

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra pedologie a ochrany půd**



**Fakulta agrobiologie,  
potravinových a přírodních zdrojů**

**Příjem kadmia mákem setým**

**Bakalářská práce**

**Lucie Trtílková**

**Výživa a potraviny**

**Vedoucí práce: doc. Ing. Ondřej Drábek, Ph.D.**

**© 2023 ČZU v Praze**

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Příjem kadmia mákem setým" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 21. 4. 2023

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ondřeji Drábkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Děkuji také doc. Mgr. Martině Vítkové, Ph.D. za pomoc s přípravou experimentu. Velké díky patří Ing. Karlu Němečkovi za pomoc při odběru půdních vzorků a za pomoc v laboratoři.

# Příjem kadmia mákem setým

## Souhrn

Cílem této práce bylo vyhodnotit účinnost biocharu a nanoželeza, jako dvou imobilizujících látek, na biologickou dostupnost kadmia v rostlině máku setého, prostřednictvím jednoduchého nádobového pokusu.

V nádobovém pokusu byla použita půda z oblasti Praha-Vinoř, která byla kontaminovaná rizikovými prvky, převážně kadmiiem. Půda nesplňovala legislativní požadavky pro pseudo-totální obsah kadmia v zemědělských půdách.

Jako pokusná rostlina byl vybrán mák setý (*Papaver somniferum* L., odrůda Aplaus), který se řadí mezi rostliny se zvýšenou schopností kumulovat kadmium ve svých pletivech. Mák byl pěstován v nádobovém pokusu ve třech variantách – kontrolní varianta, půda s přídatkem biocharu a půda s kompozitem nZVI-BC. Pokusné nádoby byly umístěny ve venkovních prostorech v polostínu, kryté střechou. Po ukončení růstu byl mák sklizen a připraven na analýzu obsahu kadmia.

Vliv půdní kontaminace kadmiiem byl viditelný už během růstu rostlin. U všech variant pěstovaného máku se potvrdila akumulace kadmia v jejich tkáních. Výsledky ukázaly pozitivní vliv aplikace BC i nZVI-BC na imobilizaci kadmia v půdě v porovnání s kontrolní půdní variantou. Samotný BC se ukázal více účinným sorbentem, než když byl součástí kompozitu s nanoželezem. U varianty půdy se sorbentem BC bylo stanoveno o 16,3 % méně kadmia v biomase máku, než u varianty půdy s kompozitem nZVI-BC. Obsah kadmia v máku pěstovaném na kontrolní variantě půdy byl téměř dvojnásobně vyšší než u máku pěstovaném na půdě s přidanými sorbenty.

Závěrem lze říci, že cíl práce byl splněn s částečně pozitivním výsledkem. Přidané sorbenty sice imobilizovali kadmium v půdě a částečně zamezili tak jeho příjmu mákem, ale i tak byl obsah kadmia v rostlinné biomase vysoký.

**Klíčová slova:** mák setý, kadmium, kontaminovaná půda, biochar, nanoželezo

# Uptake of cadmium by poppy seeds

## Summary

The goal of this thesis was to evaluate the effectiveness of biochar and nanoiron, as two immobilizing substances, on the bioavailability of cadmium in the poppy plant through a simple pot experiment.

The soil used in the pot experiment was from the Prague-Vinoř area, which was contaminated with risk elements, mainly cadmium. The soil did not meet the legislative limits for pseudo-total cadmium content in agricultural soils.

As an experimental plant was selected the poppy (*Papaver somniferum* L., variety Aplaus), which is one of the plants with an increased ability to accumulate cadmium in its tissues. Poppy was cultivated in a pot experiment in three treatments – control, soil with addition of biochar and soil with nZVI-BC composite. After the completion of growth, poppy was harvested and prepared for cadmium content analysis.

The effect of soil cadmium contamination was already visible during plant growth. The accumulation of cadmium in the tissues of all the poppy varieties grown was confirmed. The results showed a positive effect of both BC and nZVI-BC application on the immobilization of cadmium in soil compared to the control soil variant. BC alone was more effective sorbent than when it was part of the composite with nano-iron. The soil variant with the BC sorbent was found to contain 16.3 % less cadmium in poppy biomass than the soil variant with the nZVI-BC composite. The cadmium content of poppy grown on the control soil variant was almost twice as high as that of poppy grown on soil with added sorbents.

In conclusion, the objective of the work was met with a partially positive result. Although the added sorbents immobilized cadmium in the soil and partially prevented its uptake by poppy, the cadmium content in the plant biomass was still high.

**Keywords:** poppy seeds, cadmium, contaminated soil, biochar, nanoiron

# Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Cíl práce</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Literární rešerše</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1 Mák setý</b> .....	<b>10</b>
3.1.1 Historie máku .....	10
3.1.2 Botanické zařazení .....	10
3.1.3 Morfologie .....	11
3.1.4 Klasifikace máku .....	12
3.1.4.1 Podle využití .....	12
3.1.4.2 Podle doby výsevu .....	12
3.1.4.3 Podle obsahu alkaloidů .....	12
3.1.5 Požadavky na kvalitu makových semen .....	13
3.1.6 Chemické složení makových semen .....	14
3.1.6.1 Složení makových semen .....	14
3.1.6.2 Obsah alkaloidů .....	15
3.1.6.3 Rizikové prvky v máku .....	15
3.1.7 Produkce máku .....	17
3.1.8 Podmínky pěstování .....	18
3.1.9 Legislativa máku v České republice .....	19
<b>3.2 Kadmium</b> .....	<b>19</b>
3.2.1 Znečištění životního prostředí kadmii .....	20
3.2.1.1 Znečištění půd v České republice .....	20
3.2.2 Vliv kadmia na živé organismy .....	21
3.2.2.1 Vliv na rostliny .....	21
3.2.2.2 Vliv na lidský organismus .....	22
3.2.2.3 Kadmium v potravinách .....	23
<b>3.3 Sorbenty kadmia</b> .....	<b>24</b>
3.3.1 Biochar .....	24
3.3.2 Nanoželezo .....	25
<b>4 Metodika</b> .....	<b>26</b>
<b>4.1 Půda</b> .....	<b>26</b>
4.1.1 Lokalita a odběr .....	26
4.1.2 Chemická stabilizace kontaminované půdy .....	27

4.1.2.1	Aktivace sorbentů .....	27
4.1.2.2	Aplikace sorbentů.....	27
<b>4.2</b>	<b>Nádobový pokus .....</b>	<b>28</b>
<b>4.3</b>	<b>Stanovení obsahu kadmia .....</b>	<b>29</b>
4.3.1	Rentgenová fluorescence .....	29
4.3.2	Atomová absorpční spektrometrie .....	29
<b>4.4</b>	<b>Statistická analýza.....</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>Výsledky .....</b>	<b>30</b>
5.1	Nádobový pokus .....	30
5.2	Obsah kadmia v půdě.....	31
5.3	Obsah kadmia v rostlinách .....	31
<b>6</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>35</b>
<b>8</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>36</b>

# 1 Úvod

V dnešní době existuje mnoho globálních problémů zhoršujících kvalitu života, mezi které můžeme řadit toxicitu rizikových prvků a jejich bioakumulaci v organismech. Ve většině rozvinutých zemí způsobil rychlý vývoj průmyslové činnosti vážné škody na životním prostředí (Xiao et al. 2020). V souvislosti s kontaminací půdy je v současné době rizikovým prvkům věnována zvýšená pozornost.

Mezi významné rizikové prvky kontaminující zemědělské půdy se řadí kadmium. Jeho zvýšené koncentrace v půdě se staly vážným problémem v zemích po celém světě. Je známo, že kadmium nemá žádnou biologickou funkci a jeho přítomnost poškozuje téměř všechny živé organismy. Mezinárodní agentura pro výzkum nádorových onemocnění klasifikovala kadmium jako lidský karcinogen na základě prokazatelných výsledků ve studiích karcinogeneze na lidech a na zvířatech (Wang et al. 2021).

Mezi zemědělské plodiny, které jsou schopné zvýšené kumulace kadmia ve svých pletivech a semenech, patří mák setý (*Papaver somniferum* L.). Ministertvo zemědělství stanovilo Vyhláškou č. 399/2013 maximální obsah kadmia v semeni máku na 0,8 mg/kg, což je dvojnásobně vyšší hodnota než u ostatních olejnatých semen. Zvýšený příjem kadmia mákem je problémem, ve kterém je stále řada nezodpovězených otázek (Lošák & Varga 2022).

Jednou z možností, jak zamezit zvýšenému příjmu kadmia mákem, je metoda chemické stabilizace kadmia v půdě. Její princip je založen na chemické stabilizaci pomocí přídatných látek, které fungují jako sorbenty. Přidávání sorbentů do půd kontaminovaných rizikovými prvky je v posledních letech široce využíváno také pro jejich schopnosti zlepšovat fyzikální a chemické půdní vlastnosti (Alloway 2013). Proto je jedna z možností, jak dosáhnout imobilizace rizikových prvků v kontaminovaných půdách, přidání biocharu. Biochar je jemnozrnný přírodní porézní materiál podobající se dřevěnému uhlí. Jde o látku bohatou na uhlík, která snižuje biologickou aktivitu a dostupnost mnoha rizikových prvků, včetně kadmia. Zvyšuje hodnoty půdního pH, zlepšuje sorpční schopnosti půdy a je významným zdrojem živin (Qin et al. 2020).

Další z moderních technologií vedoucí ke snížení koncentrace rizikových prvků v půdách je využívání nanotechnologií. Mezi nejefektivnější nanomateriály, které imobilizují kadmium v půdách, patří nanočástice železa (Visentin et al. 2021).



## 2 Cíl práce

- a) Sepsání literární rešerše na téma obsah kadmia v máku setém
- b) Najít lokalitu kontaminovanou kadmíem a v předběžném nádobovém pokusu zjistit, zda je možné ovlivnit vstup kadmia do máku setého přípravkem biocharu a nanoželeza do půdy

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Mák setý

#### 3.1.1 Historie máku

Mák setý je stará kulturní plodina rozšířená na všech kontinentech. Jeho historie spadá až do doby mladší doby kamenné, kdy existují záznamy o jeho používání. Hlavní naleziště stop využívání máku se nacházejí v podhůří Alp a v okolí řeky Rýn. Odkud došlo pravděpodobně k rozšíření máku do dalších oblastí. Nejstarší nález zuhelnatělých makových semen v České republice se datuje do pozdní doby bronzové a byl nalezen v Ostrově u Stříbra (Vašák 2010).

V Sumerské říši byl mák známý svými léčivými a narkotickými účinky již v době přibližně 2100 let před naším letopočtem, pod názvem Hul Gill, v překladu „květina radosti“. Na objevených hlíněných tabulkách, byl klínovým písmem zaznamenán lékařský předpis s tímto ideogramem (Norn et al. 2005). Staří Egypťané používali opium nejčastěji k léčivým účelům, jako sedativum nebo při problémech s kůží. Opium uchovávali v nádobách svým tvarem připomínající obrácenou makovici. Toto využití máku se rozšířilo i do oblasti Arábie, Indie, Persie nebo Číny (Novák & Nováková 2018). Zmínky o máku nacházejí i v Bibli a Talmudu (Bernáth 1999).

Na české území mák přinesli Slované při stěhování národů. Zájem o něj ovšem narostl až za vlády Karla IV., kdy se začal pěstovat ve větším množství jako potravina (Novák & Nováková 2018). Již v té době bylo využívání opia považováno za zdravotní riziko (Vašák 2010). Jako olejnina se u nás mák začal pěstovat až v počátku 19. století (Kubánek 2008). Jednalo se o mák šedosemenný a musel být sklizen ručně, aby nevypadávala jednotlivá semena. S postupným prošlechtěním odrůd a zlepšením mechanizace pěstování a sklizně se v současnosti produkce máku obejde bez ruční práce (Novák & Nováková 2018).

Rozšíření využití máku ve farmaceutickém průmyslu nastalo během 19. století, kdy postupně docházelo k separaci jednotlivých alkaloidů. Po syntetizování heroínu z morfinu se mák začal zneužívat jako droga vyšší společnosti. Vynalezením injekční stříkačky s jehlou v roce 1843 bylo ovlivněno využívání a zneužívání makových alkaloidů a drog z nich vyrobených. Intravenózním podáním dávky bylo pro uživatele výhodnější, jelikož se zvýšil účinek a téměř vymizely nevolnosti po orálním podání (Kubánek 2008).

#### 3.1.2 Botanické zařazení

Čeleď *Papaveraceae* (makovité) zahrnuje 44 rodů, jejichž převážnou část tvoří vyšší dvouděložné byliny, ale své zastoupení zde mají i keře a rody tropických stromů. V českých

podmínkách najdeme z této čeledi rody mák, dymnivka, vlašovičnick, zemědělm a rohatec (Encyclopedia Britannica 2017).

