

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Foliární aplikace selenu jako cesta ke zvýšení obsahu  
tohoto prvku v zemědělských plodinách**

**Bakalářská práce**

**Michal Panýrek**

**Obor studia: Ochrana krajiny a využívání přírodních zdrojů**

**Vedoucí práce: prof. Ing. Jiřina Száková, CSc.**

© 2023

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "**Foliární aplikace selenu jako cesta ke zvýšení obsahu tohoto prvku v zemědělských plodinách**" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 20. 4. 2023

---

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval paní prof. Ing. Jiřině Szákové, CSc., panu Ing. Tomáši Mrštinovi za báječnou spolupráci při dokončení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a známým, kteří mě podporovali po dobu mého studia.

# Foliární aplikace selenu jako cesta ke zvýšení obsahu tohoto prvku v zemědělských plodinách

## Souhrn

Tato bakalářská práce je věnována prvku selen (Se), jeho vlastnostem, výskytu, působení na rostliny, životní prostředí, lidský organismus a hospodářská zvířata. Všechny tyto aspekty tvoří základ pro popsání významu selenu pro rostlinnou výrobu, protože rostlinná produkce je prostředníkem vstupu tohoto prvku z půdy do potravních řetězců.

Selen je důležitým prvkem pro rostliny, a to zejména kvůli jeho účinkům na zlepšení růstu, tolerance vůči stresu a kvality semen, ale jeho esencialita nebyla zatím potvrzena. Nicméně, podobně jako u většiny chemických prvků, účinky selenu na rostliny jsou závislé na dávce. Příliš vysoké dávky selenu mohou způsobit oxidační stres a negativní účinky na růst rostlin. Rostliny přijímají selen prostřednictvím kořenového systému a organické sloučeniny selenu, jako je selenocystein a selenometionin, jsou pro ně lepší než anorganické sloučeniny. Je důležité si uvědomit, že příliš vysoké dávky selenu mohou způsobit toxické účinky nejen u rostlin, ale také u lidí a zvířat, kteří jej konzumují, a proto je třeba pečlivě sledovat obsah selenu v půdě a potravinových řetězcích. Naopak nedostatek selenu v půdě může mít za následek nízký obsah tohoto prvku v rostlinné produkci a ve výsledku i v organismu hospodářských zvířat i člověka. Obohacení rostlinné produkce selenem prostřednictvím foliární aplikace může napomoci vyřešit tento problém.

Praktická část této práce prezentuje výsledky foliární aplikace různých forem Se na rostliny kukuřice. Ukázalo se, že aplikace roztoku selenanu významně zvýšila obsahy Se v nadzemní biomase kukuřice ve srovnání s kontrolou. Naproti tomu aplikace nanočástic selenu byla méně účinná.

**Klíčová slova:** selen, foliární aplikace, kukuřice, akumulace



# **Foliar application of selenium as a tool for enhancement of the Se levels in the agricultural crops**

## **Summary**

This bachelor thesis is devoted to the element selenium (Se), its properties, occurrence, effects on plants, the environment, the human organism and farm animals. All these aspects form the basis for describing the importance of selenium for plant production, since plant production mediates the entry of this element from the soil into food chains.

Selenium is an important element for plants, mainly due to its effects on improving growth, stress tolerance and seed quality, but its essentiality has not yet been confirmed. However, as with most chemical elements, the effects of selenium on plants are dose-dependent. Too high doses of selenium can cause oxidative stress and negative effects on plant growth. Plants take up selenium through the root system, and organic selenium compounds such as selenocysteine and selenomethionine are better for them than inorganic compounds. It is important to note that too high doses of selenium can cause toxic effects not only in plants, but also in humans and animals that consume it, so it is necessary to carefully monitor selenium content in the soil and food chains. Conversely, a lack of selenium in the soil can result in a low content of this element in plant production and, as a result, in the organism of farm animals and humans. Enrichment of plant production with selenium through foliar application can help solve this problem.

The practical part of this work presents the results of foliar application of different forms of Se on corn plants. It was shown that the application of selenate solution significantly increased Se contents in the above-ground biomass of maize compared to the control. In contrast, the application of selenium nanoparticles was less effective.

**Keywords:** selen, foliar application, corn, accumulation

# Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Cíl práce .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Přehled literatury .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Selen.....</b>	<b>10</b>
3.1.1 Charakteristika selenu.....	10
3.1.2 Výskyt v přírodě .....	12
3.1.3 Výroba .....	13
<b>3.2 Vliv na člověka .....</b>	<b>13</b>
3.2.1 Nedostatek selenu .....	14
3.2.1.1 Češi mají příliš málo selenu .....	15
3.2.1.2 Enzymy závislé na selenu.....	15
3.2.1.3 V České republice je málo selenu .....	16
3.2.2 Nadbytek selenu.....	16
<b>3.3 Vliv na hospodářská zvířata.....</b>	<b>17</b>
3.3.1 Význam selenu pro přežvýkavce .....	17
3.3.2 Význam selenu u prasat .....	18
3.3.3 Význam selenu pro koně .....	19
<b>3.4 Selen v půdě .....</b>	<b>20</b>
3.4.1 Mobilita a biopřístupnost selenu v půdě.....	20
3.4.2 Faktory ovlivňující biopřístupnost selenu .....	21
<b>3.5 Selen v rostlinách .....</b>	<b>22</b>
3.5.1 Příjem a bioakumulace selenu rostlinami .....	22
3.5.2 Metabolismus selenu v rostlinách.....	24
<b>3.6 Foliární aplikace.....</b>	<b>24</b>
<b>3.7 Biofortifikace a molekulární farmářství .....</b>	<b>25</b>
3.7.1 Důvody vzniku biofortifikace a molekulárního farmářství .....	25
3.7.2 Cíle biofortifikace a molekulárního farmářství .....	26
<b>3.8 Kukuřice setá.....</b>	<b>26</b>
3.8.1 Botanická charakteristika.....	27
<b>3.9 Nanočástice .....</b>	<b>27</b>
3.9.1 Využití nanočástic .....	27
3.9.2 Nanočástice v přírodě .....	29
3.9.3 Příjem nanočástic rostlinou.....	29
<b>4. Materiál a metody .....</b>	<b>31</b>
<b>5. Výsledky.....</b>	<b>33</b>

<b>6. Diskuse .....</b>	<b>36</b>
<b>7. Závěr.....</b>	<b>38</b>
<b>8. Literatura.....</b>	<b>39</b>

## 1. Úvod

Výzkumy naznačují, že selen hraje klíčovou roli v mnoha biochemických procesech v lidském těle, a proto je důležitý pro zdraví člověka. Selen působí jako antioxidant, chrání buňky před poškozením a podporuje správnou funkci imunitního systému. Nedostatek selenu v potravě může vést k různým zdravotním problémům, jako jsou svalové a kloubní bolesti, snížená funkce štítné žlázy a zvýšené riziko vzniku kardiovaskulárních onemocnění a některých typů rakoviny. Selen se nachází v potravinách různých zdrojů, včetně masa, ryb, mořských plodů, ořechů, semen a celozrnných výrobků. Množství selenu v potravinách se však může lišit v závislosti na geografické oblasti, půdních podmínkách a způsobu pěstování.

Lidé žijící v oblastech s nízkým obsahem selenu v půdě mohou být ohroženi nedostatkem tohoto důležitého minerálu. Vegetariáni a vegani by měli být opatrní, aby získali dostatečné množství selenu z potravy, protože některé rostlinné potraviny mohou mít nižší obsah selenu. Existují však potravinové doplňky obsahující selen, které mohou pomoci zajistit dostatečný příjem tohoto minerálu. Výzkumy také ukazují, že sportovci a fyzicky aktivní jedinci mohou potřebovat více selenu než průměrná populace, aby mohli udržet správnou funkci svalů a zlepšit svou výkonnost.

Celkově lze tedy říct, že správný příjem selenu je klíčový pro zajištění dobrého zdravotního stavu a prevenci civilizačních chorob. Při nízkém příjmu selenu z potravy nebo riziku nedostatku selenu v oblasti, kde žijete, může být vhodné užívat potravinové doplňky obsahující selen po konzultaci s lékařem nebo dietologem. Další možností, jak zvýšit příjem selenu v deficitních oblastech, je zvýšení obsahu Se v rostlinné produkci aplikací tohoto prvku v hnojivech, buď do půdy nebo foliárně.

## **2. Cíl práce**

Práce je především věnována prvku selen v půdním systému, ve fungování v rostlinném a lidském organismu (řetězec: půda-rostlina-člověk). Dále přihlédnutí k jeho esencialitě, toxicitě a možnostem řešení k jeho možnému navýšení v potravním řetězci v rámci uplatnění odpovídající výživě a hnojení tímto prvkem. V oblastech s nízkým obsahem Se v půdě (jako je i ČR) jsou pak testovány metody, jak zvýšit obsah Se v zemědělských plodinách, a tedy zvýšit příjem tohoto prvku člověkem i hospodářskými zvířaty. Dalším cílem této práce tedy je ověřit účinnost foliární aplikace různých forem Se v případě kukuřice.

Hypotéza: Účinnost foliární aplikace Se závisí na jeho dávce a aplikované formě.

## 3. Přehled literatury

### 3.1 Selen

Selen je stopový prvek, který je důležitý pro správné fungování lidského organismu a organismu rostlin. V půdě se vyskytuje jak organický, tak anorganický selen, buď v roztoku nebo jako vázaný na minerální složky. Rostliny přijímají selen přes kořeny v podobě selenanů a seleničtanů. Selen je součástí enzymů, které se podílejí na metabolismu a zabraňují oxidačnímu stresu (Djanaguiraman et al. 2010). Pro člověka je selen esenciálním prvkem, což znamená, že ho člověk musí získat z potravy, protože ho lidské tělo samo neumí produkovat. Selen je důležitý pro správné fungování imunitního systému, štítné žlázy a podílí se na obraně organismu proti vzniku nádorového onemocnění. Nedostatek selenu může vést k oslabení imunitního systému, tedy ke zvýšení rizika výskytu rakoviny. Ovšem však příliš nadměrné množství selenu může být pro lidský organismus toxické. Toxický efekt selenu se projevuje hlavně v podobě gastrointestinálních poruch, křehkosti nehtů, vypadávání vlasů, poruchy štítné žlázy a může skončit až selháním srdce (Abrams et al. 1990; White & Broadley 2009). Pro zajištění optimálního příjmu selenu na jedince, se doporučuje obohacovat stravu potravinami, které bohaté na selen, například drůbeží maso, ryby, mořské plody, luštěniny, ořechy a celozrnné výrobky. Doporučují se používat hnojiva, která jsou obohacena selenem, což má za následek zvýšení obsahu selenu v rostlinách, a taktéž i v potravním řetězci. Je však nutné dbát obezřetnosti, aby se nedostatek selenu nepřenesl na jeho nadměrně škodlivý příjem, což by mohlo vést k toxickým účinkům prvku a poté k jeho následkům (Kikkert & Berkelaar 2013).

#### 3.1.1 Charakteristika selenu

Selen (Se) je pro rostliny prospěšným prvkem, ale jeho nadměrná koncentrace může být toxická. Jeho vliv na rostliny byl studován na modelové rostlině *Arabidopsis thaliana*. Výsledky ukazují, že Se a síra (S) jsou si chemicky podobné, ale mají rozdílnou selektivitu pro transport v rostlinách. Zvýšení koncentrace S v půdě zvyšuje hmotnost výhonů a koncentraci S v rostlinách, ale snižuje koncentraci Se (Heczková 2009; Velíšek 1999). Naopak zvyšování koncentrace Se v půdě zvyšuje koncentraci Se a S v rostlinách, ale snižuje hmotnost výhonů. To znamená, že nadměrná koncentrace Se může být pro rostliny toxická. Byl také studován vzájemný vliv Se a S, který odhalil, že rhizosférický síran může inhibovat příjem seleničtanů, zatímco rhizosférický seleničtan může podporovat příjem síranů. To naznačuje, že transportní

cesty pro Se a S jsou selektivní a mohou být ovlivněny přítomností různých forem těchto prvků v půdě (Shriver & Atkins 1999). Kromě toho může toxicita Se souviset s jeho konkurencí s S při biochemických procesech v rostlinách, jako je asimilace na aminokyseliny a tvorba esenciálních bílkovin. Proto je stanovení optimálních dávek Se při hnojení zásadní pro minimalizaci jeho toxických účinků na rostliny. Ve vztahu k lidskému organismu je selen důležitou mikroživinou pro lidské zdraví, působí jako antioxidant a podporuje imunitní systém (Reilly 2006). Nedostatek selenu může vést k různým zdravotním problémům, jako jsou bolesti svalů a kloubů, zvýšená náchylnost k infekcím a kardiovaskulární onemocnění. Nadměrný příjem selenu však může být také toxický a způsobovat zdravotní problémy (Djanaguiraman et al. 2010). Proto je důležité udržovat vyvážený příjem selenu v potravě.

