

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

BRNO 2016

Bc. LADISLAV TOBEK



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce: Bc. Ladislav Tobek
Studijní program: Fytotechnika
Obor: Fytotechnika

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Škarpa, Ph.D.

Název práce: **Uplatnění vybraných forem selenu při pěstování máku setého (*Papaver somniferum* L.)**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literárního přehledu na zadané téma
2. Založení vegetačních experimentů s mákem setým a jeho ošetřování v průběhu vegetace dle zvolené metodiky. Mimokořenová aplikace Se ve vybraných formách (selenan a seleničitan)
3. Analýza rostlinného materiálu na obsah selenu
4. Vyhodnocení produkčních a kvalitativních parametrů sklizně máku setého
5. Navržení a realizace metodiky statistického zpracování dat

Rozsah práce: 50 - 60 stran

Literatura:

1. RICHTER, R. -- LOŠÁK, T. -- ŠKARPA, P. -- HŘIVNA, L. a kol. *Mák*. In: *Mák*. Powerprint, 2010. s. 129--158. ISBN 978-80-904011-8-1.
2. ŠKARPA, P. -- RICHTER, R. Foliar Nutrition of Poppy Plants (*Papaver Somniferum* L.) with Selenium and the Effect on its Content in Seeds. *Journal of Elementology*. 2011. sv. 16, č. 1, s. 85--92. ISSN 1644-2296.
3. JEŽEK, P. -- ŠKARPA, P. -- LOŠÁK, T. -- HLUŠEK, J. -- JŮZL, M. -- ELZNER, P. *Selenium - an important antioxidant in crops biofortification*. In: *Antioxidant Enzyme*. 1. vyd. 2012. s. 343--368. ISBN 978-953-51-0789-7.
4. Licencované databáze: CAB abstract (online)
5. Licencované databáze: Biological Abstracts (online)
6. Licencované databáze: SCOPUS (online)
7. Licencované databáze: Web of Science (online)

Datum zadání: březen 2016

Datum odevzdání: duben 2016

Bc. Ladislav Tobek
Autor práce

doc. Ing. Petr Škarpa, Ph.D.
Vedoucí práce

doc. Ing. Petr Škarpa, Ph.D.
Vedoucí ústavu

doc. Ing. Pavel Ryant, Ph.D.
Děkan AF MENDELU

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Uplatnění vybraných forem selenu při pěstování máku setého (*Papaver somniferum* L.) vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....

podpis

Poděkování

Touto cestou děkuji svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Škarpovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při psaní této práce.

Abstrakt:

Selen je jedním z esenciálních prvků pro lidský organismus. Jedním z možných přístupů ke zvýšení jeho množství v lidské potravě je agronomická biofortifikace plodin. Jelikož je Česká republika celosvětově největším pěstitelem máku, nabízí se možnost zvyšování nutriční hodnoty právě u této plodiny. Cílem diplomové práce bylo ověření vhodnosti uplatnění vybraných forem selenu při biofortifikaci semen máku setého (*Papaver somniferum*). Kromě studia distribuce selenu v rostlině máku a jeho akumulace ve sklizeném semeni byl zjišťován vliv jeho půdní a mimokořenové aplikace na výnos a hmotnost tisíce semen. V jednoletém nádobovém pokusu byl půdně aplikován selen v dávkách 150, 300 a 600 g Se.ha⁻¹ ve formě SeO₃²⁻ a SeO₄²⁻. V jednoletém polním maloparcelkovém pokusu byl selen v uvedených formách aplikován mimokořenově v dávkách 20 a 40 g Se.ha⁻¹. Z analýzy distribuce selenu v jednotlivých částech rostliny je patrné, že zatímco seleničitan byl akumulován především v jeho dolní části (stonku a listech) a do tobolky se dostalo max. 25,1 % celkově odebraného Se. Selen ve formě selenanu byl uložen v tobolce z jeho celkově akumulovaného množství v rostlině máku z 39,9 – 62,6 %. Půdní ani mimokořenová aplikace selenu v obou formách signifikantně neovlivnila výnos ani hmotnost tisíce semen. V nádobovém i polním pokusu aplikace stupňovaných dávek selenu ve formě seleničitanu i selenanu průkazně zvýšila jeho obsah ve sklizeném semeni. Z výsledků se selenan jeví jako vhodnější forma selenu pro biofortifikaci máku.

Klíčová slova: selen, seleničitan, selenan, mák, biofortifikace, hmotnost semen, výnos

Abstract

Selenium is an essential element for human organism. One of the possible ways to increase its quantity in food is a biofortification of crops. Czech Republic is the largest producer of poppy seeds in the world, it could be therefore viable to increase the nutritional value of selenium in this crop. The goal of this thesis was a recognition of suitability of selected forms of selenium for biofortification of seeds of opium poppy (*Papaver somniferum*). Aside from the distribution of selenium in the plant of poppy and its accumulation in the harvested seeds this study also investigates the effect of its soil and foliar application on the yield and weight of a thousand of seeds. The selenium was applied into the soil in 150, 300, and 600 g Se.ha⁻¹ doses in the form of SeO₃²⁻ and SeO₄²⁻ in our one-year container experiment. The same forms of selenium were also applied foliarly in the 20 and 40 g Se.ha⁻¹ doses in our one-year small-plot experiment. It is evident from the analysis of the distribution of selenium in the individual parts of the plant that selenite was accumulated primarily in the lower part of the plant (stalk and leaflets) and only a maximum of 25.1% of the total was integrated in the capsule. Selenium, in the form of selenate, was contained in the capsule at a rate of 39.9 to 62.6% of the overall weight of the selenium contained in the whole plant. Soil and foliar application did not influence the yield and weight of a thousand of seeds. In both the container and field experiment the application of an increasing amount of selenium in the form of both selenite and selenate has significantly increased its presence in the harvested seed. Our results suggest that selenate is a better form of selenium for the biofortification of poppy.

Key words: selenium, selenite, selenate, poppy, biofortification, weight of seeds, yield

Obsah

1 Úvod.....	10
2 Literární přehled.....	11
2.1 Mák.....	11
2.1.1 Historie pěstování a botanická charakteristika máku setého.....	11
2.1.2 Morfologie máku.....	12
2.1.3 Pěstování máku v České republice.....	13
2.2 Distribuce selenu v rostlině.....	14
2.3 Význam selenu pro člověka.....	19
2.3.1 Nedostatek selenu.....	20
2.3.2 Toxicita selenu.....	22
2.3.3 Příjem selenu v potravě.....	22
2.4 Biofortifikace.....	25
2.4.1 Mikroprvkový nedostatek v lidské výživě:.....	25
2.4.2 Agronomická biofortifikace:.....	27
2.4.3. Agronomická biofortifikace selenem.....	28
3 Cíl práce a hypotézy.....	31
4 Metodika pokusu.....	32
4.1 Charakteristika použité odrůdy máku v pokusech.....	32
4.2 Metodika nádobového pokusu.....	32
4.3 Metodika polního pokusu.....	34
4.3.1 Půdně agrochemická a klimatická charakteristika stanoviště.....	34
4.3.2 Metodika založení a vedení pokusu.....	36
4.4 Analytické metody.....	37
4.4.1 Analýza půdy.....	37
4.4.2 Analýza rostlinné hmoty.....	38
4.4.3 Statistická analýza výsledků.....	38
5 Výsledky a diskuse.....	39
5.1 Nádobový pokus.....	39
5.1.1 Vliv dávky selenu na jeho obsah a odběr rostlinou.....	39
5.1.2 Výnosové výsledky nádobového pokusu.....	44
5.1.3 Obsah selenu v semeni máku.....	47
5.2 Polní pokus.....	50
5.2.1 Výnosové výsledky pokusu.....	50
5.2.2 Obsah selenu v semeni máku.....	51

6 Závěr	53
7 Doporučení pro praxi	54
8 Literatura.....	55
8 Seznam obrázků, grafů a tabulek	66
8.1 Seznam obrázků	66
8.2 Seznam grafů.....	66
8.3 Seznam tabulek	66

1 ÚVOD

Selen (Se) je esenciální mikroprvek nezbytný pro správnou funkci lidského i zvířecího organismu. Jako součást imunitních mechanismů sehraává selen důležitou roli v ochraně lidského organismu před oxidativním stresem vyvolaným volnými radikály. Selen je také nedílnou součástí některých důležitých enzymů, bez něho by nebyla například možná správná funkce hydroxid peroxidázy. I přes jeho nenahraditelnost se na mnoha místech světa potýká populace s jeho nedostatkem. Přirozeně selen získává člověk z rostlinné a živočišné potravy. Množství selenu v potravě je dáno lokálními půdními podmínkami, zejména záleží na obsahu selenu v půdě a na jeho přístupnosti pro rostliny.

Mák setý (*Somnifer papaverum*) patří mezi historicky významné plodiny pěstované na našem území. V posledních letech se ročně pěstuje na výměře 20 000-30 000 ha, což činí z České republiky největšího producenta potravinářského máku na světě. Průměrné výnosy se u nás v současnosti pohybují v rozmezí 0,7-0,9 t.ha⁻¹. Mák se nejčastěji používá v pekařství, v malém množství se z něho lisuje olej. Makovina se využívá ve farmaceutickém průmyslu k získávání morfinu. Mák lze pěstovat ve všech výrobních oblastech naší republiky, mimo místa s vyšší nadmořskou výškou. Úskalí pěstování máku spočívá v problematice založení a vzcházení porostu a vyšší náchylnosti na zanedbání ochrany.

Jednou z možných cest využívaných ke zvyšování zásobení populace selenem je agronomická biofortifikace plodin, která umožňuje co nejrovnoměrěji suplementovat populaci především v hospodářsky nerozvinutých zemích.

2 LITERÁRNÍ PŘEHLED

2.1 Mák

2.1.1 Historie pěstování a botanická charakteristika máku setého

Mák setý (*Papaver somniferum*) je jednou z prvních léčivých rostlin, které lidstvo poznalo (Kapoor, 1995). První potvrzené nálezy máku jsou staré asi 4000 let z mladší doby kamenné, konkrétně z neolitu, pocházejí z podhůří Alp. Vyobrazení máku sloužilo jako ozdoba běžných předmětů (nádob, látky) i peněz už 2500-1000 let př. n. l. Staří Egypťané po sobě zanechali nálezy nádob tvarovaných do podoby makovic. Tradičně pěstovanou rostlinou v Turecku je mák už od 3000 př. n. l. (Vašák, 2010).

Mák je zmiňován i v řecké mytologii v 9. století př. n. l. Homér ve svém díle Ilias a Odyssea píše o směsi trojské Heleny, která obsahuje hlavně opium tlumící bolest i neshody (Vašák, 2010). Hippokrates ve svých skriptech ze 4. století př. n. l. uvádí zmínku o léčivé rostlině, bílém máku. Popisuje hypnotický účinek šťávy z této rostliny a semenům přisuzuje vysokou nutriční hodnotu. Ve 3. století př. n. l. v díle Dějiny rostlin od Theofrasta jsou popisovány vlastnosti makové šťávy, v té době nazývané „mekonium a opos“, která se extrahuje mechanickým narušením tobolek (Kuhn, 1936).

Z Řecka se opium začalo šířit v 1. století př. n. l. do Malé Asie, kde se z něho stala významná komodita. S islámem se opium rozšiřovalo v 7. století v arabském Kalifátu. V 8. století se opium dostalo do Indie a Číny. Bylo zde využíváno k léčebným účelům. Od 16. století se v Číně začala šířit narkomanie. Největší rozmach opia byl po roce 1644, kdy bylo v Číně zakázáno kouření tabáku. Narkomanie se rozšířila tolik, že byl čínský císař nucen v roce 1729 opium zakázat. Hlavním dovozcem do Číny byla Indie, tehdy pod nadvládou Británie, která z obchodu přestala po zákazu profitovat. Reakcí byla 1. a 2. opiová válka, které Čína prohrála a kouření opia bylo opět povoleno (Vašák, 2010).

V roce 1753 známý botanik Carl Linné botanicky popsal mák setý (*Papaver somniferum*)-(Vašák, 2010). Mák setý patří do čeledi makovitých (*Papaveraceae*), podčeledi *Papaveriodeae* a rodu *Papaver*, kde je zastoupeno přibližně 100 druhů rozšířených po celém světě. Systematice druhu *Papaver somniferum* se věnovalo

množství botaniků. V roce 1824 botanik De Candolle použil jako systematické znaky barvu semene, barvu okvětních listů a typ tobolky (otevřená nebo zavřená). V roce 1931 prezentovala botanička Bazilejská svoji klasifikaci založenou na geografických rasách. Její klasifikace vycházela z typu tobolky (otevřená nebo uzavřená) a formy (obsah alkaloidů, zbarvení semene, výška rostliny, tvar tobolky, atd.). Tato klasifikace se s některými úpravami používá do dnes (Fábry, 1975).

2.1.2 Morfologie máku

Dobře vytvořená kořenová soustava máku setého je složena ze silného dužnatého hlavního kořene s několika silnějšími vedlejšími kořeny a velkým počtem kořenových vlásků. Kořenová soustava prorůstá do maximální hloubky jen 50-70 cm, z tohoto důvodu se dospělé rostliny působením větru snadno vyvrací (Baranyk, 2010). Při bezorebné technologii zpracování půdy dochází k zakrnění hlavního kúlového kořene (Bechyně, 2001).

Mák má olistěnou lodyhu na průřezu okrouhlou, ve středu s dutinou, která obsahuje houbovitou dřev. Lodyha dorůstá do výšky 80-150 cm. Výška je značně ovlivněna genotypem, ale také výrazně konkrétními lokálními podmínkami (Baranyk, 2010). Lodyha se rozvětňuje ve výšce 40-50 cm nad zemí. Její průměr je 1,8-1,9 cm těsně nad povrchem a 1,0-1,3 cm pod rozvětvením. České odrůdy mají 3-7 větví, které jsou jen málo olistěny nebo vůbec (Fábry, 1975).

Na každé rostlině je v průměru 15-28 vejčitých nebo srdcovitých listů. Okraj mají spodní listy hluboce vykrajovaný až laločnatý, horní listy pilovitý až zubatý se zvlněnou čepelí. Největší listy jsou na rostlině od spodní třetiny do poloviny lodyhy. Barva listů je světle zelená až šedozelená (Fábry, 1975). Epidermis je často krytá voskem. Stomata pokrývají list z obou stran. Na spodní straně listu jsou přítomny vlásky (Kapoor, 1995).

Květy máku jsou tvořeny dvěma kališními lístky opadávajícími při rozkvetení, čtyřmi korunními plátky a generativními orgány. Některé květy jsou celé bílé, ale většina má na spodku korunních plátků velkou tmavší nebo světlejší skvrnu. Tyčinek v květu bývá 100-250. Jejich žluté nebo namodralé prašníky uvolňují pylová zrna. Semeník je složen z 5-24 plodolistů, blizna je přisedlá. Mák je samosprašnou

rostlinou, ale je u něho možné z 30 % cizosprašení. Mák patří mezi entomofilní a anemofilní rostliny (Bechyně, 2001).

Tobolka máku může být otevřená (hledák) nebo uzavřená (slepák). Tvar a velikost tobolek záleží na odrůdě, agrotechnice, prostředí a hustotě porostu. Tvar tobolek bývá kulovitý, oválný nebo zploštělý. Obvykle je v makovici 4000-6000 semen, s hmotností v jedné makovici 2-3 g (Vašák, 2010).

Semena mají ledvinovitý, lehce zploštělý tvar. Povrch je nerovný tvořený jamkami. Délka makového semene je 1-1,5 mm, šířka 0,8-1,1 mm a tloušťka asi 0,6-0,75 mm. Hmotnost tisíce semen (HTS) je 0,25-0,75 g, v průměru tedy 0,50 g. Barva semen je závislá především na zvolené odrůdě, může být modrá, bílá, žlutá, růžová, šedá, fialová až černá (Fábry, 1975). Zralé makové semeno je ze 42-55 % tvořeno olejem. Při lehkém mechanickém poškození povrchu semen dochází k pronikání oleje na povrch, ke žluknutí oleje a ke zvyšování obsahu morfinu, k čemuž dochází i dlouhodobým skladováním (Vašák, 2010).

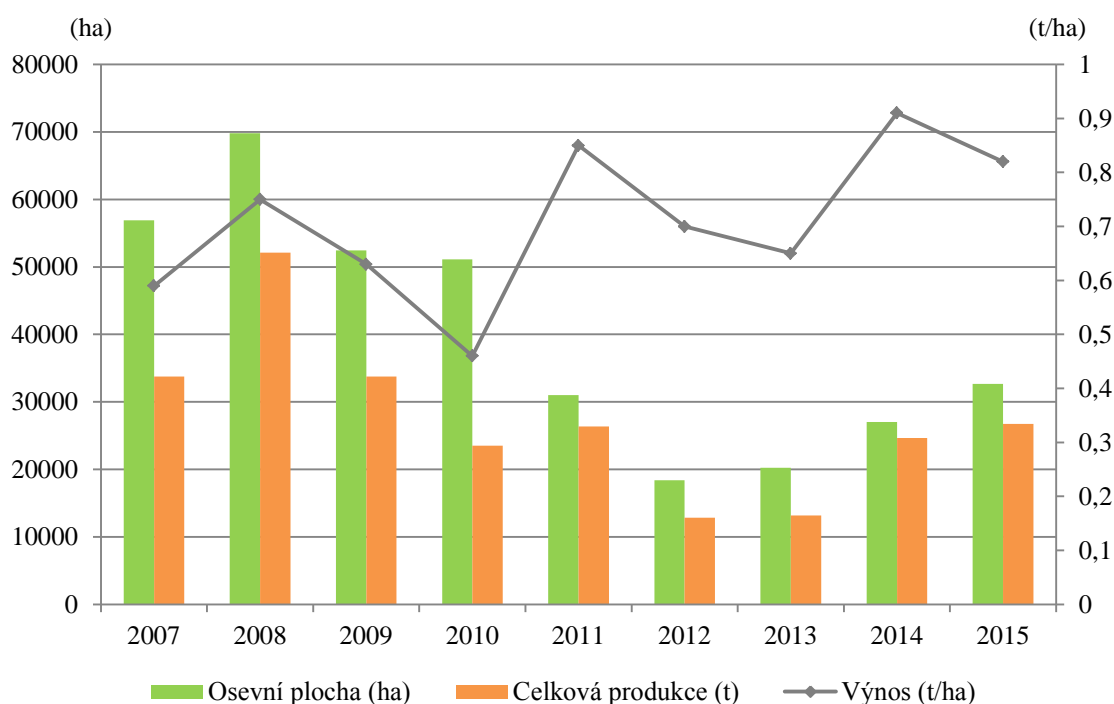
2.1.3 Pěstování máku v České republice

Mák je významnou, tradiční a dlouho pěstovanou plodinou na našem území. Až do začátku 19. století byl u nás mák pěstován jako zahradní plodina, později byl pěstován na poli v širokých řádkách kvůli nutné ruční okopávce, probírce a sklizni. Po roce 1970 se pěstování máku plně mechanizovalo do techniky pěstování v úzkých řádcích (Vašák, 2010).