Rod mák (*Papaver*) je největší rod z podčeledi *Papaveroideae* z čeledi *Papaveraceae* (Carolan et al. 2006), zahrnuje kolem 80 druhů rostlin rozšířených v severní Africe, střední a jihozápadní Asii a střední a jižní Evropě (Voglmayr et al. 2014). V České republice můžeme nalézt celkem 6 druhů máku. Nejvýznamějším druhem je mák setý (*Papaver somniferum* L.), který se pěstuje pro své semeno a jako zdroj lékařských alkaloidů. Nejrozšířenějším druhem je mák vlčí (*Papaver rhoeas* L.), dále mák polní (*Papaver argemone* L.), mák časný (*Papaver conifine* L.) a mák pochybný (*Papaver dubium* L.). Na jižní a jihovýchodní Moravě se dá nalézt mák bělokvětý a jihomoravský. Nejvzácnějším druhem máku, který se vzácně nachází v Lounském středohoří, je mák Lecoqův (Slavík 1997).

### 3.1.3 Morfologie

*Papaver somniferum* L. je jednoletá bylina dorůstající do výšky asi 100 cm. Rostliny jsou porostlé trichomy a obsahují bílou, oranžovou nebo červenou mléčnou šťávu neboli latex. Kořenovou soustavu tvoří hlavní dužnatý kořen, ze kterého vyrůstají postranní kořeny s velkým množstvím kořenových vlásků, které se rozprostírají v půdě (Stace 2019). Za příznivých podmínek se uvádí délka kořene kolem 500 mm (Vašák 2010). V nepříznivých podmínkách může hloubka zakořenění dosáhnout až 750 mm. Dříve zasetý mák má hlubší a mohutnější kořenovou soustavu, než později vysetý mák (Fejér 2015). Listy máku se rozlišují podle umístění na stonku (spodní, střední, horní). Tvary listů jsou různorodé, v listové fázi jsou podlouhlé, řapíkaté a vejčitého tvaru. Lodyžní listy jsou přisedlé, vejčité až srdčité. Jsou tmavě zelené a po okrajích jemně nepravidelně vroubkaté (Clapham et al. 1981). Počet listů na rostlině, jejich tvar a velikost je ovlivněna odrůdou a z velké části i stanovištěm a počasím. Květy jsou oboupohlavné, souměrné, tvořeny čtyřmi korunními lístky, dvěma kališními lístky, jedním pestíkem a velkého počtu tyčinek. Zbarvení květů může být od bílé, přes narůžovělou, červenou až po fialovou. Okraj lístků může být celistvý, zvlněný až vykrajovaný (Fejér 2015). Gyneceum s příhrádkami vytváří plod tobolku (makovici), připojenou ke stonku kolénkem (Stace 2019). Velikost tobolek je ovlivněna podmínkami prostředí a agrotechnikou. Tvar a velikost tobolky jsou hlavními faktory ovlivňující produkci opia. Pro úrodu semen je výhodnější vyšší počet příhrádek. Optimální počet se pohybuje mezi 13-15 příhrádkami. Semena máku setého mají ledvinovitý tvar (Fejér 2015) a na povrchu jsou zvrásněná (Stace 2019). Barva semen je různorodým znakem, který může být odlišný v jednotlivých genotypch, ale i v jedné tobolce. Nejčastějšími barvami jsou bílá, modrá, okrová a hnědá. Od základních barev se jednotlivá semena můžou odstínově lišit (Fejér 2015).

### 3.1.4 Klasifikace máku

#### 3.1.4.1 Podle využití

Mák potravinářský (olejný, semenný) má barvu semen bílou, modrou, žlutou, okrovou nebo šedou. Nejčastější barvou je modrá, která zaručuje typické makové vlastnosti (Vašák 2010). Potravinářský mák neobsahuje téměř žádný latex, z důvodu málo vyvinutého systému cévních svazků. Ze stejného důvodu je i obsah alkaloidů v potravinářských odrůdách snížený (do 1 %) (Mikšík & Lohr 2020).

Mák průmyslový naopak od máku potravinářského obsahuje vyšší množství alkaloidů. Semena jsou převážně šedá, černá nebo modrá, ale kvůli nepříjemné chuti a vůni nejsou používána k potravinářským účelům. Hlavním produktem u nepotravinářských máků jsou makovice, z kterých se extrahují alkaloidy pro farmaceutický průmysl (Mikšík & Lohr 2020).

Mák opiový obsahuje vysoké koncentrace alkaloidů, zejména morfinu, dále narkotinu, papaverinu, kodeinu aj. Má dobře vyvinutý systém cévních svazků s velkým množstvím mléčnic produkujících latex. Proto bývá pěstován nelegálně pro jeho produkci. Typickým pěstitelem jsou subtropické oblasti, převážně v Asii (Mikšík & Lohr 2020).

Máky okrasné jsou zastoupeny odrůdami s dekorativními květy nebo tobolkami (Vašák 2010).

#### 3.1.4.2 Podle doby výsevu

Máky jarní zaujímají přibližně 90-100 % z osevních ploch pěstovaného máku v ČR (Vašák 2010).

Máky ozimé se podílejí na výměře osevních ploch z 0-10 % v závislosti na konkrétním roce. Ozimost je u nich geneticky podmíněná. Mladé listy u ozimých odrůd jsou silně chlupaté a mají mléčné skvrny (Mikšík & Lohr 2020).

#### 3.1.4.3 Podle obsahu alkaloidů

S nízkým obsahem morfinu: obsah morfinu v makovině se pohybuje kolem 0,3 %. Využití těchto máku k nezákonné výrobě opia není možné, proto jsou využívány pro potravinářské účely (Vašák 2010).

Se středním obsahem morfinu: v makovině je morfin obsažen v rozmezí 0,3-0,8 %. Pro farmaceutický průmysl tyto odrůdy nejsou atraktivní, proto jsou využívány v sektoru výroby potravin. V posledních letech jsou tyto odrůdy v ČR nejvíce pěstované (Mikšík & Lohr 2020).

S vysokým obsahem morfinu: odrůdy jsou učený pro průmyslové využití, nejsou vhodné pro potravinářství. Pěstovány jsou převážně ve Španělsku a v Austrálii. Obsah alkaloidů se pohybuje mezi hodnotami 1,5-3 % (Mikšík & Lohr 2020).

### 3.1.5 Požadavky na kvalitu makových semen

Kvalita a zdravotní nezávadnost máku je regulována Zákonem o potravinách a tabákových výrobcích (Zákon č. 11/1997 Sb.) a Vyhláškou č. 399/2013 Sb. o požadavcích na olejnatá semena. Jakostní specifika máku (Tabulka 1) jsou součástí přílohy výše uvedené vyhlášky. Kontrolu plnění jakostních parametrů má na starost v České republice Státní zemědělská a potravinářská inspekce, která se zaměřuje na respektování platných právních předpisů zejména ze strany osob, které mák dovážejí a zpracovávají (Kopřiva 2016).

Tabulka 1 Požadavky na jakost semene máku setého (Ministerstvo zemědělství 2013)

Barva semen	modrá	nejvýše 0,2 % hmotnosti máku bílého	
	bílá nebo směs barev	nad 0,2 % hmotnosti máku bílého	
Vlhkost	1. jakost	nejvýše 8,0 % hmotnosti	
	2. jakost	nejvýše 10,0 % hmotnosti	
Semena nevybarvená tmavá až černá		nejvýše 5,0 % hmotnosti	
Příměsí a nečistoty celkem		nejvýše 8,0 % hmotnosti	
z toho:			
a)	semena nevyzrálá rezavé barvy	nejvýše 5,0 % hmotnosti	
b)	poškozená semena	nejvýše 3,0 % hmotnosti	
c)	nečistoty	celkem 1. jakost	nejvýše 0,2 % hmotnosti
		celkem 2. jakost	nejvýše 1,0 % hmotnosti
d)	semena blínu černého ( <i>Hyoscyamus niger</i> L.)	nejvýše 0,00 % hmotnosti	
e)	semena laskavce a merlíku	nejvýše 0,2 % hmotnosti	
f)	anorganické nečistoty	nejvýše 0,0 % hmotnosti	
g)	obsah kadmia	nejvýše 0,8 mg/kg	
h)	obsah arsenu	nejvýše 0,1 mg/kg	
i)	obsah rtuti	nejvýše 0,012 mg/kg	
j)	obsah olova	nejvýše 1,0 mg/kg	
k)	obsah morfinových alkaloidů	nejvýše 25 mg/kg	

Česká cechovní norma z roku 2019 stanovuje kvalitativní parametry pro komoditu Modrý mák. Semena musejí pocházet z potravinářské formy modrosemenného máku setého, který byl vypěstován v České republice, a to pouze z odrůd registrovaných v ČR. Výrobek musí splňovat sensorické požadavky na chuť, vůni nebo konzistenci. Pro Modrý mák nesmí být použita úprava za pomoci horké páry nebo vysoké teploty. Využití této technologie je možné pouze u máku mletého. Použití těchto metod musí být deklarováno na etiketě výrobku (Potravinářská komora 2019). Pouze výrobky, které splňují tuto cechovní normu mohou nést označení Modrý mák. V roce 2021 byla nově registrována norma pro Bělosemenný mák, avšak požadavky jsou víceméně totožné jako u Modrého máku (Český modrý mák 2022).

V roce 2021 byla přijata Evropskou komisí žádost o přidělení značky chráněného zeměpisného označení pro výrobek Český modrý mák. Spolek Český modrý mák žádal

o přidělení zeměpisného označení původu z důvodu rozlišení dvou rozdílných typů komodit, které nesly stejné jméno, ale různou kvalitou (Český modrý mák 2021). Fyzikální a chemické vlastnosti máku označeného chráněným zeměpisným označením odpovídají Vyhlášce č. 399/2013 Sb. Na první pohled semena musejí být zdravá, nepoškozená, modré barvy a o velikosti cca 1 mm. Mák, který splňuje tyto a další specifika nesmí být smíchán s mákem, který tyto vlastnosti nespĺňuje, aby mohl nést označení Český modrý mák (Potravinářská komora 2019 2021).

### **3.1.6 Chemické složení makových semen**

#### **3.1.6.1 Složení makových semen**

Semena máku jsou bohatá na bílkoviny, tuk, minerální látky, vlákninu a vitaminy, a to je hlavním důvodem, proč jsou maková semena celosvětově užívána v cukrářském a pekařském průmyslu (Lahiri et al. 2017; Chmelová et al. 2018).

Energetická hodnota je přibližně 2043 kJ na 100 g makových semen (Sabolová 2020). Obsah tuků se pohybuje v rozmezí 42-57 % (Chmelová et al. 2018). Na celkový obsah tuku má vliv lokalita pěstování a typ odrůdy. Obecně se dá říci, že bělosemenné odrůdy mají vyšší obsah tuku než odrůdy modrosemenné. Složení tuků semen máku je příznivé pro lidský organismus z důvodu velkého obsahu nenasycených mastných kyselin. Nenasycené mastné kyseliny zaujímají 85 % z celkového množství mastných kyselin. Nejvíce zastoupeny jsou kyselina linolová (70-74 %) a kyselina olejová (13-18 %). Obsah esenciální  $\alpha$ -linolenové kyseliny bývá kolem 1 %. Nasycené mastné kyseliny jsou zastoupeny jen kolem 11 %. Nejvíce zastoupené mastné kyseliny jsou kyselina palmitová (8-9 %) a kyselina stearová (kolem 2 %) (Český modrý mák 2019a). Maková semena patří i mezi významný zdroj rostlinných bílkovin (kolem 23 %), u kterých byly stanoveny relativně vyšší hodnoty neesenciálních aminokyselin (kyseliny asparagové a glutamové), zatímco obsah esenciálních aminokyselin byl v proteinovém složení nižší (Türker et al. 2021). Množství sacharidů v semenech máku se pohybuje kolem 3 %, z toho jsou z 1,8 % zastoupeny ve formě cukrů. Oproti tomu, množství vlákniny pohybující se kolem 23 % (Český modrý mák 2019a), je významnějším parametrem z nutričního hlediska. Z vitaminů, které mák obsahuje, je důležité zmínit tokoferoly (vitamin E), které jsou zastoupeny hlavně v podobě  $\gamma$ -tokoferolů. Jejich obsah se v databázích o složení potravin liší v desítkách mg. Česká databáze složení potravin uvádí obsah tokoferolů 2,3 mg na 100 g. V nepatrném množství lze v máku nalézt i vitamin C (1 mg/100 g) a některé vitaminy skupiny B ( $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ ,  $B_5$ ,  $B_6$  a  $B_9$ ), v množství menším než 1 mg/100 g. Z minerálních látek je důležité zmínit vysoký obsah vápníku, fosforu, hořčíku, draslíku, železa a zinku (Sabolová 2020). Zastoupení jednotlivých mikroživin je uvedeno v Tabulce 2.

