

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Zdroje a obsahy rtuti v půdách ČR
Bakalářská práce**

Martin Krovina

Ochrana krajiny a využívání přírodních zdrojů

Vedoucí práce prof. Ing. Jiřina Száková, CSc.

© 2023 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci Zdroje a obsahy rtuti v půdách ČR jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 21.4.2023

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval prof. Ing. Jiřině Szákové, CSc. a Ing. Janě Najmanové za pomoc při vzorkování v lokalitě Jesenný a pomoc při měření vzorků. Dále bych rád poděkoval za předání cenných rad, odborného vedení a čas, který mi byl věnován. V neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině, kolegům a kamarádům za pomoc a podporu při celém mém studiu.

Zdroje a obsahy rtuti v půdách ČR

Souhrn

Práce se zabývala shrnutím zdrojů a informací o rtuti a zmapováním největších zdrojů kontaminace v České republice, které mohou svou činností potenciálně kontaminovat životní prostředí rtutí. Mimo antropogenní znečištění patří ke kontaminaci i přírodní zdroje uvolňující rtuť a ložiska minerálu cinabaritu. V této práci bylo zmíněno, na kterých místech se v České republice těžil cinabarit. Jedním z bývalých dolů byla oblast Jesenný v Libereckém kraji. V této lokalitě probíhala těžba v letech 1625–1634. Pro zmapování kontaminace okolí bývalého ložiska proběhlo odebrání 10 vzorků půdy v okolí zasypaného vstupu do šachty a lesním okolí. Ke stanovení obsahu rtuti byl použit atomový absorpční spektrometr AMA-254. Koncentrace naměřených hodnot byla v rozmezí od 1,8 mg/kg do 9,9 mg/kg rtuti. Z dalších rizikových prvků byl stanoven zvýšený obsah chromu, a to 108 mg/kg. Obsah rtuti byl stanoven také ve vzorcích hub, kdy nejvyšší obsah, 1,23 mg/kg rtuti, bylo nalezeno ve hříbu žlutomasém. Tato lokalita nepředstavuje místo, které by mělo přímý negativní vliv na zdraví člověka či zvířat. Přesto je stále nutno na něj nahlížet jako na místo se zvýšeným obsahem rtuti v půdě v důsledku těžební činnosti. Dále bych do budoucna navrhl detailnější průzkum této bývalé těžební oblasti pro získání většího přehledu kontaminace rtutí oblasti Jesenný.

Klíčová slova: Rtuť, rizikové prvky, půda, kontaminace, životní prostředí.

Sources and contents of mercury in the soils of the Czech Republic

Summary

This bachelor thesis dealt with gathering sources and information about mercury and mapping the largest contaminants in the Czech Republic that can potentially contaminate the environment with mercury through their activities. Besides anthropogenic pollution, the contamination includes natural sources releasing mercury and deposits with the mineral cinnabarite. In this thesis it was mentioned which places in the Czech Republic were mined for cinnabarite. One of the former mines was the Jesenný area in the Liberec region. Mining took place in this locality between 1625 and 1634. In order to map the contamination of the surroundings of the former deposit, 10 soil samples were taken in the vicinity of the backfilled shaft entrance and the forest surroundings. An AMA-254 atomic absorption spectrometer was used to determine the mercury content. The concentration of the measured values ranged from 9.88 mg/kg to 6.31 mg/kg of mercury. Among the elements at risk, chromium was measured with the highest concentration of 108 mg/kg. The mushrooms found in the forest area contained the highest amount of mercury at 1.23 mg/kg and this was found in the mushroom red cracking bolete. The site does not represent a location that would have a negative impact on human or animal health. Nevertheless, it should still be viewed as a site with elevated mercury in the soil due to mining activities. Further, in the future, I would suggest a more detailed investigation of this former mining area to gain a greater understanding of the mercury contamination of the Jesenný area.

Keywords: Mercury, risk elements, soil, contamination, environment.

Obsah

1. Úvod.....	I
2. Cíl práce	I
3. Teoretická část.....	1
3.1. Charakteristika rtuti.....	1
3.1.1. Výskyt.....	1
3.1.2. Výroba	1
3.1.3. Sloučeniny	2
3.1.4. Použití.....	2
3.2. Zdroje znečištění	3
3.2.1. Znečištění vodních toků.....	4
3.2.2. Znečištění půdy a rostlin.....	5
3.3. Těžba rtuti	6
3.4. Toxikologie rtuti a jejích sloučenin	7
3.4.1. Rtuť elementární.....	7
3.4.2. Anorganické sloučeniny rtuti	8
3.4.3. Organokovové sloučeniny rtuti	8
3.5. Rtuť ve světě	9
3.6. Průmyslové zdroje kontaminace v ČR.....	10
3.7. Limity rtuti v půdě	13
3.8. Česká republika vs. svět	14
4. Materiál a metody	15
4.1. Oblast Jesenný u Semil.....	15
4.1.1. Lokalizace	15
4.1.2. Odběrové místo	17
4.2.1. Použité přístroje a chemikálie.....	18
4.2.2. Příprava vzorků	19
4.2.3. Spektrometr AMA 254	19
4.2.4. Měření vzorků v AMA 254.....	20
4.2.5. Obsah dalších rizikových prvků.....	21
4.2.5.1. Kontaminace půdy rizikovými prvky	21
4.2.5.2. Mikrovlnný rozklad vzorků v prostředí lučavky královské	21
4.2.5.3. Měření ICP-OES	21
4.3. Vyhodnocení dat a kontrola správnosti výsledků	22
5. Výsledky.....	23