Selen (Se) je chemický prvek s atomovým číslem 34 a v periodické tabulce prvků patří do skupiny chalcogenů. Je to nekovový prvek a v přírodě se vyskytuje hlavně ve formě selenidů, jako je pyrit ( $\text{FeSe}_2$ ), který je často součástí měděných rud. Selen má značný technologický význam, zejména při výrobě fotovoltaických článků, ale používá se i v jiných aplikacích, například při výrobě chemikálií a léčiv (Passwater 1999). Obrázek 1 prezentuje vzorek čistého selenu.



Obr. č. 1: Vzorek čistého selenu (<https://www.chemickeprvky.cz/prvek/se/>)

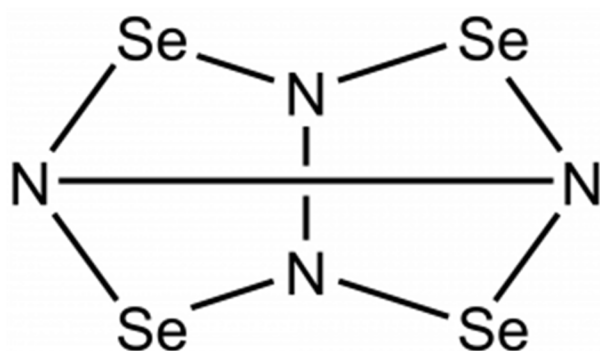
Protože selen není v přírodě příliš hojný, musí se vyrábět z odpadních materiálů a zdrojů, jako jsou anodové kaly z rafinace mědi a niklu, kouřový prach z tavení měděných rud, dým z Pb-kalu, anodové kaly z rafinace olova, aglomerační prach z výroby Pb, zbytky z loužení zinku

a kal z čištění spalin při výrobě  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Kost et al. 2008). Sekundární zdroje selenu zahrnují šrot ze selenových usměrňovačů, fotovoltaické články a odpad z xerografie.

Selen se vyskytuje v zemské kůře v koncentraci 0,05-0,09 mg/kg a v mořské vodě v koncentraci 0,5-2  $\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ . Vzhledem k jeho zásadnímu významu pro zdraví lidí a rostlin a jeho potenciální toxicitě je třeba věnovat pečlivou pozornost udržování vyváženého příjmu selenu v životním prostředí i v lidské stravě (Bankhofer 1996).

### 3.1.2 Výskyt v přírodě

V přírodě se selen obvykle vyskytuje jako náhrada síry v sulfidech těžkých kovů a je poměrně vzácný minerál. Existuje více než 120 druhů minerálů obsahujících selen, ale z průmyslového hlediska jsou nevýznamné. Nejvíce selenu se nachází v minerálech ferroselitu, kuleruditu a trogtalitu, které obsahují až 72 % selenu (Leduc et al. 2004). Průměrné množství selenu v zemské kůře je 0,05 mg/kg. Přírodní selen se skládá z 6 stabilních izotopů, z nichž nejhojnější je izotop  $^{80}\text{Se}$ . Kromě toho existuje 18 nestabilních izotopů selenu. Největší zásoby minerálů selenu se nacházejí v Rusku, Chile, Peru, USA a Kanadě. V roce 2015 bylo nejvíce selenu produkováno v Japonsku (790 t), následovaly Německo (700 t), Belgie (200 t), Kanada (160 t) a Rusko (150 t). Odhaduje se, že v ČR jsou zásoby selenu kolem 13 tun a v roce 2011 bylo dovezeno 5500 kg selenu za průměrnou dovozní cenu 2470 Kč/kg.



Obr. č. 2: Strukturální vzorec  $\text{Se}_4\text{N}_4$ .  
(<http://z-moravec.net/chemie/periodicka-soustava-prvku/selen/>)



### 3.1.3 Výroba

Pro výrobu více než 90 % selenu, který se používá průmyslově, se využívají anodové kaly z elektrolytické rafinace mědi. Zbylá část selenu se získává z odpadů po pražení sulfidických rud těžkých kovů. Dnes se nejčastěji používá pražný způsob výroby selenu z anodových kalů a úletů, nebo hydrometalurgický proces rozpouštěním oxidů selenu v kyselině sírové (Cartes et al. 2006). Po oddělení od ostatních kovů a sloučenin pomocí chemických procesů jako elektrolytické rafinace, extrakce rozpouštěním, krystalizace nebo sublimace se selen používá jako příměs do slitin a ocelí, zejména v elektronickém průmyslu. Sloučenina tetranitrid tetraselenu (Obrázek 2) může být využita jako výbušnina. Selen je také důležitým materiálem pro výrobu polovodičů a solárních článků (Mackowiak & Amacher 2008). V lékařství se selen používá jako radiofarmakum pro diagnostiku a léčbu nádorových onemocnění a jako přídavek do potravin a krmiv pro zvířata kvůli jeho výživovým vlastnostem.

## 3.2 Vliv na člověka

Selen je nezbytný prvek pro správnou funkci lidského těla, a jeho nedostatek může mít škodlivé účinky. Jeho přítomnost v těle ovlivňuje metabolismus, imunitní systém, štítnou žlázu a reprodukci. Přijetí selenu z potravy je důležité, protože ho tělo nedokáže samo syntetizovat. Naopak nadměrný příjem selenu může být toxický a způsobit selenózu, což může vést k vážným zdravotním problémům. Doporučená denní dávka selenu se může lišit podle věku, pohlaví a zdravotního stavu. Dospělý člověk by měl přijímat asi 55 mikrogramů selenu denně, což lze snadno dosáhnout normálním stravováním. Těhotné a kojící ženy potřebují více, okolo 60 až 70 mikrogramů denně, aby podpořily správný růst a vývoj dítěte. Dětem se obvykle doporučuje méně selenu, kolem 20 až 40 mikrogramů denně. Ryby, maso, celozrnné obiloviny, ořechy a luštěniny jsou zdroje selenu (Brevik 2009). Vliv selenu na zdraví může být ovlivněn dalšími faktory, jako je stav těla a životní styl. Konzultace s odborníkem může být užitečná, pokud máte obavy o svůj příjem selenu nebo jeho vliv na zdraví. Selen hraje důležitou roli jako antioxidant, podporuje imunitní systém a pomáhá udržovat zdravé vlasy, nehty a kůži. Kromě toho se selen účastní tvorby hormonů štítné žlázy a může pomoci snížit riziko některých typů rakoviny. Lidé, kteří žijí v oblastech s nízkým obsahem selenu v půdě, by mohli být ohroženi nedostatkem selenu a mohou být doporučeni potravinové doplňky pro doplnění jejich příjmu selenu (Marschner 1995; White & Brown 2010).

Množství selenu v potravinách se může lišit v závislosti na půdě, na které jsou plodiny pěstovány, a také na způsobu zpracování potravin. Je důležité mít vyváženou stravu, která obsahuje potraviny selenem, aby se zabránilo nedostatku tohoto minerálu v těle. Nadměrné množství selenu však může být škodlivé, protože přebytek selenu může mít toxické účinky na tělo (Reilly 2006). Selen je klíčovým stopovým prvkem pro lidské tělo a jeho nejvyšší koncentrace se nacházejí v kostech, ledvinách, játrech a vlasech. Množství selenu v krvi závisí na množství přijatého selenu potravou, a proto se liší u jednotlivých obyvatel v závislosti na jejich lokalitě (Germ & Stibilj 2007). Optimální sérová hladina selenu by měla být v rozmezí 40-350 µg/l krve. Selen je vázán na bílkoviny a je nezbytný pro správné fungování enzymů, které působí jako antioxidanty. Nízká hladina selenu může způsobit různá onemocnění a sníženou imunitu, zatímco nadbytek selenu může být škodlivý pro lidské zdraví. Selen je v krevním oběhu transportován ve formě selenoproteinu P a v těle může docházet ke změnám hladiny selenu v krvi v závislosti na intenzitě fyzické nebo psychické zátěže. Pro udržení správné funkce a rovnováhy organismu se část selenu musí vylučovat močí, a to přibližně 50-60 % u dospělých. Lékaři mohou snadno stanovit množství selenu v krevním séru pomocí analýzy aktivity glutathionperoxidázy (Costa & Jesus-Rydin 2001; Reis et al. 2009; Soares & Soares 2012; Anjum et al. 2013). Vysoký příjem selenu nemusí vést ke zvýšení aktivity této enzymatické reakce, protože selen je většinou vázán na bílkoviny a přebytek se nevyužije. Změny hladin selenu v plazmě se okamžitě projeví změnami hladin bílkovin (Carter 1993; Rodrigues et al. 2012; Anjum et al. 2013).

### **3.2.1 Nedostatek selenu**

Selen je důležitým minerálem pro lidské zdraví, protože se podílí na mnoha funkcích v těle, včetně metabolismu štítné žlázy, imunitní funkce a prevenci oxidačního stresu. Nedostatek selenu u člověka se může projevovat různými způsoby, zahrnujícími následující faktory:

1. Poruchy štítné žlázy: Selen je důležitý pro produkci hormonů štítné žlázy. Nedostatek selenu může vést k poruchám funkce štítné žlázy, včetně hypotyreózy (snížené činnosti štítné žlázy) a autoimunitních onemocnění štítné žlázy.
2. Slabá imunita: Selen pomáhá udržovat imunitní systém v dobré kondici. Nedostatek selenu může vést ke snížení imunitní funkce a zvýšení rizika infekčních onemocnění.
3. Oxidační stres: Selen má také antioxidantní vlastnosti a pomáhá chránit buňky před poškozením volnými radikály. Nedostatek selenu může vést k narušení této ochranné funkce a zvýšit riziko poškození buněk a vzniku chorob.

4. Kardiovaskulární onemocnění: Nedostatek selenu může zvýšit riziko vzniku kardiovaskulárních onemocnění, jako jsou srdeční infarkty a mrtvice.

Nedostatek selenu je vzácný, ale může se vyskytnout v oblastech s chudou půdou, kde potraviny obsahující selen nejsou snadno dostupné. Mezi potraviny bohaté na selen patří ryby, mořské plody, ořechy, semena, fazole a celozrnné obiloviny. Suplementace selenu by však měla být prováděna pouze pod dohledem lékaře, aby se předešlo předávkování (Goodman 1988).

Mnoho lidí trápí problémy s oslabenou imunitou, lámavými nehty, vypadáváním vlasů nebo neustálým bojem s tělesnou hmotností. A jen velmi zřídka někdo z nich ví, že příčinou může být narušená funkce jejich štítné žlázy. Co ale upoutá, je fakt, že tyto obtíže lze řešit dostatečným příjmem důležitého prvku selenu ([gesundheit.gv.at](http://gesundheit.gv.at)).

#### 3.2.1.1 Češi mají příliš málo selenu

Podle Jana Kvíčaly, PhD, CSc, odborníka v oblasti mikroživin a lidského zdraví z Endokrinologického ústavu v Praze, má nedostatek selenu negativní dopad na zdraví člověka (Carter 1993; Rodrigues et al. 2012; Anjum et al. 2013). Může ovlivnit imunitní systém, snížit ochranu před oxidativním stresem a zvýšit riziko některých nemocí. Tento nedostatek může mít také vliv na hormonální regulaci těla a zrychlit proces stárnutí. V České republice jsou hladiny selenu velmi nízké i u běžné populace ve věku 6 až 65 let. Avšak díky suplementaci v podobě doplňku stravy se stav selenu již za několik týdnů zlepšuje (Kvíčala 1999).