Tabulka 2 Obsah vybraných mikroživin v makových semenech, upraveno dle Sabolové (2020)

Mikroživiny	Obsah mikroživin (mg/100 g)
Ca	1357
P	936
Mg	395
K	832
Zn	6,79
Fe	8,75

### 3.1.6.2 Obsah alkaloidů

Mák už od středověku patří mezi rostliny známé pro své léčivé vlastnosti, které souvisí s vytvářením sekundárních metabolitů. Alkaloidy jsou dusíkaté organické sloučeniny, které mají výrazný vliv na lidský organismu (Labanca et al. 2018). V máku se alkaloidy dají rozdělit do skupin na alkaloidy morfinového typu (morfin, kodein, thebain) a benzylochinony (papaverin, narkotin). Všechny tyto látky se dají souhrnně nazvat opiovými alkaloidy (EFSA 2018). Alkaloidy obsahuje celá rostlina, kromě semen (Fejér 2015), která mohou být kontaminována během sklizně (EFSA 2018). Mezi faktory ovlivňující obsah alkaloidů v makovině patří kromě výběru odrůdy, také počasí, pěstební technologie a sklizeň (Vašák 2010).

Morfin se ve farmaceutickém průmyslu využívá jako silné analgetikum při onemocněních srdce, plic a při dušnosti. Při využívání morfinu může docházet ke snížení pozornosti a reaktivním schopnostem (EFSA 2018). Na morfinu vzniká psychická i fyzická závislost (Fejér 2015). Kodein se řadí mezi antitusika (látky tlumící kašel). Působí v prodloužené míše, kde inhibuje centrum kašle. Thebain se nachází v mladých částech rostliny a tvoří se jako mezistupeň při syntéze morfinu. Je slabším analgetikem než morfin a je i výrazně toxičtější. Stimuluje nervovou soustavu a zvyšuje uvolňování histaminu do tkání. Papaverin je využíván jako spazmolytikum, způsobující relaxaci hladkého svalstva (Fejér 2015). Jeho užívání může být stejně jako u morfinu a kodeinu doprovázeno vedlejšími účinky (EFSA 2018).

### 3.1.6.3 Rizikové prvky v máku

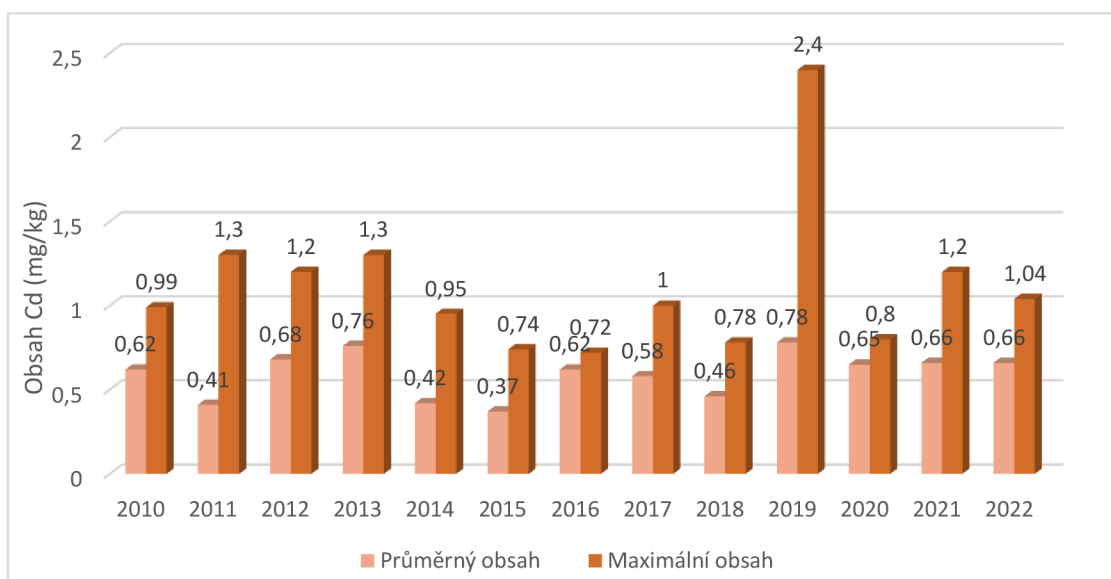
#### 3.1.6.3.1 Kadmium

Mák spadá do kategorie plodin, které mají ve srovnání s jinými rostlinami zvýšenou schopnost kumulovat kadmium ve svých pletivech (Lošák & Varga 2022). Výsledky pokusů Pavlíkové et al. (2007) zaznamenaly nejvyšší obsah Cd v semenech máku, méně v kořenech a tobolkách a nejméně ve stoncích a listech. Na půdách s vyšší koncentrací kadmia rychlost

hromadění kadmia rychle stoupá, avšak rostlina máku nemá problém hromadit kadmium i na méně znečištěných půdách. Vhodným prostředkem pro snížení obsahu kadmia v máku je pravidelné organické hnojení půd. Huminové kyseliny vytvářejí s kadmii v půdě nerozpustné sloučeniny a tím je příjem kadmia rostlinou omezen. Dalším způsobem je dostatečné vápnění kyselých půd. Byla dokázána souvislost mezi nízkou hodnotou pH půdy, nízkým obsahem vápníku a vyšším množstvím kadmia v semenech (Lošák & Varga 2022).

Při výkupu makového semene se sleduje výskyt mykotoxinů, ale i obsah kadmia (Lošák & Varga 2022). Dle Nařízení komise EU 2021/1323, je určen maximální limit kadmia v semeni máku na 1,2 mg/kg čerstvé hmotnosti. Oproti ostatním olejninám (řepka, slunečnice, len, hořčice, sója), které mají maximální limit kadmia v semeni 0,1-0,5 mg/kg čerstvé hmotnosti, je limit pro mák dvojnásobný (Evropská komise 2021b; Lošák & Varga 2022). V České republice je určený maximální limit kadmia v semeni máku přísnější. Vyhláška č. 399/2013 uvádí nejvýše 0,8 mg/kg kadmia v semeni máku (Ministerstvo zemědělství 2013).

Na Obrázku 1 je znázorněn průměrný a maximální obsah kadmia v rozmezí let 2010 až 2022 v České republice zjištěný při plánovaných kontrolách makových semen Státní zemědělskou a potravinářskou inspekcí. V roce 2022 bylo kadmium detekováno u všech analyzovaných vzorků makových semen. Naměřené koncentrace kadmia v semenech se pohybovaly od 0,13 do 1,0 mg/kg (Státní zemědělská a potravinářská inspekce 2023).



Obrázek 1 Průměrný a maximální obsah kadmia v máku v letech 2010-2022 (mg/kg), upraveno dle Státní zemědělské a potravinářské inspekce (2023)

### 3.1.6.3.2 Ostatní rizikové prvky

V analýzách makových semen je běžné sledovat obsah kadmia, zatímco hromadění jiných rizikových prvků je věnováno méně pozornosti. Mezi další rizikové prvky, které mohou být v semenech máku obsaženy, patří zejména olovo (Pb), chrom (Cr) a arsen (As) (Lošák & Varga 2022).



Vzorky z experimentálních oblastí na Slovensku dle Salamona a Fejéra (2011) obsahovaly olovo v rozmezí od 0,13 mg/kg do 0,304 mg/kg a 0,206-0,297 mg/kg chromu. V Rakousku se potvrdil průměrný obsah olova 0,1 mg/kg. V Turecku od 0,3 do 1,6 mg/kg olova a průměrně 3,75 mg/kg chromu. Obsah jednotlivých prvků v jednotlivých oblastech se výrazně liší a je pravděpodobně ovlivněn především lokalitou, ze které byly získány vzorky máku pro analýzu (Salamon & Fejér 2011).

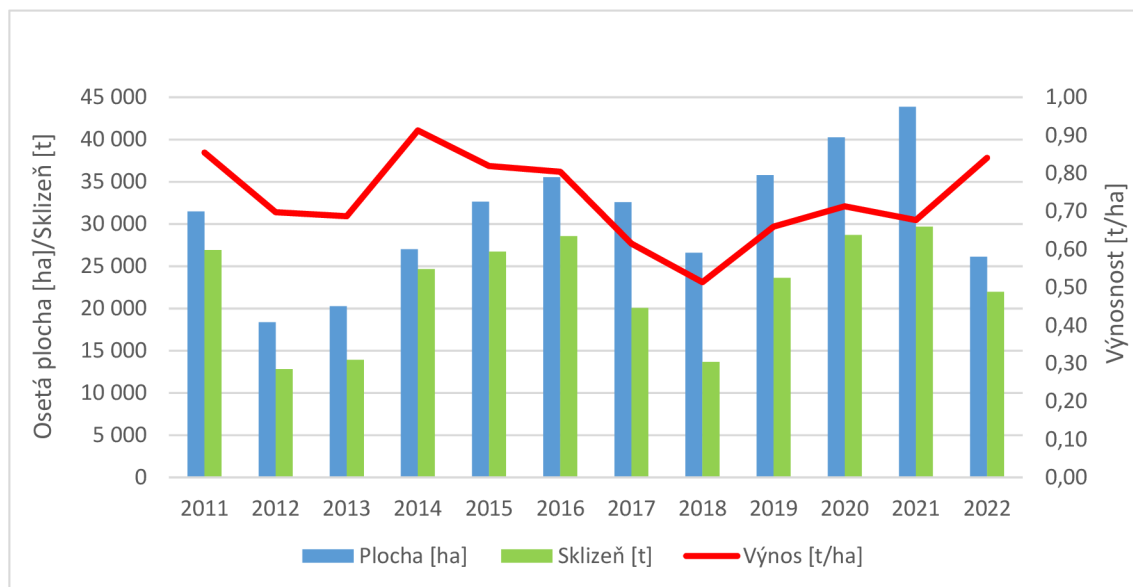
V České republice je povolený limit olova v semenech máku stanoven Vyhláškou č. 399/2013 na hodnotu nejvýše 1 mg/kg hmotnosti, což je nižší hodnota, než kterou zavedla Evropská unie. Ve stejné vyhlášce jsou zahrnuty, kromě olova, i další rizikové prvky, jmenovitě arsen (nejvýše 0,1 mg/kg) a rtuť (nejvýše 0,012 mg/kg) (Ministerstvo zemědělství 2013).

### **3.1.7 Produkce máku**

V dnešní době se mák pěstuje v několika desítkách zemí. Celková roční světová produkce makových semen se pohybuje kolem 100 tisíce tun. Odhaduje se, že 60 % máku na světovém trhu je určeno pro potravinářské účely (Mikšík & Lohr 2020).

Mezi hlavní pěstitele máku patří Česká republika, s produkcí máku modrosemenného, a Turecko, zaměřené na produkci bílosemenného máku. V dalších pěstitelských zemích (Rakousko, Německo, Ukrajina, Polsko, země jihovýchodní Evropy) se mák pěstuje většinou pro domácí využití. Česká republika produkuje až jednu třetinu máku uvedeného na světový trh. Z celkové produkce makových semen vypěstovaných v České republice se v průměru 85 % vyváží. Tato rostlinná komodita se stala jednou z nejvýznamnějších položek českého zemědělského vývozu. Česká republika mák vyváží do více než 35 zemí světa, přičemž největší odběratelé jsou východní země (Ruská federace, Polsko, Slovensko), USA, Maďarsko a Austrálie (Mikšík & Lohr 2020). Na rozdíl od České republiky jsou Francie a Maďarsko vnímány jako významní pěstitelé odrůd s vysokým obsahem alkaloidů, určených k získávání farmaceutického morfinu. Maková semena jsou využívána jako vedlejší produkt (Zehnálek & Kraus 2020).

Pěstování máku bylo v posledních letech silně ovlivněno vysokými teplotami a suchem. Meziroční produkce makových semen je znázorněna na Obrázku 2, společně s výnosností a osetou plochou.



Obrázek 2 Trendy ve výnosech, oseté ploše a sklizni máku setého, upraveno dle Českého statistického úřadu (2023)

### 3.1.8 Podmínky pěstování

Mák jarní, pěstovaný na našem území a na Slovensku, nemá přesné nároky na podmínky prostředí. Vyhovují mu mírně svažité až rovinaté plochy s nadmořskou výškou 300–600 metrů nad mořem s omezeným působením větru tak, aby nedocházelo k polehávání a vyvracování rostlin (Vašák 2010).

Rostliny jsou citlivé na půdní změny a půdní neheterogenitu. Tyto změny mohou být v průběhu vegetačního období způsobeny klimatickými podmínkami, výživou nebo agrotechnickými zákroky. Pro mák je nejlepší pravidelně zpracovaná půda a v ní rovnoměrně rozptýlené živiny. Půda by měla být hluboká, středně těžká, provzdušněná a s neutrálním nebo lehce zásaditým pH. Naopak půdy mělké a výsušné jsou pro pěstování máku nevyhovující (Fejér 2015).

Požadavky máku na vodu se během vývoje mění. Na vyklíčení máku je dostačující menší množství vody, ale v době od vzejití až do založení květu jsou požadavky na její potřebu zvýšené. Nedostatek vody má negativní vliv na ontogenetický vývoj rostlin, což se na úrodě projeví negativně (Fejér 2015). Tento nedostatek je důležitým limitem produkce makových semen. Včasným setím na jaře se dá zabránit nedostatku vody při klíčení, protože v půdě se nacházejí zbytky vláhly po zimě. Dalším typem ochrany je i setí jarního máku na podzim nebo zlepšení jakosti osiva. Odběr vody během vegetačního období (u máku 120–140 dní) je 250 až 350 litrů na m<sup>2</sup> (Vašák 2010). I když je mák na vodu náročný, její nadbytek mu neprospívá. Dochází k rozvoji houbových onemocnění, jež mají negativní vliv na růst a vývoj vegetace (Fejér 2015) nebo dochází k černání a žluknutí semen (Vašák 2010).