Česká republika se řadí mezi největší světové pěstitele máku. Vývoj pěstitelských ploch a průměrných výnosů zobrazuje graf 1. Mák se u nás pěstuje především pro produkci semen a makoviny. Semena se využívají pro lidskou výživu a okrajově k lisování oleje. Makovina je zpracovávána na opium ve farmaceutickém průmyslu. Hlavní faktorem rozhodujícím o množství morfinu v makovině je odrůda. Výkupní cena je příznivá až od 0,5 %, proto se stále častěji pěstují speciální odrůdy, jako je Opal a Orbis, které mají vyšší obsah morfinu (Vrbovský, 2014). Celorepublikové výnosy na pěstitelských plochách se v poslední době pohybují kolem 0,7 t.ha⁻¹. V pokusech při ověřování registrovaných odrůd se výnosy pohybují v rozmezí 1,5-2,0 t.ha⁻¹. Z toho vyplývá, že výnosový potenciál není dostatečně využíván. Rozhodující je především

dobrý stav půdy a dostatek srážek (Zehnálek, 2014). Kritickým bodem agrotechniky máku je založení porostu a jeho vzcházení. Bylo zjištěno, že při výsevku 300 semen na 1 m², se sklízí přibližně 55 rostlin z 1 m², což představuje asi 20 %. K tomuto úbytku dochází především nevzejitím, napadením houbovými patogeny a poškozením krytonoscem kořenovým (Cihlář, 2013).

Graf 1 Vývoj ploch produkce a výnosu máku setého v letech 2007-2015 (ČSU, Kosek 2014)



2.2 Distribuce selenu v rostlině

Rostliny nejčastěji obsahují spíše menší množství selenu, kolem 25 µg.kg⁻¹, zřídka překračují hranici 100 µg.kg⁻¹. Přesto existují určité rostliny, které dokážou akumulovat i extrémní koncentrace selenu, i přes 1000 mg.kg⁻¹. Obsahu selenu v plodinách byla v poslední době věnována velká pozornost díky důležitosti selenu v lidském jídelníčku. Obecně lze uvést, že průměrná koncentrace selenu v obilninách je vyšší v oblastech s aridním klima než v oblastech humidních (Kabata-Pendias, 2011).

Rosenfield a Beath (1964) byli první, kdo klasifikoval rostliny do tří skupin podle úrovně příjmu selenu na půdách bohatých na tento prvek:

1. První skupinou jsou primární akumulátoři, někdy též nazývaní hyperakumulátoři. Této skupině rostlin se dobře daří na půdách s vysokým obsahem selenu a dokážou absorbovat až $1000 \text{ mg Se.kg}^{-1}$. Patří sem rody: *Astragalus*, *Machaeranthera*, *Haplopappus*, *Stanleya*, *Morinda*, *Lecythidaceae*, *Neptunia*.
2. Ve druhé skupině jsou rostliny nazývané sekundární akumulátoři, kteří dokážou vstřebat z půdy mnohem menší množství selenu, přibližně v rozmezí $50\text{-}100 \text{ mg Se.kg}^{-1}$. Zástupci této skupiny jsou rody: *Atriplex*, *Astragalus*, *Castilleja*, *Grindelia*, *Gutierrezia*, *Machaeranthera*, *Mentzelia*, *Brassica* (hořčice, kapusta, brokolice, květák).
3. Třetí skupinou jsou neakumulátoři, kteří dokážou akumulovat maximálně 50 mg Se.kg^{-1} . Do této skupiny patří většina kulturně pěstovaných plodin jako je pšenice ozimá (*Triticum aestivum*), pšenice tvrdá (*Triticum durum*), ječmen jarní (*Hordeum vulgare*), oves setý (*Avena sativa*), cukrová řepa (*Beta vulgaris*), jetel luční (*Trifolium pratense*) a další.

Pokud se rostliny pěstují na půdách bohatých na selenany, starší listy obsahují převážně anorganickou formu selenu (91 %), přitom mladé listy obsahují z 90-95 % selen vázaný organicky. Nejnižší koncentrace selenu je v kořenech, kde se nachází selen převážně organický (92 %). Předpokládá se, že metylselenocystein (MeSeCys) je v mladých listech během stárnutí metabolizován a Se je reoxidován na selenan. Další možné vysvětlení se naskytuje v transportu MeSeCys z mladých listů do listů ještě mladších (Cakir et al., 2012). Fyziologické rozdíly mezi hyperakumulátory a neakumulátory jsou v tab. 1.

Toxicita seleničitanu a selenanu pro většinu rostlin je připisována kombinaci faktorů. Prvně je seleničitan a selenan přijímán z půdy kořeny a translokován do ostatních částí rostlin. V metabolických reakcích jsou tyto ionty přeměněny do organických sloučenin selenu. Tyto organické sloučeniny, které jsou analogy sirných esenciálních sloučenin, zasahují do buněčných chemických reakcí. Jako hlavní příčina vzniku toxicity je začleňování těchto analogů (selenocysteinu a selenomethioninu) do bílkovin. Fyziologické a chemické rozdíly mezi selenem a sírou jsou malé, ale významné ve změně biologických funkcí těchto bílkovin. Základem tolerance k selenu

u akumulátorů je vyloučení selenu z tvorby bílkovin. Analýzy ukazují, že u akumulátorů je velké množství selenu uloženo ve dvou aminokyselinách netvořících proteiny, metylselenocystein a selenocystathionin. Tyto dvě sloučeniny jsou detekovány u neakumulátorů jen zřídka, tudíž se selen ukládá do proteinů (Brown a Shrift, 1982).

Selen je esenciální prvek pro člověka a zvířata, ale zatím nebylo dokázáno, že je esenciální i pro rostliny. Přesto byly pozorovány některé prospěšné vlivy selenu na růst rostlin. Selenem zásobené rostliny vykazují vyšší aktivitu glutathion peroxidázy a vyšší rezistenci k ultrafialovému záření. Mechanismus tohoto zjevného pozitivního efektu je přímý díky antioxidační aktivitě selenoenzymů, a nepřímý díky selenem regulované obecné stresové rezistenci (Pilon-Smits et al., 2009). Dodání selenu hyperakumulátorům i neakumulátorům přineslo ochranu proti různým herbivorům a také houbovým infekcím (Barillas et al., 2012).

Tab. 1 Fyziologické rozdíly mezi hyperakumulátory a neakumulátory selenu (Mehdawi a Pilon-Smits, 2011)

Vlastnosti	Hyperakumulátoři	Neakumulátoři
Příjem Se	Závislý na příjmu síry	Inhibován sírou
Transport Se z kořenů do listů	Vyšší	Nižší
Akumulace a tolerance Se	1000-15000 mg Se.kg ⁻¹	<1000 mg Se.kg ⁻¹
Volatilizace Se	Vyšší, jako dimethyldiselenid	Nižší, jako dimethylselenid
Distribuce Se (na úrovni orgánů)	Nejvyšší v reprodukčních orgánech	Nejvyšší v listech
Distribuce Se (na úrovni pletiv)	Nejvyšší v epidermis, pílů a vajíčkách	Nejvyšší v cévních svazcích
Hlavní forma selenu v pletivech	Methyl-SeCys	Selenan
Sezónní výkyvy Se	Nejvyšší na jaře	Nejvyšší v létě

Barillas et al. (2012) prezentují výsledky o distribuci selenu v jednotlivých orgánech kozince (*Astragalus bisulcatus*). Nejvyšší koncentrace Se byla naměřena v květu (4661 mg Se.kg⁻¹), následoval stonek (4557 mg Se.kg⁻¹), listy (3045 mg Se.kg⁻¹)

a kořeny ($704 \text{ mg Se.kg}^{-1}$). V květech bylo tedy 1,5x více selenu než v listech a 6,5x více než v kořenech. V rámci květu bylo nejvíce selenu zjištěno v květních obalech ($6095 \text{ mg Se.kg}^{-1}$) a okvětních listech ($4163 \text{ mg Se.kg}^{-1}$), méně pak v pestíku ($3575 \text{ mg Se.kg}^{-1}$) a tyčinkách ($1817 \text{ mg Se.kg}^{-1}$). Distribuce selenu v hlavním kořenu byla homogenní, s vyššími hodnotami v primární kůře a středovém válci, nižší v peridermu. Analýza primární kůry hlavního kořene ukázala, že 89 % selenu je zde přítomno v organické formě a 11 % jako elementární Se. V postranních kořenech a v připojených hlízkách bylo stejné množství selenu, ale v jiných formách. V postranních kořenech bylo 100 % organického selenu, ale v hlízkách pouze 46 % organické formy Se, dále 31 % elementárního Se a 23 % seleničitanu. V primární kůře stonku bylo detekováno 50 % organicky vázaného Se, 31 % elementárního Se a 16 % seleničitanu. 70 % celkového množství selenu v listech je obsaženo v trichomech, kde 98 % tvořily organické sloučeniny selenu (MeSeCys a γ -glutamyl-MeSeCys). Zbývajících 30 % Se bylo ve vlastním listu. V okvětních listech a pestíku je selen distribuován homogenně, pouze vajíčko obsahuje méně Se. V tyčince je nejvíce selenu v bazální části. Selenové formy byly ve všech částech zastoupeny obdobně, tedy 90 % organického Se, 7 % elementárního Se a 3 % seleničitanu. V semenech kozince byl selen koncentrován v embryu, nikoliv v obalu, forma selenu byla výhradně organická. Podobné výsledky měli u analýzy listů astříčky vřesovcovité (*Symphyotrichum ericoides*) Mehdawi et al. (2014), kde bylo 80-89 % selenu v organické formě, 6 % seleničitanů a 4% selenanů. Odlišné výsledky získali s *Machaeraanthera tanacetifolia*, která obsahovala jen 52-55 % Se v organické podobě, 23 % ve formě selenanu, 11% jako elementární Se a 10 % v podobě seleničitanu.

Obsah selenu v jednotlivých orgánech rostlin se mění v průběhu vegetace. Výsledky pokusů Galease et al. (2007) s hyperakumulátory ukazují specifický tok selenu z kořenů do mladých listů na jaře. Následuje remobilizace Se ze stárnoucích listů do reproduktivních tkání v létě a zpětný transport zpět do kořenů na podzim. Rozdíl koncentrace selenu v listu může být až desetinásobný v dubnu oproti říjnu. Keskinen et al. (2013) potvrzují u pšenice ozimé (*Triticum aestivum*) hnojené selenem, že nejvyšší koncentrace selenu byla nejdříve v mladých listech a později ve sklizňové zralosti v zrně. Naopak nejnižší byla v kořenech a stoncích zralých rostlin. Koncentrace selenu ve vegetativních orgánech se snižovala v průběhu stárnutí rostlin pšenice, kdežto v klasech se množství Se zvyšovalo. Množství selenu v kořenech bylo malé po celou

vegetační periodu. Ve sklizňové zralosti bylo v zrně přítomno 55 % z celkového selenu, 10 % bylo ve zbytku klasu, 15 % ve stonku, 15 % v listech a 5 % v kořenech. Na druhou stranu bylo zjištěno u jílku mnohokvětého (*Lolium multiflorum*) 80 % z celkového selenu v kořenech. Z toho vyplývá, že distribuce selenu mezi kořenovou a nadzemní částí se mohou u různých druhů výrazně lišit.

Sasmaz et al. (2009) zkoumali schopnost příjmu selenu a jeho distribuci v různých rostlinách za účelem stanovení optimálního bioakumulátora Se z půdy zamořené průmyslovou výrobou. Jeho výsledky ukazují jako ideální kozinec slizodárný (*Astragalus gummifer*), který dokázal přijmout nejvíce Se v daných půdních podmínkách (aridní a semiaridní klima) a uložit ho do listů v několikanásobně vyšších dávkách než ostatní rostliny v pokusu. Další rostlina s dobrými vlastnostmi k fytořemediaci je *Stanleya pinnata* (Parker et al., 2003). Z pěstovaných polních plodin se zdá být vhodnou k fytořemediaci řepka olejka (*Brassica napus*). Dhillon a Dhillon (2009) uvádějí její schopnost akumulovat v listech 157-209 mg Se.kg⁻¹, v zrně 64-201 mg Se.kg⁻¹ a ve stonku 42-93 mg Se.kg⁻¹.

Arvymu (1982) se podařilo pomocí radioaktivně značeného selenu zmapovat distribuční cesty selenu u fazolu obecného (*Phaseolus vulgaris*). Několik hodin po inkubaci kořenů v roztoku selenanu byla převážná část selenu akumulována v kořenech. Následoval transport xylenem do mladých listů a pupat. Sekundární redistribuce syntetizovaných produktů, jako jsou selenoaminokyseliny, probíhala floémem z dospělých listů. Po odstříhnutí listů se snížila koncentrace selenu ve floému na minimum, což znamená, že listy fazolu slouží rostlině jako redistribuční centra selenu.

Pro účinnou biofortifikaci plodin selenem je nezbytné, aby se dostatečné množství akumulovalo v jedlých orgánech. Toto množství by mělo po dlouhodobém konzumování výrobků z těchto plodin pozitivně zvyšovat hladinu přijímaného Se a pozitivně podpořit lidské zdraví. Orgán rostliny, kde se ukládá adekvátní množství selenu, je dán specifickým druhem rostliny a jejím metabolismem.

2.3 Význam selenu pro člověka

Selen tvoří nepostradatelnou složku potravy pro lidi i pro zvířata. Důležité je přijímat doporučenou denní dávku tohoto prvku, která je podle McKenzieho et al. (1998) 75 µg pro muže a 60 µg pro ženy. Pokud je příjem selenu vysoký, může být toxický. Při jeho nízkém příjmu dochází ke zdravotním komplikacím a ke vzniku specifických onemocnění. Selen se účastní ochrany tělních tkání proti oxidativnímu stresu, obranných reakcí proti infekci a ovlivňování růstu a vývoje. Obsah selenu v lidském těle se výrazně liší podle oblasti. Nejméně, 3 mg, bylo zjištěno u obyvatel Nového Zélandu, naopak nejvíce, 14 mg, u Američanů. Přibližně 30 % celkového selenu v těle je obsaženo v játrech, 15 % v ledvinách a 30 % ve svalech (Nantel a Tontisirin, 2001).

Rotruck et al. v roce 1973 položili vědecké základy pro porozumění funkce selenu v živočišném systému. Podařilo se jim identifikovat selen jako esenciální složku antioxidantního enzymu glutathion peroxidázy (GSH-Px), který zbavuje tělo hydrogenperoxidu. Na jejich výzkum navázali další, kteří objevili několik jiných izoform glutathion peroxidázy. Například Chu et al. (1993) objevili GSHPx-GI. Jsou známy i další enzymy obsahující selen a specifické selenoproteiny, které skrývají selen ve formě seleno-methioninu. Důležitým enzymem regulujícím tvorbu a degradaci aktivního hormonu štítné žlázy trijodthyroninu (T3) je jodothyronin deiodináza (Larsen a Berry, 1995). Seleno-enzym thioredoxin reduktáza je uzpůsobena k likvidaci produktů oxidativního metabolismu – peroxidů a hydroperoxidů (Tamura a Stadtman, 1996). Z lidské plazmy byl získán Akessonem et al. (1994) selenoprotein P, který funguje jako extracelulární antioxidant spojený s cévním endotheliem, které chrání před poškozením. Působí také jako vyrovnávač selenové homeostázy v těle (Burk a Hill, 2005). Selenoprotein W ovlivňuje epidermální růst (Zeynep et al. 2015). Dalším enzymem obsahujícím selen je selenofosfát syntetáza, která je nezbytná pro biosyntézu selenofosfátu a následně selenoproteinů (Lacourciere a Stadtman, 2001). Vytvářející se spermatické buňky chrání před oxidativním poškozením mitochondriální obalový selenoprotein (Flohé et al., 2003). Behne et al. (1997) izolovali specifický selenoprotein z epitelu prostaty.

Dostatečné množství selenu v těle je nezbytné pro odpovídající imunitní reakci, ale je také nutné pro kontrolu před nadměrnou imunitní odpovědí (Huang et al., 2012).

Combs a Grey (1998) uvádějí, že zvýšený příjem Se člověkem má ochranné účinky proti onemocnění rakovinou. Rayman (2012) specifikuje, že jde o rakovinné bujení v močovém měchýři, prostatě, plicích a tlustém střevě. Stapleton (2000) dokonce poukazuje na skutečnost, že selen může mít obdobné účinky, jako má inzulín. Tedy stimuluje pentózový cyklus, glykolýzu a glukoneogenezi.

Nejčastější zdroj selenu v běžném jídle je selen vázaný na proteiny: selenocystein v selenoenzymech a selenomethionin ve strukturních proteinech v zelenině a v mase. Kromě selenu vázaného v proteinech přijímáme selen v anorganické formě: seleničitan a selenan obsažené v potravě a v pitné vodě (Suzuki, 2005). Resorpce Se v trávicím traktu je poměrně účinná. Tato účinnost je dána formou přijatého selenu. Selenomethionin je vstřebáván z 95-97 %, oproti tomu seleničitan je resorbován jen ze 44-79 %. Aktivní vazebná místa pro esenciální aminokyselinu methionin využívá selenomethionin ke svému vstřebávání aktivním transportem. Naopak selenocystein a seleničitan jsou vstřebávány ve směru koncentračního gradientu, tedy pasivním transportem. Resorbovaný selen je v krvi z části navázán krevními buňkami a z části je v krevní plazmě přepraven do jater a následně do tkání (Velíšek, 2002). Podle Jagera et al. (2014) je selen z těla vylučován hlavně ve formě trimethylselenu v moči. Dále se selen z části vylučuje dýcháním přes plíce ve formě dimethylselenidu (Velíšek, 2002).