#### 3.2.1.2 Enzymy závislé na selenu

Štítná žláza je velmi důležitý orgán v našem těle, který má motýlovitý tvar a nachází se na přední spodní straně krku. Její funkce spočívá v produkci několika hormonů, které regulují rychlost metabolismu. Pro správné fungování štítné žlázy jsou klíčové enzymy závislé na selenu, které se nazývají selenoproteiny (Carter 1993; Rodrigues et al. 2012; Anjum et al. 2013). Tyto enzymy umožňují, aby štítná žláza plnila své funkce, jako je například řízení rychlosti přeměny tuků, cukrů a bílkovin na energii. Je tedy důležité, abychom zajistili dostatečný přísun selenu do našeho těla pro správnou funkci štítné žlázy (Germ & Stibilj 2007). Jinak řečeno, štítná žláza je důležitý orgán v našem těle, který potřebuje selen k tomu, aby správně fungoval. Tato žláza produkuje hormony, které ovlivňují náš metabolismus a mnoho dalších procesů v těle. Když má tělo nedostatek selenu, může to negativně ovlivnit

enzymy, které štítná žláza potřebuje k tomu, aby pracovala správně. Proto je důležité zajistit si dostatečný přísun selenu prostřednictvím stravy nebo doplňků stravy (Kvíčala 1999).

### 3.2.1.3 V České republice je málo selenu

V České republice je obsah selenu v půdě relativně nízký v porovnání s jinými evropskými zeměmi. V minulosti se podobná situace vyskytla ve Finsku, kde ministerstvo zdravotnictví zavedlo povinnost přidávat selen do hnojiv, aby se zvýšil obsah selenu v plodinách a snížilo se riziko nedostatku selenu u obyvatelstva (Kvíčala 1999).

## 3.2.2 Nadbytek selenu

Extrémně nadměrný příjem selenu může vést k akutní otravě, která může způsobit srdeční selhání, fibrilaci komor, a dokonce i smrt (Lee et al. 2003). Chronicky zvýšený příjem selenu způsobuje různé příznaky, jako je vypadávání vlasů, ztráta nehtů nebo poruchy nervového systému, dále únavu, bolesti kloubů, nevolnost a průjem (Wilber 1980). Nadbytek selenu se u některých lidí může projevit jako česnekový zápach z úst. Doplnky stravy obsahující selen by nikdy neměly být užívány bez konzultace s lékařem. Nadbytek selenu u člověka může být škodlivý a vést k různým zdravotním problémům. Některé z příznaků nadměrného příjmu selenu zahrnují:

1. Zvracení, průjem, bolest břicha: Při nadměrném příjmu selenu mohou být některé trávicí problémy, jako jsou zvracení, průjem a bolest břicha.
2. Vypadávání vlasů a nehtů: Nadbytek selenu může vést k vypadávání vlasů a křehkosti nehtů.
3. Otrava selenem: Při vysokých dávkách může selen způsobit otravu selenem, což může vést k průjmu, zvracení, bolestem hlavy a svalů, vysoké horečce a dokonce i smrti.
4. Nervové poruchy: Nadbytek selenu může také vést k nervovým poruchám, jako je například slabost, dezorientace, zmatenost, a křeče.

Je důležité si uvědomit, že nadbytek selenu se obvykle vyskytuje pouze v případech nadměrné konzumace selenu v potravě nebo při nadměrné suplementaci. Protože selen se hromadí v těle, dlouhodobé nadměrné užívání selenu může mít škodlivé účinky. Proto by měla být suplementace selenu prováděna pouze pod dohledem lékaře a v doporučených dávkách (Raskin & Ensley 2000; Clemens 2006).

### **3.3 Vliv na hospodářská zvířata**

#### **3.3.1 Význam selenu pro přežvýkavce**

Selen je důležitým mikroprvkem pro zdraví a správnou funkci organismu všech živočišných druhů, včetně přežvýkavců. Přežvýkavci jsou zvláště závislí na dostatečném přísunu selenu, protože mají specifický trávicí systém, který využívá symbiotické bakterie pro trávení celulózy a dalších složek potravy (Surai 2006). Tyto bakterie jsou citlivé na vysoké hladiny síry a mohou být inhibovány přítomností vysokých hladin síry v potravě. Selen pomáhá regulovat hladinu síry v těle a tím zlepšuje trávicí procesy u přežvýkavců. Selen také hraje důležitou roli v imunitním systému přežvýkavců. Při nedostatku selenu se může snížit imunitní odpověď organismu a zvýšit riziko infekcí (Church 1989). Selen je důležitý pro tvorbu enzymů, které se účastní detoxikace těla a chrání buňky před oxidačním stresem. Kromě toho selen pomáhá udržovat zdraví srdečního svalu a je důležitý pro správnou funkci štítné žlázy. Přežvýkavci získávají selen ze stravy, především z rostlin, které ho přijímají z půdy. Různé regiony mohou mít různé hladiny selenu v půdě a tím ovlivňovat jeho obsah v rostlinné stravě přežvýkavců (Surai 2006). Nedostatek selenu v potravě může vést k narušení metabolismu přežvýkavců a zhoršení jejich zdravotního stavu. Proto je důležité zajistit dostatečný přísun selenu v potravě pro udržení zdraví a dobré funkce přežvýkavců (Washington 1985).

Při používání doplňků stravy selenem v anorganické formě se často potvrzuje jeho nízká účinnost z důvodu špatné vstřebatelnosti (Surai 2006). Veterinární lékaři se často snaží vyřešit problémy s příjmem a vstřebáváním Se injekcemi selenu, což je rozšířená praxe při produkci mléka. Bachorové bakterie zpracovávají selen a část spotřebovaného seleničitanu se redukuje na čistý selen nebo zůstává ve formě seleničitanu, zatímco druhá část je zabudována do bílkovin syntetizovaných těmito bakteriemi (Terry et al. 2000). Výměna seleničitanu sodného za organický selen, zejména v podobě selenizovaných kvasnic, se ukázala jako účinný způsob řešení problémů v mlékárenském a masném průmyslu. Organický selen zvyšuje koncentraci selenu v krvi a aktivitu glutathionperoxidázy (GPx), což má pozitivní dopad na zdraví zvířat. Nově narozená telata jsou lépe chráněna díky zlepšení antioxidační obrany a termoregulace, což vede k podpoře imunity, životaschopnosti a snížené úmrtnosti v prvních měsících života. (Surai 2006).

### 3.3.2 Význam selenu u prasat

Selen je pro prasata důležitý mikroprvek, který hraje klíčovou roli v mnoha biochemických procesech v těle. Mezi nejdůležitější funkce selenu u prasat patří:

1. Antioxidant - Selen působí jako antioxidant a chrání tělo prasat před oxidačním stresem. Pomáhá také chránit tkáň před poškozením a podporuje správné fungování imunitního systému.
2. Zdraví kůže a srsti-Selen je důležitý pro správný růst a regeneraci kůže a srsti u prasat. Nedostatek selenu může vést ke ztrátě srsti, suché a šupinaté kůži a dalším kožním problémům.
3. Zdraví kloubů-Selen je nezbytný pro správnou funkci kloubů u prasat. Nedostatek selenu může vést k artritidě, což je zánět kloubů.
4. Plodnost a reprodukce-Selen je důležitý pro správnou funkci reprodukčního systému u prasat. Nedostatek selenu u prasat může vést k problémům s plodností a snížení množství mléka u samic.
5. Růst a vývoj-Selen je důležitý pro správný růst a vývoj prasat. Nedostatek selenu může vést ke zpoždění růstu a vývoje.

Jako u jiných druhů zvířat, důležitým zdrojem selenu pro prasata jsou rostlinná krmiva, která obsahují tuto důležitou živinu v závislosti na obsahu v půdě. V případě nedostatku Se v půdě se pak doporučuje přidávat do krmení potravinové doplňky obsahující selen, aby se zvířatům dostalo této důležité živiny ve vhodné koncentraci (Horký et al. 2012).

Novorozená selata mají nízkou antioxidační ochranu kvůli omezenému přenosu antioxidantů z prasnice na selata prostřednictvím placenty. Doplněním selenu do krmení prasnic se zlepšuje antioxidační ochrana selat, což má pozitivní vliv na jejich zdraví. Výzkumy ukazují, že když se do krmení prasnic přidává selen v dávkách 0,15 nebo 0,30 %, zvyšuje se koncentrace selenu a aktivita glutathionperoxidázy (GPx) v syrovátce selat jak 7 dní, tak i 14 dní po porodu (Surai 2006). Pokud je půda v oblasti chudá na selen, může být doporučeno použití potravinových doplňků pro zajištění dostatečného příjmu selenu (Horký et al. 2012).

Selen hraje klíčovou roli v reprodukci prasat, zejména při zajišťování životaschopnosti a plodnosti spermií. Organické sloučeniny selenu se ukázaly jako účinný zdroj selenu pro novorozená selata, zvyšuje koncentraci selenu v mléce a mlezivu. V porovnání s anorganickým

seleničitanem je organický selen mnohem účinnější při ochraně spermií před volnými kyslíkovými radikály a při zajišťování celkové plodnosti samců (Surai 2006). Nedostatek selenu v potravě může vést k narušení reprodukčních procesů a snížení kvality ejakulátu. Proto se doporučuje přidávat do krmné dávky prasat 0,3 mg/kg selenu v organické formě pro zajištění optimální reprodukční výkonnosti moderních genotypů plemenných kanců (Kim & Mahan 2003).

### **3.3.3 Význam selenu pro koně**

Selen je pro zdraví koní nezbytný minerál, protože se podílí na tvorbě selenoproteinů, což jsou bílkoviny obsahující selen. Tyto bílkoviny mají v těle několik důležitých funkcí, například chrání buňky před oxidativním stresem a podporují imunitní systém. Selen hraje také významnou roli v prevenci a léčbě svalových onemocnění, jako je například kokcidiální svalová dystrofie (KSS), která postihuje svaly a způsobuje jejich úbytek. Selen navíc podporuje zdravý kopyt, zlepšuje kvalitu srsti a pomáhá regulovat hormonální rovnováhu (Surai 2006).

Mezi přírodní zdroje selenu patří seno, oves, ječmen a luštěniny. Pokud je však selenu v těle nedostatek, lze doporučit doplňky selenu. Je důležité zajistit koním dostatečný příjem selenu prostřednictvím vyvážené stravy, protože nedostatek selenu může vést k řadě zdravotních problémů, jako jsou svalová onemocnění, poruchy imunitního systému a špatná kvalita srsti a kopyt (Surai 2006). Selen je běžnou součástí krmiv a doplňků pro koně, které mohou být ve formě různých lyzátů, komplexních vitamino-minerálních doplňků nebo kombinovaných krmiv s vitamínem E. Poskytuje ochranu před škodlivými účinky radikálů, například v kombinaci s vitamínem C a vitamínem E, prostřednictvím enzymu glutathionperoxidázy (GPx) (Kim & Mahan 2003).

Nedostatek selenu se u koní obvykle projevuje jako svalová onemocnění, ale ne všechna svalová onemocnění jsou způsobena nedostatkem selenu. Pouze onemocnění zvané nutriční myodegenerace (NMD) je způsobeno nedostatkem selenu v krmivu, který vede k nedostatečné ochranné aktivitě GPx. Poškození membrán svalových buněk volnými radikály mohou způsobit i další faktory, jako je psychický nebo fyzický stres (Ajwa et al. 1998). Toto onemocnění postihuje především hříbata mladší šesti měsíců a u starších koní je velmi vzácné. Mezi hlavní příznaky patří náhlý nástup svalové ztuhlosti, potíže při stání a potíže s příjmem potravy, vody nebo mléka (Swaine 1962; Bisbjerg 1972). NMD může postihnout všechny kosterní svaly

a srdeční sval. Ačkoli je tato nemoc běžná, je důležité se vyvarovat předávkování koní selenem, protože může vést ke zdravotním problémům.

### **3.4 Selen v půdě**

Selen se nachází v půdě v různých koncentracích podle geografické oblasti a složení půdy. Jeho množství může být omezeno v některých oblastech a dostatečné v jiných. Rostliny potřebují selen pro růst, vývoj a syntézu enzymů (Ajwa et al. 1998). Pokud je selen nedostatečný, mohou trpět patologickými procesy a být náchylné k napadení škůdci. Selen se přenáší z půdy do rostlin a dále do potravinového řetězce, kde ho mohou získat lidé a zvířata prostřednictvím potravy (Velíšek 1999). Pokud je nedostatek selenu, mohou se vyskytnout zdravotní problémy u lidí a zvířat, jako je například Keshanova choroba, která způsobuje srdeční selhání u lidí žijících v oblastech s nedostatkem selenu.

V zemské kůře se vyskytuje v rozsahu 0,05 – 0,09 mg/kg, často v břidlicích, vápenatých materiálech, v pískovcích, fosforečných horninách (Velíšek 1999).

