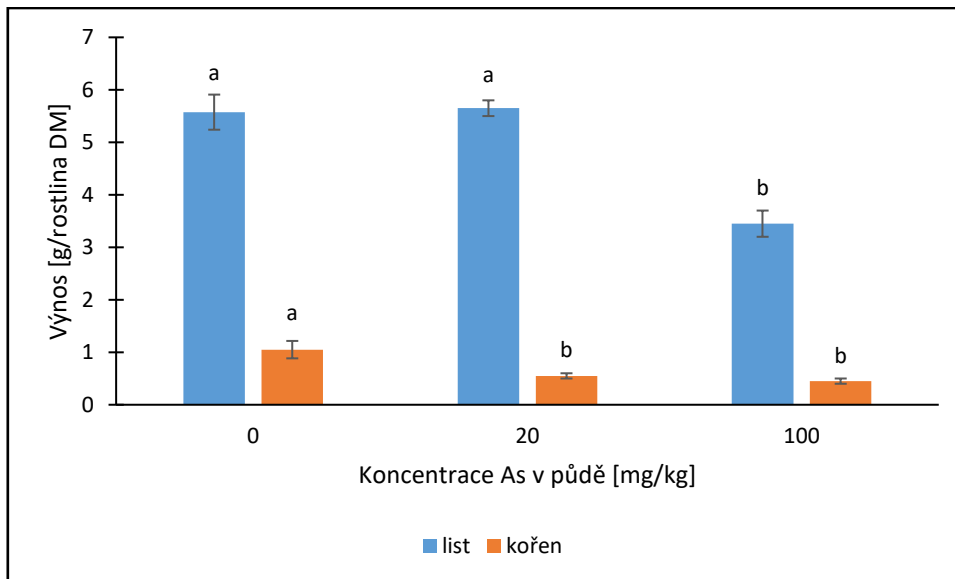
## 5.2 Vliv koncentrace arsenu v půdě na výnos sušiny

Důležitým ukazatelem kvality produkce je také výnos biomasy, v tomto případě je hodnocen výnos sušiny. Jak je patrné z grafu 1, při nižší koncentraci As v půdě došlo ve srovnání s kontrolou ke zvýšení výnosu sušiny listu (o 34 %), bulvy (o 103 %) i kořene (o 19 %) ředkvičky. Při vyšší koncentraci As v půdě je ve srovnání s kontrolou patrný výrazný úbytek výnosu sušiny všech tří sledovaných částí, konkrétně výnos biomasy listu poklesl o 56 %, bulvy o 52 % a kořene o 41 %. Statisticky významný je však pouze rozdíl výnosu sušiny bulvy mezi kontrolou a variantou As1 a sušiny listu mezi kontrolou a variantou As2.



Graf 1. Výnos suché biomasy ředkvičky v závislosti na koncentraci arsenu v půdě.

Na grafu 2 je zobrazen trend výnosu sušiny salátu. Z grafu je patrná klesající tendence výnosu sušiny při vyšší koncentraci As, trend je více zřejmý u listů salátu, rozdíly mezi výnosy biomasy jsou průkazné mezi variantou As2 a kontrolou. Pokles výnosu biomasy kořene je také statisticky průkazný mezi kontrolou a variantou As1. V porovnání s kontrolou zvýšila nižší dávka As výnos biomasy listů zhruba o 1,3 %, vyšší dávka As naopak snížila výnos biomasy o 38 %. Množství biomasy kořene se ve srovnání s kontrolou snížilo o 48 % (As1), respektive 57 % (As2).



Graf 2. Výnos suché biomasy salátu v závislosti na koncentraci arsenu v půdě.

Vliv kontaminace na růst rostlin a množství biomasy je patrný také při vizuálním zhodnocení nádobových pokusů. Jak je patrné na Obrázku 3, nižší kontaminace půdy měla na rostliny stimulační efekt a ředkvičky vytvořily biomasy více. Při vyšší kontaminaci byl již efekt opačný, rostliny vytvořily ve srovnání s kontrolou biomasy méně.



Obrázek 3. Srovnání nárůstu biomasy ředkvičky.

V případě salátu je vliv kontaminace na nárůst biomasy odlišný. Z obrázku 4 je patrné, že nižší kontaminace půdy způsobila menší úbytek biomasy oproti kontrolě, vyšší kontaminace způsobila ve srovnání s kontrolou větší úbytek biomasy. Z tohoto hlediska tedy u salátu nepozorujeme stimulační účinek dávky As na růst rostlin.



Obrázek 4. Srovnání nárůstu množství biomasy salátu.

### 5.3 Vliv koncentrace As v půdě na akumulaci N a S v rostlině

Dalším sledovaným prvkem byl dusík, zejména kvůli jeho souvislosti s obsahem nitrátů v zelenině. Tento prvek byl sledován pouze v konzumních částech rostlin. Se vzrůstající koncentrací As v půdě je z Tabulky 3 patrné, že i procentuální obsah dusíku v biomase se zvyšuje, statisticky významné rozdíly jsou patrné mezi všemi třemi variantami ve všech částech rostlin obou druhů. Nejvíce N je obsaženo v listech ředkvičky, bulva obsahuje N méně, ve variantě As0 o 0,17 %, varianta As1 obsahuje N méně o 2,22 % a varianta As2 o 0,8 %.