Stejně jako na vodu je mák náročný i na světlo. České druhy máku patří mezi odrůdy dlouhého dne a potřebují tedy zvýšené množství slunečního záření pro tvorbu

plnohodnotných semen. Světlo kladně ovlivňuje koncentrace alkaloidů v makovici a zmírňuje výskyt chorob. Pokud rostlina není vystavena dostatečnému množství světla je oslabená a výnos semen je nižší. Květy a tobolky, které jsou během svého vývoje vystaveny stínu, mohou tvořit semena menší nebo dokonce žádná (Vašák 2010).

Podle Fejéra (2015) se mák řadí mezi teplomilné rostliny. V průběhu růstu a vývoje máku jsou požadavky na teplotu rozdílné. Ve fázi listové růžice je rostlina schopná snést i jarní mrazy do -8 °C. V pozdějších fázích vývoje mohou rostliny při takto nízkých teplotách uhynout, respektive vyschnout (Vašák 2010).

### 3.1.9 Legislativa máku v České republice

Pěstování a obchodování s mákem je usměrňováno v České republice třemi legislativními dokumenty (Český modrý mák 2019b):

- Ohlašovací povinnost osob pěstujících mák setý – osoby pěstující mák setý na celkové ploše větší než 100 m<sup>2</sup> jsou povinny předat hlášení místně příslušnému celnímu úřadu podle místa pěstování (Parlament České republiky 1998).
- Informační povinnosti příjemce v místě určení. Tuto povinnost určuje Vyhláška č. 172/2015 Sb. o informační povinnosti příjemce potravin v místě určení. Tato vyhláška nařizuje provozovateli potravinářského podniku povinnost informovat příslušné orgány o příjmu vypraných potravin, včetně máku, nejméně 48 hodin před importem z jiného státu EU nebo ze třetí země (Ministerstvo zemědělství 2015).
- Vyhláška č. 399/2013 Sb., ve které je uvedeno: „Pro použití v potravinářství lze použít pouze semeno máku setého (*Papaver somniferum* L.) semenného, olejného typu pocházející z odrůd, které obsahují max. 0,8 % morfinových alkaloidů v sušině tobolky (makovici) a na povrchu makového semene není obsah morfinových alkaloidů vyšší než 25 mg/kg“ (Ministerstvo zemědělství 2013).

## 3.2 Kadmium

Kadmium bylo objeveno v roce 1817 německým chemikem Friedrichem Stromeyerem, který ho oddělil od anomálně zbarveného vzorku zinkové rudy a pojmenoval jej „cadmeia“, podle řeckého boha (Wang et al. 2022). Kadmium (Cd) je anorganický toxický prvek, který patří do IIB skupiny periodické soustavy prvků. Tento kujný přechodný kov je bez zápachu a má modrobílou barvu, je hořlavý a nerozpustný ve vodě. Při hoření na vzduchu vytváří hnědý amorfni oxid kademnatý (CdO). Když se rozpouští v kyselině sírové, chlorovodíkové a dusičité, vytváří ve stejném pořadí síran kademnatý (CdSO<sub>4</sub>), chlorid kademnatý (CdCl<sub>2</sub>) a dusičnan

kademnatý ( $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ ). Jeho fyzikální a chemické vlastnosti způsobují změny na různých úrovních ekosystému (Suhani et al. 2021).

### 3.2.1 Znečištění životního prostředí kadmiiem

V zemské kůře je kadmium vzácným prvkem. Jeho koncentrace se pohybuje kolem 0,1-0,2 mg/kg. Kadmium v zemské kůře často doprovází ložiska zinku a olova jako sulfid kademnatý ( $\text{CdS}$ ). V prostředí oceánů (koncentrace asi 500 mg/kg) je součástí fosforitů, mořských fosfátů a sedimentačních hornin (Suhani et al. 2021). Odhaduje se, že se ročně prostřednictvím prachu uvolní  $0,25 \times 10^6$  kg kadmia, při sopečné erupci  $0,5 \times 10^6$  kg, při lesních požárech  $0,01 \times 10^6$  kg a z aerosolu mořské soli  $0,002 \times 10^6$  kg (Khan et al. 2022).

Pro své jedinečné fyzikální a chemické vlastnosti je Cd široce používáno v mnoha průmyslových odvětvích. Získává se těžbou zinku a olova, tavením zinku a jeho rafinací (Friberg 2017). Používá se při výrobě lamp, nikl-kadmiových baterií, jako stabilizátor ve výrobcích z PVC, antikoroziční činidlo při galvanizaci, jako elektrody v bateriích anebo barvivo v keramických glazurách (Wang et al. 2022).

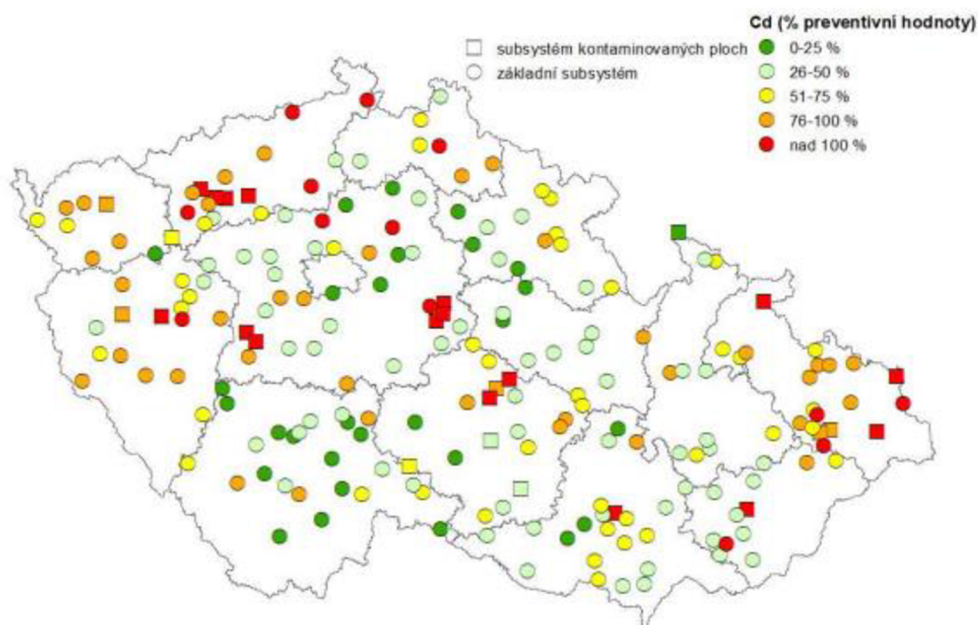
Do životního prostředí se kadmium dostává několika cestami. Spalováním uhlí a odpadů, rafinerií a z dolů se dostává do ovzduší. Z odpadních vod z průmyslu a z domácností se uvolňuje do vody a ke znečištění půd kadmiiem dochází hlavně při aplikaci fosforečných hnojiv. Významným zdrojem znečištění vod a půd kadmiiem jsou jeho úniky při manipulaci s nebezpečným odpadem (Suhani et al. 2021; Khan et al. 2022).

#### 3.2.1.1 Znečištění půd v České republice

Kadmium je rizikový prvek, který v monitoringu zemědělských půd nejčastěji překračuje preventivní hodnoty (Poláková et al. 2023). Legislativa ohledně obsahu kadmia v půdě je v každém státě rozdílná. V Číně je přípustný limit kadmia v zemědělských půdách 1,5-4 mg/kg půdy, v Indii 3-6 mg/kg (Yuan et al. 2021). V České republice jsou preventivní hodnoty obsahu kadmia v zemědělské půdě udány Vyhláškou č. 153/2016 Sb., o stanovení podrobností ochrany kvality zemědělské půdy. Pseudototální obsah kadmia u běžné půdy (písčito-hlinité, hlinité, jílovitohlinité, jílovité) byl stanoven na 0,5 mg/kg sušiny, u lehkých půd na 0,4 mg/kg sušiny (Ministerstvo životního prostředí 2016).

Celkový obsah kadmia v zemědělských půdách se světově v průměru pohybuje kolem 1 mg/kg a méně (Poláková et al. 2023). Data z Registru kontaminovaných půd ukazují, že v zemědělských půdách v České republice je průměrná koncentrace kadmia v lehkých půdách 0,23 mg/kg a v půdách běžných 0,29 mg/kg (Kubík et al. 2021). Půdy s nejvyšším obsahem kadmia se nacházejí v oblastech, kde dochází ke kombinaci emisí z uhelných elektráren a geogenních zdrojů (oblast horního Slezska), v okolí center průmyslu a hornictví (Kutná Hora, Příbram, Beroun) nebo kde působí geogenní vlivy spolu s průmyslovou činností (oblast

podkrušnohorské pánve). O antropogenní zátěž se jedná v oblasti severní Moravy (Poláková et al. 2023). Na Obrázku 3 jsou vyznačeny oblasti se zvýšenou koncentrací kadmia v zemědělských půdách. Kromě výše zmíněných lokalit se jedná o okolí Plzně a Vysočinu.



Obrázek 3 Obsah kadmia na monitorovaných plochách vyjádřený jako procento preventivní hodnoty (Poláková et al. 2023)

V roce 2019 provedl Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský bazální monitoring zemědělských ploch. Obsah kadmia se v celém souboru ploch sledovaných při monitoringu pohyboval v ornici v rozmezí hodnot od 0,15 mg/kg do 7,5 mg/kg. K překročení preventivních hodnot pro Cd u lehkých půd došlo ve 2 oblastech a k překročení u půd běžných ve 28 oblastech. K překročení těchto hodnot dochází hlavně v západní a severozápadní části České republiky (Poláková et al. 2023).

### 3.2.2 Vliv kadmia na živé organismy

#### 3.2.2.1 Vliv na rostliny

Kadmium, jako extrémně jedovatý prvek, je považován za neesenciální pro metabolické procesy v rostlinách. Je účinně absorbován a akumulován v rostlinném materiálu. Uvádí se lineární vztah mezi Cd v růstovém médiu a Cd v rostlinném materiálu. Příjem Cd rostlinami ovlivňuje několik půdních a rostlinných faktorů. Jeho biologická dostupnost je založena na koncentraci Cd v půdě, teplotě, redoxním potenciálu a pH (Qin et al. 2020). Jako hlavní půdní faktor řídící celkový i relativní příjem kadmia, je označováno pH (Kabata-Pendias 2011).

Sandrin & Maier (2009) uvádí, že relativní příjem Cd byl vysoce závislý na pH půdy a největší byl v rozmezí pH 4,5 až 5,5. Existují však i protichudné výsledky založené na tezi, že když se Cd v důsledku tvorby komplexů nebo kovových chelátů stane v alkalické půdě mobilnější, může být příjem Cd rostlinou na pH nazávislý (Kabata-Pendias 2011).

Kadmium vstupuje do rostlinných buněk z půdy kořenovým systémem prostřednictvím transportních systémů, které se podílejí na příjmu mikroživin. Kadmium v těchto systémech zastoupí živiny, které mají podobné chemické vlastnosti (např. náboj nebo ionový poloměr) (Qin et al. 2020; Haider et al. 2021). Kadmium, stejně jako jiné rizikové prvky, může být efektivně transportováno ve formě metalo-organických komplexů, přičemž mechanismy dálkového transportu nebyly dosud objasněny. Nejpravděpodobněji je Cd transportováno stejnými mechanismy jako zinek (Kabata-Pendias 2011). Přítomnost kadmia v růstovém médiu ovlivňuje v rostlinách koncentraci vápníku (Ca), mědi (Cu), železa (Fe), zinku (Zn) anebo manganu (Mn), čímž zhoršuje kvalitu jedlých částí rostlin (Haider et al. 2021).

Kadmium ovlivňuje růst a vývoj rostlin svými toxickými účinky na některé metabolické a fyziologické procesy v rostlině. Jak bylo uvedeno, Cd je škodlivé pro růst rostlin dokonce i v nízkých koncentracích. Způsobuje chlorózu listů, nekrotické léze, vadnutí rostlin, inhibuje prodlužování kořenů, snižuje celkový objem biomasy a zvyšuje predispozice napadení houbami. Toxicita kadmia zhoršuje výměnu plynů, snižuje množství fotosyntetických pigmentů, vyvolává vodní stres a způsobuje destrukci chloroplastových struktur (Qin et al. 2020).

Toxicita Cd souvisí s oxidačním stresem v rostlinných buňkách a inhibuje nebo aktivuje antioxidantní enzymy, což má za následek buněčné oxidační poškození a peroxidaci lipidů. Kadmium jako neredoxní kov nemůže provádět přenosy jednotlivých elektronů a nevytváří reaktivní formy kyslíku, jako je superoxidový anion ( $O_2^-$ ), peroxid vodíku ( $H_2O_2$ ) nebo hydroxylový radikál ( $OH\cdot$ ); svým zásahem do antioxidantních obranných systémů však vyvolává oxidační stres. Kadmium zpomaluje aktivitu antioxidantních enzymů, což má za následek poškození listů a inhibici růstu rostlin (Shanmugaraj et al. 2019), následně poškozuje pigmenty, lipidy, proteiny, DNA a další buněčné molekuly (Suhani et al. 2021).