Obsah selenu v půdě závisí na mnoha faktorech. Jeho distribuci v půdním profilu ovlivňují:

- matečná hornina,
- množství organické hmoty,
- pH,
- oxidy Fe a Al,
- srážky.

Zvýšené obsahy jsou očekávané pouze v aridních a semiaridních oblastech, na břidlicích. Ve Finsku byly vyšší koncentrace v půdě zjištěny v jílovitých a organogenních půdách (díky silné sorpci selenu), nejnižší v hrubozrnných půdách (Velíšek 1999).

#### **3.4.1 Mobilita a biopřístupnost selenu v půdě**

Pohyblivost selenu v půdě, jeho schopnost měnit oxidační stavy a dostupnost pro rostliny a živočichy jsou hlavně závislé na formě, ve které se selen vyskytuje (Hawkesford & Zhao 2007). Existují celkem čtyři oxidační stavy - 0, -II (selenid), IV (seleničnan) a VI (selenan). V prostředí dochází k třem základním mechanismům přeměny



(oxido-redukční procesy, (de)metylace, volatilizace), které zahrnují procesy immobilizace (redukční procesy), mobilizace (oxidační procesy) a ztráty selenu (demetylace, volatilizace).

### 3.4.2 Faktory ovlivňující biopřístupnost selenu

Existuje řada faktorů, které ovlivňují, jak se selen v půdě pohybuje a jak je přístupný pro rostliny a zvířata. Jedním z těchto faktorů je matečná hornina, ze které se půda vyvinula, což může mít velký dopad na mobilizaci selenu (Darcheville et al. 2008). Půdy vzniklé na vyvřelinách jsou často chudé na selen, zatímco půdy vzniklé na sedimentárních horninách, zejména břidlicích, mohou obsahovat zvýšené množství selenu. Kromě toho má pH půdy také klíčový vliv na přítomnost selenu, protože v kyselých a neutrálních půdách se selen vyskytuje převážně jako seleničnan, který tvoří těžko rozpustné komplexy s Fe (De Gregori et al. 2002). Forma selenu také ovlivňuje jeho absorpci rostlinami, přičemž nejúčinněji je absorbován ve formě selenanu, méně účinně ve formě seleničnanu a nejméně účinně v organické formě. Existují další faktory, které mohou ovlivnit přijímání selenu z minerálních půd, jako je zrnitost a obsah jílu. Dále se předpokládá, že organická hmota hraje důležitou roli při zachycování selenu. Ionty, které soutěží se selenem, jako je například síra, mohou ovlivnit pohyblivost selenu v půdě (Nriagu 1989). Tyto ionty mají podobné chemické vlastnosti jako selen, což způsobuje interakce mezi nimi a selenem. Přídavky síry, jako například  $\text{BaSO}_4$ , mohou pomoci uvolnit selen z půdy (Swaine 1962; Bisbjerg 1972).

- Matečná hornina – má na mobilitu Se velmi silný vliv. Půdy na vyvřelinách jsou většinou Se-deficitní, půdy na sedimentárních horninách (především břidlicích) obsahují zvýšená množství Se.
- pH půdy – v kyselých a neutrálních půdách se vyskytuje především ve formě seleničnanu, který vytváří těžce rozpustné komplexy s Fe
- Forma Se – nejefektivněji je rostlinami absorbován selenan, méně seleničnan, nejméně organický selen.
- Zrnitost, obsah jílu – příjem Se z minerálních půd má inverzní vztah k obsahu jílu.
- Organická hmota – předpokládá se vazba na organickou hmotu.
- Kompetující ionty – díky podobným chemickým vlastnostem dochází k interakcím mezi Se a S; přídavky síry ( $\text{BaSO}_4$ ) napomáhají vyluhování Se z půdy.

### 3.5 Selen v rostlinách

Selen hraje v rostlinách několik klíčových funkcí. Je nezbytný pro enzymy, které umožňují metabolismus a fotosyntézu rostlin a také pomáhá rostlinám bojovat proti stresu, jako je nedostatek vody nebo vysoké teploty. Nicméně, příliš vysoká koncentrace selenu může být pro rostliny toxická. Rostliny však dokáží regulovat a ukládat selen v neškodných formách, aby se předešlo jeho přemnožení (Yilmaz 2007). V oblastech s bohatými selenovými půdami se často nacházejí rostliny s vysokým obsahem selenu, jako jsou křen, česnek nebo para ořechy. Tyto rostliny se stávají důležitým zdrojem selenu v potravinách pro lidi (Zhao et al. 2005). Například bylo pozorováno, že aplikace selenu zvyšuje toleranci rostlin *Cucumis sativus* vůči chladovému stresu a snižuje negativní vliv vysokých teplot na *Sorghum bicolor*. (Banuelos & Lin 2005; Zhao et al. 2005) Další pozitivní účinky selenu na rostliny zahrnují zlepšení růstu *Solanum tuberosum* a zvýšení počtu a hmotnosti semen *Brassica rapa*. Nicméně, studie prokázaly, že selen nezvyšuje tolerance rostlin kadmia a mědi. Dávkování selenu má velký vliv na jeho účinky na rostliny. Nízké dávky selenu mohou zvýšit antioxidační účinek a zlepšit růst, zatímco vysoké dávky mohou způsobit oxidační stres.

#### 3.5.1 Příjem a bioakumulace selenu rostlinami

Selen se může v rostlinách vyskytovat v různých množstvích v závislosti na faktorech jako jsou typ a kvalita půdy, počasí a způsob zpracování potravin. Nicméně, rostliny nejsou obecně považovány za bohatý zdroj selenu jako ryby, mořské plody, ořechy nebo semena. Mezi rostlinné zdroje selenu patří celozrnné obiloviny jako pšenice, rýže, ječmen a oves, a také luštěniny, například fazole, hrách, čočka a sója. Některé druhy zeleniny, jako brokolice, cibule, rajčata a papriky, také obsahují malé množství selenu. Nicméně, je třeba poznamenat, že rostliny obvykle obsahují méně selenu než živočišné produkty, takže osoby, které se spoléhají na rostlinnou stravu, by mohly mít nedostatek selenu, pokud nezahrnou do své stravy potraviny s vyšším obsahem selenu nebo nevyužívají doplňky stravy (Brown & Shrift 1982).

Rostliny mají dobrou schopnost přijímat selen v alkalických půdách s dostatečným provzdušením, kde se vyskytuje převážně selenan. Selen a síra jsou si chemicky podobné prvky, což zvyšuje příjem selenu u rostlin s větší potřebou síry. Rostliny aktivně metabolizují selenan a soutěží s ním o vazebná místa, zatímco seleničnan je pasivně přijímán a váže se na jiná místa. Vysoký obsah selenanu v půdě se koreluje se vysokým obsahem selenu v rostlinách. Pokusy potvrdily, že obilí přijímá více selenanu než seleničitanu, který je pevně

vázán na půdní částice. Rostliny mohou přijímat různé formy selenu, jako jsou seleničitan, selenan a organické sloučeniny SeCys a SeMet, ale nejsou schopny využít selenidy a elementární selen (Brown & Shrift 1982).

Existují 3 skupiny rostlin, které se liší svou schopností akumulovat selen v pletivech:

- Primární indikátory, které mohou obsahovat 103-104 mg/kg selenu v sušině.
- Sekundární indikátory, které mohou obsahovat 100-1000 mg/kg selenu v sušině.
- Neakumulátory, které mají mnohem nižší hladinu selenu (<30 mg/kg v sušině) a zahrnují většinu kulturních rostlin, obiloviny a trávy.

Výzkum ukázal, že hydroponické pěstování *Triticum turgidum* a *Brassica napus* preferuje přijímání organických sloučenin selenu, jako je SeMet, před anorganickými sloučeninami Se (Kikkert & Berkelaar 2013). Naopak, u rostlin pěstovaných v půdě, jako například v případě *Festuca arundinacea* a *Brassica napus* bylo pozorováno, že více než 80 % přidaného selenu ve formě organických sloučenin bylo absorbováno spolu s organickými látkami v půdě, kde byla použita seleničitanová hnojiva (Ajwa et al. 1998). U rostlin *Phaseolus vulgaris* bylo zjištěno, že seleničitan je snadno transportován z kořenů do nadzemní biomasy, zatímco translokace seleničitanu byla velmi nízká, což znamená, že se seleničitany obtížněji dostávají do nadzemní části rostliny (Arvy 1993).

Yu et al. (2011) pozorovali zvýšenou akumulaci Se v rostlinách *Zea mays* a *Medicago sativa* v důsledku mykorhizní akumulace. Rostliny se významně liší v příjmu Se a fyziologické reakci na selen (Terry et al. 2000). Většina běžných rostlin není schopna akumulovat více než 25 mg Se/kg sušiny v nadzemní biomase a obvykle se označují jako neakumulátory, které nesnášejí vysoké hladiny Se v prostředí. Přestože *Portulaca oleracea* je relativně tolerantní ke zvýšenému obsahu Se v půdě, zvýšení obsahu Se v půdě vedlo ke snížení růstu rostlin (Prabha et al. 2015). Podobně Hermosillo-Cereceres et al. (2013) zaznamenali snížení výnosu biomasy *Phaseolus vulgaris* při pěstování v roztoku obsahujícím více než 10-20 mM seleničitanu na hmotnost *Phaseolus vulgaris*.

Některé rostliny dokážou akumulovat selen na místo síry, což jim umožňuje ukládat až 0,1 - 1,5 % hmotnosti své sušiny jako selen, aniž by to mělo na ně toxický vliv. Toto ale může vést k nechtěné kontaminaci potravinového řetězce. Nicméně, takové rostliny, nazývané hyperakumulátory selenu, najdou uplatnění v procesu nazývaném fytoremediace,

kdy se používají k odstraňování nadměrného selenu z půdy a závlahových vod. Některé známé hyperakumulátory selenu jsou brokolice, ředkev a také česnek, který ukládá selen především ve formě  $\gamma$ -glutamylselenomethylselenocysteinu. Na druhé straně jsou para ořechy a některé houby zdrojem selenomethioninu (Lyons et al. 2005).

### 3.5.2 Metabolismus selenu v rostlinách

Rostliny přijímají selen z půdy v podobě selenanů a seleničitanů, a nejraději vstřebávají právě selenany. Selenan putuje do chloroplastů, kde se podobně jako síra metabolizuje enzymem sulfát permeázou. Selen se poté mění na selenid, který reaguje s aminokyselinami serinem, či methioninem a vytváří selenocystein a selenomethionin. Tyto selenové aminokyseliny se pak mohou vázat na proteiny a nahradit běžné aminokyseliny, čímž mohou být tyto proteiny poškozeny. Rostliny mají ale dva způsoby, jak se chránit před toxickým účinkem selenu. Můžou produkovat těkavé sloučeniny jako jsou dimetylselenid a dietylselenid, nebo enzymaticky štěpit selenocystein na alanin a elementární selen.

Selen je v rostlinách vázán na různé sloučeniny, v nichž je síra nahrazena selenem, například SeCys a SeMet (Ellis & Salt, 2003). Komplexním příkladem metabolismu Se v rostlinách je biochemický proces, kdy SeMet může být syntetizován ze SeCys prostřednictvím třístupňové reakce katalyzované třemi enzymy. Prvním enzymem je cystathionin  $\gamma$ -syntáza, která váže SeCys na o-fosfoserin za vzniku Se-cystathioninu. Ve druhém kroku se Se-cystathionin přeměňuje na Se-homocystein. Nakonec Met-syntáza přemění Se-homocystein na SeMet (Pilon-Smits & Quinn, 2010).

Organická sloučenina Se-methylselenocystein (SeMeSeCys), která se vyskytuje v rostlinách akumulujících Se, je syntetizována ze SeCys za přítomnosti selenocysteinmethyltransferázy. Tato sloučenina je obvykle přítomna v rostlinách, které akumulují Se jako způsob posílení své obranyschopnosti, zatímco neakumulující rostliny ošetřené selenanem obsahují převážně Se - sloučeniny. U živočichů má Se úzké rozmezí mezi esenciálními a toxickými hladinami. Proto jsou případy nedostatku nebo předávkování Se u zvířat poměrně časté (Terry et al. 2000). Více než 1 mg Se/kg sušiny může vést k chronické otravě zvířat a krmivo obsahující 1000 mg Se/kg sušiny může být smrtelné (Wilber 1980).