Ve srovnání s kontrolou je obsaženo v listu ředkvičky při nižší koncentraci As o 2,45 % N více, ve variantě As2 byl naměřen nárůst podílu N o 3,68 %. Rovněž v bulvě ředkvičky je zřetelný nárůst podílu N, varianta As1 obsahuje oproti kontrole o 0,4 % více a varianta As2 o 3,05 %. Procentuální nárůst podílu N je signifikantní také u listů salátu, ve srovnání s kontrolou je nárůst 1,15 % (As1), respektive 3,1 % (As2).

Tabulka 3. Množství dusíku v sušině ředkviček a salátů.

Označení varianty	Koncentrace As v půdě [mg/kg]	Množství dusíku v sušině (%)		
		Ředkvička	Bulva	Salát
		List		List
As0	0	2,06 ± 0,05 <sup>a</sup>	1,89 ± 0,15 <sup>a</sup>	1,84 ± 0,13 <sup>a</sup>
As1	20	4,51 ± 0,40 <sup>b</sup>	2,29 ± 0,21 <sup>b</sup>	2,99 ± 0,14 <sup>b</sup>
As2	100	5,74 ± 0,05 <sup>c</sup>	4,94 ± 0,08 <sup>c</sup>	4,94 ± 0,08 <sup>c</sup>

Procentuální obsah síry v rostlině je dalším parametrem pro hodnocení kvality produkce, neboť síra je významným makroprvkem ve výživě rostlin a je obsažena mimo jiné v sirných aminokyselinách. Jak je patrné v Tabulce 4, v případě listů ředkvičky procentuální rozdíl obsahu S mezi variantami není příliš značný, i když rozdíly statisticky významné jsou. Bulva ředkvičky též vykazuje procentuální nárůst obsahu S v sušině, obě varianty s kontaminací půdy (As1 a As2) se statisticky liší od varianty As0. V listech salátu je statisticky

významný rozdíl mezi oběma variantami s kontaminací půdy a variantou bez kontaminace (As0), kontaminace půdy způsobila u variant As1 i As2 procentuální nárůst podílu S na dvojnásobek ve srovnání s variantou As0.

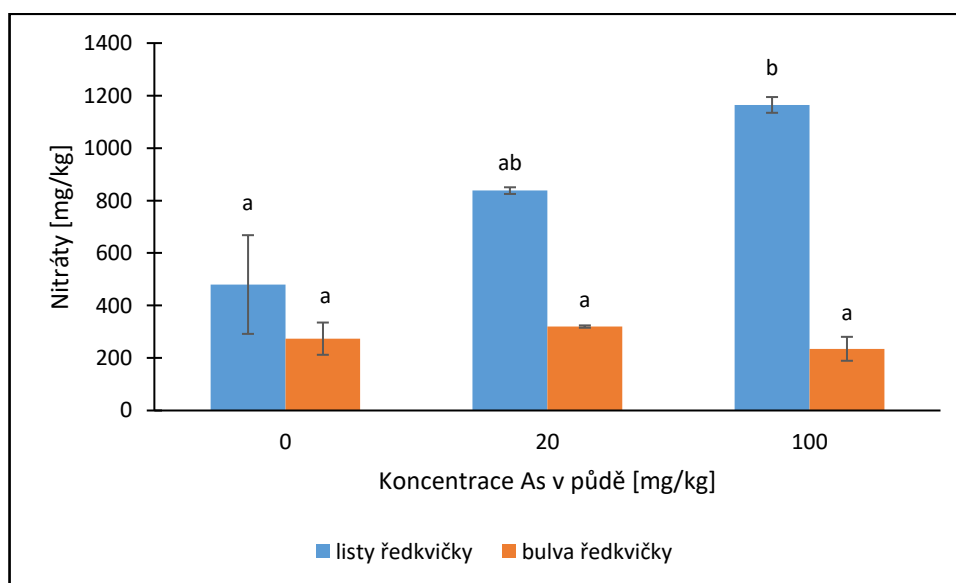
Tabulka 4. Množství síry v sušině ředkviček a salátů.

Označení varianty	Koncentrace As v půdě [mg/kg]	Množství síry v sušině (%)		
		Ředkvička List	Bulva	Salát List
As0	0	0,30 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,20 ± 0,02 <sup>a</sup>	0,08 ± 0,01 <sup>a</sup>
As1	20	0,30 ± 0,04 <sup>b</sup>	0,22 ± 0,03 <sup>b</sup>	0,16 ± 0,01 <sup>b</sup>
As2	100	0,33 ± 0,03 <sup>c</sup>	0,24 ± 0,03 <sup>b</sup>	0,17 ± 0,01 <sup>b</sup>