2.3.1 Nedostatek selenu

Při nedostatku selenu může docházet k poruchám funkčnosti imunitního systému, špatné funkci štítné žlázy, vzniku rakovinotvorných buněk, kardiovaskulárnímu onemocnění, gastrointestinálnímu onemocnění nebo vzniku revmatoidní artritidy (Riaz a Mehmood, 2012). Bylo prokázáno, že deficiencie selenu má vliv na rychlost postupu rozvoje onemocnění způsobené virem HIV (Baum a Shor-Posner, 1998). V Číně se vyskytují dvě endemické nemoci způsobené nedostatkem selenu v lokálních půdách, jsou to Keshanova a Kashin-Beckova nemoc.

2.3.1.1 Keshanova nemoc

Jedná se o endemickou kardiomyopatii vyskytující se v oblastech Číny s deficiencí selenu (Fairweather-Tait, 2011). Keshanova nemoc se projevuje akutní nebo chronickou

srdeční insuficiencí, zvětšením srdce, městnavým srdečním selháním a srdeční arytmií. Přesto se u této nemoci nevyskytuje žádný specifický symptom ani specifický znak, podle kterého by mohla být tato nemoc identifikována. Z patologického hlediska se jedná multifaktorovou nekrózu a fibrózní přeměnu myokardu (Reilly, 1996).

Nejvíce ohroženi k této nemoci jsou těhotné ženy a děti ve věku 2-10 let. Keshanova nemoc se vyskytuje převážně v rodinách chudých farmářů, protože většinu své potravy si sami vyprodukují na půdách chudých na selen. Klinicky lze nemoc klasifikovat do čtyř typů: akutní, subakutní, chronickou a latentní. Podle jednotlivých typů se liší přítomné symptomy od točení hlavy, malátnosti, ztráty chuti a nevolnosti u akutního typu až po neklidnost a slabou dilataci srdce u subakutního typu. Keshanovu nemoc se podařilo dostat pod kontrolu, i v těch nejvíce postižených oblastech Číny přidáváním selenu do zde používané kuchyňské soli. Tato obohacená sůl byla vyráběna přidáním seleničitanu sodného do kuchyňské soli v poměru 15 mg.kg^{-1} . Tímto zásahem byl zvýšen denní příjem na obyvatele z $11 \text{ } \mu\text{g}$ na $80 \text{ } \mu\text{g}$ (Reilly, 1996).

2.3.1.2 Kashin-Beckova nemoc

Kashin-Beckova nemoc je endemické, chronické, degenerativní kloubní onemocnění, které se vyskytuje v oblastech s nedostatkem selenu. Hlavně se jedná o oblasti Číny, Mongolska, Sibíře a Severní Koreji (Fairweather-Tait, 2011). Tato nemoc způsobuje zkrácený růst způsobený mnohočetnými nekrotizacemi v růstových zónách dlouhých kostí. Toto vede k sekundární osteoartróze. Choroba byla poprvé popsána v Rusku v oblasti Bajkalu panem Kashinem v roce 1848 a později Eugenem Beckem v roce 1906. Hlavní teorií vzniku, kterou vyslovili ruští vyšetřovatelé, byl toxický efekt mykotoxinů. Hlavní teorií v Číně byl nedostatek selenu. Tyto dvě teorie byly spojeny v jednu. Příčinou Kashin-Beckovy nemoci je nejspíš interakce mykotoxinů a deficiencie selenu (Allander, 1994). Zhang et al. (2012) ve svém výzkumu potvrzují, že mykotoxiny mají vliv na vzniku této nemoci. Chen et al. (2012) ve své práci prezentují výsledky, které dávají do souvislosti vznik Kashin-Beckovy nemoci s deficiencí selenu. V boji proti této nemoci se využívá umělé přidávání selenu do kuchyňské soli a hnojení plodin selenem v postižených oblastech (Fang et al., 2003)

2.3.2 Toxicita selenu

Toxicita selenu může být způsobena několika různými příčinami. Možnou příčinu popsali Yang et al. (1983) ve své publikaci, jako nadměrný příjem selenu prostřednictvím konzumace plodin z oblastí s extrémními hodnotami selenu v půdě. Tato endemická forma toxicity byla objevena v roce 1961 v oblasti Enshi County v Číně, kde měla 50 % úmrtnost u 248 obyvatel z pěti vesnic. Příznaky intoxikace selenem jsou vždy stejné: ztráta vlasů a nehtů, léze na kůži, poškození nervového systému a zubů. Zdrojem selenu bylo identifikováno uhlí, které zvětrávalo a dostávalo se do půdy, na které se pěstovala rýže tvořící převážnou část jídelníčku zdejších obyvatel.

Barrak et al. (2012) popisují intoxikaci selenem u 201 pacientů způsobenou konzumací suplementů. Jednalo se o největší epidemii selenózy v historii USA. Byla způsobena chybou ve výrobě tekutých suplementů, kde byla několikanásobně větší dávka. Pacientům byla poskytnuta symptomatická léčba a žádný z nich nevyžadoval hospitalizaci. Tento případ je důkazem značné toxicity selenu při požití větších než doporučených dávek suplementů.

Je hlášeno několik případů, kdy došlo k rozvoji symptomů intoxikace selenem po požití většího množství brazilských ořechů (*Lecythis ollaria*), které jsou jedny z největších akumulátorů selenu. Muller a Desel (2010) hlásí případ dvou žen, které následně po konzumaci velkého množství těchto ořechů trpěly ztrátou vlasů. Senthilkumaran et al. (2012) prezentují případ ženy, která konzumovala 10-15 ořechů denně po dobu 20 dnů v domnění, že se jedná o prevenci proti rakovině. Projevila se u ní masivní alopecie.

2.3.3 Příjem selenu v potravě

Obsah selenu v různých potravinách se diametrálně liší. Pokud pomineme různý obsah selenu v různých potravinách, záleží množství selenu ve stejném druhu potravy především na jeho geografickém původu, tedy na půdním obsahu Se (Kieliszek a Blažejak, 2013). Z pohledu potravního řetězce je půda primárním zdrojem selenu pro rostliny a rostliny jsou zdrojem selenu pro býložravce a všežravce (tedy i člověka). Masožravci čerpají selen ze své potravy živočišného původu.

Denní příjem selenu by měl být v rozmezí hodnot, které při své dolní hranici způsobují obtíže spojené s deficiencí, a na své horní hranici, kdy hrozí intoxikace selenem. Z tohoto důvodu by měl být příjem Se vyrovnaný a v odpovídajícím množství (tab. 2). Jako odpovídající denní příjem bylo určeno 50 µg Se na osobu. Toxicita selenu se začíná projevovat při dávce 350-700 µg Se za den (Tapiero et al., 2003).

Tab. 2 Přehled doporučených denních dávek pro jednotlivé kategorie osob (NHMRC, 1991)

Věková kategorie		Doporučená denní dávka (µg.den ⁻¹)
Kojenci	0-6 měsíců, kojené	10
	0-6 měsíců, nekojené	10
	7-12 měsíců	15
Děti	1-3 roky	25
	4-7 roků	30
	8-11 roků, chlapci	50
	8-11 roků, dívky	50
	12-15 roků, chlapci	85
	12-15 roků, dívky	70
	16-18 roků, chlapci	85
	16-18 roků, dívky	70
Dospělí	19-64 roků, muži	85
	19-54 roků, ženy	70
	64 a více roků, muži	85
	54 a více roků, ženy	70
Těhotné ženy	-	80
Kojící ženy	-	85

V České republice je příjem selenu populací odhadován na 20-40 µg Se.den⁻¹, což je méně než doporučená denní dávka. Rozbory koncentrace Se v krevním séru u osob mezi 6-65 roky upozorňují na poměrně nízkou hladinu Se v populaci. Celkový průměr pro populaci České republiky je na úrovni 42-65 µg Se.l⁻¹ séra. Conner et al. (2015) uvádějí jako optimální hodnotu pro dospělé, koncentraci 82-85 µg Se.l⁻¹ séra. Předpokládá se, že pravděpodobnost vzniku onemocnění spojeného s deficiencí Se značně roste při koncentraci 40-50 µg Se.l⁻¹ séra. Z výsledků analýz krve u českých obyvatel také vyplývá, že skoro polovina spadá do rozmezí 20-55 µg Se.l⁻¹ séra,

což jsou hodnoty silného deficitu. U těchto osob je zvýšené nebezpečí vzniku kardiovaskulárních onemocnění a rakoviny. Na zlepšení stavu se od roku 1998 přidává selen do krmných dávek hospodářských zvířat, což zvyšuje obsah selenu v mase, mléce a vejcích (Kvíčala, 2003).

Pro porovnání lze uvést množství přijímaného selenu v jiných státech. V Chorvatsku je průměrný denní příjem $27,3 \mu\text{g Se}\cdot\text{den}^{-1}$ (Mandic et al., 1998), v Irsku $52 \mu\text{g Se}\cdot\text{den}^{-1}$ (Murphy et al., 2002), v Itálii $51 \mu\text{g Se}\cdot\text{den}^{-1}$ (Amodio-Cocchieri et al., 1995). Dva extrémní případy pocházejí z Číny. V oblasti s těžkou deficiencí selenu s výskytem Keshanovy choroby je denní příjem pouze $11 \mu\text{g Se}\cdot\text{den}^{-1}$ (Reilly, 1996), naopak v oblasti s toxickým obsahem selenu je denní příjem na osobu $750\text{--}582 \mu\text{g Se}\cdot\text{den}^{-1}$ (Yang et al. 1989).

Přidáváním selenu do krmiva hospodářským zvířatům lze snadno zvýšit jeho obsah v mase. Z potravy živočišného původu jsou na selen bohaté ryby. Yoshida et al. (2002) uvádějí, že tuňák obsahuje $2\text{--}4,7 \mu\text{g Se}\cdot\text{g}^{-1}$, který je zde obsažen v dobře vstřebatelné formě v 70-80 % vázaný v bílkovinách. Analýzou hovězího masa se zabývali Shi a Spallholz (1994), kteří potvrzují velkou přístupnost selenu v hovězím mase. Bugel et al. (2004) testovali na 12 dobrovolnících přístupnost selenu z vepřového masa. Zjistili, že selen byl absorbován z 94 %, ale nedošlo k žádné změně v množství selenoproteinů obsažených v plazmě. Přístupnost selenu z vepřového masa je tedy špatná pro sérové proteiny. Přidáváním selenu do potravy nosným slepicím lze velmi účinně ovlivnit množství selenu obsaženého ve vejci (až $30 \mu\text{g}$ v jednom vejci), který je zde v dobře vstřebatelné formě (Fisinin et al., 2009).

Množství selenu v jednotlivých druzích potravin se výrazně liší (tab. 3). Koncentrace Se nacházejícího se v rostlinách je závislá na jeho množství v půdě. Protože obsah proteinů, na které by se vázal selen, je v rostlinách oproti živočišným produktům výrazně nižší, obsah selenu v zelenině a ovoci je také nízký (Velíšek, 1999). Nejvíce selenu z rostlinných produktů obsahují brazilské ořechy. V jednom ořechu je obsaženo asi $290 \mu\text{g Se}$. Doporučuje se konzumovat jeden brazilský ořech denně jako prevence proti rakovině (Cominetti et al., 2012).

Tab. 3 Obsah selenu ve vybraných potravinách v Belgii (Waegeneers et al., 2013).

Druh potravin	Obsah selenu (mg Se. kg⁻¹)	Druh potravin	Obsah selenu (mg Se. kg⁻¹)
Chleba	0,05	Makrela	0,55
Brambory	0,006	Platýs	0,47
Těstoviny	0,17	Kreveta	0,59
Rýže	0,06	Krab	0,90
Kořenová zelenina	0,003	Langusty	0,80
Listová zelenina	0,009	Hřebenatka (plž)	0,17
Plodová zelenina	0,002	Rak	0,23
Cibulová zelenina	0,008	Vejce	0,23
Brukvovitá zelenina	0,012	Sýr	0,18
Houby	0,18	Jogurt	0,02
Ovoce	0,005	Mléko	0,03
Vepřové maso	0,15	Minerální voda	0,001
Hovězí maso	0,14	Káva	0,002
Skopové maso	0,06	Nealko. nápoje	0,003
Kuřecí maso	0,21	Víno	0,003
Treska	0,36	Pivo	0,002
Tuňák	0,82	Ořechy	0,50
Sled'	0,27	Hovězí játra	0,61
Losos	0,23	Hovězí ledviny	1,90

2.4 Biofortifikace

2.4.1 Mikroprvkový nedostatek v lidské výživě:

Mikroprvková podvýživa, tedy nedostatečné množství vitamínů a minerálů v potravě, zůstává jedním z nejčastějších a nejlépe řešitelných výživových problémů dneška. Nedostatek mikroprvků v potravě je v současnosti nejvíce rozšířený druh podvýživy. V posledních desetiletích došlo k výraznému snížení počtu hladovějících lidí na Zemi, protože dotyčné vlády daly nejvyšší prioritu potravinové bezpečnosti. Následným logickým krokem je snaha o snížení mikroprvkové podvýživy (Campos-Bowers a Wittenmyer, 2007).

Podle zprávy WHO vypracovanou Murrayem a Lopezem (2002) trpí mnoho lidí v rozvojových a chudých státech, zvláště pak ženy a děti, nějakým druhem podvýživy. Deficience železa (Fe) je stále jednou z nejčastějších ve světě. Je odhadováno, že jí trpí asi 2 miliardy lidí na celém světě a způsobuje 0,8 milionu úmrtí ročně. Deficience jodu (I) je nejčastější příčinou mentální retardace a poškození mozku. Odhaduje se, že více než miliarda lidí se setkala s nějakým stupněm strumy. Každý rok umírá na deficienci zinku (Zn) 0,8 milion lidí. Nedostatek zinku stojí za zkráceným vzrůstem či špatnou funkcí imunitního systému. Celosvětově se odhaduje, že 21 % všech dětí trpí deficiencí vitamínu A a s ní spojenými poruchami zraku. Combs (2001) uvádí, že 10 % populace nepřijímá potřebné množství selenu (Se) v potravě.

V současné době jsou využívány čtyři hlavní strategie pro boj s mikroprvkovou podvýživou (Campos-Bowers a Wittenmyer, 2007):

- **Stravovací diverzifikace:** tato strategie se snaží přimět konzumenty ke změně stravovací návyků, tedy ke konzumaci široké škály potravin, čímž se zvyšuje množství přijímaných deficitních živin. Stravovací diverzifikace spoléhá na potřebné živiny obsažené v určitých druzích potravin, které jsou již populaci dostupné.
- **Umělá suplementace:** je termín popisující přijímání relativně velké dávky mikroprvků v podobě tablet, kapslí nebo sirupu. Její velkou výhodou je schopnost poskytnout optimální dávku specifického prvku nebo prvků ve vysoce rozpustné formě. Jedná se o nejrychlejší cestu, jak dostat pod kontrolu identifikovanou deficienci u jednotlivců nebo skupin v populaci. V rozvojových zemích jsou široce využívány suplementační programy pro poskytování železa těhotným ženám a vitamínu A novorozencům a dětem do pěti let. Tato strategie je pro tyto země relativně finančně náročná (Allen, De Benoist, 2006).
- **Průmyslová fortifikace:** znamená přidávání mikroprvků do zpracovávaných potravin. Průmyslová fortifikace zahrnuje výrobu výživově obohacených potravin přidáváním kapek roztoku s mikroprvky přímo k obilovinám v první fázi mletí mouky. V mnoha situacích může být tato strategie relativně hodně účinná a za rozumnou cenu. Vzhledem k tomu, že zisk může být potenciálně vysoký, jedná se o efektivní investici do veřejného zdraví. Za nevýhodu lze

považovat nutnost příjmu adekvátního množství potravy velkou částí dotčené populace. Nezbytně nutné je mít možnost využít vhodné fortifikanty, které jsou dobře absorbovatelné a zároveň nemají vliv na senzorické vlastnosti potravin (Allen, De Benoist, 2006).

- **Biofortifikace:** představuje zvyšování koncentrace požadovaného mikroprvku již na úrovni rostoucí rostliny. V poslední době se uplatňují dva přístupy k biofortifikaci (White a Broadley, 2009) :

- 1) Agronomický přístup optimalizuje aplikaci minerálních hnojiv půdní a foliární cestou, nebo zlepšuje rozpustnost a pohyblivost minerálních prvků i půdě.
- 2) Genetický přístup zahrnuje dvě strategie, tedy klasické šlechtění a genetické inženýrství. Plodiny jsou vyvíjeny se zvýšenou schopností přijímat a akumulovat minerální prvky ve svém pletivu, nebo jsou schopné zvyšovat koncentraci prekurzorových sloučenin (askorbát, β -karoten), případně jsou schopny redukovat koncentraci antinutričních látek (oxalát, polyfenoly), které inhibují absorpci minerálních látek.

2.4.2 Agronomická biofortifikace:

Častou překážkou pro biofortifikaci je všeobecně nízká přístupnost minerálních živin rostlinám. Z tohoto důvodu je směřováno agronomické úsilí směrem k aplikaci minerálních hnojiv a zlepšení rozpustnosti a pohyblivosti minerálních prvků v půdě. Tato strategie může být použita pro fortifikaci rostlin minerálními elementy, nikoliv organickými látkami (například vitaminy), které musí být syntetizovány samotnými rostlinami (Carvalho, Vasconcelos, 2013).

Rostliny dokážou přijímat minerální prvky, které jsou jim dodávány ve specifických chemických formách. Aby se stala biofortifikace úspěšnou, je nezbytné zvolit správné chemické formy prvků a zajistit přístupnost těchto prvků kořenům v půdním roztoku. Jedná se o limitující faktor půdní aplikace biofortifikovaného prvku. Z tohoto důvodu je výhodnější volit foliární aplikaci (White a Broadley, 2009). Minerální prvky mohou být v půdě přítomny jako volné ionty nebo jako ionty vázané na minerálních nebo organických površích. Nejdůležitější půdní vlastnosti, které ovlivňují přístupnost minerálů, jsou: půdní pH, redoxní potenciál, kationtová výměnná kapacita, mikrobiální

aktivita, půdní struktura, organická hmota a vodní zásobení půdy (Shuman, 1998). Kořeny všech druhů rostlin mohou přijímat železo (Fe), zinek (Zn), měď (Cu), vápník (Ca) a hořčík (Mg) v jejich kationtové formě. Většina jednoděložných rostlin dokáže také přijímat Fe, Zn a Cu ve formě kovových chelátů (Marshner, 1995). Selen je přijímán kořeny ve formě seleničitanu, selenanu a v organických sloučeninách (Kikkert a Berkelaar, 2013).