## 3.6 Foliární aplikace

Foliární aplikace jsou aplikace hnojiv, pesticidů, fungicidů a dalších chemikálií na listy rostlin. Tyto aplikace jsou často preferovány zemědělci a zahradníky, protože umožňují přímé

aplikování živin a pesticidů na listy, což umožňuje rychlejší a účinnější vstřebávání rostlinami (Fellowes et al. 2013). Foliární aplikace může být využita pro aplikaci mnoha různých druhů hnojiv, včetně dusíku, fosforu, draslíku a hořčíku, jakož i pro aplikaci různých druhů pesticidů a fungicidů, které pomáhají ochránit rostliny před škůdci a chorobami. Je důležité dodržovat pokyny na obalu přípravku a provádět aplikace v souladu s předepsanými postupy, aby bylo zajištěno bezpečné a účinné použití (Fellowes et al. 2013).

### **3.7 Biofortifikace a molekulární farmářství**

Biofortifikace je technika, která se zaměřuje na zvýšení nutričních hodnot plodin pro lidskou konzumaci. Cílem je zvýšit množství živin a dalších prospěšných látek, které jsou v potravinách obsažené. Může být dosaženo klasickými šlechtitelskými postupy, ale také genetickými modifikacemi. Molekulární farmářství se pak soustředí na výrobu specifických molekul pomocí rostlin, a to prostřednictvím molekulárně biologických technik. Tyto molekuly mohou být přirozené, ale také úplně nové (Velíšek 1999).

#### **3.7.1 Důvody vzniku biofortifikace a molekulárního farmářství**

Většina lidí ve vyspělých zemích žije velmi hektickým životním stylem a má tendenci ignorovat zdravou životosprávu, což může vést ke zvýšenému riziku některých onemocnění. Například Diabetes mellitus typu II je často spojen s nadváhou a nezdravým stravováním. Biofortifikované rostliny mohou pomoci tuto situaci řešit, ale samy o sobě nejsou řešením. Pokud lidé nezmění svůj životní styl a nesnaží se dodržovat zdravou životosprávu, nebude to stačit (Zhao et al. 2003). Na rozdíl od toho v rozvojových zemích mnoho lidí trpí nedostatkem správné stravy, což může vést k vážným zdravotním problémům (Feng et al. 2009). Jedním příkladem je nedostatek vitamínu A, což může vést k slepotě a rané úmrtnosti dětí. Geneticky modifikované plodiny, jako je zlatá rýže, která obsahuje více betakarotenu, mohou pomoci řešit tento nedostatek. U cukrovky typu I zatím nejsou známy přesné příčiny vzniku tohoto onemocnění.

Vitamin A je nezbytný pro tvorbu zrkového pigmentu rodopsinu a je také významným antioxidantem. Rozsah aplikací molekulárního zemědělství je širší než biofortifikace potravin. Molekulární zemědělství nabízí příslib výroby látek, které lze použít jako léky, biologicky odbouratelné plasty, speciální vlákna na bázi pavoučího hedvábí a mnoho dalšího, jak ukázali Schillberg et al. (2004).

Rostoucí znalosti o lidském těle s sebou přinášejí mimo jiné popisy a diagnostiku nových nemocí. Mnoho lidí dnes potřebuje pravidelnou medikaci, zejména při hormonálních potížích. V důsledku toho logicky roste poptávka po lécích a syntetických hormonech. Výroba rekombinantních farmaceutických proteinů v rostlinách se začala rozvíjet přibližně před 25 lety a dnes je na trhu nebo v závěrečné fázi schvalování více než 300 proteinů vyráběných rostlinami. Většina těchto proteinů byla dříve produkována mikrobiálními systémy (především *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae*) nebo savčími buněčnými kulturami, které využívají například ovariální buňky čínské křečka (Schmidt & Rodrick, 2003). Využití rostlin k tomuto účelu má oproti těmto metodám několik výhod, které budou dále diskutovány.

### 3.7.2 Cíle biofortifikace a molekulárního farmářství

Cílem molekulárního zemědělství je produkovat širokou škálu látek, jako jsou sacharidy, tuky, bílkoviny a různé sekundární metabolity, které se využívají v různých lidských činnostech. Významnou výhodou rostlin je jejich schopnost produkovat širokou škálu látek v důsledku manipulace (Sasmaz 2009). Tvorbou rekombinantních proteinů se budeme zabývat podrobněji, protože proteiny mají významný potenciál při léčbě lidských a zvířecích onemocnění.

Biofortifikace se snaží zabránit nebo odstranit prokázané nutriční nedostatky u určité skupiny obyvatelstva, které vznikají v důsledku nevyvážené stravy nebo nedostatečného přístupu k některým zdrojům potravin (Sasmaz 2009). Biofortifikace je termín používaný pro obohacení potravin o složky, které jsou nezbytné, ale během výrobního procesu se ztratily nebo v potravině původně nikdy nebyly přítomny (Zhao et al. 2003). Metody používané pro biofortifikaci jsou v zásadě podobné metodám používaným pro molekulární zemědělství.

## 3.8 Kukuřice setá

Kukuřice setá (*Zea mays*) je druh rostliny z čeledi lipnicovitých, pocházející z Ameriky. Je to jednoletá bylina, dorůstající až 3 metrů výšky. Má široké listy a charakteristická květenství-samčí květy tvoří lata a samičí klasy. Plodem je kulovitá kukuřičná kobyłka s řadou zrn (kukuřičných zrn, nazývaných také klasem), která může mít různé barvy: žlutou, bílou, modrou, červenou nebo černou. Kukuřice setá se pěstuje po celém světě jako zdroj potravy pro lidi i zvířata. Kukuřičné zrna obsahuje velké množství sacharidů a bílkovin, stejně jako vitamíny a minerály. Kukuřičné klasy se používají k přímé konzumaci, na výrobu mouky

a oleje, nebo jako krmivo pro zvířata. V poslední době se také kukuřice setá využívá jako zdroj biopaliv (Keskinen et al. 2010).

### **3.8.1 Botanická charakteristika**

Popisují vám rostlinu, která je robustní jednoletou trávou, dorůstající nejčastěji do výšky 1 - 3 metrů. Může však být i nižší nebo až šestimetrová. Má střídavé listy s listovými pochvami a souběžnou žilnatinou, čepele jsou asi 30-90 cm dlouhé a asi 1,5-12 cm široké. Rostlina má jednopohlavní květy v pohlavně rozlišených květenstvích. Samčí květenství je vrcholová lata klásků, kde jeden klásek je stopkatý a druhý přisedlý a každý klásek obsahuje 2 květy. Na bázi každého klásku jsou 2 plevy. Samičí květenství jsou vyrůstají z úžlabí listu a u pěstované kukuřice seté to je ztlustlý klas, který se skládá z mnoha řad obilek. Celý samičí klas je uzavřen v pochvách listenů a z každého klásku vzniká pouze jedna obilka (Dhillon & Dhillon 2009). Rostlina může být diploidní nebo tetraploidní.

Kukuřice se opyluje pomocí větru, ačkoli některý hmyz, včetně včel, také sbírá pyl, jeho přínos pro opylování je malý, protože nenavštěvují samičí květy. Pyl je relativně těžký a vysychá velmi rychle, jeho životnost je obvykle mezi 10 a 30 minutami. Pylová sezóna trvá obvykle asi 14 dní. Samčí květy dozrávají dříve než samičí, což zaručuje cizosprášení (Wilber 1980). Některé moderní odrůdy však mají oba květy dozrávající ve stejnou dobu. Kukuřice se přirozeně rozmnožuje pouze semeny, z nichž asi 95 % je oplodněno cizosprášením a zbytek samosprášením. Během domestikace však kukuřice ztratila schopnost uvolňovat semena z klasů a je zcela závislá na člověku. Nelze ji rozmnožovat vegetativně, i když pomocí sterilních technik z tkáňových kultur by to bylo teoreticky možné, ale obtížné a nespolehlivé. Kukuřice je rostlina s fotosyntézou typu C<sub>4</sub>, což jí umožňuje velmi rychlý růst a produkci velkého množství biomasy za dostatečného osvětlení (Dhillon & Dhillon 2009). Je také relativně nenáročná na vodu. Podle údajů lze z jednoho hektaru sklízet až 23 tun kukuřice.

## **3.9 Nanočástice**

### **3.9.1 Využití nanočástic**

Nanočástice jsou velmi malé částice, které mají rozměry v řádu nanometrů (nanometr = 10<sup>-9</sup> metrů). Díky jejich vysokému poměru povrchu k objemu a kvantovým efektům mají nanočástice mnoho unikátních vlastností, které se často liší od jejich standardních analogů. Tato odlišnost umožňuje širokou škálu aplikací, zejména v oblasti farmacie a medicíny. Jedním

z významných faktorů je schopnost nanočástic překonat biologické bariéry a doručit léčiva na místo určení s menšími vedlejšími účinky a větší terapeutickou účinností. Superparamagnetické nanočástice se mohou použít k mnoha aplikacím, jako je například zvýšení kontrastu pro nukleární magnetickou rezonanci nebo separace buněk. Stříbrné nanočástice mají antimikrobiální aktivitu, a proto se stále více používají v oblasti zdravotnického materiálu a výrobků pro domácnost (Park et al. 2010). Mnoho polovodičových a kovových nanočástic má velký potenciál v diagnostice a terapii rakoviny. Například zlaté nanočástice účinně přeměňují absorbované světlo na teplo a mohou být využity pro fototermální terapii.

Nanočástice zlata mohou být spojeny s ligandy, které se vážou na biomarkery rakovinných buněk, což umožňuje přesné molekulární rozpoznání rakoviny. To může být využito pro diagnostiku. Zlaté nanočástice s navázaným antisense oligonukleotidem se používají k detekci viru SARS-CoV-2 v jednoduchém kolorimetrickém testu, který nevyžaduje pokročilé vybavení (Park et al. 2010). Další možností je použití nanostruktur pro léčbu infekce virem SARS-CoV-2. "Nanohouby" odvozené z lidských buněk obsahují proteinové struktury, které jsou potřebné pro vstup viru do hostitelských buněk. Po inkubaci s "nanohoubami" je virus neutralizován a nedokáže infikovat další buňky. Nanočástice mají potenciál přispět k ochraně životního prostředí prostřednictvím různých aplikací. Ty mohou zahrnovat detekci, prevenci a odstraňování znečištění pomocí nanosenzorů a nanočástic, které mohou být využity ke snadnému sledování a odstranění nečistot (Park et al. 2010).

Ekologické výrobky mohou být vyráběny pomocí čistějších průmyslových postupů, což může snížit negativní dopad na životní prostředí. Kromě toho, nanočástice mohou být použity k fotokatalýze, což umožňuje odstranění nečistot z prostředí pomocí slunečního záření, přičemž tyto nanočástice neovlivňují průhlednost čirého média. Železné nanočástice jsou dalším příkladem, které mohou být použity k odstraňování znečišťujících látek z půdy a podzemní vody. Výzkum nanomateriálů se v České republice zaměřuje na mnoho oblastí, jako například na využití nanočástic oxidů kovů pro katalytické, magnetické a biomedicínské aplikace. RCPTM je významným pracovištěm, které se této problematice věnuje (Wilber 1980). Nanotechnologie nacházejí uplatnění také v energetice, kde mohou být využity při výrobě vodíku z vody, při redukci CO<sub>2</sub> na prekurzory paliv nebo v solárních člancích. Díky speciálním mechanickým vlastnostem mohou být nanočástice využity v oborech jako je tribologie a povrchové inženýrství. Využívají se například jako součást maziv, adheziv nebo nátěrů, čímž snižují tření a opotřebení.



### 3.9.2 Nanočástice v přírodě

Jak je vidět, rozmanité produkty nanotechnologií jsou v dnešní době všudypřítomné. Není tedy divu, že je v poslední době přitahována pozornost na oblast nanotoxikologie a také vzrůstají obavy ohledně možného toxického dopadu na člověka a kontaminace životního prostředí nanomateriály (Lv et al. 2019). Syntetické nanočástice mohou vstoupit do životního prostředí během každé ze tří fází svého životního cyklu. Mohou se uvolňovat během výroby produktů obsahujících nanočástice, během jejich používání či po jejich likvidaci (nakládání s odpady). Emise nanočástic mohou probíhat buď přímo do okolního prostředí, jak se to děje například u výfukových plynů, nebo nepřímo prostřednictvím technických systémů jako jsou čistírny odpadních vod nebo skládky. K nepřímým emisím pravděpodobně dochází buď odtokem z čistíren odpadních vod, použitím vyhnílených kalů v hnojivech, nebo výluhy ze skládek (Khan et al. 2008). Bylo prokázáno, že většina syntetických nanočástic je do prostředí uvolněna právě během použití a likvidace, zatímco během produkce je uvolněno maximálně 2 % z jejich celkového množství.