#### 5.4 Vliv koncentrace arsenu v půdě na obsah nitrátů v jedlých částech ředkvičky a salátu

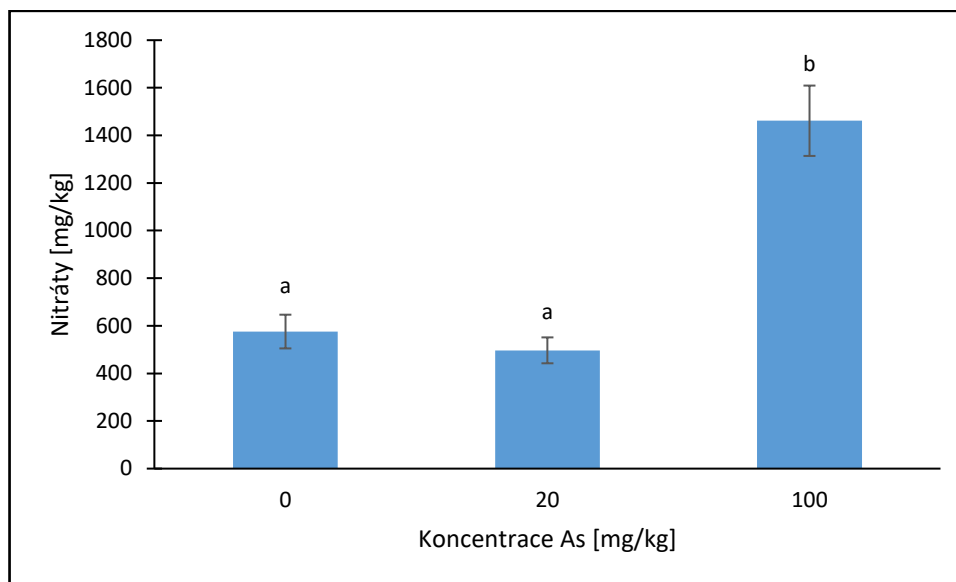
Maximální povolený obsah nitrátů v zelenině je stanoven legislativně, proto je tento parametr velmi významným ukazatelem kvality produkce a potravin. Obsah nitrátů byl stanoven v jedlých částech obou plodin (bulva a list ředkvičky, list salátu).

V listech ředkvičky je dle grafu 3 zřejmý vzrůstající trend obsahu nitrátů, statisticky průkazný je rozdíl mezi variantou bez kontaminace a variantou s vyšší kontaminací (As2). Ve srovnání s kontrolou došlo k procentuálnímu nárůstu množství nitrátů o 75 % v případě varianty As1, respektive 143 % (As2). Rozdíl obsahů nitrátů v bulvě mezi jednotlivými variantami nevykazuje statistickou významnost, kolísání hodnot je výrazně nižší než v případě listů, konkrétní nárůst množství nitrátů mezi kontrolou a variantou As1 je 17 %, zatímco ve variantě As2 obsah nitrátů poklesl o 14 % oproti kontrolnímu vzorku.



Graf 3. Obsah nitrátů v ředkvičce v závislosti na koncentraci arsenu v půdě.

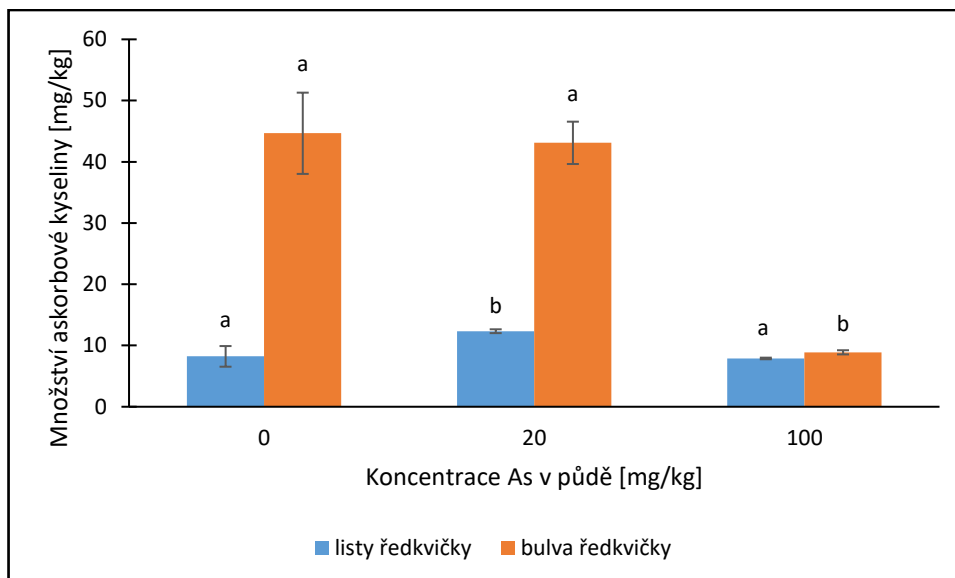
Obsah nitrátů v listech salátu se ve srovnání s kontrolou velmi výrazně navýšil při vyšší koncentraci As, konkrétně o 154 %, jak znázorňuje graf 4. V tomto případě se jedná o statisticky významnou změnu. Při nižší koncentraci As naopak množství nitrátů pokleslo oproti kontrolnímu vzorku o 14 % a o statisticky významnou změnu se nejedná.



Graf 4. Obsah nitrátů v listech salátu v závislosti na koncentraci arsenu v půdě.