5.1. Obsah rtuti v půdě	23
5.2. Obsahy dalších rizikových prvků ve vzorcích půdy.....	23
5.3. Obsah rtuti ve vzorcích hub.....	29
5.4. Obsah dalších rizikových prvků ve vzorcích hub.....	29
6. Diskuze	30
7. Závěr	33
8. Literatura	1

1. Úvod

Znečištění životního prostředí těžkými kovy je globální problém. Vlivem přírodních zdrojů znečištění ale také antropogenní činností při průmyslové výrobě či spalování fosilních paliv se dostávají těžké kovy do životního prostředí, kde mají škodlivé účinky na zdraví lidí, zvířat i rostlin. Během koloběhu toxických kovů v atmosféře a následné akumulaci například v rostlinách či rybách mohou být snadno zakomponovány do potravního řetězce.

Mezi hlavní nebezpečné kovy patří rtuť, která se v životním prostředí nachází přirozeně, ale také vlivem antropogenního znečištění. Nejvíce toxická sloučenina methylrtuť se ukládá v tučných dravých rybách a způsobuje u lidí s vysokou konzumací těchto ryb následné otravy. Zástupci více než 140 zemí světa připravili novou globální úmluvu o rtuti. V říjnu roku 2013 byla v Japonsku podepsaná Minamatská úmluva o rtuti. Na tuto úmluvu přistoupila Česká republika v roce 2017, která má za základní cíl ochranu lidského zdraví a životního prostředí před úniky a emisemi rtuti. Rtuť a její sloučeniny poškozují zejména centrální nervový systém všech živých organismů.

V praktické části bude zmapovaná lokalita Jesenný u Semil, kde se v minulosti těžil cinabarit, ze kterého se získával kvalitní červený pigment. Z odebraných deseti vzorků půdy v okolí bývalé šachty dolu bude stanoven obsah rtuti a také obsahy dalších rizikových prvků. Výsledky mohou posloužit jako příklad možné úrovně kontaminace půdy v blízkosti opuštěných dolů, případně odhad rizika pro životní prostředí.

2. Cíl práce

Rtuť patří mezi rizikové prvky, jejichž zvýšené obsahy v prostředí mohou mít nepříznivé důsledky na zdraví rostlin, živočichů i člověka. Tento prvek je přirozenou součástí prostředí, ale např. těžbou rud s obsahem rtuti či těžbou zlata pomocí metody amalgamace se obsahy tohoto prvku v půdě zvyšují. Cílem práce bude zmapovat místa se zvýšeným obsahem Hg v půdě a posoudit riziko vstupu tohoto prvku do potravních řetězců.

Hypotéza: Charakter a intenzita průmyslové výroby v České republice významně ovlivňuje obsahy rizikových prvků, včetně rtuti, v půdách.

3. Teoretická část

3.1. Charakteristika rtuti

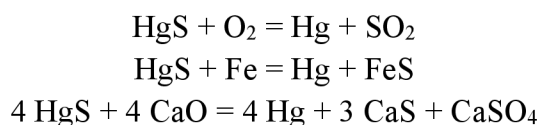
Chemický prvek rtuť je velmi lesklý, stříbrno bílý kov. V periodické tabulce prvků se nachází ve 12. skupině. Za normálních podmínek je jako jediný kapalný kov, a to díky extrémní hustotě ($13,5 \text{ g/cm}^3$). Rtuť zřetelně téká již při obyčejné teplotě. V 1 m^3 vzduchu nasyceného parami rtuti je: při $0 \text{ }^\circ\text{C}$ $0,00021 \text{ g}$ rtuti, při $100 \text{ }^\circ\text{C}$ $2,42 \text{ g}$ rtuti. Páry rtuti jsou velmi jedovaté. Při trvalém působení mohou vyvolat těžké poruchy i při zcela nepatrném množství požití. Jestliže rtuť ztuhne, tvoří krychlové osmistěny, avšak svou krystalovou strukturou patří mezi šesterečné. Rtuť tuhne při $-38,84 \text{ }^\circ\text{C}$ a vře při $356,95 \text{ }^\circ\text{C}$. Rtuť a její těžba byla už známá starým Římanům a Řekům kolem r. 300 před n. l. Římané těžili rtuť v rumělkových dolech u Almadénu ve Španělsku, které již dnes nejsou aktivní. Druhým nejstarším dolem na získávání rtuti v Evropě je důl Idrija ve Slovinsku. Rtuť se využívala koncem 6. století n. l. k získání zlata. Latinské pojmenování pro rtuť je hydrargyrum – odvození z řečtiny jako tekuté stříbro (Remy 1971; IRZ 2021).

3.1.1. Výskyt

Rtuť se vyskytuje v přírodě převážně jako minerál cinabarit HgS zvaný rumělka, který má dvě barevné modifikace, červenou a černou. Cinabarit se zřídka vyskytuje v dobře vyvinutých krystalech, nejčastěji jej nalezneme v hutných agregátech zabarvené cihlově červeně. Také ji lze najít v nepatrném množství přímo v horninách ve formě kapiček jako ryzí. Hlavními nalezišti jsou Almadén ve Španělsku, Monte Almiata v Toskánsku, Idrija ve Slovinsku, další naleziště jsou také také v Kalifornii, Mexiku a Číně (Remy 1971). Přírozená koncentrace těžkých kovů včetně rtuti v hydrosféře, atmosféře a pedosféře je extrémně nízká. Vyšší koncentrace se vyskytují lokálně v ložiscích nebo v okolí vulkánů (Heintz & Reinhardt 1993).