Rostliny si vyvinuly obranný systém, který je chrání před toxicitou rizikových prvků. Když jsou rostliny vystaveny vysoké koncentraci kadmia, začínají rolovat listy a inhibuje se fotosyntéza listů tím, že se potlačuje biosyntéza chlorofylu (Shanmugaraj et al. 2019).

### 3.2.2.2 Vliv na lidský organismus

Mezinárodní agentura pro výzkum nádorových onemocnění klasifikovala kadmium jako lidský karcinogen na základě prokazatelných výsledků ve studiích karcinogeneze na lidech a na zvířatech. K expozici kadmia dochází zejména orálním požitím, dermální absorpcí a vdechováním kontaminovaného prachu. Kromě specifických pracovních činností a kouření, je hlavním zdrojem příjmu kadmia u populace strava (Wang et al. 2021).

Kadmium je zadržováno organismem v průměru 20–30 let po jeho vstřebání (Knápek et al. 2011). Přibližně jedna třetina kadmia se ukládá v ledvinách a jedna čtvrtina v játrech. Po vysoké expozici je více kadmia nalezeno v játrech, kde je biologický poločas rozpadu kratší než v ledvinách (Souza-Arroyo et al. 2022). Nemoc vyvolává nadměrným příjmem kadmia stravou se nazývá itai-itai a byla poprvé popsána v 50. letech 20. století v Japonsku, kde se k zavlažování plantáží s rýží používala voda z čističky odpadních vod z firmy na výrobu kadmiových pigmentů (Wang et al. 2021).

V době narození je koncentrace Cd v lidském těle nulová, ale s přibývajícím věkem se kadmium hromadí a jeho koncentrace v lidském těle stoupá. I při velmi nízkých koncentracích představuje kadmium větší zdravotní riziko. Nedochozí k metabolické degradaci kadmia na méně toxické látky a v důsledku nedostatku účinných chelatačních činidel nedochází k dostatečnému vylučování (Suhani et al. 2021). Toxicita kadmia také způsobuje oxidační stres, který vede k narušení antioxidačního obranného systému a k tvorbě reaktivních forem kyslíku, a tím narušuje imunitní systém. Reaktivní formy kyslíku poškozují sacharidy, enzymy a proteiny, což způsobuje zvýšenou peroxidaci lipidů buněčných membrán. Tyto děje přispívají k mutaci a poškození DNA, což může dále vést ke karcinogenezi (Wang et al. 2022). V ledvinách se Cd může akumulovat v renální tkáni vazbou přes metalothionein, aniž by došlo k detoxikaci kadmia. Dlouhodobá expozice Cd může způsobit renální tubulární dysfunkci a příznaky proteinurie, diabetu a aminoacidurie. Může také vést k hyperkalciurii a tvorbě ledvinových kamenů, protože kadmium ovlivňuje metabolismus vápníku (Suhani et al. 2021). Výsledky studií ukazují, že expozice kadmíem je spojená s onemocněním jater, včetně hyperglykémie, nealkoholického ztučnění jater a nealkoholické steatohepatitidy. Také dochází k histologickým změnám, narušení a degeneraci jaterní tkáně. Uvádí se také pokles obsahu jaterního glykogenu a antioxidačních enzymů. Mechanismus, kterým je indukována hepatotoxicita, není zcela objasněn; nicméně zahrnuje zvýšenou produkci reaktivních forem kyslíku a změnu exprese a aktivity antioxidačního enzymu (Souza-Arroyo et al. 2022). Chronická expozice Cd způsobuje závažné onemocnění kostního metabolismu, jako je osteoporóza, osteoartritida a osteomalacie. U zubů kadmium působí primárně na vývoj skloviny a vznik zubního kazu (Ma et al. 2021). Toxicita kadmia vede k neplodnosti, prenatální smrti, abnormálnímu embryonálnímu vývoji a k strukturálním a funkčním poruchám mužského nebo ženského reprodukčního systému (Suhani et al. 2021). Kromě výše uvedených vlivů toxicity Cd na lidský organismus, byla zjištěna úzká spojitost mezi kadmíem a nádorovými onemocněními, jako je například rakovina prostaty, plic nebo nádory ledvin (Wang et al. 2022).

### 3.2.2.3 Kadmium v potravinách

Jak bylo zmíněno výše, potraviny jsou hlavním zdrojem expozice kadmia pro nekuřáky. Mezi skupiny potravin, které se nejvíce podílejí na dietním příjmu kadmia, se řadí obiloviny

a výrobky z nich, zelenina, skořápkové plody a arašídny, luštěniny, okopaniny, maso a masné výrobky. Maximální limity kadmia v některých potravinách jsou uvedeny v Nařízení komise (EU) č. 2021/1323 (Evropská komise 2021a).

Organizace FAO a WHO stanovily tolerovaný měsíční příjem kadmia na 25  $\mu\text{g}/\text{kg}$  tělesné hmotnosti. Organizace EFSA, působící v Evropské unii, tuto hodnotu zpřísnila na 2,5  $\mu\text{g}/\text{kg}$  tělesné hmotnosti kadmia za týden. Odhadnutý průměrný týdenní příjem kadmia stravou u občanů Evropské unie činí 2,04  $\mu\text{g}/\text{kg}$  tělesné hmotnosti (EFSA 2012). Zvýšený příjem kadmia potravinami mají vegetariáni kvůli vyšší spotřebě rostlinných produktů (Evropská komise 2021a). Převážnou část jejich stravy tvoří zelenina, která představuje přibližně 70-80 % z celkového příjmu kadmia stravou u lidské populace (Khan et al. 2017). Kromě vegetariánů přijímají více kadmia i pravidelní konzumenti vodních mlžů a lesních hub. Vegetariáni, kuřáci a lidé žijící ve vysoce kontaminovaných oblastech mohou překročit tolerovaný týdenní příjem až dvojnásobně (Evropská komise 2021a).

### 3.3 Sorbenty kadmia

#### 3.3.1 Biochar

Biochar (biouhel) je jemnozrnný přírodní porézní materiál podobající se dřevěnému uhlí (charcoal  $\rightarrow$  biochar) vzniklý za nepřítomnosti kyslíku pyrolýzou organického materiálu. Jde o látku bohatou na uhlík, která snižuje biologickou aktivitu a dostupnost mnoha rizikových prvků, včetně kadmia, zvyšuje hodnoty půdního pH, zlepšuje sorpční schopnosti půdy a je významným zdrojem živin (Qin et al. 2020).

Biochar po jeho aplikaci do půdy ovlivňuje její fyzikálně-chemické a biologické vlastnosti. Hraje důležitou roli při snižování emisí skleníkových plynů z půdy. Sekvestrací půdního uhlíku může zvýšit jeho ukládání v půdě a zároveň snížit emise  $\text{CO}_2$ . Kromě uhlíku biochar obsahuje další minerální živiny, jako je fosfor, vápník, zinek, hořčík, síra a další. Obsah těchto živin a jejich dostupnost všah závisí na zdroji suroviny, ze které byl biochar vyrobený a zejména na podmínkách pyrolýzy (Qian et al. 2023).

Při výrobě biocharu se využívají zemědělské a agroprůmyslové zbytky, což je ekonomický způsob nakládání s odpady (Qian et al. 2023).

Proces výroby biocharu je založen na termochemickém rozkladu materiálů bohatých na uhlík (výše zmíněné zemědělské a agroprůmyslové zbytky) v inertní atmosféře za vzniku biocharu, bio-oleje a pyrozního plynu. Bio-olej a bio-plyn jsou produkty pyrolýzy s přidanou hodnotou, sloužící jako zdroj energie. Poměr produktů pyrolýzy závisí na teplotě a době zdržení v aktivní zóně reaktoru. Vlastnosti produktu závisí na teplotě, době zdržení a na kvalitě vstupní organické hmoty (Li et al. 2023).

V posledních letech nabývá velkého významu přidávání biocharu do zemědělských půd kontaminovaných rizikovými prvky. Začlenění biocharu do půdy minimalizuje dostupnost



a akumulaci rizikových prvků v rostlinách (Qin et al. 2020; Haider et al. 2021). Mezi mechanismy odstranění rizikových prvků dle výzkumů přispívají hlavně elektrostatické interakce, precipitace a další reakce. Elektrostatická interakce mezi rizikovými prvky a biocharem je způsobena záporným nábojem na povrchu biocharu. Začlenění biocharu do půdy má za následek zvýšení elektrostatické interakce mezi rizikovými prvky (kladnými náboji) a půdou, což vede ke zvýšení adsorpce kationtů ze znečištěné půdy. Zvýšením pH půdy a koncentrace iontů anorganických solí může biochar zvýšit chemické srážení kovových iontů na půdním povrchu (Qian et al. 2023).

### 3.3.2 Nanoželezo

V posledních 20 letech bylo vyvinuto mnoho nových technologií využívající nanomateriály, od zlepšení léčiv až po metody ošetření kontaminované půdy a vody. Mezi nejběžnějšími nanomateriály vyniká nanoželezo (nZVI – nanoscale zero-valent iron), neboli nanočástice elementárního železa (Visentin et al. 2021).

Jednotlivé částice nanoželeza mají velikost od 1 nm do 100 nm (Liang et al. 2022), což jim umožňuje procházet velmi malými póry v půdě nebo se zdržovat v podzemních vodách. To umožňuje nanočásticím reagovat déle, lépe se rozptýlit a dostat se do vzdálenějších míst než běžné částice (Visentin et al. 2021). Okolní prostředí ovlivňují i v malém množství, díky svému velkému povrchu, mnoha sorpčním místům a vysoké povrchové reaktivitě (Liang et al. 2022). Mechanismy detoxikace zahrnují redukci, oxidaci, adsorpci a srážení. Rostoucí množství důkazů prokázalo, že nZVI může degradovat a separovat různé kontaminanty životního prostředí, jako jsou chlorované sloučeniny, dusičnany, fosfáty nebo radioaktivní látky (Tang et al. 2023). Nanoželezo má výborné adsorpční vlastnosti na rizikové prvky, jako rtuť, olovo, kadmium, nikl, arsen, měď a šestimocný chrom (Liang et al. 2022).

## 4 Metodika

### 4.1 Půda

#### 4.1.1 Lokalita a odběr

Vzorky půdy byly odebrány 28. 2. 2022 v městské části Praha – Vinoř, ležící na severovýchodě hlavního města Prahy. Pozemek se rozkládá na dvou parcelách o velikosti 1000 m<sup>2</sup> a 7362 m<sup>2</sup>. Obě parcely patří do kategorie orná půda. V letech 1987 až 1989 byl pozemek zavezen bahnem z nedalekých rybníků Malá a Velká Obůrka, které obsahovalo velké množství toxického kadmia. V současné době jsou pozemky zarostlé vegetací a nejsou nijak hospodářsky využívány (Vojtová 2020).

Pomocí přístroje X-ray fluorescence (Delta Premium XPD 6000 byla v terénu vybrána 3 vhodná stanoviště pro odběr půdy. Celkově bylo odebráno přibližně 30 kg půdy z hloubky 60-80 cm. Půda ze všech stanovišť byla pro potřeby pokusu homogenizována, proseta přes 2 mm síto a poté sušena do konstantní hmotnosti při 40 °C.



Obrázek 4 Fotodokumentace odběru vzorků



Obrázek 5 Fotodokumentace odběru vzorků

#### 4.1.2 Chemická stabilizace kontaminované půdy

K chemické stabilizaci kadmia v kontaminované půdě byly pro experiment použity tyto sorbenty: nanoželezo, dřevní biochar a jejich kompozit nZVI-BC. Množství přidaných sorbentů odpovídalo 2 hm. % půdy (to je 184 g sorbentu v 9,2 kg půdy).

Přidané množství sorbentů bylo zvoleno na základě dvou aspektů: účinnost stabilizace a potenciální negativní účinky nZVI na živé organismy. Při vyšší koncentraci nZVI v půdě byly zjištěny negativní nebo dokonce toxické účinky na mikroorganismy a rostliny (Wu et al. 2018), proto se předpokládalo, že 2 hm. % přidaných sorbentů budou tvořit rovnováhu mezi imobilizací a potenciální toxicitou.

Použitý biochar byl vyroben pyrolýzou v dusíkové atmosféře ze směsi pilin borovicového a smrkového dřeva při teplotě 700°C. Kompozit nZVI-BC obsahoval 33 % železa a 67 % uhlíku. Byl připraven pyrolýzou směsi borovicových a smrkových pilin s předem upraveným prekurzorem Fe (práškové železo,  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Výroba biocharu i kompozitu proběhla v Regionálním centru pokročilých technologií a materiálů na Univerzitě Palackého v Olomouci (Semerád et al. 2021).