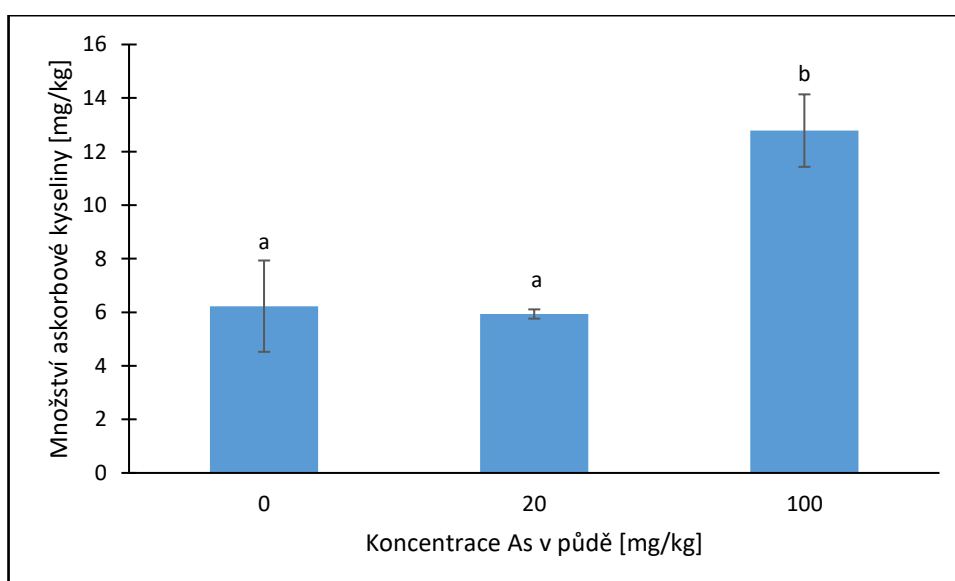
## 5.5 Vliv koncentrace arsenu v půdě na obsah kyseliny askorbové v jedlých částech rostlin

Posledním hodnoceným parametrem je množství kyseliny askorbové v jedlých částech obou plodin. Z grafu 5 je zřejmé, že množství askorbové kyseliny v bulvě ředkvičky značně pokleslo při vyšší koncentraci As (As2) v půdě ve srovnání s kontrolním vzorkem, konkrétně o 80 %. Změna je v tomto případě statisticky průkazná. Nižší koncentrace As (As1) způsobila pokles množství askorbové kyseliny o 3 %. V listech ředkvičky byl trend odlišný oproti bulvě, statisticky významný rozdíl je mezi kontrolní variantou a variantou As1. Oproti kontrolní variantě se při nižší kontaminaci arsenem obsah askorbové kyseliny zvýšil o 50 %, vyšší koncentrace As způsobila pokles množství askorbové kyseliny o 4 %.



Graf 5. Množství kyseliny askorbové v ředkvičce v závislosti na koncentraci arsenu v půdě.

Předpoklad, že zvýšená kontaminace arsenem způsobuje pokles množství askorbové kyseliny v zelenině, se nepotvrdil u listů salátu, jak je patrné z grafu 6. Nižší kontaminace způsobila mírný, statisticky nevýznamný pokles (konkrétně o 14 %), zatímco při vyšší kontaminaci arsenem se obsah askorbové kyseliny zvýšil o 105 %, oproti kontrole se jedná o statisticky významnou změnu.



Graf 6. Množství kyseliny askorbové v listech salátu v závislosti na koncentraci arsenu v půdě.

## 6 Diskuze

Vliv As na metabolismus rostliny a následné nutriční vlastnosti je velmi komplexní a rozsáhlá problematika. Nutriční vlastnosti a obsahy prvků v zelenině jsou ovlivněny mnoha proměnnými, které můžeme rozdělit na vnější a vnitřní faktory. Vnitřními faktory se rozumí samotné genetické vlastnosti rostliny, mezi vnější faktory řadíme fyzikální a chemické podmínky prostředí, atmosférické a půdní podmínky (Vaněk et al. 2012). Tato práce je věnována vlivu As na obsah vybraných prvků (As, N a S), nitrátů a askorbové kyseliny v rostlinách salátu a ředkviček. Rovněž byl vyhodnocen vliv kontaminace půdy As na výnos biomasy.

### 6.1 Vliv kontaminace půdy na výnos biomasy

Prvním předpokladem v návaznosti na hypotézy je negativní vliv zvyšujícího se obsahu As v půdě na výnos suché biomasy pěstovaných plodin. Gusman et al. (2013) provedl podobný experiment s hlávkovým salátem (*Lactuca sativa*) a uvádějí, že výnos biomasy závisí na míře kontaminace půdy. Nižší kontaminace As může mít na rostlinu dokonce stimulační účinky, i když není ještě zcela objasněna příčina. Gusman et al. (2013) však předpokládali, že stimulační efekt je vyvolán nedostatkem P v biochemických procesech. Arsen ( $As^V$ ) nahrazuje  $P^V$  v metabolických procesech, avšak není schopen plnit všechny jeho biologické funkce, na což rostlina reaguje zvýšeným příjmem P. Vyšší příjem P souvisí s vyšší fotosyntetickou aktivitou, vyšší tvorbou produktů fotosyntézy a tím pádem také s nárůstem biomasy. Adriano (2001) předpoklad o stimulačním efektu nižších koncentrací As v půdě rovněž potvrzuje.