Nevýhodou agronomické biofortifikace se zdá být cenová náročnost, protože se musí potřebné prvky pro populaci aplikovat pravidelně. Je nutné jednotlivá hnojiva nakoupit, zaplatit jejich logistiku a aplikaci. Je zřejmé, že zdroje některých prvků nejsou nevyčerpatelné, proto může být v budoucnu jejich dostupnost překážkou v biofortifikaci. Z těchto důvodů se zdá být nejvýhodnější kombinovat tuto strategii s jinými přístupy k biofortifikaci, například zlepšování akumulární schopnosti rostlin pro určité prvky pomocí genetického inženýrství (White a Broadley, 2009).

2.4.3. Agronomická biofortifikace selenem

Finsko má půdy chudé na selen obdobně jako zbytek Evropy s tím rozdílem, že ve Finsku jsou ještě nepříznivé půdní podmínky (nízký oxidačně-redukční potenciál, nízké pH), což má za následek značné omezení přístupu Se pro plodiny. Aspila (2005) ve své publikaci pojednává o rozšiřování plošné biofortifikaci plodin na zemědělské orné půdě a pozemků využívaných k pastvě hospodářských zvířat. Nejprve začali přidávat Na_2SeO_3 o koncentraci do $0,1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ do krmiva hospodářským zvířatům. Tento pokus o zlepšení deficiencie selenu u finské populace se nezdařil, protože se u lidí nezvýšil příjem selenu, ale došlo ke zvýšení příjmu Se pouze u hospodářských zvířat. V roce 1983 ustanovili přidávání 16 mg Se ve formě SeO_4^{2-} na každý aplikovaný kilogram hnojiva NPK. Po tomto zásahu do výživy rostlin došlo k přílišnému zásobení populace selenem a bylo nařízeno snížit dávku na 6 mg Se na kilogram hnojiva NPK. Po provedené revizi v roce 1998 byla dávka upravena na konečných 10 mg Se na každý aplikovaný kilogram hnojiva NPK (Salminen, 2005).

Pro získání dobrých výsledků biofortifikace selenem je jedním z nejdůležitějších faktorů forma aplikovaného Se, který lze aplikovat ve dvou anorganických formách, jako seleničitan SeO_3^{2-} a selenan SeO_4^{2-} . Rios et al. (2013) prováděli pokus se salátem (*Lactuca sativa* L.), ve kterém aplikovali různé dávky seleničitanu a selenanu. Výsledky

ukazují, že varianty, kde byl aplikován selenan, měly vyšší koncentraci selenu v listech. Z toho vyplývá skutečnost, že selenan se jeví jako vhodnější k foliární aplikaci selenu. Ke stejným výsledkům došli Boldrin et al. (2013) při svých pokusech s rýží (*Oryza sativa*), kde výsledky také ukazují, že aplikace selenanu je efektivnější než aplikace seleničitanu.

Aplikace selenu k plodinám se provádí půdní nebo foliární a nebo se obohacuje selenem už semeno. Galinha et al. (2011) ve svém článku představují protokol na obohacování semen potravinářské pšenice (*Triticum aestivum*). Jejich výsledky ukazují ideální dobu namáčení 48 hodin a následovanou 24 hodinami vymývání selenu z povrchu semen. Jiný přístup k obohacování semen selenem popisují Businelli et al. (2015) ve svých pokusech s okurkou (*Cucumis sativus* L.), salátem (*Lactuca sativa* L.) a rajčetem (*Solanum lycopersicum* L.). Představují novou metodu fortifikace plodin selenem založenou na použití selenem obohaceného substrátu v průběhu klíčení a počátečního růstu rostlin. Optimální dávka selenu přidávaná do substrátu byla stanovena na 10-20 mg Se.kg⁻¹ suchého substrátu. Sazenice odebrané ze substrátu vykazovaly 2-78x vyšší koncentraci selenu oproti kontrole. Výsledná koncentrace selenu v biofortifikovaných plodinách u jednotlivých variant byla u plodů okurky v rozmezí 29,3-48 µg.kg⁻¹, u listů salátu 22,7-53,4 µg.kg⁻¹ a u plodů rajčat 15,2-19,9 µg.kg⁻¹.

Význam fortifikace selenem pro lidskou výživu popisují ve své práci Galinha et al. (2013) na pokusech se pšenicí tvrdou (*Triticum durum*) a pšenicí ozimou (*Triticum aestivum*), kde aplikovali foliárně 4, 20 a 100 g Se.ha⁻¹. V Portugalsku zkonzumuje každý obyvatel průměrně 43 g pšenice tvrdé, což dokáže pokrýt 10 % doporučené denní dávky. V případě fortifikace v uvedených dávkách stoupne pokrytí doporučené denní dávky na 30, 65 a 160 %. Pšenice obecná se používá především na pečení chleba, při průměrné konzumaci jednoho kousku chleba (60g) denně je pokryta denní doporučená dávka z 6 %. V případě fortifikace v uvedených dávkách stoupne pokrytí doporučené denní dávky selenu na 15; 65 a 200 %.

Kukuřice (*Zea mays*) je vedle rýže a pšenice další plodinou, která je v některých oblastech světa majoritně konzumovanou potravinou. Výzkumem fortifikace selenem této plodiny se zabývali Chilimba et al. (2012) v africké Malawi. Prováděli pokus s aplikací selenanu ve třech různých hnojivech: samotný selenan (0-100 g Se.ha⁻¹), NPK

obohacené selenem (0-9 g Se.ha⁻¹) a LAV obohacené selenem (0-20 g Se.ha⁻¹). V průměru se obsah Se v zrně kukuřice zvýšil u jednotlivých hnojiv o 20, 21 a 15 µg Se.kg⁻¹ na každý gram aplikovaného selenu. Ve výsledku lze říci, že přihnojením 5 g Se.ha⁻¹ ke kukuřici se zvýší příjem selenu člověkem o 26-37 µg za den. Longchamp et al. (2015) ověřovali, která forma (síran nebo seleničitan) selenu je vhodnější k aplikaci ke kukuřici. Z jejich výsledků vyplývá, že seleničitan vyvolává akumulaci většího množství v zrně než selenan. Naopak po aplikaci selenanu je v zrně selen vázán výhradně v organické formě, která je mnohem lépe vstřebatelná pro člověka.

Při foliární aplikaci selenu u řepky (*Brassica napus*) v pokusech Seppanena et al. (2010) nebyl ovlivněn výnos ani olejnatost semen, ale aplikace měla signifikantně pozitivní efekt na kvalitu výnosu zvýšením obsahu seleno-methioninu v semeni. Ve svém pokusu aplikovali nejprve půdně dávku selenanu 0; 5,6 a 20 g Se.ha⁻¹ před setím. Asi po měsíci byl ještě foliárně aplikován seleničitan nebo selenan v dávkách 0 a 30 g Se.ha⁻¹. Samotná foliární aplikace selenanu zvýšila koncentraci selenu v semeni z 0,05 µg.g⁻¹ na 0,54-1 µg.g⁻¹. Listová aplikace seleničitanu měla jen minimální účinek. Půdní aplikace seleničitanu a selenanu dokázala dále navýšit koncentraci Se na 0,88-1,15 µg.g⁻¹, respektive 1,48-1,84 µg.g⁻¹. K opačným závěrům došli Lyons et al. (2009). Ve své práci porovnávali varianty pokusů hnojených malou dávkou seleničitanu s kontrolou. Hnojené dávky měly stejné množství biomasy, ale o 43 % vyšší výnos semene. Zdůvodňují to zvýšenou respirací v listech a květech.

3 CÍL PRÁCE A HYPOTÉZY

Cílem předložené diplomové práce bylo ověření vhodnosti uplatnění vybraných forem selenu při obohacování máku setého (*Papaver somniferum*) za účelem dodání potřebného množství tohoto nepostradatelného prvku pro výživu člověka. Biofortifikace selenem byla prováděna v jednoletém nádobovém a polním pokusu s mákem. Polní pokus byl založen na pokusném pozemku ŠZP v Žabčicích. Nádobový pokus byl realizován v biotechnologickém pavilonu M v areálu Mendelovy univerzity v Brně.

Konkrétní cíle a hypotézy byly stanoveny takto:

Cíl 1: Ověřit rychlost příjmu a distribuci sledovaných forem selenu v rostlině máku po jejich aplikaci do půdy

Hypotéza 1: Selenan bude rychleji přijímán a lépe distribuován v nadzemních částech rostliny máku v porovnání se seleničitanem

Cíl 2: Zjistit účinnost půdní aplikace sledovaných forem selenu ve vztahu k biofortifikaci semene máku

Hypotéza 2: V souvislosti se snazší distribucí v rostlině bude selenan transportován do semen ve vyšším množství v porovnání se seleničitanem

Cíl 3: Ověřit účinek mimokořenové aplikace sledovaných forem selenu v polním experimentu

Hypotéza 3: Obsah selenu v semeni máku ovlivní nejen dávka mimokořenově aplikovaného Se, ale i jeho forma

4 METODIKA POKUSU

Ve dvou na sobě nezávislých vegetačních experimentech založených formou nádobového a polního maloparcelního pokusu byla sledována distribuce aplikovaného selenu ve formě selenanu a seleničitanu v rostlině máku ve vztahu k jejich biofortifikační účinnosti. V polním i nádobovém pokuse byl zároveň pozorován vliv aplikace stupňovaných dávek selenu, jako vhodné strategie použitelné při zvyšování jeho obsahu v semeni máku.

4.1 Charakteristika použité odrůdy máku v pokusech

Do pokusů byl použit Major, což je odrůda máku setého (*Papaver somniferum*) plodící modrá semena s dobrou barevnou vyrovnaností. Jedná se o středně ranou odrůdu s celkově mohutnějším habitem a středním vzrůstem, a proto dobře odolnou proti vyvracení a poléhání. Plasticky se dokáže dobře přizpůsobit odlišným půdně-klimatickým podmínkám stanoviště. Nejvhodnější jsou pro tuto odrůdu vlhčí řepařské oblasti, ale také bramborářské výrobní oblasti.

Major je kvalitní odrůda univerzálního pěstitelského zaměření. Poskytuje dobré výnosy semena i makoviny, která se využívá pro farmaceutický průmysl. Obsah morfinu je střední, tudíž je možné dosáhnout na hranici 0,5 %, od které je prodej makoviny ekonomicky zajímavý. Zdravotní stav je dobrý (Vašák, 2010).

4.2 Metodika nádobového pokusu

Nádobový pokus byl založen na jaře roku 2015. Zemina byla odebrána na pozemku Školního podniku MENDELU v Žabčicích a dopravena do Brna 24. 4. 2015. Následně byla tato zemina homogenizována a navážena do jednotlivých Mitscherlichových nádob (6 kg na nádobu). Tyto nádoby byly uloženy do vegetační haly biotechnologického pavilonu M v areálu MENDELU. V ten samý den byl mák vyset do nádob na povrch utužené půdy a zasypán 250 g zeminy. Agrochemické vlastnosti půdy prezentuje tab. 4.

Tab. 4 Agrochemické vlastnosti půdy v nádobách

Půdní druh	pH výměnné	Obsah živin v mg.kg ⁻¹ půdy (Mehlich III)			
		P	K	Ca	Mg
střední	6,6	87	184	2510	159
Vyhodnocení		dobry	dobry	dobry	vyhovující

Poprvé byl mák vyjednocen 12. 5. 2015 a podruhé 25. 5. 2015, tak aby v každé nádobě zůstalo 10 rostlin. Na konci května 2015 byla každá nádoba přihnojena 0,3 g dusíku (ve formě dusičnanu amonného), následně byl aplikován fungicid Amistar Extra v dávce 1 l.ha⁻¹ proti výskytu plísně makové a do každé nádoby byl napojen automatický zavlažovací systém. Poslední vyjednocení bylo provedeno 6. 6. 2015 na konečných 5 rostlin v nádobě. Podruhé byl aplikován dusík 20. 6. 2015 (ve formě dusičnanu amonného) v dávce 0,3 g do jedné nádoby a provedeno ošetření rostlin insekticidem Nurellem D (0,6 l.ha⁻¹) proti mšicím.

Půdní aplikace selenu (obrázek 1) byla provedena 22. 6. 2016 přímo do nádob k rostlinám máku formou zálivky ve fázi dlouhivého růstu (BBCH 35). Dávky selenu u jednotlivých variant jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5 Schéma hnojení

Varianta	Forma selenu	Dávky selenu na nádobu (mg)	Dávka selenu (g.ha ⁻¹)
Kontrola	-	0	0
Se 1	seleničitan	0,319	150
Se 2	seleničitan	0,638	300
Se 3	seleničitan	1,276	600
Se 4	selenan	0,319	150
Se 5	selenan	0,638	300
Se 6	selenan	1,276	600

Dne 16. 7. 2015 byl proveden odběr jedné rostliny z každé nádoby u kontroly a variant Se 1-6. Tyto rostliny byly následně rozděleny na 5 částí: tobolku, horních 5 listů, horní stonek (v úrovni pod pátým listem ve středu internodia), spodní listy a spodní stonek až po hypokotyl. Ruční sklizeň v plné zralosti u ostatních rostlin

proběhla 7. 8. 2015. Semeno bylo vysypáno z makovic a zváženo. Stanovila se u něho HTS, byl vypočítán jeho výnos na nádobu a stanoveno množství selenu v semeni.



Obrázek 1 Nádobový pokus při půdní aplikaci selenu ve fázi dlouhivého růstu (BBCH 35)

4.3 Metodika polního pokusu

Polní maloparcelkový pokus s mákem setým byl založen v březnu 2015 na pozemku Školního zemědělského podniku v Žabčicích.

4.3.1 Půdně agrochemická a klimatická charakteristika stanoviště

Školní zemědělský podnik v Žabčicích se nachází na jižní Moravě 30 km jižně od Brna (48°59'52.3" N s. š., 16°36'04.4" E v. d.). Maloparcelkový pokus s mákem byl založen na provozní ploše školního podniku v katastru obce Přísnotice, jak uvádí obrázek 2.



Obrázek 2 Lokalita polního pokusu

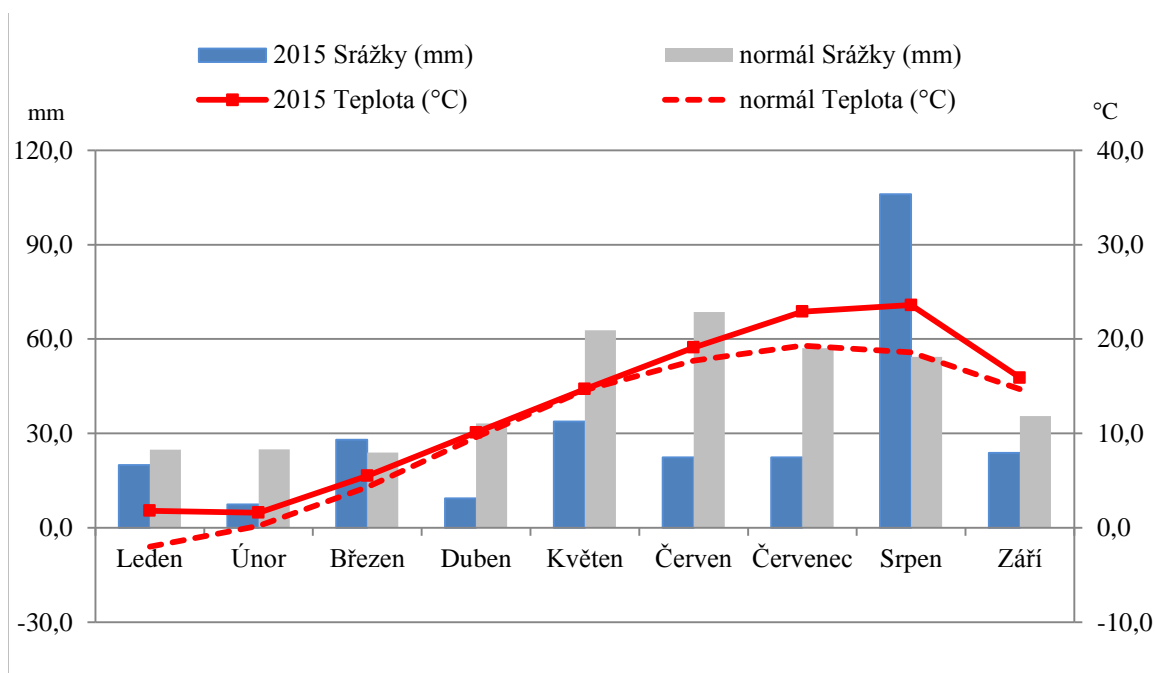
Tab. 6 obsahuje údaje o agrochemických vlastnostech půdy odebrané na pozemku před setím máku.

Tab. 6 Agrochemické vlastnosti stanoviště

Půdní druh	pH výměnné	Obsah živin v mg.kg ⁻¹ půdy (Mehlich III)			
		P	K	Ca	Mg
střední	6,3	74,2	150	1450	144
Vyhodnocení		vyhovující	vyhovující	vyhovující	vyhovující

Klimatický region, kde se nacházejí Žabčice, je velmi teplý a suchý. Průběh počasí na stanovišti v roce 2015 a údaje dlouhodobého normálu zachycuje graf 2. Srážkově byl rok 2015 výrazně podprůměrný, zejména pro nedostatek srážek v období konce května a průběhu června a července došlo k výraznému snížení výnosu. Teplotně byl naopak tento rok nadprůměrný.

Graf 2 Klimadiagram průběhu počasí v roce 2015 v Žabčicích



4.3.2 Metodika založení a vedení pokusu

Na pozemku před plánovaným pokusem byla předplodinou pšenice ozimá. Následně byla provedena podzimní orba. Na jaře byl pozemek před setím pohnojen 100 kg N.ha⁻¹ (LAV) a připraven pomocí bránosmyku Väderstad NZA 800.