3.1.2. Výroba

Rtuť se získává zahříváním rumělky v proudu vzduchu nebo společně se železem či oxidem vápenatým. Čistí se destilací nebo prokapáváním 5% HNO_3 (Šrámek & Kosina 1996).



3.1.3. Sloučeniny

Rtuť tvoří s kovy slitiny zvané amalgámy. Dobře se slévá se sodíkem, stříbrem, zlatem, zinkem, cínem či olovem, a naopak neslévá s niklem, kobaltem a železem. K přípravě amalgámu stačí přidávat kovy do rtuti, a to po kouscích dle potřeby mohou být i zahřáté. Zajímavou vlastností amalgámů je, že jsou za obvyčejných teplot tekuté nebo alespoň kašovitě měkké. To je důležitý znak pro jejich použití jako je například plombování zubů, kdy se využívá toho, že při teplotě blízké varu vody se mohou hníst, avšak při teplotě lidského těla zcela tuhnou (Remy 1971).

3.1.4. Použití

Dle nařízení Evropské unie č. 1102/2008 platí již více než 40 právních předpisů, které se snaží minimalizovat využití rtuti a díky tomu snížit rizika negativních účinků rtuti na člověka a také na životní prostředí. V Evropské unii se omezení použití rtuti týká např. omezení výrobků obsahující rtuť (teploměry, měřicí techniky), omezení rtuti ve výrobních procesech, zákaz těžby zlata, omezení použití dentálního amalgámu u dětí a těhotných žen. Naopak v laboratořích se bez rtuti nedokážeme obejít. Je nepostradatelná pro polarografii a další elektrochemická zařízení. Rtuť našla využití primárně v průmyslu na výrobu průmyslových chemikálií, elektrotechnice a elektronice. Na LCD monitory laptopů využívaných v Evropské unii se použije kolem 100 kg rtuti. Baterie obsahující rtuť se vyskytují např. v kalkulačkách, naslouchadlech, kamerách, detektorech kouře či radiomikrofonech. Tyto baterie jsou malé, ve tvaru mince či knoflíku. Mohou obsahovat až 25 mg rtuti a samotná rtuť má v baterii význam rtuťové elektrody.

Značné použití má rtuť při výrobě dentálního amalgámu ve zdravotnictví. V Evropě dosáhla spotřeba rtuti v zubních amalgámech v roce 1990 110 tun. V Polsku, České republice a Slovinsku spotřeba představovala 20 tun v roce 2000 (Tuček et al. 2007). Schopnosti rtuti tvořit amalgámy se využívalo při těžbě zlata z rud o vysoké kovnatosti. Těžba zlata pomocí rtuti se do dnes využívá v chudých částech Afriky a jihovýchodní Asii. Těžba v těchto zemích momentálně představuje největší zdroj zamoření ekosystému rtutí. Rtuť se používá k navázání zlata do amalgámu, který snadno oddělí zlato od horniny a písku. Amalgám se poté zahřeje, rtuť se odpaří do životního prostředí a zanechá zlato. Rtuť také slouží při výrobě plynného chloru a hydroxidu sodného, kde se jako rtuťová katoda využívá při elektrolýze chloridu sodného.

Sloučeniny jako octan fenylrtuťnatý se široce používají jako přísada do barev, kde našly uplatnění jako fungicidní a antibakteriální přísady v nátěrových hmotách i mazacích olejích. Dalším využitím rtuti bylo použití jejích sloučenin jako biocidů k moření semen osiva. Rtuťnatá sůl thiomersal se využívala jako konzervační látka, antibakteriální a antiplísňové činidlo ve vakcínách (Tuček 2006; Zero Mercury 2018; IRZ 2021).

3.2. Zdroje znečištění

Rtuť je kov, který se vyskytuje ve složkách životního prostředí přirozeně. Koncentrace rtuti ve vyvřelých horninách se pohybují v rozmezí 0,01-0,05 mg/kg, ale minerál rumělka obsahuje 86,2 % rtuti. Do všech složek životního prostředí je rtuť uvolňována jednak z přírodních zdrojů (sopečná činnost, zvětrávání minerálů, vypařování z oceánů, lesní požáry) tak i činností člověka. Antropogenní zdroje činí 60-80 % a patří mezi ně spalování fosilních paliv, výroba chloru, spalování odpadů ve spalovnách, tavení kovů, odpady z chemického průmyslu, používání fungicidně upraveného osiva, používání čistírenských kalů jako hnojiv v zemědělství a těžba vzácných kovů amalgamací. Rtuť se dostává do pedosféry, atmosféry a do všech přírodních vod, kde se snadno bioakumuluje v potravním řetězci. Uvolněná kovová rtuť a její těkavé sloučeniny se dostávají do vyšších vrstev atmosféry.

V důsledku jejich vysoké stability mohou sloučeniny rtuti při příznivých povětrnostních podmínkách kontaminovat oblasti velmi vzdálené od místa vzniku kontaminace. Celkový cyklus obsahuje uvolněnou rtuť a nově vzniklé těkavé sloučeniny rtuti z půd, hornin, povrchových a odpadních vod obohacených o antropogenní emise. Cyklus sloučenin se neustále opakuje a pouze část rtuti je vázaná do nerozpustných sloučenin nebo se akumuluje do vodního potravního řetězce a dále už se do atmosféry neuvolňuje (Casucci et al. 2002; Houserová et al. 2006).