Výsledky experimentu zejména v případě ředkvičky potvrzují stimulační účinky nižší dávky As. Nárůst množství biomasy je patrný u všech tří částí ředkvičky, k nejvyššímu nárůstu množství biomasy došlo ve srovnání s kontrolou u bulvy, konkrétně o 103 %. Nárůst biomasy listu byl 34 % a kořene 19 %. Vyšší koncentrace As naopak zapříčinila pokles výnosu biomasy (bulva o 52 %, list o 56 % a kořen o 41 %). Výnos biomasy listů salátu ve variantě As1 rovněž mírně narostl, ve srovnání s kontrolou došlo k nárůstu o 1,3 %. Vyšší kontaminace způsobila poměrně výrazný pokles výnosu o 38 %. V případě kořene byl pokles 48 % (As1) a 57 % (As2) ve srovnání s kontrolou, což by značilo mírný pokles biomasy ve variantě As2 oproti As1. Rozdíly ve hmotnosti suché biomasy jsou velmi malé, jak je patrné z grafu 2. Měření je však zatíženo mnoha chybami, záleží například na místě oddělení kořene od nadzemní biomasy, důslednosti při proplachování kořene a šetrnosti při vyjímání rostliny z nádoby, a proto by pro lepší průkaznost výsledků bylo vhodné provést měření ve více opakování.

Inhibiční účinky As na růst rostlin potvrdil ve výzkumu na fazolích a rajčatech také Carbonell-Barrachina et al. (1997). Uvádí také, že vůči kontaminaci As jsou méně rezistentní rostliny, které rizikové prvky více translokují z kořenů do nadzemní části, oproti rostlinám kumulujících As v kořenech.

## 6.2 Vliv kontaminace půdy na obsah As v pěstované produkci

Obsah As v pěstované produkci je důležitým ukazatelem zdravotní nezávadnosti zeleniny. Warren et al. (2003) uvádějí, že ve Velké Británii je požadavek na obsah As v prodávané zelenině pod 1 mg/kg. V ČR legislativa tento údaj nijak neupravuje. Zelenina obsahuje průměrně kolem 95 % vody, proto při přepočtu na sušinu je požadavek na obsah As maximálně 20 mg/kg.

Arsenu však obsahují jednotlivé části rostlin různé množství. Smith et al. (2008) zkoumali míru translokace As z kořene do ostatních částí rostlin u čtyř druhů rostlin, ředkvičky, salátu, mangoldu a mungo fazolí. V jednotlivých částech rostlin bylo detekováno množství As v tomto pořadí: kořen > bulva > stonek > list. Míra translokace je však výrazně závislá na druhu rostliny. Z tohoto důvodu jsou podzemní části rostlin z hlediska vstupu rizikových prvků do potravního řetězce problematičtější (Adriano 2001).

Z výsledků je patrné, že se stoupající koncentrací As v půdě stoupá také koncentrace As v pěstovaných plodinách. Dle předpokladu bylo naměřeno nejvyšší množství As v kořenech salátu i ředkviček. V bulvě ředkviček bylo však detekováno 5,5x (As1), respektive 11x méně As než v kořenech. Dle Warren et al. (2003) by tak bulva ředkvičky ve variantě As1 s obsahem As 4,4 mg/kg As v sušině byla způsobilá ke konzumaci, zatímco kořen obsahoval As 24,4 mg/kg. Bulva varianty As2 obsahovala As nadlimitní množství, konkrétně 30,8 mg/kg As v sušině, kořen obsahoval As 346,9 mg/kg. Do listů bylo As translokováno minimální množství As, varianta As1 se pohybovala pod mezí detekce, varianta As2 obsahovala As v sušině 6,4 mg/kg. Smith et al. (2008) pro srovnání naměřili v bulvě a kořeni ředkvičky 35,5 mg/kg As a v listech 6,9 mg/kg. Tento rozdíl může být zapříčiněn například rozdílným designem experimentu, neboť Smith et al. (2008) provedli pokus na hydroponicky pěstované zelenině s koncentrací As 2 mg/l roztoku.

U salátu je taktéž patrná výrazná akumulace As v kořenech. Listy varianty As1 obsahovaly 6,4x méně As než kořeny, listy varianty As2 obsahovaly As 17,4x méně. Translokace As do listů tedy není přímo úměrná množství As v kořenech.

## 6.3 Vliv kontaminace půdy na obsah vybraných živin, nitrátového N a vitamínu C v pěstované zelenině

Třetím předpokladem byl vliv zvyšující se kontaminace půdy na obsah vybraných prvků (S, N), zvýšení množství nitrátového N a snížení obsahu vitamínu C v biomase.

Stres v rostlinách vyvolaný působením rizikových prvků je komplexní a rozsáhlá problematika. Rostliny disponují různými mechanismy pro zmírnění oxidačního stresu, který způsobují volné kyslíkové radikály vzniklé v důsledku působení rizikových prvků. Základním mechanismem je produkce antioxidantů, které mají schopnost volné radikály eliminovat. Mezi tyto látky řadíme glutathion, superoxid dismutázu, peroxidázu a další sloučeniny. Významnou antioxidační aktivitu vykazuje také askorbová kyselina (Hasanuzzaman et al. 2018). Alamri et al. (2021) rovněž potvrzují funkci kyseliny askorbové jako antioxidantu v rostlině. Zároveň však