##### 4.1.2.1 Aktivace sorbentů

K aktivaci biocharu a nanoželeza se využívá voda/roztok s určitou iontovou silou. Kohoutková voda byla vybrána především pro své složení. Obsahuje řadu iontů, které zvyšují iontovou sílu, proto odpovídá více reálným podmínkám než voda demineralizovaná, která žádné rozpuštěné ionty neobsahuje. K danému množství sorbentů bylo přidáváno odpovídající množství vody (Tabulka 3) do té doby, než vznikla hustá suspenze. Po promíchání se suspenze nechala týden odstát, než byla přidána do půdy (Semerád et al. 2021).

Tabulka 3 Složení aktivovaných sorbentů

Sorbent	Hmotnost sorbentu (g)	Přidané množství vody (g)
BC	184	1663
nZVI-BC	184	1003

##### 4.1.2.2 Aplikace sorbentů

Půda během stabilizace byla udržována při konstantní vlhkosti, to je standartně při 60–70 % maximální retenční vodní kapacity dané půdy (Mitzia et al. 2020). Po stanovení maximální retenční vodní kapacity bylo množství vody přepočteno na dané množství půdy (9,2 kg) a zvolenou vlhkost (65 %).

Kontrolní varianta (= bez sorbentů) byla rovnoměrně zavlhčena a ručně homogenizována. Aktivovaná činidla byla rovnoměrně smíchána s půdou a doplněna vodou do požadované kapacity.

Chemická stabilizace půdy, včetně aktivace a aplikace sorbentů, a maximální retenční vodní kapacita byla stanovena na Katedře pedologie a ochrany půd České zemědělské univerzity.

## 4.2 Nádobový pokus

Pro hodnocení příjmu kadmia rostlinou máku byl založen jednoduchý vegetativní nádobový pokus. V nádobovém pokusu byla použita půda, jejíž charakteristika je vypsána v Tabulce 4 a 5. Do plastových nádob bylo vloženo 9,2 kg půdy, která nebyla hnojena žádným hnojivem. Pokusné nádoby byly umístěny ve venkovních prostorech v polostínu, kryté střešou. Průměrná teplota v době vegetace máku činila 15,8 °C a relativní vlhkost vzduchu byla 70 % (Český hydrometeorologický ústav 2022).

Tabulka 4 Složení použité půdy

Vzorek	Konkrétní složení	Celková hmotnost (kg)
Kontrola	9,2 kg půdy + 3,6 kg vody	12,8
BC	9,016 kg půdy + 184 g BC + 3,6 vody	12,8
nZVI-BC	9,016 kg půdy + 184 g nZVI-BC + 3,6 vody	12,8

Tabulka 5 Základní charakteristika pokusné půdy (Vojtová 2020)

pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	7,5
pH <sub>BaCl<sub>2</sub></sub>	7,4
C <sub>ox</sub> (%)	2,3
KVK (cmol <sub>(+)</sub> /kg)	16

Do každé nádoby byla vyseta semena máku do hloubky 0,5 cm a lehce přikryta půdou. Výsev probíhal v květnu. Osivo máku setého (*Papaver somniferum* L. odrůda Aplaus) bylo chemicky mořeno. Tato odrůda máku je určená k produkci makoviny pro farmaceutický průmysl a semene pro potravinářské využití (Zehnálek & Kraus 2020).

Zálivka byla uskutečňována dešťovou vodou dle potřeby. Během pokusu proběhla aplikace fungicidního přípravku, k ochraně proti houbovým chorobám.

Mák byl sklizen po 4 měsících růstu v pokusných nádobách. Biomasa máku byla usušena při pokojové teplotě a před analýzou byla homogenizována a rozemleta na analytickém mlýnku (Polymix PX-MFC 90 D, Kimetica).

### **4.3 Stanovení obsahu kadmia**

#### **4.3.1 Rentgenová fluorescence**

Ke zjištění obsahu kadmia v půdě byla použita metoda rentgenové fluorescence. K analýze byl použit spektrometr Olympus Delta Premium XRF. Měření byla pořízena v režimu Soil, který vyzařuje tři paprsky 50 keV, 40 keV a 15keV na sken. Vzorek půdy byl umístěn do 10 ml plastových kyvet, pokryt polypropylenovou fólií o tloušťce 4  $\mu\text{m}$  a poté umístěn na laboratorní stojan XRF. Povrch půdy byl přímo skenován přístrojem ve třech opakováních s dobou skenování 60 s na sken (celkový čas 180 s) (Gholizadeh et al. 2021). Průměrné výsledky byly přepočteny na obsah kadmia v půdě. Analýza byla provedena na Katedře pedologie a ochrany půd České zemědělské univerzity.

#### **4.3.2 Atomová absorpční spektrometrie**

Do teflonové nádoby s 0,5 g naváženého, vysušeného a zhomogenizovaného vzorku se přidalo 10 ml 65%  $\text{HNO}_3$ . Nádoby se lehce uzavřely víčkem a obsah se nechal přes noc zreagovat. Poté byla teflonová nádoba pevně uzavřena a zahřívána 2 hodiny při 120 °C na již vyhřáté desce. Po zchladnutí byl vzorek kvantitativně převeden do 50 ml odměrné baňky a doplněn deionizovanou vodou po rysku. Před analýzou bylo odebráno 10 ml vzorku a přefiltrováno přes 0,45  $\mu\text{m}$  nylonové filtry (Rondevaldova et al. 2022). Celkový obsah kadmia byl stanoven pomocí plamenové atomové absorpční spektrometrie (F-AAS, VARIAN SpectrAA-280) při vlnové délce 228,8 nm. Správnost analýzy byla kontrolována pomocí kontrolních vzorků o známé koncentraci a slepých vzorků. Měření kontrolních vzorků, slepých vzorků a analyzovaných vzorků byla provedena ve třech opakováních.

### **4.4 Statistická analýza**

Výsledky analýzy byly statisticky vyhodnoceny za pomoci programu Statistica 12.0 (StatSoft Inc.). Rozdíly mezi variantami u sledovaného parametru byly hodnoceny pomocí analýzy rozptylu jednoduchého třídění (one-way ANOVA) s Fischerovým LSD post-hoc testem ( $p < 0,05$ ). Vizualizace výsledků byla vytvořena v programu Excel (Microsoft Office).

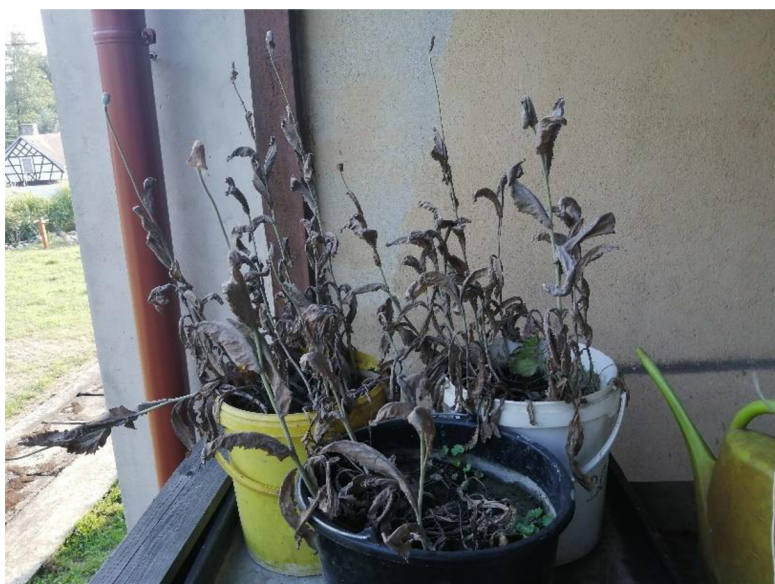
## 5 Výsledky

### 5.1 Nádobový pokus

V průběhu pokusu (27. 5. - 8. 9.) docházelo k postupnému úhynu jednotlivých rostlin ve všech pokusných nádobách, a proto byl pokus předčasně ukončen. K nejrychlejšímu úhynu rostlin došlo u máku rostoucím na kontrolní variantě půdy.

Před projevy začátku úhynu, nebyly mezi jednotlivými variantami rostlin pozorovány žádné rozdíly v jejich vývoji.

Největší rozdíl mezi pěstovanými rostlinami byl v množství nadzemní biomasy. U rostlin pěstovaných na půdě bez přidaných sorbentů bylo toto množství nejmenší v porovnání s ostatními variantami. Biomasa u variant s přidanými sorbenty byla srovnatelná. U všech rostlin se projevila chloróza listových ploch. Listy rostlin pěstovaných na kontrolní variantě byly výrazně menší a k jejich úhynu docházelo rychleji než u jiných variant. V polovině srpna začalo u rostlin docházet k usychání již vytvořených květů a následně k úhynu celých rostlin. U rostlin rostoucích na kontrolní variantě půdy nedošlo před úhynem k založení květů. Mák rostoucí na půdách s přidanými sorbenty uhynul ve fázi plného květu před začátkem tvorby tobolek. Kořeny u všech tří variant byly na konci pokusu mělce zakořeněné a odumřelé. Vzhled rostlin v konečné fázi nádobového pokusu je vidět na obrázcích 6 a 7.



Obrázek 6 Vzhled rostlin v konečné fázi pokusu



Obrázek 7 Vzhled rostlin v konečné fázi pokusu

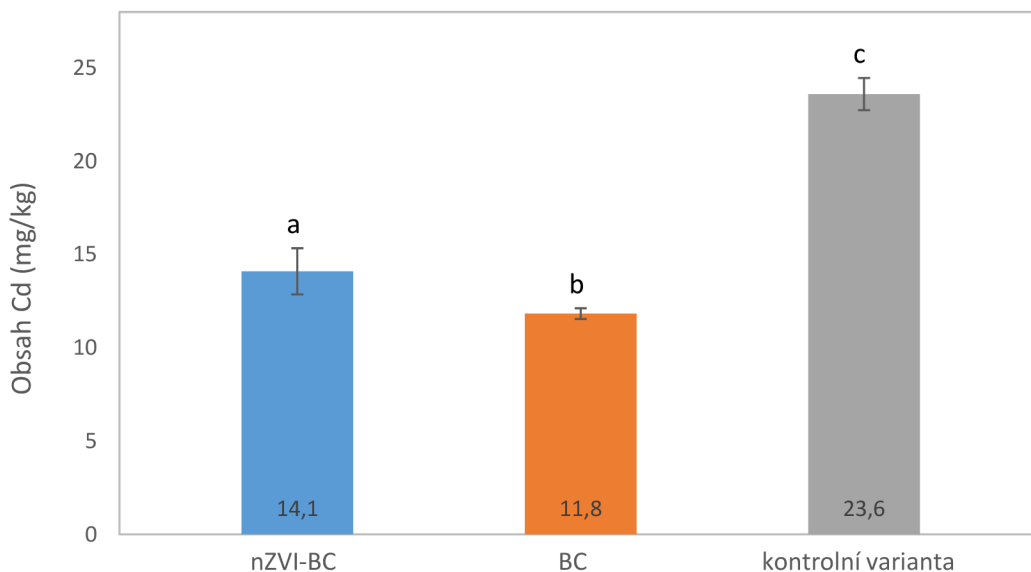
## 5.2 Obsah kadmia v půdě

V půdě, která byla použita v nádobovém pokusu, byla za pomoci rentgenové fluorescence stanovena průměrná hodnota obsahu kadmia jako 76 mg/kg.

## 5.3 Obsah kadmia v rostlinách

Obrázek 8 znázorňuje naměřené průměrné hodnoty obsahu kadmia v rostlinách pro každou testovanou půdní variantu.

Byl prokázán statisticky významný rozdíl ( $p < 0,05$ ) v obsahu kadmia mezi jednotlivými variantami. V grafu je zaznamenán zřetelný pokles obsahu kadmia v máku pěstovaném na půdách s přidanými sorbenty v porovnání s kontrolní variantou. V porovnání s kontrolní variantou byl obsah kadmia v máku pěstovaném na půdě s obsahem BC snížen o 49,9 %. V máku rostoucím na půdě s kompozitem nZVI-BC byl obsah kadmia zjištěn o 40,3 % nižší než ve variantě kontrolní. Statisticky významný rozdíl byl zaznamenán i mezi rostlinami, u kterých do půdy byla přidána stabilizační činidla. U varianty se sorbentem BC bylo stanoveno o 16,3 % méně kadmia než u varianty s kompozitem nZVI-BC.



Obrázek 8 Průměrný obsah kadmia v rostlinách máku

Rozdílná písmena ukazují statisticky významné rozdíly při hladině významnosti  $p < 0,05$ . Velikosti směrodatných odchylek jsou značeny chybovými úsečkami.

## 6 Diskuze

Kontaminace půd kadmiiem se stala vážným problémem, který ohrožuje bezpečnost potravin a lidské zdraví. Přítomnost kadmia v rostlinách snižuje jejich výnosy a zasahuje do jejich metabolických procesů. V České republice se nachází několik lokalit, kde koncentrace kadmia v půdách ohrožuje životní prostředí. Aby se zamezilo kontaminaci rostlin, určilo Ministerstvo zemědělství České republiky preventivní hodnoty koncentrace rizikových prvků v zemědělských půdách (Vyhláška 437/2016 Sb.). Pseudototální hodnota pro kadmium je stanovena na 0,5 mg/kg v běžných půdách (Ministerstvo životního prostředí 2016). Obsah kadmia v experimentální půdě výrazně převyšuje preventivní hodnotu stanovenou touto vyhláškou a nelze jí zemědělsky využívat. Celý experiment lze tedy vnímat jako čistě teoretický pokus v oblasti extrémní kontaminace.