Porost máku setého (odrůda Major) byl zaset 7. 3. 2015, výsevek byl stanoven na 1,7 kg.ha⁻¹. Pozemek byl preemergentně ošetřen proti plevelům 9. 3. 2015 přípravkem Callisto 480 SC (0,25 l.ha⁻¹). V termínu 10. 4. 2015 byla provedena aplikace přípravku Cyperkill 25 EC (0,1 l.ha⁻¹) proti krytonosci kořenovému. Druhá aplikace herbicidu (Laudis) byla provedena 8. 5. 2015 v dávce 1,7 l.ha⁻¹. Pokusné parcelky o velikosti 15 m² byly vyměřeny a vytyčeny 10. 5. 2015. Další fungicidní (Bumper super v dávce 1 l.ha⁻¹) a insekticidní (Nurelle v dávce 0,6 l.ha⁻¹) ošetření bylo proveden 31. 5. 2015. Listová aplikace selenu byla provedena 18. 6. 2015 ve fázi po odkvětu (BBCH 69) podle schématu v tab. 7. Selen byl aplikován v postřikové jíše 250 l.ha⁻¹. Stav porostu v tomto termínu zachycuje obrázek 3.

Tab. 7 Schéma hnojení selenem

Varianta hnojení	Forma Se	Dávka Se (g.ha ⁻¹)
Kontrola	-	0
Se 1	Seleničitan	20
Se 2	Seleničitan	40
Se 3	Selenan	20
Se 4	Selenan	40

Porost máku byl mechanizovaně sklizen 3. 8. 2015 v plné zralosti sklízecí maloparcelkovou mlátičkou. Semeno bylo ručně přečištěno a následně analyzováno. Byla zjištěna hmotnost tisíce semen, hmotnost sklizeného semene a stanoveno množství selenu v semeni.



Obrázek 3 Porost máku v době listové aplikace selenu (BBCH 69)

4.4 Analytické metody

4.4.1 Analýza půdy

Agrochemické vlastnosti půdy byly zjištěny analýzou vzorků odebraných před setím máku. Jako základní agrochemická vlastnost u půdy byla měřena její reakce

(1:5 půda: 0,01M CaCl₂). Dále byly stanoveny přístupné živiny pro rostliny, tedy Ca, Mg, K a P, byly zjištěny z odebraného vzorku půdy ve výluhu Mehlicha III (Zbiral, 2002). Obsah P se stanovuje z tohoto výluhu kolorimetricky (UV/VIS spektrofotometr ATI Unicam 8625). Množství Ca, Mg a K se zjišťovalo atomovou absorpční spektrofotometrií (ContrAA 700, Analytic Jena).

4.4.2 Analýza rostlinné hmoty

V rostlinné hmotě se stanovovalo množství následujících prvků - N, P, K, Ca, Mg a Se. Vzorky se vysušily v sušárně při teplotě 60 °C a následně se stanovila hmotnost jejich sušiny na laboratorních váhách. Suchá hmota se homogenizovala a jednotlivé vzorky byly mineralizovány ve směsi H₂SO₄ a H₂O₂ ve speciálním uzavřeném systému s ohřevem pomocí mikrovln (Ethos 1, ChromSpec) podle Zbiral et al., (2005). Ze získaného mineralizátu se stanovil Se v rostlinné hmotě metodou atomové absorpční spektrofotometrie (ContrAA 700, Analytic Jena).

4.4.3 Statistická analýza výsledků

Naměřená data byla podrobena statistické analýze v programu Statistica CZ 12. Vliv aplikovaného Se na sledované charakteristiky, popsány průměrnou hodnotou ± směrodatnou chybou od něho, byl vyhodnocen analýzou ANOVA (monofaktoriální analýzou variance). Následujícím testováním podle Fischera při 95 % (P≤0,05) hladině významnosti se analyzovaly rozdíly v jednotlivých variantách.

5 VÝSLEDKY A DISKUSE

5.1 Nádobový pokus

5.1.1 Vliv dávky selenu na jeho obsah a odběr rostlinou

Obsah selenu, aplikovaného ve formě seleničitanu (tab. 8), se v rostlinné hmotě statisticky významně ($P \leq 0,05$) zvýšil v závislosti na aplikované dávce. Jeho navýšení bylo průkazné především ve spodní části rostliny, kde obsah selenu narostl v porovnání s kontrolou u dolní části stonku a dolních listů o 217-356 %, respektive o 78-145 %.

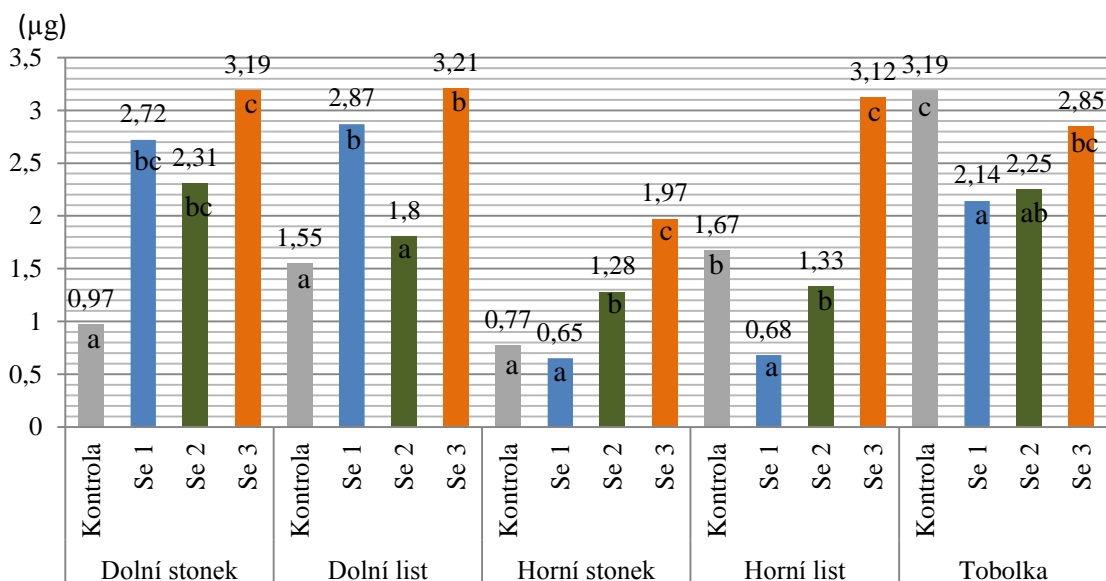
Tab. 8 Vliv dávky selenu na jeho obsah v jednotlivých částech rostlin po aplikaci seleničitanu

Dávka Se ($\text{g} \cdot \text{ha}^{-1}$)	Dolní stonek ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Dolní list ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Horní stonek ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Horní list ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Tobolka ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Kontrola	0,728 ^a	2,077 ^a	0,715 ^a	2,930 ^{ab}	1,624 ^{ab}
Se 1	2,305 ^b	3,706 ^b	0,672 ^a	2,360 ^a	1,410 ^a
Se 2	2,832 ^c	4,336 ^b	1,452 ^b	3,812 ^b	1,450 ^a
Se 3	3,318 ^c	5,090 ^c	2,632 ^c	6,702 ^c	1,993 ^b

Kontrola: $0 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$, Se 1: $150 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$, Se 2: $300 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$, Se 3: $600 \text{ g} \cdot \text{ha}^{-1}$. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl ($P \leq 0,05$).

Nejsilnější závislost odběru selenu na stupňovitě aplikované dávce seleničitanu byla u dolního ($r=0,6738$) a horního ($r=0,8987$) stonku. Naopak žádná závislost nebyla pozorována u tobolky ($r=0,0069$), dokonce s lehce klesajícím trendem ($y = -0,0002x + 2,65$). Z těchto výsledků uvedených v grafu 3 je patrné, že půdní aplikace seleničitanu neovlivnila ukládání selenu do tobolky. Vzhledem k nižším korelačním koeficientům u dolního ($r=0,4614$) a horního ($r=0,5497$) listu je zřejmé, že seleničitan má omezenou mobilitu v rostlině. Zayed et al. (1998) předpokládají, že tato omezená mobilita je způsobena rychlou přeměnou seleničitanu na organické formy selenu (například SeMet), které jsou převážně zadrženy v kořenech.

Graf 3 Vliv dávky selenu na jeho odběr v jednotlivých částech rostlin po aplikaci seleničitanu



Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl ($P \leq 0,05$).

Obsah selenu aplikovaného ve formě selenanu se v rostlinné hmotě statisticky významně ($P \leq 0,05$) zvýšil v závislosti na jeho dávce ve všech částech rostlin. Nejvýznamnější nárůst obsahu selenu byl zaznamenán v tobolkách máku a představoval, ve vztahu k dávce, 8-36 násobek jeho množství stanoveného na kontrolní variantě, jak uvádí tab. 9. Z těchto výsledků je zřejmá výrazně vyšší mobilita selenanu než seleničitanu v rostlině máku. Zayed et al. (1998) toto zjištění potvrzují v pokusech s brukví sítinovitou (*Brassica juncea*), brokolicí (*Brassica oleracea var. italica*), cukrovou řepou (*Beta vulgaris*) a rýží (*Oryza sativa*). Arvy (1993) demonstruje na pokusu s fazolem obecným (*Phaseolus vulgaris*) rozdíly v akumulaci sledovaných forem selenu. Po 3 hodinách po aplikaci bylo v nadzemních částech rostliny akumulováno 50 % selenanu z kořenů, naopak seleničitan byl v nadzemní části přítomen pouze v malém množství.

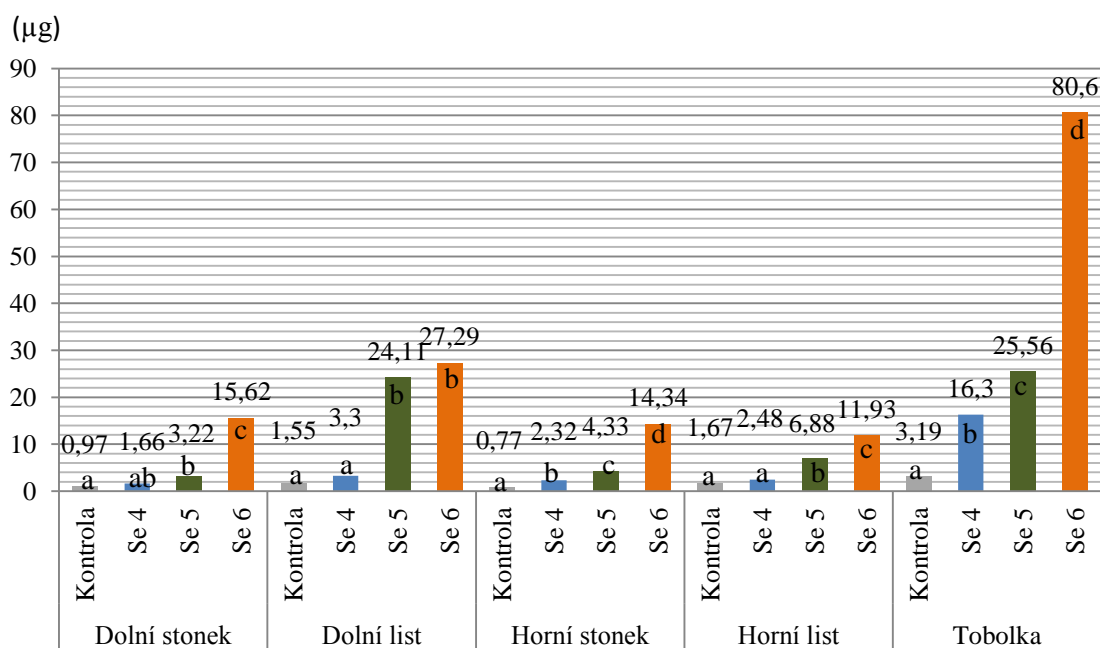
Tab. 9 Vliv dávky selenu na jeho obsah v jednotlivých částech rostlin po aplikaci selenanu

Dávka (g/ha)	Dolní stonek (mg.kg ⁻¹)	Dolní list (mg.kg ⁻¹)	Horní stonek (mg.kg ⁻¹)	Horní list (mg.kg ⁻¹)	Tobolka (mg.kg ⁻¹)
Kontrola	0,728 ^a	2,077 ^a	0,715 ^a	2,930 ^a	1,624 ^a
Se 4	2,611 ^b	10,710 ^b	3,491 ^b	12,420 ^b	12,468 ^b
Se 5	3,732 ^b	48,127 ^c	6,020 ^c	17,562 ^c	19,349 ^c
Se 6	12,359 ^c	64,930 ^d	17,053 ^d	35,259 ^d	58,014 ^d

Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl (P≤0,05).

Odběr selenu je silně závislý na stupňovitě rostoucí dávce selenanu u všech částí rostliny. Korelační koeficienty vyjadřující tento vztah jsou následující: pro dolní část stonku je $r = 0,8719$, pro horní část stonku se $r = 0,9345$, pro dolní listy představuje $r = 0,8075$, pro horní listy $0,9674$ a pro tobolku $0,9487$. Grafu 4 ukazuje, že mák dobře reaguje na stupňované dávky selenanu zvýšenou akumulací selenu. Z tohoto důvodu se selenan jeví jako vhodnější forma k půdní aplikaci selenu při srovnání se seleničitanem. Ke stejnému závěru došli také Hegedus et al. (2009) v pokusech s rajčaty (*Solanum lycopersicum*) a kapustou (*Brassica oleracea*). Poggi et al. (2000) aplikovali selen v zálivce k bramborům (*Solanum tuberosum*) ve formě selenanu i seleničitanu, jako vhodnější shledávají také selenan.

Graf 4 Vliv dávky selenu na jeho odběr v jednotlivých částech rostlin po aplikaci selenanu



Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl (P≤0,05).

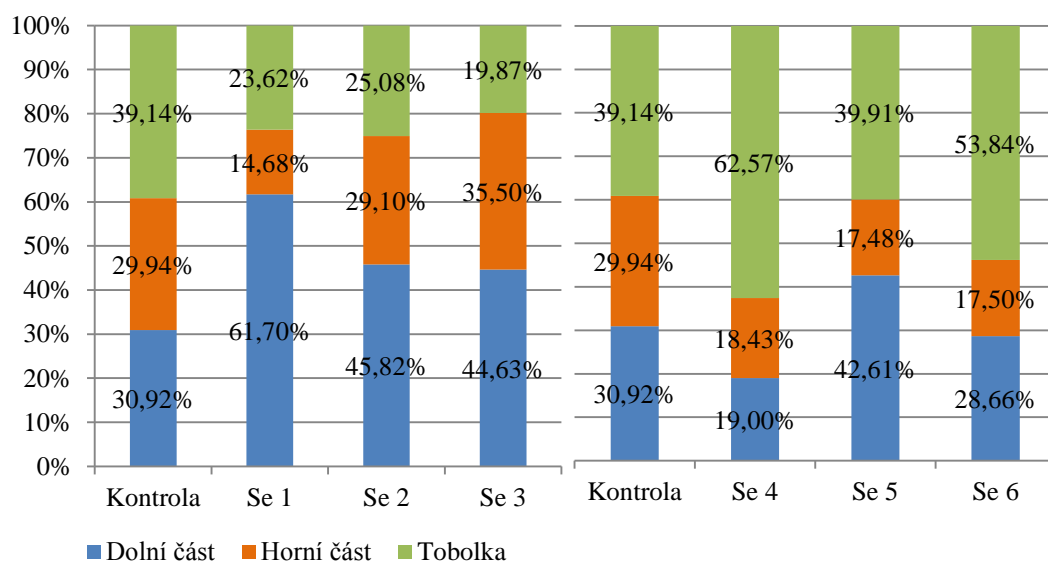
Z tabulky 10 vyplývá, že po aplikaci seleničitanu docházelo k největší akumulaci selenu v dolní části rostliny (stonku a listech) máku. Do tobolky se transportními cestami dostala část selenu, která z jeho celkového akumulovaného množství v rostlině představuje 19,9 – 25,1 % (graf 5).

Tab. 10 Distribuce Se v jednotlivých částech rostlin po aplikaci různých dávek seleničitanu

Část rostliny	Kontrola		Se 1		Se 2		Se 3	
	Odběr (µg)	Rel. %	Odběr (µg)	Rel. %	Odběr (µg)	Rel. %	Odběr (µg)	Rel. %
Dolní stoněk	0,97 ^a	11,90	2,72 ^c	30,02	2,31 ^d	25,75	3,19 ^b	22,25
Dolní list	1,55 ^b	19,02	2,87 ^c	31,68	1,8 ^{bc}	20,07	3,21 ^b	22,38
Horní stoněk	0,77 ^a	9,45	0,65 ^a	7,17	1,28 ^a	14,27	1,97 ^a	13,74
Horní list	1,67 ^b	20,49	0,68 ^a	7,51	1,33 ^{ab}	14,83	3,12 ^b	21,76
Tobolka	3,19 ^c	39,14	2,14 ^b	23,62	2,25 ^{cd}	25,08	2,85 ^b	19,87

Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl (P≤0,05).

Graf 5 Distribuce Se v jednotlivých částech rostlin po aplikaci různých dávek seleničitanu a selenanu



Legenda: horní část rostliny = horní stonek + horní list, dolní část rostliny = dolní stonek + dolní list.
 Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹ (seleničitan). Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹ (selenan).

Po aplikaci selenanu (tab. 11 a graf 5) nastala opačná situace, kdy nejvíce selenu bylo akumulováno v tobolce (u všech variant kromě varianty s 300 g Se.ha⁻¹). Toto množství představovalo ve variantách s jeho půdní suplementací z celkově akumulovaného množství Se v rostlině máku 39,9 – 62,6 %. Vzhledem k tomu, že je konzumováno pouze semeno uložené v tobolce, se zdá aplikace selenu ve formě selenanu vhodnější pro biofortifikaci máku tímto prvkem. Boldrin et al. (2013) došli ke stejnému závěru ve své práci, v které prezentují lepší schopnost akumulace selenu po půdní aplikaci selenanu než seleničitanu u zrna rýže (*Oryza sativa*). Výrazně vyšší ukládání selenu v zrně ječmene jarního (*Hodeum vulgare*) po aplikaci selenanu pozorují také Rodrigo et al. (2013), kteří ve své práci prezentují, že na každý aplikovaný gram selenu ve formě seleničitanu a selenanu zjistili jeho nárůst o 9 µg.kg⁻¹, respektive o 44 9 µg.kg⁻¹ v sušině.