V atmosféře je přes 95 % rtuti obsaženo ve formě elementární rtuti a zůstává v ní několik měsíců až rok. Celosvětový tok rtuti emisí ze sopečných erupcí se odhaduje na 57 tun/rok. Celkový globální tok rtuti v atmosféře se odhaduje na 112 tun/rok (Nriagu & Becker 2003; Driscoll et al. 2013).

Kremace také patří mezi znečišťovatele životního prostředí. Při kremaci je kontaminace způsobená odpařením zubního amalgámu, který obsahuje rtuť. Výroba PVC – polyvinylchloridu, materiálu, který se využívá jako vodovodní a kanalizační potrubí, oblečení až po plastové hračky přispívá ke znečištění rtutí. Rtuť je v tomto procesu katalyzátorem pro uskutečnění chemické reakce mezi surovinami. Tento katalyzátor se musí neustále doplňovat, neboť se část ztrácí. K největším využitím rtuti v průmyslu při výrobě PVC patří Čína (Zero Mercury 2018).

V Evropě je největším zdrojem kontaminace prostředí rtutí spalování fosilních paliv. Spalování uhlí je jedním z největších antropogenních zdrojů emisí rtuti do atmosféry. Samotné uhlí neobsahuje příliš vysoké koncentrace rtuti, ale velký objem spáleného uhlí, vede k vypouštění emisí přímo do atmosféry, a tím přináší velké znečištění. Až dvě třetiny celkových emisí přibližně 2190 tun rtuti emitovaných ze všech antropogenních zdrojů po celém světě v roce 2000 pocházelo ze spalování fosilních paliv. Další 30 % emisí z antropogenních zdrojů celosvětově tvoří průmyslové procesy jako je výroba zlata pomocí amalgamační technologie. Přibližně 54 % se na emisích z rtutí z antropogenních zdrojů podílela Asie následovaná Afrikou a Evropou včetně evropské části Ruska (11 %). Také Čína se řadí mezi země s největšími emisemi rtuti. Při výrobě cementu se do ovzduší uvolní 9,8 % celosvětových emisí rtuti. Koloběh rtuti v životním prostředí vlivem antropogenních zdrojů zobrazuje obrázek (obr. 1) (Pacyna et al. 2006; Zero Mercury 2018).

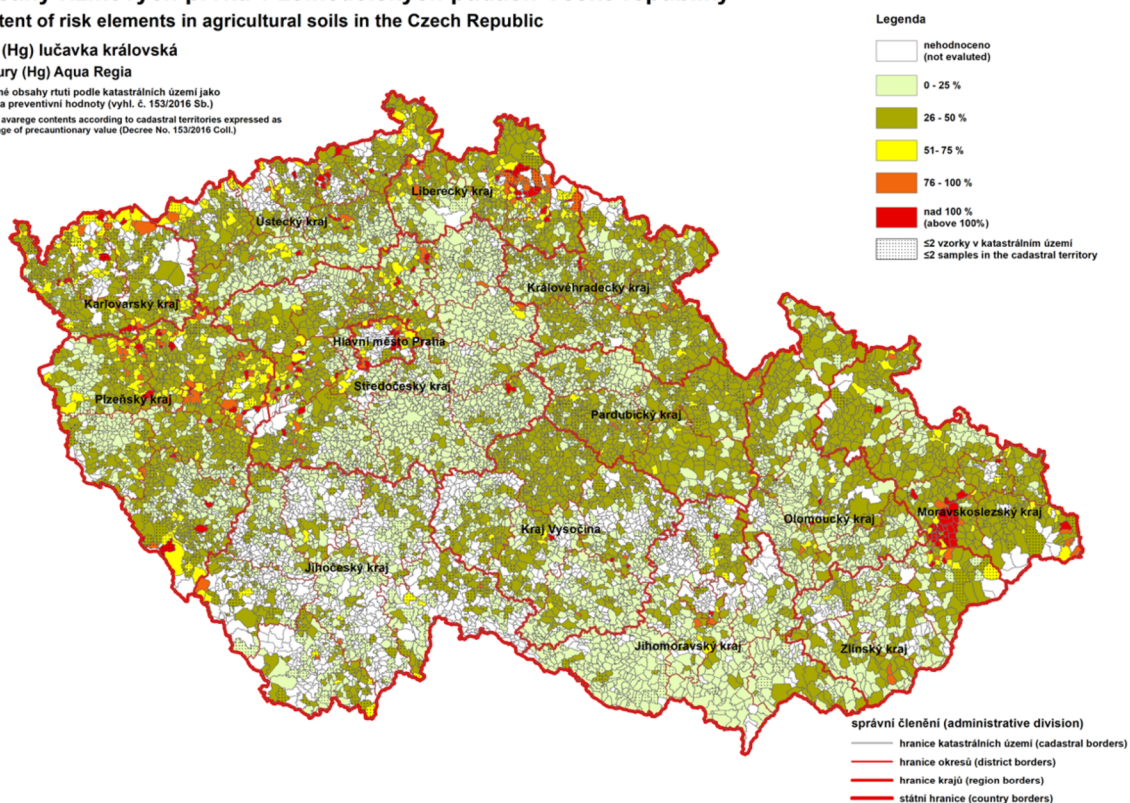
3.2.2. Znečištění půdy a rostlin

Nejčastější zvýšený obsah rtuti v půdě je v blízkosti činných sopek nebo naleziště cinabaritu (rumělký). Hlavním zdrojem antropogenního znečištění půd jsou imise ze spalování uhlí, aplikaci hnojiv, čistírenských kalů či z úniků chemických továren vyrábějících hydroxidy či chlor. Rtuť má schopnost vázat se na molekuly humusových látek, tím jsou nejčastějším médiem pro přenos ze suchozemského do vodního ekosystému. Hlavní ztráta rtuti z půdy je tékáním. Samotná rtuť se pak vrací zpět z atmosféry pomocí srážek (Cibulka et al. 1991).