Vaněk et al. (2012) uvádějí, že kyselina askorbová brání redukci nitrátů na škodlivé nitrity, tudíž při vysokém obsahu nitrátů v salátu je obsah askorbové kyseliny nízký. Výsledky ukazují na skutečnost, že reakce pěstovaných plodin na zvýšenou koncentraci As je odlišná. V případě salátu došlo ke zvýšení množství kyseliny askorbové ve variantě As2 (12,8 mg/kg) ve srovnání s kontrolou (6,2 mg/kg). Varianta As1 obsahovala askorbové kyseliny 5,9 mg/kg. Výzkum týkající se reakce rostlin salátu na stresové reakce prováděli také Oh et al. (2009) a došel k závěru, že vyšší míra stresu způsobuje zvýšení obsahu antioxidantů v rostlinách. K obdobným výsledkům dospěli také Anuradha & Rao (2008) v případě ředkviček pěstovaných na půdách kontaminovaných Cd. V pokusu k této práci však byly výsledky mírně odlišného charakteru, neboť ve variantě As2 došlo k markantnímu poklesu obsahu askorbové kyseliny v bulvě ředkvičky ve srovnání s kontrolou (pokles ze 44,7 mg/kg na 8,9 mg/kg). Výkyvy obsahu askorbové kyseliny byly menší v případě listu, nejvyšší obsah byl však zaznamenán ve variantě As1 (12,3 mg/kg, kontrola 8,2 mg/kg). Pro detailnější přehled o antioxidantech v rostlinách by však bylo nutné provést v této oblasti podrobnější analýzy.

Obsah nitrátů v zelenině taktéž souvisí s mírou stresu působícího na rostlinu. Plodiny pěstované na kontaminovaných půdách As mají kvůli působení As na fotosyntetické a metabolické procesy zhoršené podmínky růstu (Naidu et al. 2006), v důsledku čehož předpokládáme kumulaci nitrátů. Z výsledků je patrné, že obsah nitrátů v nadzemních částech rostlin stoupá se vzrůstající kontaminací půdy. Nejvyšší množství nitrátů bylo zaznamenáno v listech salátu, konkrétně 1461 mg/kg. Dle legislativy (EUR-Lex 2022) je však i tento obsah nitrátů v salátu pěstovaném ve skleníku v normě.

V ředkvičce byly nitráty také kumulovány nejvíce v listech, varianta As2 obsahovala 1164 mg/kg nitrátů (kontrola 480 mg/kg nitrátů). Ve srovnání s kontrolou je patrný nárůst množství nitrátů i ve variantě As1 (838 mg/kg). V bulvě obsah nitrátů při nižší koncentraci As stoupal (320 mg/kg, kontrola 274 mg/kg), při vyšší naopak klesl na 100 mg/kg. Vyšší kumulaci nitrátů v zelených částech rostlin oproti částem podzemním potvrzují také Vaněk et al. (2012).

Síra i dusík jsou obsaženy v látkách s antioxidační aktivitou, proto analýza množství těchto prvků v pěstované produkci může indikovat zvýšenou míru oxidačního stresu. Plodiny produkují aminokyseliny, enzymy a další látky s antioxidační aktivitou, které oba zmíněné prvky obsahují (Silveira et al. 2015). Obsah síry a dusíku se v rostlinách salátu i ředkvičky zvyšoval s narůstající kontaminací As. Vysoký obsah dusíku ve variantě As2 v listu salátu (4,94 %) a listu ředkvičky (5,74 %) oproti kontrole (1,84 %, respektive 2,06 %) pravděpodobně souvisí také s kumulací nitrátů. Nárůst procentuálního podílu N v bulvě ředkvičky (kontrola 1,89 %, As1 2,29 % a As2 4,94 %) a nárůst podílu S ve všech konzumních částech plodin lze vysvětlit zvýšenou tvorbou antioxidantů. Nejvíce síry bylo obsaženo v listu ředkvičky ve variantě As2 0,33 % (kontrola 0,3 %). Kontrolní vzorek bulvy ředkvičky obsahoval 0,2 % S, ve variantě As2 byl zaznamenán nárůst o 0,04 %. V listech salátu byl naměřen největší nárůst procentuálního podílu S, kontrola obsahovala 0,08 % a varianta As2 o 0,09 % více. Silveira et al. (2015) potvrdili ve svém výzkumu zvýšenou tvorbu látek s antioxidační funkcí a obsahem N a S (glutathion reductáza, glutathion peroxidáza, dismutáza, kataláza, askorbát peroxidáza, superoxid dismutáza) u rostlin salátu pěstovaných v prostředí kontaminovaném As. Pro srovnání Paul et

al. (2014) stanovili maximální antioxidační aktivitu v listech ředkvičky při koncentraci As v půdě 50 mg/kg, rostlina byla As vystavena po dobu 60 dní.

## 7 Závěr

- Cíl práce byl splněn a byly vyhodnoceny výsledky nádobového pokusu.
- První hypotéza týkající se poklesu množství biomasy se zvyšující se koncentrací As v půdě potvrzena zcela nebyla. Nižší dávka As prokázala spíše stimulační účinky na růst biomasy, zatímco výsledky vyšší koncentrace As v půdě již hypotézu o výrazném poklesu množství biomasy potvrdily.
- Druhá hypotéza týkající se vyšší akumulace As ve všech částech rostlin se vzrůstající koncentrací As v půdě potvrzena byla. Výsledky ukázaly, že se zvyšující se koncentrací narůstá množství As v biomase, přičemž As byl nejvíce kumulován v kořenech, v případě ředkvičky méně v bulvě a u obou plodin byl As kumulován nejméně v listech.
- Třetí hypotéza byla potvrzena částečně. Arsen v půdě způsobil změnu obsahu vybraných živin (S a N), se vzrůstající koncentrací As v půdě byl patrný nárůst množství obou těchto prvků. Teorie o poklesu množství askorbové kyseliny se nepotvrdila v listech salátu, kde ve variantě As2 došlo k výraznému nárůstu oproti kontrole (kontrola 6,2 mg/kg, nárůst na 12,7 mg/kg). Předpoklad týkající se nárůstu množství nitrátů zejména v nadzemních částech rostlin byl potvrzen v listech ředkvičky v obou variantách, v listech salátu došlo ve srovnání s kontrolou k mírnému poklesu ve variantě As1 a významnému nárůstu ve variantě As2 na hodnotu 1461 mg/kg. V bulvě ředkvičky bylo kolísání obsahu nitrátů menší (nárůst o 17 % ve variantě As1 a pokles o 14 % ve srovnání s kontrolou).