Vedle syntetických nanočástic se v životním prostředí vyskytuje obrovské množství nanočástic z přírodních zdrojů. Pochází většinou z rozkladu organické hmoty, chemického zvětrávání hornin nebo to mohou být nanoskopické částice prachu nebo sazí vznikuvší během vulkanické aktivity, požárů nebo jiných spalování. Tyto částice mají velikost mezi 100 a 200 nm a jsou chemicky převážně na bázi křemíku, železa a uhlíku (Baik et al. 2013). Nermalou skupinu tvoří nanočástice vytvořené živými organismy. Kupříkladu *Bacillus cereus*, *Escherichia coli* nebo bakterie z rodu *Lactobacillus* jsou schopny redukovat seleničitany ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ) a selenany ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ) na elementární selen ve formě sférických nanočástic. *Bacillus beveridgei* a *Rhodobacter capsulatus* jsou zase schopny redukovat telurčitany a produkovat nanočástice teluru. Jak je zmíněno výše, nanočástice se vyskytují ve všech složkách životního prostředí (Lv et al. 2019). Rostliny do všech těchto oblastí zasahují, a jsou tedy nuceny s nimi interagovat na všech úrovních.

### 3.9.3 Příjem nanočástic rostlinou

Do semen nanočástice vstupují osemením přes akvaporiny. Přes parenchymatózní mezibuněčné prostory se mohou dostat až do děložního lístku (kotyledonu). Pokud jde o vzrostlé rostliny, existují dvě cesty, kudy mohou nanočástice vstupovat, jsou to listy nebo kořeny. Listy jsou vystaveny nanočásticím vyskytujícími se v atmosféře, případně může dojít k postřiku či přímému vstřiku do listu (Khan et al. 2008). Vyšší rostliny jsou chráněny voskovou kutikulou před ztrátou vody a nekontrolovanou výměnou rozpustných

látek. Kutikula je považována za první přirozenou bariéru proti vstupu nanočástic do rostlinných pletiv. Pokud dojde ke změnám v kutikule vlivem životního stádia, klimatických podmínek nebo poškozením škůdci či chorobami, může být kutikula jakožto první bariéra překonána.

Jedinou prokázanou cestou vstupu nanočástic do těla rostliny přes listy jsou průduchy (stomata) (Lv et al. 2019). Například Giraldo a kol. (2014) prokázali schopnost jednostěnných uhlíkových nanotubic procházet stomaty špenátu, proniknout do chloroplastů a hromadit se na tylakoidech a ve stromě. Vzhledem k jedinečné geometrické konstrukci a fyziologické funkci průduchů stále není známo, jaký je velikostní limit (nano)částic pro průnik průduchem do vnitřních struktur listu. Eichert a Goldbach (2008) například zaznamenali průchod polystyrenových nanočástic o velikosti 43 nm, zatímco částice o velikosti 1,1  $\mu\text{m}$  neprošly.

Kim a kol. (2014) však zjistili, že nanočástice nulamocného železa vyvolaly indukci aktivity plazmatické  $\text{H}^+$  ATPázy a podpořily otevření stomat u huseníčku (*Arabidopsis thaliana* L.). Velikost propuštěných nanočástic průduchy tedy velmi záleží na jejich povaze. Lze tedy očekávat, že rostlinné druhy s různou morfologií listů, velikostí a hustotou průduchů budou mít různou kapacitu pro foliární příjem nanočástic (Khan et al. 2008). Pokud se nanočástice vyskytují v okolí kořenů, jsou nejprve adsorbovány na jejich povrch. Kořeny rostlin mají díky přítomnosti trichomů drsný povrch. Tyto chloupky mohou vylučovat sliz nebo malé molekuly organických kyselin, které dávají povrchu kořenů negativní náboj. Vyšší pravděpodobnost adsorpce a akumulace na povrchu kořenů mají proto nanočástice s pozitivním povrchovým nábojem (Lv et al. 2019). Nanočástice pak musí procházet řadou fyziologických bariér počínaje kořenovou kutikulou, přes epidermis, kůru, endodermis, Caspariho proužky až nakonec projdou do xylému. Není jasné, zda mohou nanočástice prostupovat kutikulou na povrchu kořene. Kutikula je však nedostatečně vyvinutá na povrchu kořenových chloupků a vyvíjejících se kořenových čepiček hlavních a sekundárních kořenů. Proto je v těchto oblastech nanočásticím vystavena přímo epidermis (Song et al. 2011).

Nanočástice selenu jsou velmi zajímavé pro své vlastnosti, jako je například zlepšení funkce imunitního systému a ochrana před oxidativním stresem. Vědecké studie ukazují, že nanočástice selenu mají potenciál jako terapeutický činidlo v léčbě některých onemocnění, jako jsou například rakovina, kardiovaskulární choroby a diabetes. Tyto částice se mohou vázat na kovy a toxické látky v těle a pomáhat tak odstraňovat nebezpečné látky. Nicméně, jako u většiny nových technologií, existují také obavy z možných negativních účinků

nanočástic selenu na zdraví. Je důležité provádět další výzkum a testování, aby se zjistilo, zda jsou tyto částice bezpečné pro použití v různých aplikacích (Khan et al. 2008).

#### 4. Materiál a metody

Nádobový pokus byl založen ve venkovní vegetační hale České zemědělské univerzity v Praze katedry agroenvironmentální chemie a výživy rostlin. Nadmořská výška je přibližně 280 m n. m., roční teplota vzduchu se pohybovala kolem 9 °C. Zemina pro pokus byla odebrána z lokality Doudleby nad Orlicí (DNO) přibližně 100 kg do plastových pytlů. Tato lokalita se nachází v řepařské výrobní oblasti. Půda v DNO je charakterizována jako černice modální (jílovitohlinitá). V tabulce 1 jsou uvedeny fyzikálně-chemické vlastnosti půdy.

Tabulka č.1: Fyzikálně chemické vlastnosti použité půdy

Půdní typ	pH (H <sub>2</sub> O)	N <sub>min</sub>	P	K	Ca	Mg	S	Se
černozem modální	5,9 ± 0,02	4,59 ± 0,09	32 ± 2,45	205 ± 4,56	2495 ± 23,65	193 ± 3,25	25 ± 1,36	0,03 ± 0,05

Po vysušení na vzduchu byla půda proseta sítím o velikosti ok 5 mm. Poté bylo odváženo 5 kg suché homogenizované půdy, důkladně promícháno s roztokem NPK (1 g N, 0,19 g P a 0,76 g K) a vloženo do jednotlivých nádob.

Do nádob byla vyseta dne 4.5.2022 kukuřice roční (*Zea mays* L.) odrůda 'RGT ATTRAXION' v počtu 8 semen na nádobu. Tento hybrid se vyznačuje vysokou odolností proti stresu. Má velmi dobrý výnos zelené hmoty v sušších podmínkách a je odolná vůči poléhání a lámání stonku. Po vyklíčení byla vyjednocena dne 16.5.2022 na konečný počet 4 rostliny na nádobu. Nádobky byly poté randomizovány. Během vegetace byly rostliny ošetřovány proti chorobám a škůdcům a denně zavlažovány na 60-70 % maximálního nasycení půdních pórů vodou. Dne 26.5.2022 byla kukuřice přihnojena 2 g N na půdu roztokem dusičnanu amonného. Schéma pokusu je uvedeno v tabulce 2.

Tabulka č.2: Schéma nádobového pokusu

Varianty	Ozn. nádob	BBCH	dávka
Kukuřice 0	37,38,39,40	30 + 51	voda
Kukuřice A	45,46,47,48	30 + 51	2x 50 µg/nádoba
Kukuřice B	53,54,55,56	30 + 51	
Kukuřice C	61,62,63,64	30 + 51	
Kukuřice D	69,70,71,72	30 + 51	

Nádobový experiment byl založen v pěti variantách. Na všechny varianty, mimo kontrolní, se aplikoval selen v různých formách dvěma dávkami po 50 µg/nádoba v BBCH 30 (počátek prodlužovacího růstu) dne 23.6.2022 a v BBCH 51 (počátek metání lat) dne 20.7.2022.

První varianta K0 byla kontrolní varianta, u které se aplikovala voda na list.

Druhá varianta KA zahrnovala postřik selenanem sodným (Sigma Aldrich, Německo).

U třetí varianty KB se aplikoval selen ve formě komerčně dostupného nanoselenu (Sigma Aldrich, Německo).

Na čtvrtou variantu KC se aplikoval selen ve formě nanoselenu syntetizovaného ve spolupráci s VŠCHT.

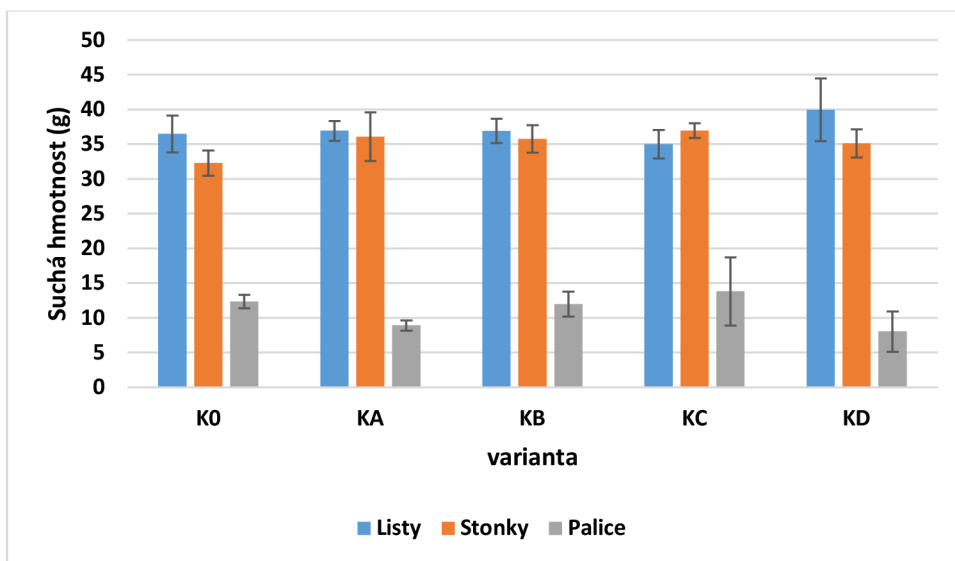
Pátá varianta KD zahrnovala předchozí nanoselen z VŠCHT s přidáním smáčedla SILWET (polyalkyleneoxid heptamethyl trisiloxane 80 %, allyloxypolyethyleneglycol 20 %) pro lepší smáčivost.

Tyto formy byly aplikovány pomocí 15ml zmlžovače.

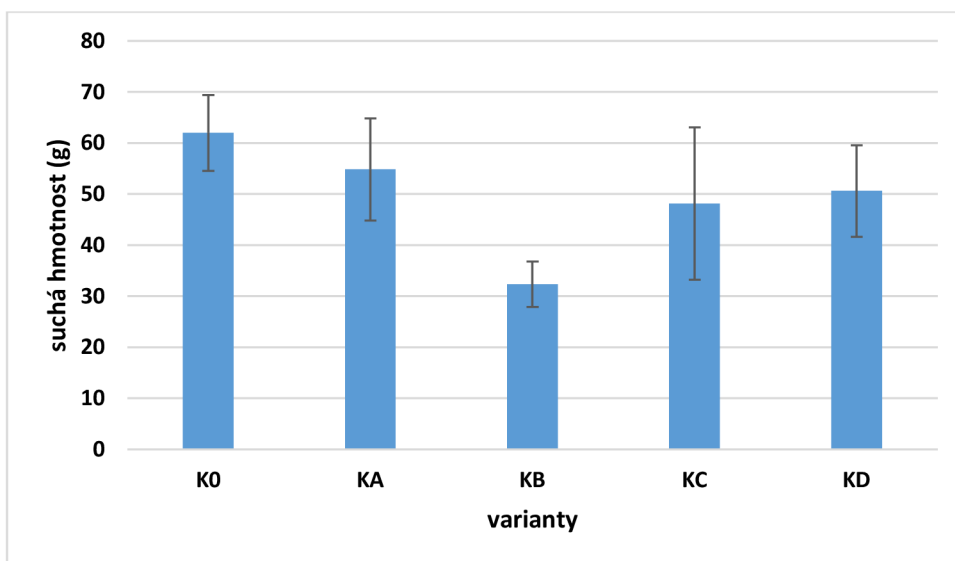
Při sklizni dne 4.8.2022 byly palice, stonky, listy a kořeny, které byly důkladně vyprané v demineralizované vodě, rozděleny, zváženy a vysušeny při teplotě 35 °C v sušárně. Suché vzorky byly homogenizovány a rozemlety na mlýnku se sítím o průměru 1 mm. Rostlinné vzorky byly rozloženy pomocí mikrovlnného rozkladu ve směsi 65% HNO<sub>3</sub> (8 ml) a 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (2 ml) při 190 °C v systému Ethos 1 Advanced Microwave Digestion System (MLS GmbH, Německo). Stanovení celkového obsahu Se v rozložených vzorcích bylo provedeno pomocí hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS, Agilent 7700x, Agilent Technologies Inc., USA) v režimu kolizní cely (helium).