Tab. 11 Distribuce Se v jednotlivých částech rostlin po aplikaci různých dávek selenanu

Část rostliny	Kontrola		Se 4		Se 5		Se 6	
	Odběr (μg)	Rel. %	Odběr (μg)	Rel. %	Odběr (μg)	Rel. %	Odběr (μg)	Rel. %
Dolní stonek	0,97 ^a	11,90	1,66 ^a	6,37	3,22 ^a	5,02	15,6 ^a	10,42
Dolní list	1,55 ^b	19,02	3,29 ^b	12,63	24,11 ^c	37,59	27,3 ^b	18,24
Horní stonek	0,77 ^a	9,45	2,32 ^a	8,91	4,33 ^{ab}	6,75	14,3 ^a	9,55
Horní list	1,67 ^b	20,49	2,48 ^{ab}	9,52	6,88 ^b	10,73	11,9 ^a	7,95
Tobolka	3,19 ^c	39,14	16,3 ^c	62,57	25,6 ^c	39,91	80,6 ^c	53,84

Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl (P≤0,05).

5.1.2 Výnosové výsledky nádobového pokusu

5.1.3.1 Výnos

Seleničitan signifikantně ($P \leq 0,05$) neovlivnil výnos semene máku (tab. 12). Po aplikaci 150 g Se.ha⁻¹ došlo ke snížení výnosu o 2 % oproti kontrole. U variant s aplikovanou dávkou 300 a 600 g Se.ha⁻¹ se zvýšil výnos oproti kontrole o 3,8 %, respektive o 1,4 %. Boldrin et al. (2013) prezentují ve své práci podobné výsledky u pokusu s rýží (*Oryza sativa*), kde při půdní aplikaci selenu zjistili, že výnos není ovlivněn aplikací seleničitanu. Wang et al. (2013) uvádějí stejné zjištění u kukuřice (*Zea mays*) po půdní aplikaci seleničitanu ve stejných dávkách (150, 300 a 600 g Se.ha⁻¹).

Tab. 12 Průměrný výnos semene máku v g/nádoba po aplikaci seleničitanu

Seleničitan	Výnos (g/nádoba) ± SE	Rel. %	$P \leq 0,05$
Kontrola	4,655 ± 0,393	100,00%	a
Se 1	4,563 ± 0,489	98,03%	a
Se 2	4,833 ± 0,298	103,83%	a
Se 3	4,720 ± 0,226	101,40%	a

Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl (P≤0,05).

Rovněž aplikace selenanu neovlivnila významně ($P \leq 0,05$) výnos semene máku, i když u všech aplikovaných dávek Se se výnos zvýšil, v rozmezí 1,3-4,5 % oproti kontrole (tab. 13). Ke stejnému závěru došli Boldrin et al. (2013) po půdní aplikaci selenanu k rýži (*Oryza sativa*). Turakainen et al. (2004) naopak popisují zvýšení výnosu hlíz u bramboru (*Solanum tuberosum*) po půdní aplikaci selenanu.

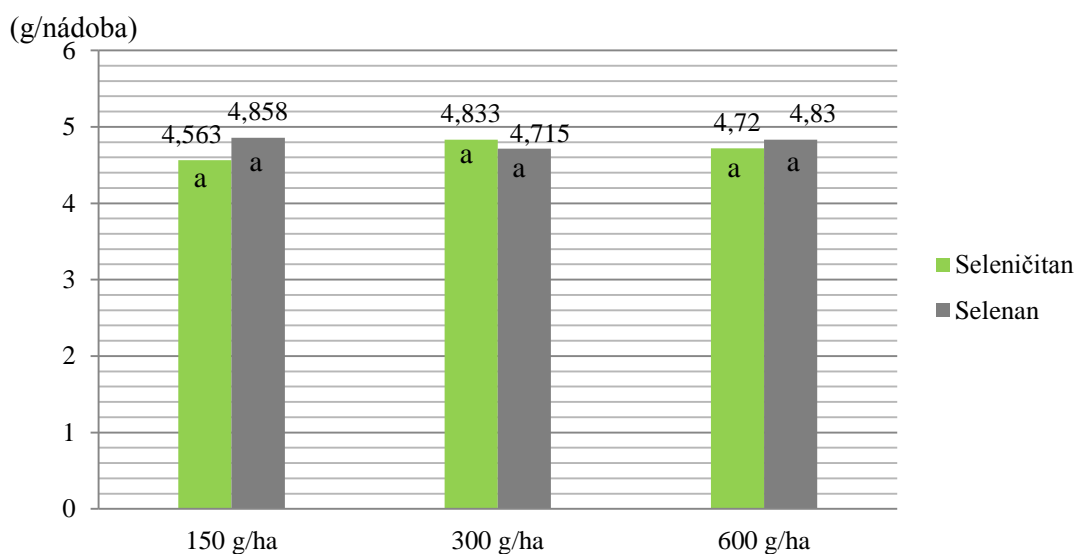
Tab. 13 Průměrný výnos semene máku v g/nádoba po aplikaci selenanu

Selenan	Výnos (g/nádoba) ± SE	Rel. %	$P \leq 0,05$
Kontrola	4,655 ± 0,393	100,00%	a
Se 4	4,858 ± 0,356	104,35%	a
Se 5	4,715 ± 0,736	101,29%	a
Se 6	4,830 ± 0,335	103,76%	a

Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl ($P \leq 0,05$).

Mezi sledovanými formami selenu nebyl zjištěn v jejich účinku na výnos máku průkazný rozdíl ($P \leq 0,05$), jak prezentuje graf 6.

Graf 6 Porovnání průměrného výnosu v g/nádoba u jednotlivých dávek mezi seleničitanem a selenanem



Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl ($P \leq 0,05$).

5.1.3.2 Hmotnost tisíce semen

Po aplikaci seleničitanu nebyla statisticky průkazně ($P \leq 0,05$) ovlivněna hmotnost tisíce semen u máku. U nižších dávek (150 a 300 g Se.ha⁻¹) došlo k mírnému zvýšení hmotnosti tisíce semen oproti kontrole o 7,9%, respektive o 8,4 % (tab. 14). Naopak při nejvyšší dávce 600 g Se.ha⁻¹ byla hmotnost tisíce semen nižší o 3,9 % než u kontroly. Na rozdíl od experimentu s mákem došlo po aplikaci seleničitanu k pšenici ozimé (*Triticum aestivum*) podle Teimouriho et al. (2014) ke zvýšení hmotnosti semen.

Tab. 14 Průměrná HTS máku (g) po aplikaci seleničitanu

Seleničitan	HTS (g) ± SE	Rel. %	$P \leq 0,05$
Kontrola	0,433 ± 0,016	100,00%	a
Se 1	0,468 ± 0,018	107,91%	a
Se 2	0,470 ± 0,011	108,43%	a
Se 3	0,416 ± 0,023	96,06%	a

Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl ($P \leq 0,05$).

Ani po aplikaci selenanu nebyla hmotnost tisíce semen signifikantně ($P \leq 0,05$) ovlivněna. U nižších aplikovaných dávek (150 a 300 g Se.ha⁻¹) se hmotnost tisíce semen oproti kontrole snížila o 9,3 %, respektive o 2,4 % (tab. 15). Po aplikaci selenu v nejvyšší dávce (600 g.ha⁻¹) došlo jen k nepatrnému rozdílu (vyšší o 0,3 %) oproti kontrole. Habibi (2013) zjistil, že hmotnost tisíce semen není ovlivněna aplikací selenanu u ječmene jarního (*Hordeum vulgare*). Stejný závěr citují také Falahatzadeh et al. (2011) v práci s pšenicí ozimou (*Triticum eastivum*).

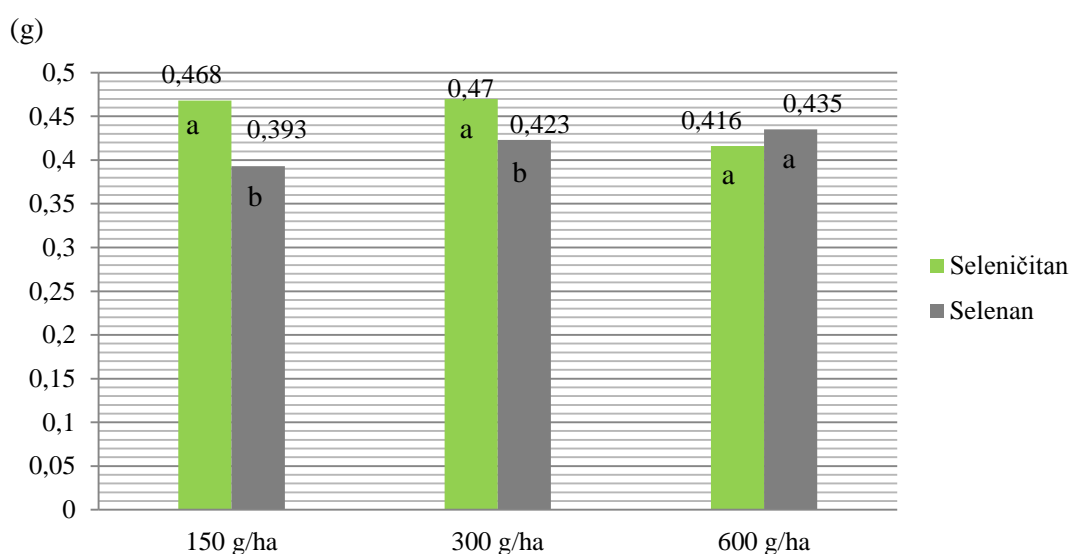
Tab. 15 Průměrná HTS máku (g) po aplikaci selenanu

Selenan	HTS (g) ± SE	Rel. %	$P \leq 0,05$
Kontrola	0,433 ± 0,016	100,00%	a
Se 4	0,393 ± 0,019	90,65%	a
Se 5	0,423 ± 0,013	97,61%	a
Se 6	0,435 ± 0,019	100,34%	a

Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl ($P \leq 0,05$).

V rámci srovnání účinku sledovaných forem selenu na hmotnost tisíce semen byl zjištěn statisticky významný rozdíl ($P \leq 0,05$) při dávkách 150 a 300 g.ha⁻¹. U variant hnojených seleničitanem byla HTS vyšší o 16 %, respektive o 10 %, při srovnání se selenanem. Naopak při dávce 600 g.ha⁻¹ byla HTS při použití selenanu vyšší než u seleničitanu (o 4,6 %). Tento rozdíl však nebyl nesignifikantní ($P \leq 0,05$), jak uvádí graf 7.

Graf 7 Porovnání průměrného HTS (g) u jednotlivých dávek mezi seleničitanem a selenanem



Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl ($P \leq 0,05$).

5.1.3 Obsah selenu v semeni máku

Průměrný obsah selenu v semeni máku u variant s aplikovaným seleničitanem se ve všech dávkách signifikantně lišil ($P \leq 0,05$) proti kontrole, statisticky průkazně ($P \leq 0,05$) se lišily jeho obsahy u jednotlivých dávek mezi sebou, což lze pozorovat v tab. 16. Nárůst množství Se byl oproti kontrole u sledovaných dávek 3,4-8,5x vyšší. Obsah Se u variant hnojených seleničitanem koreluje se stupňujícími se dávkami selenu v hnojivu ($r = 0,9736$). Rovnice regresní přímky ($y = 0,0057x + 0,6514$) poukazuje na to, že pokud zvýšíme aplikovanou dávku o 1 g Se.ha⁻¹, koncentrace selenu se v rostlině zvýší o 5,7 µg.kg⁻¹. Wang et al. (2013) prováděli dvouletý pokus (2009 a 2010) s kukuřicí (*Zea mays*) hnojenou seleničitanem v dávkách 150, 300 a 600 g Se.ha⁻¹.

V obou letech statisticky průkazně ($P \leq 0,05$) došlo ke stupňovitému nárůstu obsahu selenu v semeni, ovšem s výrazně nižší intenzitou (na aplikovaný 1 g Se.ha⁻¹ došlo k nárůstu o 0,33 µg.kg⁻¹ respektive o 0,12 µg.kg⁻¹). Fernandes et al. (2014) ve svém článku uvádějí signifikantní ($P \leq 0,05$) navýšení množství Se v obilkách rýže (*Oryza sativa*) a kořenech ředkve (*Raphanus*) po půdní aplikaci seleničitanu.

Tab. 16 Průměrný obsah Se v semeni máku v mg.kg⁻¹ po aplikaci seleničitanu

Seleničitan	Obsah Se (mg.kg ⁻¹) ± SE	Rel. %	$P \leq 0,05$
Kontrola	0,456 ± 0,089	100,00%	a
Se 1	1,552 ± 0,103	340,68%	b
Se 2	2,679 ± 0,129	587,88%	c
Se 3	3,894 ± 0,213	854,67%	d

Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl ($P \leq 0,05$).

Statisticky průkazně se lišil ($P \leq 0,05$) průměrný obsah selenu v semeni máku ve variantách s aplikovaným selenanem ve všech dávkách proti kontrole. Také obsahy Se v semeni u sledovaných stupňovaných dávek se mezi sebou statisticky průkazně ($P \leq 0,05$) lišily (tab. 17). Nárůst jeho množství byl oproti kontrole u jednotlivých dávek 10,4-81,5x vyšší. Zjištěné množství Se v semeni u variant hnojených selenanem koreluje se stupňujícími se dávkami selenu v hnojivu ($r = 0,9703$). Rovnice regresní přímky ($y = 0,063x - 2,5014$) ukazuje, že pokud zvýšíme aplikovanou dávku o 1 g Se.ha⁻¹, koncentrace selenu v rostlině stoupne o 63 µg.kg⁻¹. Lyons et al. (2005) u pšenice (*Triticum aestivum*) potvrzují rovněž výrazné zvýšení příjmu Se semenem po půdní aplikaci selenanu v dávce 120 g Se.ha⁻¹.

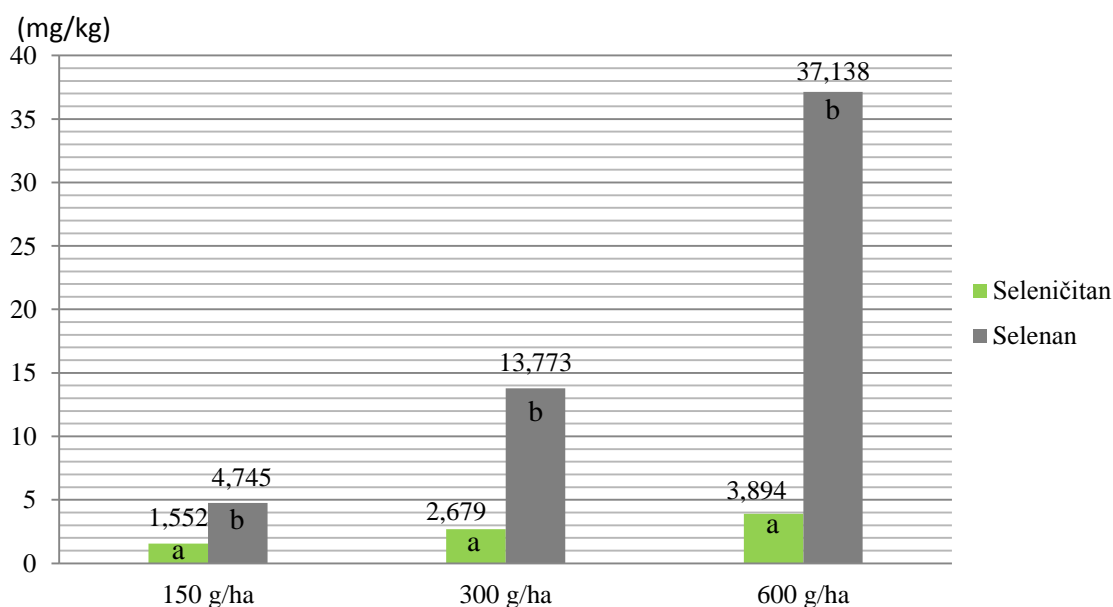
Tab. 17 Průměrný obsah Se v mg.kg⁻¹ po aplikaci selenanu

Selenan	Obsah Se (mg.kg ⁻¹) ± SE	Rel. %	P≤0,05
Kontrola	0,456 ± 0,089	100,00%	a
Se 4	4,745 ± 0,231	1041,46%	b
Se 5	13,773 ± 1,134	3022,73%	c
Se 6	37,138 ± 0,860	8150,82%	d

Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 150 g.ha⁻¹, Se 2: 300 g.ha⁻¹, Se 3: 600 g.ha⁻¹. Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl (P≤0,05).

Aplikace selenu stimulovala jeho akumulaci v semeni máku více u selenanu než u seleničitanu, a to ve všech aplikačních dávkách (150, 300 i 600 g.ha⁻¹) statisticky signifikantně (P≤0,05). Porovnání je uvedeno v grafu 8. Nejvíce se průměrný obsah selenu v semeni mezi seleničitanem a selenanem lišil u nejvyšší dávky (600 g.ha⁻¹), a to o 854 %. Boldrin et al. (2013) shodně informují ve své práci o lepší schopnosti akumulace selenu po půdní aplikaci selanenu než seleničitanu u rýže (*Oryza sativa*).

Graf 8 Porovnání průměrného obsahu Se v semeni v mg.kg⁻¹ u jednotlivých dávek mezi seleničitanem a selenanem



Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl (P≤0,05).