## 8 Literatura

- Adriano DC. 2001. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. Springer, New York.
- Alamri S, Kushwaha BK, Singh VP, Siddiqui MH, Al-Amri AA, Alsubaie QD, Ali HM. 2021. Ascorbate and glutathione independently alleviate arsenate toxicity in brinjal but both require endogenous nitric oxide. *Physiologia Plantarum* **11**:1-11.
- Anuradha S, Rao SSR. 2008. The effect of brassinosteroids on radish (*Raphanus sativus* L.) seedlings growing under cadmium stress. *Plant, Soil and Environment* **53**:465-472.
- Basu A, Saha D, Saha R, Ghosh T, Saha B. 2014. A review on sources, toxicity and remediation technologies for removing arsenic from drinking water. *Research on Chemical Intermediates* **40**:447-485.
- Carbonell-Barrachina AA, Burló F, Burgos-Hernández A, López E, Mataix J. 1997. The influence of arsenite concentration on arsenic accumulation in tomato and bean plants. *Scientia Horticulturae* **71**:167-176.
- Dai W, Yang X, Chen H, Xu W, He Z, Ma M. 2013. Phytotoxicities of Inorganic Arsenic and Dimethylarsinic Acid to *Arabidopsis thaliana* and *Pteris vittata*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **91**:652-655.
- de la Guardia M, Garrigues S. 2015. Handbook of Mineral Elements in Food. WILEY Blackwell, Chichester.
- Eisler R. 2007. Eisler's encyclopedia of environmentally hazardous priority chemicals. Elsevier, Amsterdam.
- Gunnarsdottir I, Dahl L. 2017. Iodine intake in human nutrition: a systematic literature review. *FOOD & NUTRITION RESEARCH* (e19731). DOI: 10.3402/fnr.v56i0.19731.
- Gusman GS, Oliveira JA, Farnese FS, Cambraia J. 2013. Arsenate and arsenite: the toxic effects on photosynthesis and growth of lettuce plants. *Acta Physiologiae Plantarum* **35**:1201-1209.
- Hambidge M. 2000. Human Zinc Deficiency. *The Journal of Nutrition* **130**:1344-1349.
- Hasanuzzaman M, Nahar K, Fujita M. 2018. Mechanisms of Arsenic Toxicity and Tolerance in Plants. Springer, Singapore.
- Hmelak Gorenjak A, Cencič A. 2013. Nitrate in vegetables and their impact on human health. *Acta Alimentaria* **42**:158-172.
- Hounsome N, Hounsome B, Tomos D, Edwards-Jones G. 2008. Plant Metabolites and Nutritional Quality of Vegetables. *Journal of Food Science* **73**:48-65.

- Chakraborty S, Alam MO, Bhattacharya T, Singh YN. 2014. Arsenic Accumulation in Food Crops: A Potential Threat in Bengal Delta Plain. *Water Quality, Exposure and Health* **6**:233-246.
- Chow ChK. 2004. Biological Functions and Metabolic Fate of Vitamin E Revisited. *Journal of Biomedical Science* **11**:295-302.
- Komarnisky LA, Christopherson RJ, Basu TK. 2003. Sulfur: its clinical and toxicologic aspects. *Nutrition* **19**:54-61.
- KOPEC K. 2010. *Zelenina ve výživě člověka*. Grada, Praha.
- Kraft MD. 2015. Phosphorus and Calcium. *Nutrition in Clinical Practice* **30**:21-33.
- Lockitch G. 1993. Perspectives on lead toxicity. *Clinical Biochemistry* **26**:371-381.
- Marounek M, Havlík J. 2020. *Živiny a živinové potřeby člověka: učebnice pro studenty ČZU v Praze*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Mesías M, Seiquer I, Navarro MP. 2011. Calcium Nutrition in Adolescence. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **51**:195-209.
- Mourek J. 2012. *Fyziologie: učebnice pro studenty zdravotnických oborů*. Grada, Praha.
- Naidu R, Smith E, Owens G, Bhattacharya P, Nadebaum P. 2006. Managing Arsenic in the environment: From soil to human health. CSIRO, Collingwood.
- Oh M-M, Carey EE, Rajashekar CB. 2009. Environmental stresses induce health-promoting phytochemicals in lettuce. *Plant Physiology and Biochemistry* **47**:578-583.
- Ozturk M, et al. 2022. Arsenic and Human Health: Genotoxicity, Epigenomic Effects, and Cancer Signaling. *Biological Trace Element Research* **200**:988-1001.
- Pomykačová I, Kožíšek F, Weyessa Gari D, Němcová V, Nešpůrková L. 1990. Nádrže jako zdroj pitné vody. Dům techniky ČSVTS, České Budějovice.
- Santamaria P. 2006. Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **86**:10-17.
- Satoh M, Koyama H, Kaji T, Kito H, Tohyama Ch. 2002. Perspectives on Cadmium Toxicity Research. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine* **196**:23-32.
- SATTAR A, et al. 2016. Metabolism and toxicity of arsenicals in mammals. *Environmental Toxicology and Pharmacology* **48**:214-224.
- Sharma S. 2018. *Klinická výživa a dietologie: v kostce*. Grada Publishing, Praha.