Obsahy rizikových prvků v zemědělských půdách České republiky Content of risk elements in agricultural soils in the Czech Republic

Rtuť (Hg) lučavka královská
Mercury (Hg) Aqua Regia

průměrné obsahy rtuti podle katastrálních území jako procenta preventivní hodnoty (vyhl. č. 153/2016 Sb.)
mercury average contents according to cadastral territories expressed as percentage of precautionary value (Decree No. 153/2016 Coll.)



Obr. 2. Mapa ČR obsah rtuti v zemědělské půdě (ÚKZÚZ)

Na obrázku (obr. 2) jsou přehledně vidět místa v České republice s obsahem rtuti v zemědělských půdách. Tuto mapku vytvořil Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský na základě rozsáhlého monitoringu obsahu vybraných rizikových prvků v zemědělských půdách, který probíhal v letech 1998-2020.

Přirozený obsah rtuti v půdách se pohybuje v rozmezí od 0,02 do 0,2 mg/kg. Formy rtuti v půdách závisí na půdním redox potenciálu a pH půdy. Půdní součásti snadno sorbují kationtovou formu rtuti. Rtuť dvojmocná se rychle a silně komplexuje kovalentní vazbou na organickou a anorganickou hmotu půdních součástí. Při aplikaci čistírenských kalů je zvýšená mobilita rizikových prvků včetně rtuti. Negativní vlivy

rtuti v půdě se dají snížit pomocí zvýšením pH půdy (např. vápněním) (Cibulka et al. 1991).

Proces bioakumulace rtuti rostlinami závisí na koncentraci rtuti v prostředí a také na její formě. Rtuť má pro rostliny silné fyto toxické účinky, má vliv na fotosyntézu a antioxidační systém. Během vegetačního období mohou rostliny akumulovat rtuť kořeny i povrchem listů. Vysoké obsahy rtuti převažují více u vodních rostlin než u rostlin suchozemských. Vysoký obsah methylrtuti v zemině může být vysvětlen činností půdních bakterií, které přeměňují dvojmocnou rtuť na methylrtuť. Bakterie mají za následek translokaci a příjem methylrtuti do nadzemních částí rostlin (Mališová et al. 2017).

3.3. Těžba rtuti

Rtuťovou rudu cinabarit také zvanou rumělka dobývali již staří Řekové a Římané. Pro svou červenou barvu byla rumělka používána jako velmi ceněný pigment na výzdobu keramiky či nástěnné malby. Velký rozvoj těžby probíhal v 16. století v Almadénu a většina rtuti byla využita ve střední Americe při získávání stříbra ze stříbrných rud metodou amalgamace. Druhým největším ložiskem na světě byl Idrij na Slovinsku. Od 16. století se těžil cinabarit také v Čechách, a to na pěti místech. Těžil se na Dědově hoře na Hořovicku (Jedová hora), v Horních Lubech na Chebsku, ve Svaté u Berouna, v oblasti Jesenný u Semil a v Bezdruzicích u Mariánských lázní (Národní muzeum 2013).

Nejvýznamnější lokalitou byla těžba v Horních Lubech, kdy v první polovině 16. století bylo ložisko evropsky významným producentem rtuti. Cinabarit byl na místě zpracován a tavením byla vyráběna rtuť. Nejčistější cinabarit byl namlet a prodáván na trhu jako kvalitní červený pigment (Velebil 2009).

Červený minerál cinabarit v hornině můžeme vidět na obrázku (obr. 3). Tato hornina pochází z nejvýznamější lokality Horní Luby a ve své sbírce ji vlastní Národní muzeum.



Obr. 3. Cinabarit v hornině, Horní Luby (Národní muzeum 2013)

V oblasti Jedová hora se těžil cinabarit jako vedlejší produkt těžby železné rudy obsahující hematit Fe_2O_3 a siderit FeCO_3 . Těžba probíhala od 18. století do roku 1870. Zpracování rudy se provádělo na místě, později se zpracování přesunulo do obce Komárov (Hojdová 2008).

Těžební oblast Svatá na Berounsku, kde se cinabarit těžil od 2. poloviny 16. století vynášela ročně 100–500 kg cinabaritu. Důl byl v provozu přibližně 90 let a produkce byla odhadnuta na 10-20 tun. Množství cinabaritu na Jedové hoře bylo mnohem větší než na Svaté, přesné informace však nejsou k dispozici. Oblast střední ČR byla hodnocena jako nejvíce kontaminovaná rtutí. Koncentrace rtuti v oblastech jehličnatých lesů ve středních Čechách se pohybovala od 0,9 do 1,25 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Hojdová 2010).