5.2 Polní pokus

5.2.1 Výnosové výsledky pokusu

5.2.1.1 Výnos

Mimokořenová aplikace selenu neměla statisticky průkazný vliv ($P \leq 0,05$) na výnos máku. Foliární přihnojení (tab. 18) seleničitanem v dávkách 20 a 40 g Se.ha⁻¹ a selenanem v dávce 40 g Se.ha⁻¹ snížila výnos semene máku o 3,73–5,02 %. Pouze u varianty s aplikací selenanu v dávce 20 g Se.ha⁻¹ se výnos zvýšil o 7,82 % oproti kontrole. Shodně Seppanen et al. (2010) ve svém pokusu potvrzují, že při aplikované dávce 30 g Se.ha⁻¹ ve formě seleničitanu a selenanu nedošlo k ovlivnění výnosu řepky (*Brassica napus*). Naopak k odlišným závěrům dospěli Lyons et al. (2009), kteří upozorňují v pokusech s řepkou (*Brassica napus*) pěstovanou ve fytotronu na zvýšení výnosu až o 43 % u variant po aplikaci seleničitanu. Poblaciones et al. (2013) ve svých pokusech s hrachem setým (*Pisum sativum*) po foliární aplikaci seleničitanu i selenanu (20 a 40 g.ha⁻¹) nezaznamenali změnu výnosu. Škarpa a Richter (2011) uvádějí statisticky nevýznamné ($P \leq 0,05$) snížení výnosu máku (*Papaver somniferum*) po přihnojení seleničitanem v dávce 300 g Se.ha⁻¹ aplikovaným ve fázi po odkvětu.

Tab. 18 Průměrný výnos semene máku v kg.ha⁻¹ po aplikaci seleničitanu a selenanu

Varianta	Výnos (kg.ha ⁻¹) ± SE	Rel. %	$P \leq 0,05$
Kontrola	190,5 ± 29,3	100,00%	a
Se 1	180,9 ± 17,9	94,98%	a
Se 2	181,8 ± 18,7	95,39%	a
Se 3	205,4 ± 6,8	107,82%	a
Se 4	183,4 ± 21,7	96,27%	a

Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 20 g.ha⁻¹, Se 2: 40 g.ha⁻¹ (seleničitan). Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 3: 20 g.ha⁻¹, Se 4: 40 g.ha⁻¹ (selenan). Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl ($P \leq 0,05$).

5.2.1.2 Hmotnost tisíce semen

Vlivem aplikace seleničitanu a selenanu (v dávkách 20 a 40 g.ha⁻¹) došlo ke snížení průměrné hmotnosti tisíce semen, ovšem statisticky neprůkazně ($P \leq 0,05$). Největší

pokles hmotnosti semen byl zaznamenán u varianty hnojené selenanem v dávce 40 g.ha⁻¹ (tab. 19). Z výsledků pokusu s ječmenem jarním (*Hordeum vulgare*) provedeného Habibim (2013) se jeví hmotnost tisíce semen rovněž bez závislosti na aplikaci selenanu. Naopak Teimouri et al. (2014) shledávají vyšší hmotnost semen po aplikaci seleničitanu u pšenice ozimé (*Triticum aestivum*).

Tab. 19 Průměrná HTS máku (g) po aplikaci seleničitanu i selenanu

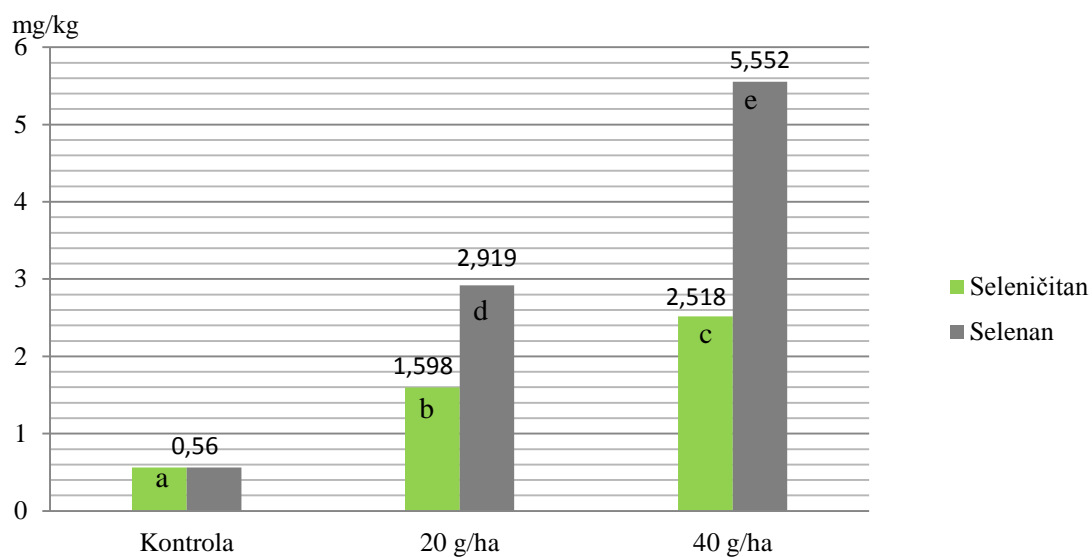
Varianta	HTS (g) ± SE	Rel. %	<i>P</i> ≤0,05
Kontrola	0,422 ± 0,018	100,00%	a
Se 1	0,417 ± 0,016	98,82%	a
Se 2	0,414 ± 0,015	98,10%	a
Se 3	0,414 ± 0,006	98,10%	a
Se 4	0,392 ± 0,011	92,89%	a

Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 1: 20 g.ha⁻¹, Se 2: 40 g.ha⁻¹ (seleničitan). Kontrola: 0 g.ha⁻¹, Se 3: 20 g.ha⁻¹, Se 4: g.ha⁻¹ (selenan). Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl (*P*≤0,05).

5.2.2 Obsah selenu v semeni máku

V polním pokusu se statisticky průkazně (*P*≤0,05) zvýšil obsah selenu v semeni máku po aplikaci obou stupňovaných dávek selenanu i seleničitanu, jak uvádí graf 9. U variant s aplikovaným seleničitanem v dávkách 20 a 40 g Se.ha⁻¹ se zvýšilo množství selenu o 185,4 %, respektive 349,6 %. U varianty s aplikovaným selenanem v dávkách 20 a 40 g Se.ha⁻¹ se obsah Se v semeni máku zvýšil o 421, 3 %, respektive o 891,4 %. Seppanen et al. (2010) v pokusu s řepkou (*Brassica napus*) potvrzují výrazný nárůst akumulace selenu v semeni účinkem aplikace selenanu v dávce 30 g Se.ha⁻¹. Obdobně zjistili zvýšenou akumulaci Se po aplikaci seleničitanu v dávce 30 g Se.ha⁻¹. Galinha et al. (2013) ve svých pokusech s pšenicí tvrdou (*Triticum durum*) a pšenicí ozimou (*Triticum aestivum*) potvrzují pozitivní navýšení akumulace selenu v zrnu účinkem přihnojení seleničitanem i selenanem v dávkách 4; 20 a 100 g Se.ha⁻¹. Poblaciones et al. (2013) ve svém pokusu s hrachem setým (*Pisum sativum*) informují o zvýšené akumulaci selenu v semeni při aplikaci seleničitanu i selenanu. Škarpa a Richter (2011) uvádějí podobné zvýšení obsahu selenu v semeni máku po foliární aplikaci 300 g Se.ha⁻¹ ve fázi po odkvětu, vzrostl 4x oproti kontrole.

Graf 9 Obsah selenu v semeni v mg.kg⁻¹



Následné testování (Fischerův LSD test) – varianty se stejnými písmeny vyjadřují statisticky nevýznamný rozdíl ($P \leq 0,05$).

6 ZÁVĚR

V nádobovém pokusu byl vlivem půdní aplikace selenanu v testovaných dávkách signifikantně ($P \leq 0,05$) zvýšen obsah selenu ve všech částech rostliny máku, po suplementaci seleničitanu pouze v dolní části stonku a spodních listech. Selenan aplikovaný ve všech dávkách (0, 150, 300 a 600 g Se.ha⁻¹) byl akumulován především v tobolkách. Z tohoto důvodu se pro biofortifikaci máku jeví jako vhodnější tato forma selenu.

Půdní aplikace seleničitanu a selenanu v nádobovém pokusu neměla průkazný vliv ($P \leq 0,05$) na výnos semene máku a hmotnost tisíce semen. Výnos variant s aplikovaným seleničitanem se signifikantně nelišil od produkce semene dosažené na variantách hnojených selenanem. Hmotnost tisíce semen byla průkazně ($P \leq 0,05$) vyšší u variant s aplikovaným seleničitanem při srovnání s variantami hnojenými selenanem v dávkách 150 a 300 g.ha⁻¹. Obsah selenu se v semeni průkazně ($P \leq 0,05$) zvyšoval se stupňovanými dávkami seleničitanu i selenanu. Statisticky průkazně ($P \leq 0,05$) byla účinnější aplikace selenanu v porovnání se seleničitanem, a to o 205,7 %, o 414,1 %, respektive o 853,7 %.

V polním pokusu snížila foliární aplikace selenanu i seleničitanu (v dávkách 20 a 40 g.ha⁻¹) hmotnost tisíce semen, nikoliv však statisticky průkazně ($P \leq 0,05$). Při foliární aplikaci selenu došlo ke statisticky neprůkaznému ($P \leq 0,05$) snížení výnosu jak při použití seleničitanu u obou sledovaných dávek, tak při použití selenanu v dávce 40 g Se.ha⁻¹. Obsah Se v semeni máku signifikantně ($P \leq 0,05$) vzrostl s narůstající dávkou seleničitanu i selenanu. Aplikovaný selenan byl ze sledovaných forem Se významně ($P \leq 0,05$) účinnější v akumulaci selenu v semeni. Oproti kontrole vzrostlo množství selenu v semeni po aplikaci seleničitanu u dávek 20 a 40 g Se.ha⁻¹ o 185,4 %, respektive o 349,6 %, po aplikaci selenanu o 421,3 %, respektive o 891,4 %.

Výsledky této práce ukazují selenan jako vhodnější formu selenu k využití při biofortifikaci máku.

7 DOPORUČENÍ PRO PRAXI

Selen se řadí mezi esenciální prvky, které hrají ve výživě člověka důležitou roli v jeho antioxidačním systému. Považuje se za individuální antioxidant a spolu s dalšími látkami (např. vitamínem C a E) spolupracuje v procesech ochrany buněk před volnými radikály. V řadě zemí Evropy, včetně ČR, je příjem Se z potravy pod doporučeným denním limitem, který představuje 55 μg .

Mák je tradiční českou komoditou, a to nejen na polích, ale i v kuchyni. Ročně je v ČR spotřebováno jako potravina 0,4 kg semen máku na osobu. I toto zdánlivě malé množství může zabezpečit, při zařazení půdní nebo mimokořenové biofortifikace do technologie pěstování této plodiny, od 3 až do 73 % denní potřeby Se pro dospělého jedince.

Z výsledků diplomové práce je možné doporučit selenan jako vhodnou formu selenu k využití pro biofortifikaci máku. Jeho aplikaci je možné provádět jak do půdy v doporučené dávce 600 $\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}$ s možností využití jeho půdní zásoby následnou plodinou, tak mimokořenově v dávce 40 $\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Autor i školitel práce jsou si vědomi úskalí, která limitují rozšířené využití této formy selenu. Jedná se především o jeho omezenou dostupnost v kvalitě a množství umožňující velkovýrobní zpracování a rovněž poměrně vysokou cenu, která je cca 3,5x vyšší než seleničitanu.

Zde se nabízí možnost prodeje takovéto nutričně „obohacené“ potraviny jako potraviny s přidanou hodnotou za cenu, která bude zohledňovat náklady na její výrobu.

8 LITERATURA

- AKESSON B., BELLOW T., BURK R. F., 1994: Purification of selenoprotein P from human plasma. *Biochemistry physiological acta*, 1204 (2): s. 243-249.
- ALLANDER E., 1994: Kashin-Beck disease. An analysis of research and public health activities based on a bibliography 1849-1992. *Scandinavian journal of rheumatology*, 99: s. 1-36.
- ALLEN L., DE BENOIST B., DARY O., HURRELL R., 2006: Guidelines on food fortification with micronutrients. WHO. 341 s.
- AMODIO-COCHIERI R., ARNESE A., RONCIONI A., SILVESTRI G., 1995: Evaluation of the selenium content of the traditional Italian diet. *Internal journal food science nutrition*, 46 (2): s. 149-154.
- ARVY M., 1982: Translocation of selenium in the bean plant (*Phaseolus vulgaris*) and the field bean (*Vicia faba*). *Physiology plant*, 56: s. 299-302.
- ARVY M., 1993: Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*). *Journal of experimental botany*, 44(6): s. 1083-1087.
- ASPILA P., 2005: History of selenium supplemented fertilization in Finland. p. 8-13. In EUROLA M. (ed), Proceedings Twenty years of selenium fertilization. MTT Agriifood research Finland. Helsinki, 110 s.
- BARANYK P., 2010: *Olejniny*. Profipress, Praha, 206 s.
- BARILLAS L. R. V., QUINN C. F., FREEMAN J. L., LINDBLOM S. D., FAKRA S. C., MARCUS M. A., GILLIGAN T. M., ALFORD E. R., WANGELINE A. L., PILON-SMITS E. A. H., 2012: Selenium distribution and speciation in the hyperaccumulator *Astragalus bisulcatus* and associated ecological partners. *Plant physiology*, 159: s. 1834-1844.
- BARRAK M. A., SUTTER M. E., SCHWARTZ M., MORGAN B. W., 2012: Case series of selenium toxicity from a nutritional supplement. *Clinical toxicology*, 50: s. 57-64.

- BAUM M. K., SHOR-POSNER G., 1998: Micronutrient status in relationship to mortality in HIV-1 disease. *Nutritional review*, 56 (2): s. 135-139.
- BEHNE D., KYRIAKOPOULOS A., KALCHLOSCH M., WEISS-NOWAK C., PFEIFER H., GESSNER H., HAMMEL C., 1997: Two new selenoproteins found in the prostatic glandular epithelium and in the spermatid nuclei. *Biomedical and enviromental sciences*, 10 (2-3): s. 340-345.
- BECHYNĚ M., KADLEC T., VAŠÁK J., 2001: *Mák*. Semafor, Praha, 130 s.
- BOLDRIN P. F., FAQUIN V., RAMOS S. J., BOLDRIN K. V. F., ÁVILA F. W., GUILHARME L. R. G., 2013: Soil and foliar application of selenium in rice biofortification. *Journal of food composition and analysis*, 31 (2): s. 238-244.
- BROWN T. A., SHRIFT A., 1982: Selenium: toxicity and tolerance in higher plants. *Biological reviews*, 57 (1): s. 59-84.
- BUGEL S., SANDSTROM B., SKIBSTED L. H., 2004: Pork meat: A good source of selenium? *Journal of trace elements in medicine and biology*, 14 (4): s. 307-311.
- BURK R. F., HILL K. E., 2005: Selenoprotein P: An extracellular protein with unique physical characteristics and a role in selenium homeostasis. *Annual reviews nutrition*, 25: s. 215-235.
- BUSINELLI D., DAMATO R., ONOFRI A., TEDESCHINI E., TEI F., 2015: Se-enrichment of cucumber (*Cucumis sativus* L.), lettuce (*Lactuca sativa* L.) and tomato (*Solanum lycopersicum* L.) through fortification in pre-transplanting. *Scientia horticulture*, 197: s. 679-704.
- CAKIR O., TURGUT-KARA N., ARI S., 2012: Selenium metabolism in plants: molecular approaches, s. 209-232. In: Montanaro G. (ED): Advantages in selected plant physiology aspects, Intech.
- CAMPOS-BOWERS M. H., WITTENMYER B. F., 2007: Biofortification in China: policy and practice. *Health research Policy and systems*, 5 (10): 7 s.

- CARVALHO S. M. P., VASCONCELOS M. W., 2013: Producing more with less: Strategies and novel technologies for plant-based food biofortification. *Food research international*, 54: s. 961-971.
- CARVALHO K. M., GALLARDO-WILLIAMS M. T., BENSON R. F., MARTIN D. F., 2003: Effects of selenium supplementation on four agricultural crops. *Journal agricultural food chemistry*, 21: s. 704-709.
- CIHLÁŘ P., VAŠÁK J., BEČKA D., VORŠILKA T., VLAŽNÝ P., 2013: Nové možnosti zvýšení efektivity pěstování máku. *Úroda*, 1: s. 39-42.
- COMBS F. G., GRAY W. P., 1998: Chemopreventive agents: selenium, *Pharmacological Therapy*, 79 (3): s. 179-192.
- COMBS G. F., 2001: Selenium in global food systems. *British journal of nutrition*, 85: s. 517-547.
- COMINETTI C., DE BORTOLI M., GARRIDO A. B., COZZOLINO S. M. F., 2012: Brazilian nut consumption improves selenium status and glutathione peroxidase activity and reduces atherogenic risk in obese women. *Nutrition research*, 32 (6): s. 403-407.
- CONNER T. S., RICHARDSON A. C., MILLER J. C., 2015: Optimal serum selenium concentrations are associated with lower depressive symptoms and negative mood among young adults. *American society for nutrition*, 145 (1): s. 59-65.
- DHILLON S. K., DHILLON K. S., 2009: Phytoremediation of selenium-contaminated soils: The efficiency of different cropping systems. *Soil use and management*, 25: s. 441-453.
- FÁBRY A., 1975: *Řepka, hořčice, mák a slunečnice*, Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 358 s.
- FANG W., WU P., HU R., HUANG Z., 2003: Environmental Se-Mo-B deficiency and its possible effects on crops and Keshan-Beck disease (KBD) in the Chousang area, Yao county, Shaanxi province, China. *Environmental chemistry an health*, 25: s. 267-280.