- Silveira NM, De Oliveira JA, Ribeiro C, Canatto RA, Siman L, Cambraia J, Farnese F. 2015. Nitric Oxide Attenuates Oxidative Stress Induced by Arsenic in Lettuce (*Lactuca sativa*) Leaves. *Water, Air, & Soil Pollution* **226**:1-9.
- Smith E, Juhasz AL, Weber J. 2009. Arsenic uptake and speciation in vegetables grown under greenhouse conditions. *Environmental Geochemistry and Health* **31**:125-132.
- Paul S, Upadhyay SK, Lal EP. 2014. Accumulation of arsenic in radish (*Raphanus sativus l.*), and their effects on growth and antioxidant activities. *International journal of pharmaceutical sciences and research* **5**:3536-3543.
- Trebichavský J, Blohberger M, Havrdová D. 1998. *Toxické kovy*. NSO, Kutná Hora.
- Vaněk V, Balík J, Černý J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P, Valtera J. 2012. *Výživa zahradních rostlin*. Academia, Praha.
- Vidrih R, Filip S, Hribar J. 2009. Content of Higher Fatty Acids in Green Vegetables. *Czech Journal of Food Sciences* **27**:125-129.
- Vormann J. 2016. Magnesium: Nutrition and Homoeostasis. *AIMS Public Health* **3**:329-340.
- Wagner MG, Rhee Y, Honrath K, Blodgett Salafia EH, Terbizan D. 2016. Nutrition education effective in increasing fruit and vegetable consumption among overweight and obese adults. *Appetite* **100**:94-101.
- Warren GP, Alloway BJ, Lepp NW, Singh B, Bochereau FJM, Penny C. 2003. Field trials to assess the uptake of arsenic by vegetables from contaminated soils and soil remediation with iron oxides. *Science of The Total Environment* **311**:19-33.

## 9 Internetové zdroje

- Český hydrometeorologický ústav. 2021. Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2020. Available from: [https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/20groc/gr20cz/Obsah\\_CZ.html](https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/20groc/gr20cz/Obsah_CZ.html) (accessed April 2022).
- EUR-Lex. 2006. Nařízení Komise (ES) č. 563/2002 ze dne 2. dubna 2002, kterým se mění nařízení (ES) č. 466/2001, kterým se stanoví maximální limity některých kontaminujících látek v potravinách. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX%3A32002R0563> (accessed March 2022).
- Informační centrum bezpečnosti potravin. 2011. EFSA. Available from: <https://www.bezpecnostpotravin.cz/kategorie/efsa.aspx> (accessed March 2022).

- Informační centrum bezpečnosti potravin. 2011. Systém rychlého varování pro potraviny a krmiva (RASFF). Available from: [https://www.bezpecnostpotravin.cz/stranka/system-rychleho-varovani-pro-potraviny-a-krmiva-\(rasff\).aspx](https://www.bezpecnostpotravin.cz/stranka/system-rychleho-varovani-pro-potraviny-a-krmiva-(rasff).aspx) (accessed March 2022).
- Informační centrum bezpečnosti potravin. 2013. Olovo. Available from: <https://www.bezpecnostpotravin.cz/az/termin/76680.aspx> (accessed March 2022).
- Informační centrum bezpečnosti potravin. 2016. Chróm. Available from: <https://www.bezpecnostpotravin.cz/az/termin/92245.aspx> (accessed March 2022).
- Informační centrum bezpečnosti potravin. 2016. Kadmium. Available from: <https://www.bezpecnostpotravin.cz/az/termin/76662.aspx> (accessed March 2022).
- Informační centrum bezpečnosti potravin. 2017. Tolerovatelný denní příjem sodíku. Available from: <https://www.bezpecnostpotravin.cz/tolerovatelnny-denni-prijem-sodiku.aspx> (accessed March 2022).
- Informační centrum bezpečnosti potravin. 2018. Selen – zdroje, účinky a zásobování. Available from: <https://www.bezpecnostpotravin.cz/selen-zdroje-ucinky-a-zasobovani.aspx> (accessed March 2022).
- Kalorické tabulky. 2013. Kalorické tabulky potravin. Available from: <http://www.kaloricke-tabulky.cz/kaloricke-tabulky-potravin> (accessed February 2022).
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. 2019. FoodData Central Search Results. Available from: <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/> (accessed February 2022).
- World Health Organisation. 2014. Increasing fruit and vegetable consumption to reduce the risk of noncommunicable diseases. Available from: [https://www.who.int/elena/titles/fruit\\_vegetables\\_ncds/en/](https://www.who.int/elena/titles/fruit_vegetables_ncds/en/) (accessed February 2022).
- Zákony pro lidi. 2013. Vyhláška č. 252/2004 Sb. Available from: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2004-252> (accessed April 2022).