3.4. Toxikologie rtuti a jejích sloučenin

3.4.1. Rtuť elementární

U kovové rtuti má za hlavní význam pouze vstřebávání par plicemi, jelikož rtuť je ve vodě nerozpustná a v trávicím traktu člověka je nevstřebatelná. Kůží se vstřebá pouze tehdy, je-li dispergována v mastném podkladu. Páry kovové rtuti jsou dobře rozpustné v tucích a vylučování rtuti z organismu je velmi pomalé a trvá až řády let po skončení vystavení expozice. Určitá část rtuti se nevratně ukládá v nehtech a vlasech ve formě methylrtuti. Plíce jsou hlavním kritickým orgánem při akutním vystavení parám rtuti, kdy dochází k zánětu plic a průdušek. Naopak při

dlouhodobému vystavení je kritickým orgánem centrální nervový systém. U větší expozice rtuti se u člověka objevuje třes, změny chování či ztráta paměti (Tuček 2006).

Zvýšené vystavení rtuti má také vliv na zdraví ryb a volně žijících živočichů. Studie ukázaly, že koncentrace ve svalové tkáni 0,5 mg/kg ohrožuje reprodukci ryb, vývoj embrya a způsobuje poškození buněk a tkání (Driscoll 2013).

3.4.2. Anorganické sloučeniny rtuti

Rtuťné sloučeniny jsou oproti rtuťnatým méně rozpustné ve vodě, to má za následek, že jsou méně vstřebatelné. Nejznámějším je chlorid rtuťný Hg_2Cl_2 – kalomel. Vyskytuje se v přírodě v malých krystalcích. V lihu se nerozpouští vůbec a nejlépe je rozpustný v roztoku chloridů. Využití nachází hlavně v lékařství jako projímadlo (Remy 1971).

Chlorid rtuťnatý HgCl_2 – sublimát. Nejčastěji se připravuje zahříváním síranu rtuťnatého spolu s chloridem sodným $\text{HgSO}_4 + 2 \text{NaCl} = \text{HgCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4$. Tvoří bílou krystalickou hmotu. Oproti kalomelu je těkavější a ve vodě dobře rozpustný. Využívá se v lékařství, kde je vysoce účinným antiseptikem, dezinfekčním prostředkem, lék při léčbě syfilidy a jiných infekčních nemocí. Také se využívala jako jed na hlodavce a k moření obilí. Už množství 0,2 – 0,4 g působí smrtelně (Remy 1962; IRZ 2021).

3.4.3. Organokovové sloučeniny rtuti

Organokovové sloučeniny jsou přibližně 10x toxičtější než anorganické a působí především na centrální nervový systém. Poškození lidského zdraví se projevuje na oblasti mozku, ve kterém jsou soustředěny smyslové a koordinační funkce. Otrava methylrtutí se vyskytuje nejvíce u populace s nadměrnou konzumací ryb a rybích výrobků (např. brazilská Amazonie, Madeira). Koncentrace methylrtuti ve vlasech či ochlupení odpovídá stejnému obsahu methylrtuti v mozku a těle člověka. V životním prostředí jsou nejvíce rozšířené sloučeniny methylrtuti, které se akumulují tam, kde mohou být rozpuštěny v tucích. Sloučenina ethylrtuť byla využívána v zemědělství pro fungicidní účinky, což způsobilo značné počty otrav v Číně a Iráku (Tuček 2006).

Tab. 1. Toxikologie rtuti (Tuček 2006)

Parametr	Hg ⁰	Hg ²⁺	Methylrtuť CH ₃ Hg	Ethylrtuť CH ₃ CH ₂ Hg
Cesta expozice	Inhalační	Orální	Orální (konzumace ryb)	Parenterální (vakcíny)
Cílový orgán	CNS, periferní NS, ledviny	Ledviny	CNS	CNS, ledviny
Místní klinické příznaky				
Plíce	Podráždění průdušek, zánět sliznic			
Trávicí systém	Kovová chuť, zánět dutiny ústní	Kovová chuť, zánět dutiny ústní, zánět trávicí soustavy		
Kůže		Kopřivka		
Systémové klinické příznaky				
Ledviny	Zvýšený obsah bílkovin v moči	Zvýšený obsah bílkovin v moči, poškození ledvin		Poškození ledvin
Periferní NS	Poškození periferních nervů	Bolest končetin		Bolest končetin
CNS	Chorobně zvýšená dráždivost, třes		Brnění končetin, ztráta zraku a sluchu	Brnění končetin, ztráta zraku a sluchu
Průměrný poločas (celotělový)	60 dnů	40 dnů	70 dnů	20 dnů
Léčba	Meso-2,3-dimercaptojantarová kyselina	Meso-2,3-dimercaptojantarová kyselina	Cheláty nejsou efektivní	Cheláty nejsou efektivní

V tabulce (tab. 1) je přehledná toxikologie rtuti a jejich sloučenin.

3.5. Rtuť ve světě

Evropa se řadí mezi velké spotřebitele rtuti, ale také mezi velké producenty emisí rtuti. Díky legislativě se používání rtuti značně omezilo. V říjnu roku 2013 byla přijata první globální mezinárodní dohoda, tzv. Minamatská úmluva jejíž hlavním úkolem je řešit problém, který rtuť přináší. Úmluva byla potvrzena 98 stranami a platná je od roku 2017 (Marnane 2018). Minamatská úmluva, jejímž patronem je program OSN pro životní prostředí (UNEP), má za úkol ochranu lidského zdraví a životního prostředí před emisemi a úniky rtuti.

Úmluva se zabývá celým biogeochemickým cyklem rtuti. Nachází se v ní opatření tykající se ukončování těžby rtuti, omezení využití rtuti ve výrobcích a

výrobních procesech, kontroluje emise do ovzduší, vody a půdy. Reguluje těžby zlata pomocí amalgamace. Nastavuje pravidla a podmínky pro skladování rtuti a jejích sloučenin, nakládání s odpady obsahující rtuť a její sloučeniny. Česká republika je smluvní stranou úmluvy od 19. června 2017 a vstupuje v platnost dne 17. září 2017 (MŽP 2008).