Jak již bylo řečeno, přidávání sorbentů do kontaminovaných půd je v posledních letech široce využíváno pro jejich schopnosti zlepšovat jejich fyzikální a chemické vlastnosti. Využitím procesů sorpce a srážení dochází k imobilizaci rizikových prvků. Mezi sorbenty rizikových prvků se řadí mnoho organických i anorganických materiálů (Alloway 2013).

Bylo zjištěno, že přidávání biocharu do půdy lze považovat za možný způsob, jak dosáhnout poklesu rizikových prvků v rhizosféře a tím snížit i jejich dostupnost pro rostliny (Qian et al. 2023). V extrémním experimentu popisovaném v této práci byl pozorován výrazný vliv biocharu nejen na koncentraci kadmia v rostlině *Papaver somniferum* L., ale též na zvýšenou odolnost rostliny. Obsah kadmia byl snížen v porovnání s kontrolní variantou o 49,9 %, ale i přes tento fakt, se do máku dostalo takové množství kadmia, které je neslučitelné s bezpečností pro lidské zdraví.

Analýza, provedená Bidermanem & Harpolem (2013), studující účinky biocharu na produktivitu rostlin a koloběh živin zjistila, že přidání biocharu do půdy zvýšilo nadzemní produktivitu, výnos plodin a koncentraci živin ve tkáních testovaných rostlin.

Schopnost rostlin přijímat rizikové prvky z půdy ošetřené biocharem závisí na typu biohlu, teplotě výroby, aplikační dávce, půdním typu a druhu rostliny (Rizwan et al. 2016). Toto tvrzení bylo dokázáno mnoha studiemi.

Cheng et al. (2023) přidali do kadmiiem kontaminované půdy tři různé koncentrace biocharu (1 %, 3 %, 5 %) a sledovali, u které varianty bude obsah kadmia v melounu (*Cucumis melo* L.) nejmenší. Varianta s 5 % biocharu nejvíce fixovala půdní kadmium, čímž byl obsah kadmia v melounu nejmenší. V našem případě bylo do půdy přidány 2 % hm. biocharu a je možné, že toto množství není schopné sorbovat většinu kadmia v tak kontaminované půdě a zmírňovat tím účinky kadmiového stresu v rostlinách máku.

Liu et al. (2022) ve svém experimentu porovnávali druhy biocharu vyrobené z různých materiálů a jejich vliv na obsah kadmia v salátu (*Latuca sativa* L.). Biochar vyrobený z borovicového dřeva významně snížil obsah kadmia v salátu, ale lepší variantou se ukázal



biochar z kukuřičné slámy. Jejich výsledky také zaznamenaly, že biochar z borovicového dřeva snižoval růst rostlin a jejich výnosy. Ke stejným závěrům došel i Holt et al. (2022), kdy BC z borovice snížil výnos kukuřice (*Zea mays* L.), ale zároveň neměl vliv na výnos vojtěšky (*Medicago sativa* L.). Stejně nebo podobné pokusy u máku nejsou dohledatelné, ale je možné, že biochar z borovice, použitý i v našem případě, měl vliv na přijatém obsahu kadmia a na výnos biomasy.

Ekologicky šetrné nanoželezo se stále častěji používá ke snížení znečištění rizikovými prvky. Jeho výhodami jsou vysoká reaktivita, bezpečnost a nízké výrobní náklady. Biochar může být použit jako podpora nZVI, a jako prostředek pro zlepšení jeho sanačních schopností. Ačkoliv kompozit nZVI-BC může odstraňovat rizikové prvky z odpadních vod, znalosti týkající se stabilizace rizikových prvků v kontaminované půdě jsou omezené (Yang et al. 2021).

Qian et al. (2021) ve svém experimentu zkoumali aplikaci kompozitu nZVI-BC v kontaminované půdě a jeho vliv na imobilizaci kadmia. Výsledky ukázaly, že nZVI-BC účinně imobilizoval Cd a jeho biologickou dostupnost pro rostliny. Ke stejným závěrům došli i Yang et al. (2021), kdy imobilizace kadmia v kontaminované půdě byla snížena až o 86,49 %. Stejní autoři (Yang et al. 2022) se zabývali i vlivem nZV-BC na rostliny, kdy sledovali příjem kadmia rýží (*Oryza sativa* L.) pěstované na kontaminované půdě, s přidavkem různého množství nZVI-BC. Obecně lze říci, že přidávaný kompozit zvyšoval pH půdy a snížil dostupnost kadmia pro rostliny, ale s vyššími koncentracemi nZVI-BC se tento efekt snižoval. Za optimální množství nZVI-BC v půdě určili 1 hm. %. Sami autoři ale uvedli, že další studie jsou nezbytné pro určení optimálního množství nZVI-BC přidávaného do kontaminovaných půd (Yang et al. 2022).

V námi testovaném máku pěstovaném na půdě s kompozitem nZVI-BC byl obsah kadmia o 40,3 % nižší než ve variantě kontrolní. Do půdy byla přidána 2 % hm. tohoto kompozitu a kvůli nedostatku studií nelze říci, zdali je toto množství u máku adekvátní. Nicméně se stálejeví jako výhodnější po stránce účinnosti i po stránce finanční prostý přidavek biocharu, což dokumentuje i studie Zand et al. (2020), kteří zkoumali příjem kadmia rostlinami rostoucích na kontaminované půdě s přidavkem biocharu a nanoželeza. Pěstovanou rostlinou byl plevelný druh jetele (*Trifolium repens* L.). Jejich pokus se skládal ze tří variant: kontrolní, BC a nZVI-BC. Biochar byl vyrobený z borovicového dřeva a pyrolyzován při 740°C. Do půdy byl aplikován v dávce 2,5 %. Nanoželezo bylo přidáno v množství 300 mg/kg spolu s biocharem. Použití kompozitu nZVI-BC sice zvýšilo množství nadzemní i podzemní biomasy, ale zároveň se zvýšila akumulací kapacita rostlin pro kadmium. Individuální aplikace BC snížila příjem kadmia rostlinami a zároveň se zlepšila jejich fyziologická struktura.

Výsledky této studie lze aplikovat na naše závěry, přestože se jednalo o jiný rostlinný druh, nicméně byly použity sorbenty stejného složení a o podobné koncentraci.

Mák je světlomilná a teplomilná rostlina (Fejér 2015). Je tedy možné, že prostředí, ve kterém probíhal nádobový pokus není pro mák vhodným místem pro jeho správný růst a vývoj. Nicméně z hlediska osobního provedení pokusu se jednalo o jedinou možnou lokaci.

## 7 Závěr

Cílem této práce bylo vyhodnotit účinnost biocharu a nanoželeza, jako dvou imobilizujících látek, na biologickou dostupnost kadmia v rostlině máku setého prostřednictvím jednoduchého nádobového pokusu.

Výsledky ukázaly pozitivní vliv aplikace BC i nZVI-BC na imobilizaci kadmia v půdě v porovnání s kontrolní půdní variantou. Samotný BC se ukázal více účinným sorbentem, než když byl součástí kompozitu s nanoželezem. Lze tedy konstatovat, že BC byl schopen více zlepšovat růstové parametry rostlin a snížit obsah kadmia v jejich tkáních.

Další studie s touto problematikou, by se mohly zaměřit na využití biocharu vyrobeného z jiného materiálu a při jiné teplotě a na úpravy týkající se jeho koncentrace v půdě. U kompozitu nZVI-BC by se výzkum mohl zaměřit na poměr mezi jednotlivými složkami a na pozměnění celkového množství kompozitu přidaného do půdy. Za zamyšlení stojí i způsob pěstování máku v nádobovém pokusu. Dále by bylo dobré odhadnout do jaké úrovně kontaminace půdy kadmiiem by mělo použití sorbentu smysl. A to ať již v praktické či pouze teoretické rovině.

Závěrem lze říci, že cíle práce byly splněny s částečně pozitivním výsledkem. Přidané sorbenty sice imobilizovaly kadmium v půdě a částečně zamezily jeho příjmu mákem, ale i tak byl obsah kadmia v rostlinné biomase vysoký. Otázkou je, zdali by i jiný typ sorbentů dokázal více imobilizovat kadmium v takto silně kontaminované půdě.

## 8 Literatura

- Alloway BJ. 2013. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Springer Dordrecht, New York.
- Bernáth J. 1999. Poppy: The Genus *Papaver*. CRS Press.
- Biderman LA, Harpole WS. 2013. Biochar and Its Effects on Plant Productivity and Nutrient Cycling: A Meta Analysis. *Global Change Biology* **5**:202-2014.
- Carolan JC, Hook III, Chase MW, Kadereit JW, Hodkinson TR. 2006. Phylogenetics of *Papaver* and Related Genera Based on DNA Sequences from ITS Nuclear Ribosomal DNA and Plastid trnL Intron and trnL–F Intergenic Spacers. *Annals of Botany* **98**:141-155.
- Clapham AR, Tutin TG, Walbura EF. 1981. Excursion flora of the British Isles. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Český hydrometeorologický ústav. 2022. Měsíční a roční data dle zákona 123/1998 Sb. Český hydrometeorologický ústav, Praha. Available from <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/mesicni-data/mesicni-data-dle-z.-123-1998-Sb#> (accessed March 2023).
- Český modrý mák. 2019a. Český modrý mák: Nutriční hodnota. Český modrý mák z.s. Available from <https://ceskymodrymak.cz/cs/mak/nutricni-hodnota> (accessed November 2022).
- Český modrý mák. 2019b. Legislativa v ČR. Český modrý mák z. s. Available from <https://ceskymodrymak.cz/cs/mak-jako-komodita/legislativa-mak> (accessed December 2022).
- Český modrý mák. 2021. Chráněné zeměpisné označení. Český modrý mák z. s. Available from <https://ceskymodrymak.cz/cs/chzo2021> (accessed February 2023).
- Český modrý mák. 2022. Česká cechovní norma. Český modrý mák z. s. Available from <https://ceskymodrymak.cz/cs/mak/guild> (accessed February 2023).
- Český statistický úřad. 2023. Definitivní údaje o sklizni zemědělských plodin – 2022. Český statistický úřad, Praha. Available from <https://www.czso.cz/csu/czso/definitivni-udaje-o-sklizni-zemedelskych-plodin-2022> (accessed March 2023).
- Encyclopedia Britannica. 2017. "*Papaveraceae*." Encyclopedia Britannica. Available from <https://www.britannica.com/plant/Papaveraceae> (accessed November 2022).
- EFSA. 2012. Cadmium dietary exposure in the European population. *EFSA Journal* **10(1)**:2551.
- EFSA. 2018. Update of the Scientific Opinion on opium alkaloids in poppy seeds. *EFSA Journal* **16(5)**:5243.

- Evropská komise. 2021a. Cadmium: Cadmium in food. Evropská komise. Available from [https://food.ec.europa.eu/safety/chemicalsafety/contaminants/catalogue/cadmium\\_en](https://food.ec.europa.eu/safety/chemicalsafety/contaminants/catalogue/cadmium_en) (accessed March 2023).
- Evropská komise. 2021b. Nařízení komise (EU) č. 1323 ze dne 10. srpna 2021, kterým se mění nařízení (ES) č. 1881/2006, pokud jde o maximální limity kadmia v některých potravinách. Pages 13-18 in Úřední věstník Evropské unie, 2021, L 288/13. Brusel.
- Fejér J. 2015. Morfologicko – biologická diverzita druhu mak siaty (*Papaver somniferum* L.) a jej hodnotenie. Prešovská univerzita, Prešov.
- Friberg L. 2017. Cadmium in environment. Taylor & Francis Group.
- Gholizadeh A, Coblinski JA, Saberioon M, Ben-Dor E, Drábek O, Dematte JAM, Borůvka L, Němeček K, Chabrilat S, Dajčl J. 2021. vis-NIR and XRF Data Fusion and Feature Selection to Estimate Potentially Toxic Elements in Soil. *Sensors* **21**:2386.
- Haider FU, Liqun C, Coulter JA, Cheema SA, Wu J, Zhang R, Wenjun M, Farooq M. 2021. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **211**:111887.
- Holt JA, Yost MA, Winward D, Creech JE, Allen LN, McAvoy D. 2022. Biochar had minor effects on yield, quality, and water availability of irrigated alfalfa, corn, and wheat. *Agronomy Journal* **144(3)**:1717-1730.
- Cheng Y, Qiu L, Shen P, Wang Y, Li J, Dai Z, Qi M, Zhou Y, Zou Z. 2023. Transcriptome studies on cadmium tolerance and biochar mitigating cadmium stress in muskmelon. *Plant Physiology and Biochemistry* **197**:107661.
- Chmelová D, Ondrejovič M, Havrlenová M, Kraic J. 2018. Evaluation of polar polyphenols with antioxidant activities in *Papaver somniferum* L. *Journal of Food & Nutrition Research* **57**:98-107.
- Kabata-Pendias A. 2011. Trace Elements in Soils and Plants. *Experimental Agriculture* **47(04)**:739.
- Khan Z, Elahi A, Bukhari DA, Rehman A. 2022. Cadmium sources, toxicity, resistance and removal by microorganisms – A potential strategy for cadmium eradication. *Journal of Saudi Chemical Society* **26**:101569.
- Knápek J, Buchtová R, Vošmerová D. 2011. Content of Cadmium in Poppy Seeds and Poppy Seeds Containing Products Marketed in Czech Republic. *Journal of Environmental Science and Engineering* **5**:831-834.
- Kopřiva P. 2016. SZPI intenzivně kontroluje dovoz a zpracování máku v ČR. Státní zemědělská a potravinářská inspekce, Brno. Available from

<https://www.szpi.gov.cz/docDetail.aspx?docid=1343610&docType=ART&nid=12462>  
(accessed March 2023).