- FAIRWEATHER-TAIT S. J., BAO Y., BROADLEY M. R., COLLINGS R., FORD D., HESKETH J. E., HURST R., 2011: Selenium in human health and diseases. *Antioxidants and redox signaling*, 14 (7): s. 1337-1383.
- FALAHATZADEH A., HABIBI D., PAKNEJAB F., PAZOKI A. R., ILKAEI M. N., 2011: The study of the effect of selenium on yield components of two varieties of wheat (*Triticum aestivum*) in normal irrigation and drought stress (lack of the water) condition. *Plant and ecosystem*, 26: s. 115-136.
- FERNANDES K. F. M., BERTON R. S., COSCIONE A. R., 2014: Selenium biofortification of rice and radish: effect of soil texture and efficiency of two extractants. *Plant soil environmental*, 60: s. 105-110.
- FISININ V. I., PAPAZYAN T. T., SURAI P. F., 2009: Producing selenium-enriched eggs and meat to improve the selenium status of the general population, *Critical review biotechnology*, 29 (1): s. 18-28.
- FLOHÉ L., FORESTA C., GAROLLA A., ROVERI A., URSINI F., WISSING J., MAIORINO M., 2003: PHGPx is the mitochondrial capsule selenoprotein of mammalian sperm. *Andrologia*, 35: s. 2-12.
- GALEAS M. L., ZHANG L. H., FREEMAN J. L., WERGER M., PILON-SMITS E. A. H., 2007: Seasonal fluctuations of selenium and sulfur accumulation in selenium hyperaccumulators and related nonaccumulator. *New phytologist*, 173: s. 517-525.
- GALINHA C., FREITAS M. C., PACHECO A. M. G., COUNTINHO J., MACAS B., ALMEIDA A. S., 2011: Radiotracing selenium in bread-wheat seeds for a Se-biofortification program: an optimization study in seed enrichment. *Journal radioanalytical nuclear chemistry*, 291: s. 193-195.
- HABIBI G., 2013: Effect of drought stress and selenium spraying on photosynthesis and antioxidant activity of spring barely. *Acta agriculturae Slovenica*, 101: s. 31-39.

- HEGEDUS O., HEGEDUSOVÁ A., JAKABOVÁ S., VARGOVÁ A., PAVLÍK V., 2009: Modelling selenium transfer in soil-plant system, *Acta fytotechnica et zootechnica*, mimořádné číslo: s. 206-215
- HUANG Z., ROSE A. H., HOFFMANN P. R., 2012: The role of selenium in inflammation and immunity: From molecular mechanisms to therapeutic opportunities. *Antioxidants and redox signaling*, 16(7): s. 705-743.
- CHEN J., XUE S., LI S., WANG Z., YANG H., WANG W., SONG D., ZHOU X., CHEN CH., 2012: Oxidant damage in Keshin-Beck disease and a rat Kashin-Beck disease model by employing T-2 toxin treatment under selenium deficient conditions. *Journal of orthopaedic research*, 30 (8): s. 1229-1237.
- CHILIMBA A. D. C., YOUNG S. D., BLACK C. R., MEACHAM M. C., LAMMEL J., BROADLEY M. R., 2012: Agronomic biofortification of maize with selenium (Se) in Malawi. *Field crops research*, 125: s. 118-128.
- CHU F. F., DOROSHOW H. J., ESWORTHY R. S., 1993: Expression, characterization and tissue distribution of a new cellular selenium-dependent glutathione peroxidase, GSHPx-GI. *The journal of biochemical chemistry*, 208: s. 2571-2576.
- JAGER T., DREXLER H., GOEN T., 2014: Human metabolism and renal excretion of selenium compounds after oral ingestion of sodium selenate dependent on trimethylselenium ion (TMSe) status. *Archaeological toxicology*, 90: s. 149-158.
- KABATA-PENDIAS A., 2011: *Trace elements in soils and plants*. 4th edition, CRC Press, BocaRaton, 520 s.
- KAPOOR L. D., 1995: *Opium poppy: Botany, chemistry and pharmacology*. Food products press, New York, London, 545 s.
- KESKINEN R., TURAKAINEN M., HARTIKAINEN H., 2010: Plant availability of soil selenate additions and selenium distribution within wheat and ryegrass. *Plant soil*, 333: s. 301-313.
- KIELISZEK M., BLAŽEJAK S., 2013: Selenium: significance and outlook for supplementation. *Nutrition*, 29: s. 713-718.

- KIKKERT J., BERKELAAR E., 2013: Plant uptake and translocation of inorganic and organic forms of selenium. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 65: s. 458-465.
- KOSEK Z., 2014: Perspektivy pěstování máku v ČR, EU a ve světě. *Úroda*, 1: s. 29-30.
- KUHN V., 1936: *Mák jako olejnina a rostlina narkotická*. Praha,
- KVÍČALA J., 2003: Zvýšení příjmu mikronutrientu selenu – utopie, fikce, prozřetelnost či nutnost? – II. Část. *Interní medicína*, 7: s. 354-359.
- LACOURCIERE G. M., STADTMAN T. C., 2001: Utilization of selenocysteine as a source of selenium for selenophosphate biosynthesis. *Biofactors*, 14: s. 69-74.
- LARSEN P. R., BERRY M. J. 1995: Nutritional and hormonal regulation of thyroid hormone deiodinases. *Annual review of nutrition*, 15: s. 323-352.
- LONGCHAMP M., CASTREC-ROUELLE M., BIRON P., BARIAC T., 2015: Variations in the accumulation, localization and rate of metabolization of selenium in mature *Zea mays* plants supplied with selenite or selenate. *Food chemistry*, 182: s. 128-135.
- LYONS G. H., JUDSON G. J., ORTIZ-MONASTERIO I., GENC Y., STANGOULIS J. C. R., GRAHAM R. D., 2005: Selenium in Australia: Selenium status and biofortification of wheat for better health. *Journal of trace elements in medicine and biology*, 19: s. 75-82.
- LYONS G. H., GENC Y., SOOLE K., STANGOULIS J. C. R., LIU F., GRAHAM R. D., 2009: Selenium increases seed production in Brassica. *Plant soil*, 318: s. 73-80.
- MANDIC M. L., HERCEG Z., PRIMORAC L., KLAPEC T., IKIC M., GRGIC Z., GRGIC J., LOVRIC T., 1998: Daily dietary intake of selenium in eastern Croatia, *The science of the total environment*, 217 (1): s. 127-130.
- MARSHNER H., 1995: *Mineral nutrition of higher plants*. London. Academic press. 889 s.

- MCKENZIE R., RAFFERTY T., BECKETT G. J., 1998: Selenium: an Essentials element for imune function. *Imunology today*, 19 (8): s. 342-345.
- MEHDAWI A. F., PILON.SMITS E. A. H., 2011: Ecological aspects of plant selenium hyperaccumulation. *Plant biology*, 14: s. 1-10.
- MEHDAWI A. F. E., REYNOLDS R. J. B., PRINS CH. N., LINDBLOM S. D., CAPPS J. J., FAKRA S. C., PILON-SMITS E. A. H., 2014: Analysis of selenium accumulation, speciation and tolerance of potencial selenium hyperaccumulator *Symphyotrichum aricoides*. *Physiologia plantarum*, 152: s. 70-83.
- MULLER D., DESEL H., 2010: Acute selenium poisoning by paradise nuts (*Lecythis ollaria*). *Human and experimental toxikology*, 29 (5): s. 431-434.
- MURPHY J., HANNON E. M., KIELY M., FLYNN A., CASHMAN K. D., 2002: Selenium intakes in 18-64-y-old Irish adults. *European journal of clinical nutrition*, 52: s. 402-408.
- MURRAY CH., LOPEZ A., 2002: *The world heatlh report 2002*. WHO, France, 230 s.
- NANTEL G., TONTISIRIN K., 2001: *Human vitamin and mineral requirements*. FAO/WHO. Thailand. 303 s.
- NATIONAL HEALTH AND MEDICAL RESEARCH COUNCIL (NHMRC), 1991: *Recomended dietary intakes for use in Australia*. Australian government publishing service, Canberra, s. 25-26.
- PARKER D. R., FEIST L. J., VARVEL T. W., THOMASON D. N., ZHANG Y., 2003: Selenium phytoremediation potential of *Stanleya pinnata*. *Plant and soil*, 249: s. 157-165.
- PILON-SMITS E. A. H., QUINN C. F., TAPKEN W., MALAGOLI M., SCHIAVON M., 2009: Physiological functions of beneficial elements. *Curnnet opinion in Plant biology*, 12: s. 267-274.

- POBLACIONES J. M., RODRIGO S. M., 2013: Evaluation of the potential of peas (*Pisum sativum L.*) to be used in selenium biofortification programs under mediterranean conditions. *Biological trace elements residual*, 151: s. 132-137.
- POGGI V., ARCIONI A., FILIPPINI P., PIFFERRI P. G., 2000: Foliar application of selenite and selenate to potato (*Solanum tuberosum*): effect of a ligand agent on selenium content of tubers. *Journal agrical food chemistry*, 48(10): 4749-4751.
- RAYMAN M. P., 2012: *Selenium and human health*. Lancet, 379: s. 1256-1268.
- REILLY C., 1996: *Selenium in food and health*. Springer science bussiness media, New York, 342 s.
- RIAZ M., MEHMOOD K. T., 2012: Selenium in human health and disease: a review. *Journal of postgraduate medical institute*, 26 (2): s. 120-133.
- RIOS J. J., BLASCO B., LEYVA R., SANCHEZ-RODRIGUEZ E., RUBIO-WILHELMI M. M., ROMERO L., RUIZ J. M., 2013: Nutritional balance changes in lettuce plant grown under different doses and forms of selenium. *Journal of plant nutrition*, 36: s. 1344-1354.
- RODRIGO S., SANTAMARIA O., LOPEZ-BELLIFO F. J., POBLACIONES M. J., 2013: Agronomic selenium biofortification of two-rowed barely under Mediterranean conditions. *Plant soim enviroment*, 59 (3): s. 115-120.
- ROSENFELD I., BEATH O. A., 1964: *Selenium: geobotany, biochemistry, toxicity and nutrition*. Academic press, New York, 410 s.
- ROTRUCK J. T., POPE A. L., GRANTHER H. E., SWANSON A. B., HAFEMAN D. G., HOEKSTRA W. G., 1973: Selenium: Biochemical role as a component of glutahione peroxidase. *Science*, 179 (4073): s. 588-590.
- SALMINEN P., 2005: Increasing the selenim content of agricultural crops: decisions and monitoring. s. 14-15. In EUROLA M. (ed), Proceedings Twenty years of selenium fertilization. MTT Agriifood research Finland. Helsinki, 110 s.

- SASMAZ A., 2009: The distribution and accumulation of selenium in roots and shoots of plants naturally grown in the soils of Kebans Pb-Zn-F mining area, Turkey. *International journal of phytoremediation*, 11: s. 385-395.
- SENTHILKUMARAN S., BALAMURUGAN N., VOHRA R., THIRUMALAIKOLUNDUSUBRAMAIAN P., 2012: Paradise nut Paradox: Alopecia due to selenosis from a nutritional therapy. *International journal of trichology*, 4 (4): s. 283-284.
- SEPPANEN M. M., KONTTURI J., HERAS I. L., MADRID Y., CÁMARA C., HARTIKAINEN H., 2010: Agronominc biofortification of Brassica with selenium enrichment of SeMet and its identification in Brassica seeds and meal. *Plant soil*, 337: s. 273-283.
- SHI B., SPALLHOLZ J., 1994: Selenium from beef is highly bioavailable as assessed by liver glutathione peroxidase (EC 1-11-1-9) activity and tissue selenium. *British journal of nutrition*, 72 (6): s. 873-881.
- SHUMAN L. M., 1998: Micronutrient fertilizers. *Journal of crop production*, 1: s. 165-195
- SUZUKI K. T., 2005: Metabolomics of selenium: Se metabolites based on speciation studies. *Journal of health science*, 51 (2): s. 107-114.
- STAPLETON S. R., 2000: Selenium: an insulin-mimetic. *Cellular and molecular life science*, 57 (13-14): s. 1874-1879.
- ŠKARPA P., RICHTER R., (2011): Foliar nutrition of poppy plants (*Papaver somniferum*) with selenium and the effect on its content in seeds. *Journal elementology*, 16(1): s. 85-92.
- TAMURA T., STADTMAN T. C., 1996: A new selenoprotein from human lung adenocarcinoma cells: purification, properties and thioredoxin reductase activity. *Proceedings of the national academy of science of the United states of america*, 93 (3): s. 1006-1011.

- TAPIERO H., TOWNSEND D. M., TEW K. D., 2003: The antioxidant role of selenium and seleno-compounds. *Biomedicine and pharmacotherapy*, 57: s. 134-144.
- TEIMOURI S., HASANPOUR J., TAJALI A. A., 2014: Effect of selenium spraying on yield and growth indices of wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress condition. *International journal of advanced biological and biomedical research*, 6: s. 2091-2103.
- TURAKAINEN M., HARTIKAINEN H., SEPPANEN M. M., 2004: Effects of selenium treatments on potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and concentration of soluble sugars and starch. *Journal agronomical food chemistry*, 52: s. 5378-5382.
- VAŠÁK J., 2010: *Mák*. Powerprint, Praha, 352 s.
- VELÍŠEK J., 2002: *Chemie potravin 2*. 2. Vydání, OSSIS, Tábor, 303 s.
- VRBOVSKÝ V., ENDLOVÁ L., RYCHLÁ A., 2014: Morfin – klíčový parametr sledovaný při šlechtění máku. *Úroda*, 9: s. 33-37.
- WAEGENEERS N., THIRY C., DE TEMMERMAN L., RUTTENS A., 2013: Predicted dietary intake of selenium by the general adult population in Belgium. *Food additives and contaminants*, 30 (2): s. 278-285.
- WANG J., WANG Z., MAO H., ZHAO H., HUANG D., 2013: Increasing Se concentration in maize grain with soil or foliar applied selenite on the Loess Plateau in China. *Field crops research*, 150: s. 83-90.
- WHITE P. J., BROADLEY M. R., 2009: Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets – iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine. *New Phytologist*, 182: s. 49-84.
- YANG G. Q., WANG S. Z., ZHOU R. H., SUN S. Z., 1983: Endemic selenium intoxication of humans in China. *The american journal of clinical nutrition*, 37 (5): s. 872-881.

- YANG G., YIN S., ZHOU R., GU L., YAN B., LIU Y., 1989: Studies of safe maximal daily Se-intake in a seleniferous area in China. Part II: Relation between Se-intake and the manifestation of clinical signs and certain biochemical alterations in blood and urine. *Journal trace elements electrolytes health*, 3 (3): s. 123-130.
- YOSHIDA M., ABE M., FUKUNAGA K., KUKUCHI K., 2002: Bioavailability of selenium in the defatted dark muscle of tuna. *Food additives and contaminants*, 19 (10): s. 990-995.
- ZAYED A., MEL LYTTLE C., TERRY N., 1998: Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants. *Planta*, 206: s. 284-292.
- ZBÍRAL J., 2002: *Analýza půd I. Jednotlivé pracovní postupy*. UKZÚZ, Brno 197 s.
- ZBÍRAL J., 2005: *Analýza rostlinného materiálu: jednotlivé pracovní postupy*. UKZUZ, Brno, 192 s.
- ZEHNÁLEK P., 2014: Mák setý – zkoušení registrovaných odrůd. *Úroda*, 5: s. 51-53.
- ZEYNEP A., DUONG F. L., HAWKES W. C., 2015: Selenoprotein W controls epidermal growth factor receptor surface expression, activation and degradation via receptor ubiquitination. *BBA – molecular cell research*, 1853: s. 1087-1095.
- ZHANG F., GUO X., WANG W., WU S., MA W., YAN H., 2012: Expression profile analysis of mycotoxin-related genes in cartilage with endemic osteochondropathy kashin-beck disease. *Musculoskeletal disorder*, 13: s. 1-7.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 Nádobový pokus při půdní aplikaci selenu ve fázi dlouhivého růstu (BBCH 35).....	34
Obrázek 2 Lokalita polního pokusu	35
Obrázek 3 Porost máku v době listové aplikace selenu (BBCH 69).....	37

8.2 Seznam grafů

Graf 1 Vývoj ploch produkce a výnosu máku setého v letech 2007-2015 (ČSU, Kosek 2014).....	14
Graf 2 Klimadiagram průběhu počasí v roce 2015 v Žabčicích	36
Graf 3 Vliv dávky selenu na jeho odběr v jednotlivých částech rostlin po aplikaci seleničitanu	40
Graf 4 Vliv dávky selenu na jeho odběr v jednotlivých částech rostlin po aplikaci selenanu	42
Graf 5 Distribuce Se v jednotlivých částech rostlin po aplikaci různých dávek seleničitanu a selenanu	43
Graf 6 Porovnání průměrného výnosu v g/nádoba u jednotlivých dávek mezi seleničitanem a selenanem.....	45
Graf 7 Porovnání průměrného HTS (g) u jednotlivých dávek mezi seleničitanem a selenanem	47
Graf 8 Porovnání průměrného obsahu Se v semeni v mg.kg ⁻¹ u jednotlivých dávek mezi seleničitanem a selenanem	49
Graf 9 Obsah selenu v semeni v mg.kg ⁻¹	52

8.3 Seznam tabulek

Tab. 1 Fyziologické rozdíly mezi hyperakumulátory a neakumulátory selenu (Mehdawi a Pilon-Smits, 2011).....	16
Tab. 2 Přehled doporučených denních dávek pro jednotlivé kategorie osob (NHMRC, 1991).....	23
Tab. 3 Obsah selenu ve vybraných potravinách v Belgii (Waegeneers et al., 2013).	25
Tab. 4 Agrochemické vlastnosti půdy v nádobách	33
Tab. 5 Schéma hnojení.....	33
Tab. 6 Agrochemické vlastnosti stanoviště	35
Tab. 7 Schéma hnojení selenem	37
Tab. 8 Vliv dávky selenu na jeho obsah v jednotlivých částech rostlin po aplikaci seleničitanu	39
Tab. 9 Vliv dávky selenu na jeho obsah v jednotlivých částech rostlin po aplikaci selenanu	41
Tab. 10 Distribuce Se v jednotlivých částech rostlin po aplikaci různých dávek seleničitanu	42
Tab. 11 Distribuce Se v jednotlivých částech rostlin po aplikaci různých dávek selenanu	44

Tab. 12 Průměrný výnos semene máku v g/nádoba po aplikaci seleničitanu	44
Tab. 13 Průměrný výnos semene máku v g/nádoba po aplikaci selenanu	45
Tab. 14 Průměrná HTS máku (g) po aplikaci seleničitanu	46
Tab. 15 Průměrná HTS máku (g) po aplikaci selenanu	46
Tab. 16 Průměrný obsah Se v semeni máku v mg.kg ⁻¹ po aplikaci seleničitanu	48
Tab. 17 Průměrný obsah Se v mg.kg ⁻¹ po aplikaci selenanu.....	49
Tab. 18 Průměrný výnos semene máku v kg.ha ⁻¹ po aplikaci seleničitanu a selenanu	50
Tab. 19 Průměrná HTS máku (g) po aplikaci seleničitanu i selenanu	51