Statistické hodnocení bylo provedeno pomocí Tukeyho HSD testu na hladině významnosti  $p \leq 0,05$  pomocí softwaru Statistica 12.

## 5. Výsledky

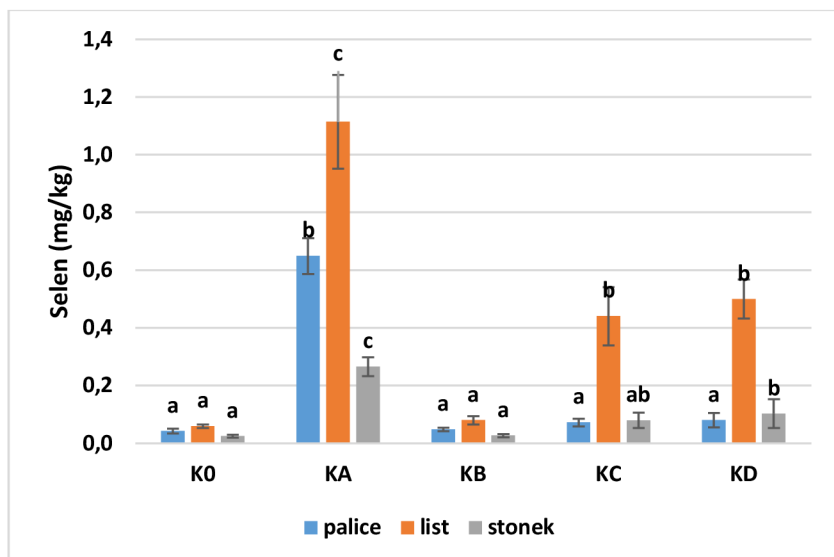


Graf č.1: Výnos nadzemní biomasy kukuřice dle jednotlivých variant

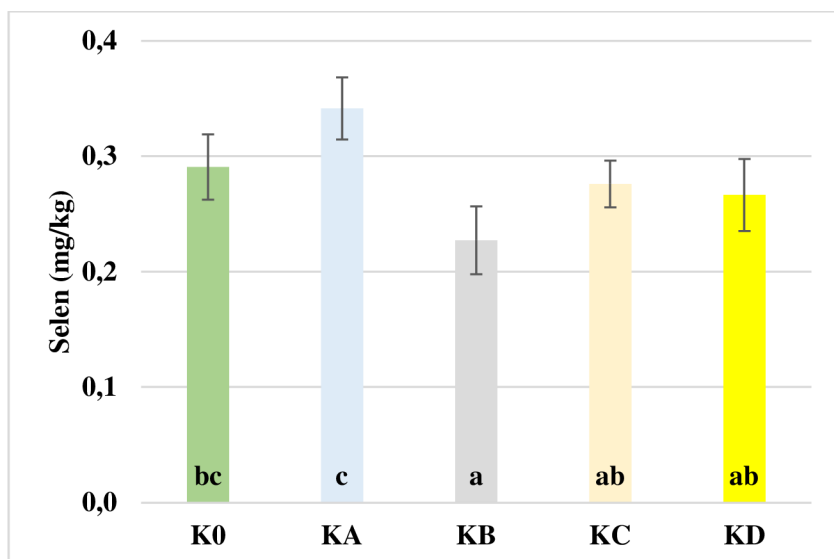


Graf č.2: Výnos kořenů kukuřice dle jednotlivých variant

Grafy 1 a 2 ukazují výnosy suché biomasy kukuřice dle jednotlivých variant. U nadzemní biomasy je zřejmé, že aplikace Se výnos neovlivnila. U kořenů se zdá, že aplikace Se snížila výnos kořenů, přičemž nejvyšší pokles výnosu byl zaznamenán u varianty KB, tedy té, kde byly aplikovány komerčně dostupné nanočástice Se.



Graf č.3: Obsah selenu v sušině nadzemní biomasy kukuřice dle jednotlivých variant; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně neliší na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .



Graf č.4: Obsah selenu v sušině kořenů kukuřice dle jednotlivých variant; varianty označené stejnými písmeny se od sebe statisticky významně neliší na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ .

Grafy 3 a 4 dokumentují, že příjem selenu rostlinami kukuřice významně závisí na formě, ve které je podán. Aplikace roztoku selenanu vedla k významnému zvýšení obsahů Se v nadzemní biomase i v kořenech jak ve srovnání s kontrolou (K0), tak i ve srovnání s aplikací nanočástic. Aplikace komerčně dostupných nanočástic Se (KB) nevedla ke změně obsahu Se v nadzemní biomase a v případě kořenů dokonce vedla ke snížení obsahu Se. Nanočástice Se vyrobené na VŠCHT pak zvýšily obsah Se v nadzemní biomase kukuřice ve srovnání s kontrolou, na obsahu Se v kořenech se tato aplikace neprojevila. Využití smáčedla (varianta

KD) nevedlo ke zvýšení příjmu Se povrchem listu ve srovnání s variantou bez smáčedla (varianta KC).

## 6. Diskuse

V rámci řešeného projektu Národní agentury pro zemědělský výzkum (NAZV) č. QK22010037 byla provedena řada experimentů s cílem zjistit akumulční potenciál selenu v různých plodinách. Kromě kukuřice, která byla hodnocena v rámci této práce, byl ještě sledován vliv foliární aplikace Se na rostliny pšenice a sóji, přičemž byly testovány různé dávky aplikovaného selenanu. Pokus byl proveden maloparcelkovým způsobem v reálných provozních podmínkách (Száková et al. 2022). Výsledky ukázaly, že pro efektivní akumulaci selenu do pšeničného zrna je nejlepší použít jednu plnou dávku, která nemá vliv na tvorbu biomasy a zajišťuje výrazně vyšší obsah selenu v zru i ve slámě pěstované pšenice. Sója akumuluje významně vyšší obsah selenu než pšenice ozimá, zejména v semenech rostlin. S rostoucí dávkou foliárně aplikovaného selenu se zvyšuje obsah tohoto prvku v semenech rostlin. Obě zkoumané plodiny mají vysoký potenciál pro využití v biofortifikačních strategiích, protože dokáží akumulovat vyšší hodnoty selenu a snižovat tak deficit selenu ve stravě lidí a zvířat (Száková et al. 2022).

Jak je zřejmé z grafů 3 a 4, i kukuřice v nádobovém experimentu reagovala pozitivně na foliární aplikaci Se a je také možno uvažovat i využití této plodiny v biofortifikačních projektech s cílem zvýšit příjem Se zejména v chovech skotu. Přestože se jednalo o foliární aplikaci, zvýšené obsahy Se ve srovnání s kontrolou byly pozorovány i v kořenech. Podobný výsledek zaznamenali i Šindelářová et al. (2015) v experimentu s brokolicí, kdy se foliární aplikace Se odrazila i na zvýšení obsahu tohoto prvku v kořenech (Száková et al. 2022).

Drahoňovský et al. (2016) provedli rovněž maloparcelkový experiment, kdy byla postřikem selenu ošetřena neobdělávaná louka. Bylo vybráno 12 druhů rostlin rostoucích na této louce a na nich bylo testováno, jak dobře přijímají selen. V tomto případě byla provedena foliární aplikace seleničitanu sodného v dávkách 25 a 50 g Se/ha a byla také zahrnuta neošetřená kontrolní varianta. Výsledky ukázaly, že aplikace selenu pomocí listové aplikace skutečně zvýšila obsah selenu v rostlinách, přičemž byly prokázány velké mezidruhové rozdíly. Největší příjem selenu byl zaznamenán u rostlin *Veronica chamaedrys*, *Stellaria holostea*, *Gallium aparine* a *Urtica dioica*, zatímco rostliny *Cirsium arvense* a *Carex vesicaria* měly nejnižší příjem selenu. V rostlinách byly detekovány organické sloučeniny selenu, přičemž nejčastějšími byly selenan a selenometionin, které byly přítomny ve všech rostlinách. Výsledky také naznačily rozdíly v transformaci selenu mezi jednoděložnými a dvouděložnými rostlinami, což se týkalo i minoritních organických sloučenin selenu, jako je selenocystin a Se-methylselenocystein (Babula et al. 2008). Je tedy zřejmé, že případné ošetření lučního porostu selenem může zvýšit příjem Se u hospodářských zvířat na pastvě.



Ve srovnání s aplikací roztoku selenanu nebo seleničitanu, účinek aplikace nanočástic Se byl významně horší a nepomohla ani aplikace smáčedla, které mělo zvýšit pokrývnost listu aplikovanými nanočásticemi. Při foliární aplikaci mohou nanočástice vstupovat do listu pouze průduchy (Lv et al. 2019) a záleží tedy jak na velikosti nanočástic tak i na velikosti průduchů. Lze spekulovat, že v našem případě byly nanočástice příliš velké. Eichert a Goldbach (2008) studovali průchod polystyrenových nanočástic průduchy listů a zjistili, že nanočástice o velikosti 43 nm průduch prošly, zatímco částice o velikosti 1,1  $\mu\text{m}$  již neprošly. Je tedy zřejmé, že optimalizace velikosti nanočástic tak aby byly posléze vhodné pro foliární aplikaci na konkrétní plodinu musí být předmětem dalšího intenzivního výzkumu (Száková et al. 2022).

## 7. Závěr

- Selen je esenciální prvek pro člověka i hospodářská zvířata, který může mít pozitivní i negativní následky. Optimalní hnojení selenem by mohlo zvýšit obsah selenu v biomase kukuřice, což by bylo pro zmírnění nedostatku selenu v cílových oblastech příznivé. Výsledky této studie by mohly přinést užitečné informace pro efektivní pěstování kukuřice seté (*Zea mays*) s ohledem na zvýšený příjem selenu pro lidský, zvířecí i rostlinný organismus.
- V nádobovém pokusu byl testován vliv foliární aplikace selenu na příjem tohoto prvku rostlinami kukuřice, přičemž byly porovnávány různé formy aplikovaného selenu včetně nanočástic.
- Samotný výnos možná nebyl nijak zvlášť ovlivněn, avšak příjem selenu na dané rostliny závisel na to, v jaké formě se selen aplikoval. Aplikace selenanu vedla ke značnému zvýšení obsahu selenu v biomase ve srovnání s kontrolou (KA). Aplikace nanoselenu neměla žádný vliv oproti komerčnímu selenu (KB). Aplikace nanoselenu ve spolupráci s VŠCHT (KC) zaznamenává nárůst selenu v biomase, ale nijak zásadně se neliší od výsledků, kde bylo přidáno smáčedlo (KD). Pokud se jedná o aplikace selenu, tak nejlépe se projevil roztok selenanu, zatímco komerční se neprojevil vůbec.