- Kubánek V. 2008. Konopí a mák (pěstování, výroky, legislativa). Tribun EU, Brno.
- Kubík L, Svoboda T, Reininger D, Poláková Š. 2021. Obsahy rizikových prvků v zemědělských půdách České republiky. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno.  
Available from  
[https://eagri.cz/public/web/file/691280/\\_20\\_6\\_2022\\_Kartogramy\\_2021.pdf](https://eagri.cz/public/web/file/691280/_20_6_2022_Kartogramy_2021.pdf) (accessed March 2023).
- Labanca F, Ovesna J, Milella L. 2018. *Papaver somniferum* L. taxonomy, uses and new insight in poppy alkaloid pathways. *Phytochem Rev* **17**:853-871.
- Lahiri R, Lal RK, Sarkar S, Kumar D, Dubey BK, Shukla S, Singh S. 2017. Genetics of alkaloids in poppy straw with other morphological traits in opium poppy (*Papaver somniferum* L.). *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants* **7**:74-83.
- Li Y, Gupta R, Zhang Q, You S. 2023. Review of biochar production via crop residue pyrolysis: Development and perspectives. *Bioresource Technology* **369**:128423.
- Liang W, Wang G, Peng C, Tan J, Wan J, Sun P, Li Q, Ji X, Zhang Q, Wu Y, Zhang W. 2022. Recent advances of carbon-based nano zero valent iron for heavy metals remediation in soil and water: A critical review. *Journal of Hazardous Materials* **426**:127993.
- Liu Q, Huang L, Chen Z, Wen Z, Ma L, Xu S, Wu Y, Liu Y, Feng Y. 2022. Biochar and its combination with inorganic or organic amendment on growth, uptake and accumulation of cadmium on lettuce. *Journal of Cleaner Production* **370**:133610.
- Lošák T, Varga L. 2022. Rizikové látky v půdě a rostlinách na příkladu kadmia při pěstování máku setého. Kurent s.r.o. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/rizikove-latky-v-pude-a-rostlinach-na-prikladu-kadmia-pri-pestovani-maku-seteho> (accessed January 2023).
- Ma Y, Ran D, Shi X, Zhao H, Liu Z. 2021. Cadmium Toxicity: A role in bone cell function and teeth development. *Science of The Total Environment* **769**:144646.
- Mikšík V, Lohr V. 2020. The Czech Republic – The Largest producer of breadseed Poppy. Ministry of Agriculture of the Czech Republic, Prague.
- Ministerstvo zemědělství. 2015. Vyhláška č. 172 ze dne 1. července 2015 o informační povinnosti příjemce potravin v místě určení. Pages 2150-2151 in *Sbírka zákonů České republiky, 2015, částka 70*. Česká republika.
- Ministerstvo zemědělství. 2013. Vyhláška č. 399 ze dne 27. listopadu 2013, kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 329/1997 Sb., kterou se provádí § 18 písm. a), d), h),

- i), j) a k) zákona č. 110/1997 Sb., o potravinách a tabákových výrobcích a o změně a doplnění některých souvisejících zákonů, pro škrob a výrobky ze škrobu, luštěniny a olejnatá semena, ve znění vyhlášky č. 418/2000 Sb. Pages 6838-6844 in Sbíрка zákonů České republiky, 2013, částka 156. Česká republika.
- Ministerstvo životního prostředí. 2016. Vyhláška č. 153 ze dne 9. května 2016 o stanovení podrobností ochrany kvality zemědělské půdy a o změně vyhlášky č. 13/1994 Sb., kterou se upravují některé podrobnosti ochrany zemědělského půdního fondu. Pages 2692-2699 in Sbíрка zákonů České republiky, 2016, částka 59. Česká republika.
- Mitzia A, Vítková M, Komárek M. 2020. Assessment of biochar and/or nano zero-valent iron for the stabilisation of Zn, Pb and Cd: A temporal study of solid phase geochemistry under changing soil conditions. *Chemosphere* **242**:125248.
- Norn S, Kruse PR, Kruse E. 2005. History of opium poppy and morphine. *Dan Medicinhist Arbog* **33**:171-84.
- Novák J, Nováková H. 2018. Mák jako potravina a droga. Aventinum, Praha.
- Parlament České republiky. 1998. Zákon č. 167 ze dne 11. června 1998 o návykových látkách a o změně některých dalších zákonů. Pages 6770-6800 in Sbíрка zákonů České republiky, 1998, částka 57. Česká republika.
- Pavlíková D, Balík J, Tlustoš P. 2007. Effect of Cadmium Content in Soil and Crop Rotation on Cadmium Accumulation in Plant Biomass. *Ecological Chemistry and Engineering* **14(3-4)**: 363–369.
- Poláková Š, Kubík L, Reininger D. 2023. Bazální monitoring zemědělských půd: obsah rizikových prvků 1995-2019. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský, Brno. Available from [https://eagri.cz/public/web/file/717924/ZZ\\_RP\\_95\\_19\\_FINAL\\_1.pdf](https://eagri.cz/public/web/file/717924/ZZ_RP_95_19_FINAL_1.pdf) (accessed March 2023).
- Potravinářská komora. 2019. Modrý mák. Potravinářská komora ČR, Praha. Available from <https://www.cehovninormy.cz/index.php/cehovni-normy/270-modry-mak> (accessed March 2023).
- Qian S, Zhou X, Fu Y, Song B, Yan H, Chen Z, Sun Q, Ye H, Qin L, Lai C. 2023. Biochar-compost as a new option for soil improvement: Application in various problém soils. *Science of The Total Environment* **870**:162024.
- Qian W, Laing JY, Zhang W, Huang S, Diao Z. 2021. A porous biochar supported nanoscale zero-valent iron materials highly efficient for the simultaneous remediation of cadmium and lead contaminated soil. *Journal of Environmental Science* **113**:231-241.

- Qin S, Liu H, Nie Z, Rengel Z, Gao W, Li CH, Zhao P. 2020. Toxicity of cadmium and its competition with mineral nutrients for uptake by plants: A review. *Pedosphere* **30**:168-180.
- Rizwan M, Ali S, Qayyum MF, Ibrahim M, Zia-ur-Rehman M, Abbas T, Ok YS. 2016. Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research* **23**:2230-2248.
- Rondevaldova J, Novy P, Tauchen J, Drabek O, Kotikova Z, Dajcl J, Mascellani A, Chrun R, Nguon S, Kokoska L. 2022. Determination of antioxidants, minerals and vitamins in Cambodian underutilized fruits and vegetables. *Journal of Food Measurement and Characterization* **17**:716-731.
- Sabolová M. 2020. Role máku ve výživě člověka. *Výživa a potraviny* **1**:8-12.
- Salamon I, Fejér J. 2011. Content of heavy metals in poppy seeds (*Papaver somniferum* L.). *Advances in Environmental Biology* **5**:315-319.
- Sandrin TR, Maier RM. 2009. Effect of pH on cadmium toxicity, speciation, and accumulation during naphthalene biodegradation **21**:2075-2079.
- Semerád J et al. 2021. Discovering the potential of an nZVI-biochar composite as a material for the nanobioremediation of chlorinated solvents in groundwater: Degradation efficiency and effect on resident microorganisms. *Chemosphere* **281**:130915.
- Shanmugaraj BM, Malla A, Ramalingam S. 2019. Chapter 1 – Cadmium Stress and Toxicity in Plants: An Overview. Pages 1-17 in Hasanuzzaman M, Vara Prasad MN, Fujita M, editors. *Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants*. Academic Press, Cambridge, Massachusetts.
- Slavík B. 1997. *Květena České republiky 1*. Academia, Praha.
- Souza-Arroyo V, Fabián JJ, Bucio-Ortiz L, Miranda-Labra RU, Gomez-Quiroz LE, Gutiérrez-Ruiz MC. 2022. The mechanism of the cadmium-induced toxicity and cellular response in the liver. *Toxicology* **480**:153339.
- Stace CA. 2019. *New Flora of the British Isles*. C & M Floristics, Suffolk.
- Státní zemědělská a potravinářská inspekce. 2023. Zpráva o výsledcích plánované kontroly cizorodých látek v potravinách v roce 2022. Ministerstvo zemědělství, Brno. Available from <https://www.szpi.gov.cz/clanek/zprava-o-vysledcich-planovane-kontroly-cizorodych-latek-v-potravinach-v-roce-2022.aspx> (accessed March 2023).
- Suhani I, Sahab S, Srivastava V, Singh RP. 2021. Impact of cadmium pollution on food safety and human health. *Current Opinion in Toxicology* **27**:1-7.
- Tang C, Wang X, Zhang Y, Liu N, Hu X. 2023. Corrosion behaviors and kinetics of nanoscale zero-valent iron in water: A review. *Journal of Environmental Sciences* **135**:391-406.



- Türker DA, Saraç MG, Yetiman AE, Doğan M. 2021. Interfacial properties of poppy seed protein (*Papaver somniferum* L.) as an alternative protein source at oil/water interface: influence of pH on stability, morphology and rheology. *Eur Food Res Technol* **247**:2545-2556.
- Vašák J. 2010. Mák. Powerprint s.r.o., Praha.
- Visentin C, da Silva Trentin AW, Braun AB, Thomé A. 2021. Nano scale zero valent iron production methods applied to contaminated sites remediation: An overview of production and environmental aspects. *Journal of Hazardous Materials* **410**:124614.
- Voglmayr H, Montes-Borrego M, Landa BB. 2014. Disentangling Peronospora on *Papaver*: Phylogenetics, Taxonomy, Nomenclature and Host Range of Downy Mildew of Opium Poppy (*Papaver somniferum*) and Related Species. *PLOS ONE* 9(5) (e96838). DOI: 10.1371/journal.pone.0096838.
- Vojtová P. 2020. Vliv Cd na půdní mikroorganismy – od pedonu po půdní agregát [MSc. Thesis]. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Wang M, Chen Z, Song W, Hong D, Huang L, Li Y. 2021. A review on Cadmium Exposure in the Population and Intervention Strategies Against Cadmium Toxicity. *Bull Environ Contam Toxicol* **106**:65-74.
- Wang R, Sang P, Guo Y, Jin P, Cheng Y, Yu H, Xie Y, Yao W, Qian H. 2022. Cadmium in food: Source, distribution and removal. *Food Chemistry* **405**:134666.
- Wu S et al. 2018. Nano zero-valent iron mediated metal (loid) uptake and translocation by arbuscular mycorrhizal symbioses. *Environmental Science & Technology* **52**:7640-7651.
- Xiao X, Zhang J, Wang H, Han X, Ma J, Ma Y, Luan H. 2020. Distribution and health risk assessment of potentially toxic elements in soils around coal industrial areas: A global *meta*-analysis. *Science of The Total Environment* **713**:135292.
- Yang D, Yang S, Yuan H, Wang F, Wang H, Xu J, Liu X. 2021. Co-benefits of biochar-supported nanoscale zero-valent iron in simultaneously stabilizing soil heavy metals and reducing their bioaccessibility. *Journal of Hazardous Materials* **418**:126292.
- Yang D, Zhang J, Yang S, Wang Y, Tang X, Xu J, Liu X. 2022. Biochar-supported nanoscale zero-valent iron can simultaneously decrease cadmium and arsenic uptake by rice grains in co-contaminated soil. *Science of the Total Environment* **814**:152798.
- Yuan C, Li Q, Sun Z, Sun H. 2021. Effects of natural organic matter on cadmium mobility in paddy soil: A review. *Journal of Environmental Sciences* **104**:204-2015.
- Zand AD, Tabrizi AM, Heir AV. 2020. Incorporation of biochar and nanomaterials to assist remediation of heavy metals in soil using plant species. *Environmental Technology & Innovation* **20**:101134.

Zehnálek P, Kraus P. 2020. Odrůdy 2020. Olejniny 2020: Seznam doporučených odrůd řepka olejka – ozimá, len setý. Přehled odrůd řepka olejka – jarní, hořčice bílá, mák setý a kmín kořený. Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. Národní odrůdový úřad, Brno.