3.6. Průmyslové zdroje kontaminace v ČR

Největší chemickou továrnou v České republice je Spolana Neratovice, která vyrábí hydroxid sodný, chlor a produkty z něj. V roce 2017 Spolana přestala využívat rtuť při výrobě chloru. Výrobu chloru měla továrna postavenou na zastaralé metodě amalganové elektrolýzy, která je zdrojem úniku rtuti. Spolana Neratovice není jedinou chemickou továrnou vyrábějící chlor a hydroxid sodný. Druhou chemickou továrnou je Spolchemie v Ústí nad Labem (Arnika).

V následující tabulce (tab. 2) jsou uvedeny průmyslové podniky v České republice, které mají úniky rtuti spojené s přenosem látky v odpadech. V tabulce (tab. 3) jsou největší kontaminanti s úniky rtuti do ovzduší. Data získaná z integrovaného registru znečištění pro rok 2021 (IRZ 2021).

Tab. 2. Přenos látek v odpadech (IRZ)

Provozovna	ZUJ	Kraj	Látka	Typ úniku	Množství celkem (kg)
Spolana Neratovice	Neratovice	Středočeský kraj	Rtuť a sloučeniny	Přenos látek v odpadech	75 751
ALW INDUSTRY, s.r.o.	Olomouc	Olomoucký kraj	Rtuť a sloučeniny	Přenos látek v odpadech	302
Devro s.r.o.	Jilemnice	Liberecký kraj	Rtuť a sloučeniny	Přenos látek v odpadech	215
CeramTec Czech Republic, s.r.o	Šumperk	Olomoucký kraj	Rtuť a sloučeniny	Přenos látek v odpadech	180
SAKO Brno, a.s. -divize 3 ZEVO	Brno - Židenice	Jihomoravský kraj	Rtuť a sloučeniny	Přenos látek v odpadech	119,3
Festool s.r.o.	Česká Lípa	Liberecký kraj	Rtuť a sloučeniny	Přenos látek v odpadech	84,9
Spalovna Malešice	Praha 10	Hlavní město Praha	Rtuť a sloučeniny	Přenos látek v odpadech	60
Areál skládky a ZEVO Plzeň	Chotíkov	Plzeňský kraj	Rtuť a sloučeniny	Přenos látek v odpadech	55,2
TERMIZO a.s.	Liberec	Liberecký kraj	Rtuť a sloučeniny	Přenos látek v odpadech	49,5
Liberty Ostrava a.s.	Slezská Ostrava	Moravskoslezský kraj	Rtuť a sloučeniny	Přenos látek v odpadech	33,5

Tab. 3. Úniky do ovzduší (IRZ)

Provozovna	ZUJ	Kraj	Látka	Typ úniku	Množství celkem (kg)
Elektrárna Ledvice	Bílina	Ústecký kraj	Rtuť a sloučeniny	Úniky do ovzduší	399
Elektrárna Počerady	Výškov	Ústecký kraj	Rtuť a sloučeniny	Úniky do ovzduší	337,7
Elektrárna Tušimice	Kadaň	Ústecký kraj	Rtuť a sloučeniny	Úniky do ovzduší	272,3
Elektrárna Pruněřov	Kadaň	Ústecký kraj	Rtuť a sloučeniny	Úniky do ovzduší	270,9
Elektrárna Chvaletice	Chvaletice	Pardubický kraj	Rtuť a sloučeniny	Úniky do ovzduší	237,9
Elektrárna Mělník	Horní Počaply	Středočeský kraj	Rtuť a sloučeniny	Úniky do ovzduší	117,4
Elektrárna Opatovice	Opatovice nad Labem	Pardubický kraj	Rtuť a sloučeniny	Úniky do ovzduší	109,7
Orlen Unipetrol RPA	Litvínov	Ústecký kraj	Rtuť a sloučeniny	Úniky do ovzduší	96,4
Liberty Ostrava	Slezská Ostrava	Moravskoslezský kraj	Rtuť a sloučeniny	Úniky do ovzduší	69,3
Sokolovská uhelná, právní nástupce, a.s.-zpracovatelská část	Vřesová	Karlovarský kraj	Rtuť a sloučeniny	Úniky do ovzduší	66

3.7. Limity rtuti v půdě

Vyhláška 153/2016 Sb. stanovuje v zemědělské půdě preventivní limit rizikových prvků. Pokud jsou limity překročeny, je nutné provést preventivní opatření např. snížit vstupy rizikových látek do půdy.

Preventivní hodnoty obsahů rizikových prvků v zemědělské půdě jsou založené na stanovení pseudocelkových obsahů těchto prvků extrahovatelných lučavkou královskou (mg/kg sušiny). V případě rtuti se ale jedná o celkový obsah stanovený s využitím přístroje AMA-254. Tyto preventivní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4. Preventivní hodnoty rizikových prvků v půdě (Vyhláška 153/2016 Sb.)