## 8. Literatura

- Abrams, MM, Shennan C, Zasoski R.J, Burau R.G. 1990. Selenomethionine uptake by wheat seedlings. *Agronomy Journal* 82, 1127-1130.
- Ajwa HA, Banuelos GS, Mayland HF 1998. Uptake of selenium by plants from soils amended with inorganic and organic materials. *Journal of Environmental Quality*. 27, 1218-1227.
- Anjum NA, Ahmad I, Válega M, Figueira E, Duarte AC, Pereira E. 2013. Phenological development stages variation versus mercury tolerance, accumulation and allocation in salt marsh macrophytes *Triglochin maritima* and *Scirpus maritimus* prevalent in Ria de Aveiro coastal lagoon (Portugal). *Environmental Science Pollution Research* 20:3910–3922.
- Arvy MP. 1993. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*). *J Exp Bot* 44:1083–1087. Bankhofer, Hademar. 1996. Bioselen: přirozená obrana vašeho imunitního systému. 1. vyd. Olomouc: Fin, 151 s. ISBN 80-7182-029-6.
- Babula P, Adam V, Opatrilova R, Zehnalek J, Havel L, Kizek R. 2008. Uncommon heavy metals, metalloids and their plant toxicity: a review. *Environmental chemistry of the elements*. 6(4), 189-213.
- Baik MH, Lee SY, Jeong J (2013) Sorption and reduction of selenite on chlorite surfaces in the presence of Fe (II) ions. *Journal of Environmental Radioactivity* 126:209–215.
- Banuelos GS, Lin ZQ. 2005. Phytoremediation management of selenium-laden drainage sediments in the San Luis Drain: a greenhouse feasibility study. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 62:309–316.
- Bisbjerg B. 1972. Riso report no. 200: Studies on selenium in plants and soils. Copenhagen, Denmark: Danish Atomic Energy Commission Research Establishment Riso.
- Blaylock MJ, James BR. 1994. Redox transformations and plant uptake of selenium resulting from root–soil interactions. *Plant and Soil* 158, 1–12.
- Brevik EC. 2009. Soil, food security and human health. Soil, plant growth and crop production. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, produced under the auspices of UNESCO. Encyclopedia of Life Support Systems. Publishers, Oxford.
- Brown TA and Shrift A. 1982. Selenium: Toxicity and tolerance in higher plants. *Biol. Rev.* 57, 59–84.

- Carter MR. 1993. Soil sampling and methods of analysis. Canadian Society of Soil Science, Lewis Bola Carter, FL, pp 40–75.
- Cartes P, Shene C, Mora ML. 2006. Selenium distribution in ryegrass and its antioxidant role as affected by sulfur fertili-zation. *Plant and Soil* 285:187–195.
- Clemens S. 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* 88:1707–1719.
- Costa C, Jesus-Rydin C. 2001. Site investigation on heavy metals con- taminated ground in Estarreja—Portugal. *Engineering Geology* 60:39–47.
- Darcheville O, Février L, Haichar FZ, Berge O, Martin-Garin A, Renault P 2008. Aqueous, solid and gaseous partitioning of selenium in an oxic sandy soil under different microbiological states. *Journal of Environmental Radioactivity* 99:981–992.
- De Gregori I, Lobos MG, Pinochet H. 2002. Selenium and its redox speciation in rainwater from sites of Valparaiso region in Chile, impacted by mining activities of copper ores. *Water Research* 36, 115–122.
- Dhillon KS, Dhillon SK. 2003. Distribution and management of seleniferous soils. *Advances in Agronomy* 79, 119–184.
- Dhillon KS, Dhillon SK. 2009. Selenium concentrations of common weeds and agricultural crops grown in the seleniferous soils of northwestern India. *Science of Total Environment* 407(24):6150–6156.
- Djanaguiraman, M, Prasad, PVV, Seppaenen M. 2010. Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage during high temperature stress by enhancing antioxidant defense system. *Plant Physiology Biochemistry* 48, 999-1007.
- Drahoňovský, J., Száková, J., Mestek, O., Tremlová, J., Kaňa, A., Najmanová, J., Tlustoš, P. 2016. Selenium uptake, transformation and inter-element interactions by selected wildlife plant species after foliar selenate application. *Environmental and Experimental Botany*, 125, 12-19.
- Ellis DR, Salt DE. 2003. Plants, selenium and human health. *Curr Opin Plant Biol* 6:273–279.
- Fellowes J, Patrick R, Boothman C, Al Lawati W, van Dongen B, Charnock J, Lloyd J, Pearce C. 2013. Microbial selenium transformations in seleniferous soils. *Eur J Soil Sci* 64:629–638.
- Feng RW, Wei CY, Tu SX, Sun X. 2009. Interactive effects of selenium and arsenic on the ir uptake by *Pteris vittata* L. under hydroponic conditions. *Envi-ronmental and Experimental Botany* 65 (2–3), 363–368.
- Germ M, Stibilj V. 2007. Selenium and plants. *Acta Agricultura Slovenica*, 89: 65–71.

- Goodman S. 1988. Therapeutic effects of organic germanium. *Medical Hypotheses*, 26(3), 207-215.
- Hawkesford MJ, Zhao F-J (2007) Strategies for increasing the obsah selenu v pšenici. *Journal of Cereal Science* 46:282-292.
- Heczková K. 2009. Vliv selenu na kolorektální karcinom. *Výživa a potraviny*. Praha: Společnost pro výživu. č. 1. ISSN 1211 - 846X.
- Horký P, Jančíková P, Sochor J, Hynek D, Chavis GJ, Ruttkay-Nedecký B, Cernei N, Zítka O, Zeman L, Adam V, Kizek R. 2012. Effect of organic and inorganic form of selenium on antioxidant status of breeding boars ejaculate revealed by electrochemistry. *International journal of electrochemical science*, 9643–9657 ISSN: 1452-3981.
- Church DC, Pond WG. 1989. *Basic Animal Nutrition and Feeding*. 3rd ed. John Wiley and Sons, New York.
- Keskinen R, Turakainen M, Hartikainen H (2010) Plant availability of soil selenate additions and selenium distribution within wheat and ryegrass. *Plant and Soil* 333:301–313.
- Kikkert, J., Berkelaar, E. 2013. Uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium by plants. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 65, 458-465.
- Kim YY, Mahan, DC. 2003. Biological aspects of selenium in farm animals. *Asian-australasian Journal of Animal Sciences*. 435-444. ISSN: 0021-8812.
- Khan S, Cao Q, Zheng YM, Huang YZ, Zhu YG. 2008. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 152(3), 686-692.
- Kost D, Chen L, Dick WA. 2008. Predicting plant sulfur deficiency in soils: results from Ohio. *Biology and Fertility of Soils* 44:1091–1098.
- Kvíčala J. 1999. Selen a organismus. *Časopis lékařů českých*, č. 4, s. 99-106. ISSN 0008-7335.
- Reilly, Conor. 2006. *Selenium in food and health*. 2nd Edition. New York: Springer, ISBN 13: 978-0387-33243-7.
- Leduc, D.L., Tarun, A.S., Montes-Bayon, M. et al. (2004) Overexpression of selenocysteine methyltransferase in *Arabidopsis* and Indian mustard increases selenium tolerance and accumulation. *Plant Physiology* 135, 377–383.
- Lee CK, Nam JH, Kim JC, Koo BC. 2003. Review on the selenium, an essential trace mineral, *Korea J. Crop Sci.* 48, 13-23.

- Lv Y, Li Y, Wang L. 2019. Emergence of plasmid-mediated high-level tigecycline resistance genes in animals and humans, Institute of Clinical Pharmacology, Peking University First Hospital, Beijing, China.
- Lyons GH, Stangoulis JCR, Graham RD. 2005. Tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) to high soil and solution selenium levels. *Plant Soil* 270:179–188.
- Mackowiak CL, Amacher MC (2008) Soil sulfur amendments suppress selenium uptake by alfalfa and Western wheatgrass. *Journal of Environmental Quality* 37:772–779.
- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants, 2nd ed. Academic Soil, London.
- Mendel, R. (Eds.), *Plant Cell Monographs. Cell Biology of Metals and Nutrients*, vol. 17. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 225–241.
- Nriagu JO. 1989. A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals. *Nature* 338, 47–49.
- Park M, Chon HT, Marton L (2010) Mobility and accumulation of selenium and its relationship with other heavy metals in the system rocks/soils/crops in areas covered by black shale in Korea. *J Geochem Explor* 107:161–168.
- Pilon-Smits EAH, Quinn CF. 2010. Selenium metabolism in plants. In: Hell, R., Passwater RA. 1997. *Vše o selenu*. Praha: Pragma, 97 s. ISBN: 80-7205-902-5.
- Prabha D, Sivakumar S, Subbhuraam CV, Son HK. 2015. Responses of *Portulaca oleracea* Linn. to selenium exposure. *Toxicology and Industrial Health* 31, 412–421.
- Raskin I, Ensley BD. 2000. *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. John Wiley, New York.
- Reis AT, Rodrigues S, Araújo C, Coelho JP, Pereira E, Duarte AC. 2009. Mercury contamination in the vicinity of a chlor-alkali plant and potential impacts on local population. *Science of The Total Environment* 407:2689–2700.
- Rodrigues SM, Pereira ME, Duarte AC, Römkens PFAM. 2012. Soil-plant-animal transfer models to improve soil protection guidelines: a case study from Portugal. *Environment International* 39:27–37.
- Sasmaz A. 2009. The distribution and accumulation of selenium in root and shoot of the plants naturally grown in the soils of Keban's Pb–Zn–F mining area, Turkey. *International Journal of Phytoremediation* 11:385–395.
- Shriver DF, Atkins PW. 1999. *Inorganic chemistry*, 3rd edn. Oxford University Press, Oxford.
- Soares EV, Soares HMVM. 2012. Bioremediation of industrial effluents containing heavy metals using brewing cells of *Saccharomyces cerevisiae* as a green technology: a review. *Environmental Science and Pollution Research* 19:1066–1083.

- Song U, Hong JE, An JH, Chung JS, Moon JW, Lim JH, Lee EJ. 2011. Heavy metal accumulation in halophyte *Salicornia europaea* and salt marsh in west-coast of Korea. *Journal of Environmental Sciences*, 20(4), 483-491.
- Surai, PF. 2006. Selenium in nutrition and health. Nottingham, U. K.: Nottingham University Press, 974 s. ISBN 1-904761-16-X. Swaine DJ. 1962. Technical Communication 52: The trace-element content of fertilisers. London: Commonwealth Agricultural Bureaux.
- Schmidt RH, Rodrick GE. 2003. Food safety handbook. Hoboken: Wiley-Interscience, 850 s. ISBN 0-471-21064-1.
- Száková J, Tlustoš P, Kaplan L, Praus L, Mrština T, Stádník L, Stupka R, Procházka J, Hlaváček I. 2022. Implementace agronomických selenizačních postupů při výrobě mléka a mléčných výrobků jako funkčních potravin. Průběžná zpráva o realizaci projektu QK22010037 za rok 2022, Ministerstvo zemědělství 2022.
- Šindelářová, K., Száková, J., Tremlová, J., Mestek, O., Praus, L., Kaňa, A., Najmanová, J., Tlustoš, P. 2015. The response of broccoli (*Brassica oleracea* convar. *italica*) varieties on foliar application of selenium: uptake, translocation, and speciation. *Food Additives and Contaminants Part A-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment*, 32, 2027-2038.
- Taylor GJ, Crowder AA. 1983. Use of DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plants. *American Journal of Botany* 70:1254–1257.
- Terry N, Zayed AM, de Souza MP, Tarun AS. 2000. Selenium in higher plants. *Annu Rev Plant Physiol Plant Molecular Biology* 51:401–432.
- Velíšek J. 1999. *Chemie potravin*. 2. Vyd. 1. Tábor: OSSIS, 304 s. ISBN 80-902391-4-5.
- Washington 1985. National Research Council, Subcommittee on Sheep Nutrition. Nutrient requirements of sheep. 6th ed., National Academy Press, ISBN 0309035961.
- White PJ, Bowen HC. 2004. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*. *Journal of Experimental Botany* 55:1927–1937.
- White PJ, Brown PH. 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany* 105:1073-1080.
- White PJ, Broadley MR. 2009. Biofortification of crops with seven mineral elements, often lacking in the human diet-iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist* 182, 49-84.
- Wilber CG. 1980. Toxicology of Se: a review. *Clinical Toxicology* 17:171–230.

- Yilmaz DD. 2007. Distribution of selenium and some trace elements at different depths of soil core. *Fresenius Environmental Bulletin* 16(11):1351–1354.
- Zhao C, Ren J, Xue C, Lin E. 2005. Study on the relationship between soil selenium and plant selenium uptake. *Plant and Soil* 277:197–206.
- Zhao FJ, Lombi E, Mc Grath SP. 2003. Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil* 249:37–43.