Kategorie půdy	Preventivní hodnota									
	As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Běžné půdy	20	2,0	0,5	30	90	60	0,3	50	60	120
Lehké půdy	15	1,5	0,4	20	55	45	0,3	45	55	105

Pod běžné půdy spadají písčito-hlinité, hlinité, jílovitohlinité a jílovité půdy, které zauímají převážně část zemědělsky využívaných půd. Lehké půdy jsou půdy vzniklé na velmi lehkých a chudých matečních horninách jako jsou písky a štěrkopísky. Tyto půdy se vyznačují velmi nízkou sorpční kapacitou a můžeme u nich očekávat vyšší mobilitu prvků (Vyhláška 153/2016 Sb.).

Vyhláška 153/2016 Sb. také udává indikační hodnoty pro obsah rizikových prvků včetně rtuti v půdách. Uvedeny jsou indikační hodnoty při jejich překročení může být ohroženo zdraví lidí a zvířat (tab. 5). a hodnoty při jejich překročení může být ohrožena zdravotní nezávadnost potravin (tab. 6).

Tab. 5. Indikační hodnoty rizikových prvků, při jejich překročení může být ohroženo zdraví lidí a zvířat v mg/kg sušiny (Vyhláška 153/2016 Sb.).

Rizikový prvek	Indikační hodnota (extrakce lučavkou královskou)
As	40
Cd	20
Pb	400
Hg (celkový obsah)	20

Tab. 6. Indikační hodnoty, při jejichž překročení může být ohrožena zdravotní nezávadnost potravin nebo krmiv v mg/kg sušiny (Vyhláška 153/2016 Sb.).

Rizikový prvek	Půdní druh	pH/CaCl ₂	Indikační hodnota	
			Extrakce lučavkou královskou	Extrakce NH ₄ NO ₃
As	-	-	40,0	1,0
Cd	Bežné půdy	≤ 6,5	1,5	-
		> 6,5	2,0	0,1
	Lehké půdy	> 6,5	2,0	0,04
Ni	-	≤ 6,5	150	-
	-	> 6,5	200	-
	-	-	-	1,0
Pb	-	-	300	1,5
Hg (celkový obsah)	-	-	1,5	-

3.8. Česká republika vs. svět

V České republice je těžba rudy cinabaritu už dlouho ukončena a mezi kontaminanty životního prostředí tedy nepatří. Mezi největší znečišťovatele u nás patří chemické podniky a elektrárny, které uvolňují rtuť do ovzduší či rtuť uniká spolu s odpady. Ve světě se nová těžba rtuti stává nejméně preferovaným způsobem získávání rtuti, neboť přispívá k přidávání rtuti do celosvětového rezervoáru rtuti. Mezi země, které stále aktivně těží rtuť, patří Čína, Mexiko a Indonésie. Značné množství rtuti se získává díky sběru a recyklaci produktů, které rtuť obsahují (Zero Mercury 2018).

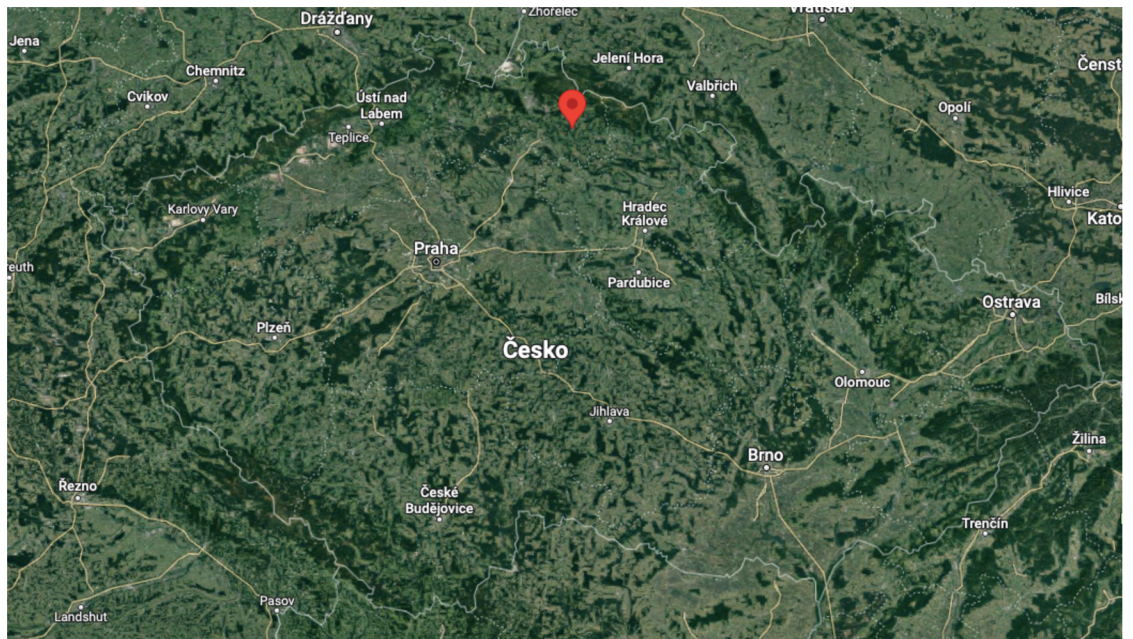
Česká republika se samotnou zátěží zemědělské půdy výrazně neliší od ostatních států v Evropě. V České republice se nachází oblasti se zvýšenou zátěží půdy i imisního spadu např. severočeský, severomoravský region. Následkem těžební činnosti je kontaminováno např. Příbramsko či Kutnohorsko. Aktuálně může docházet ke zvýšeným kontaminacím půdy při povodňových událostech nebo opakovaným nelegálním použití kalů z čistíček odpadních vod se zvýšeným obsahem kontaminantů (eAgri).

4. Materiál a metody

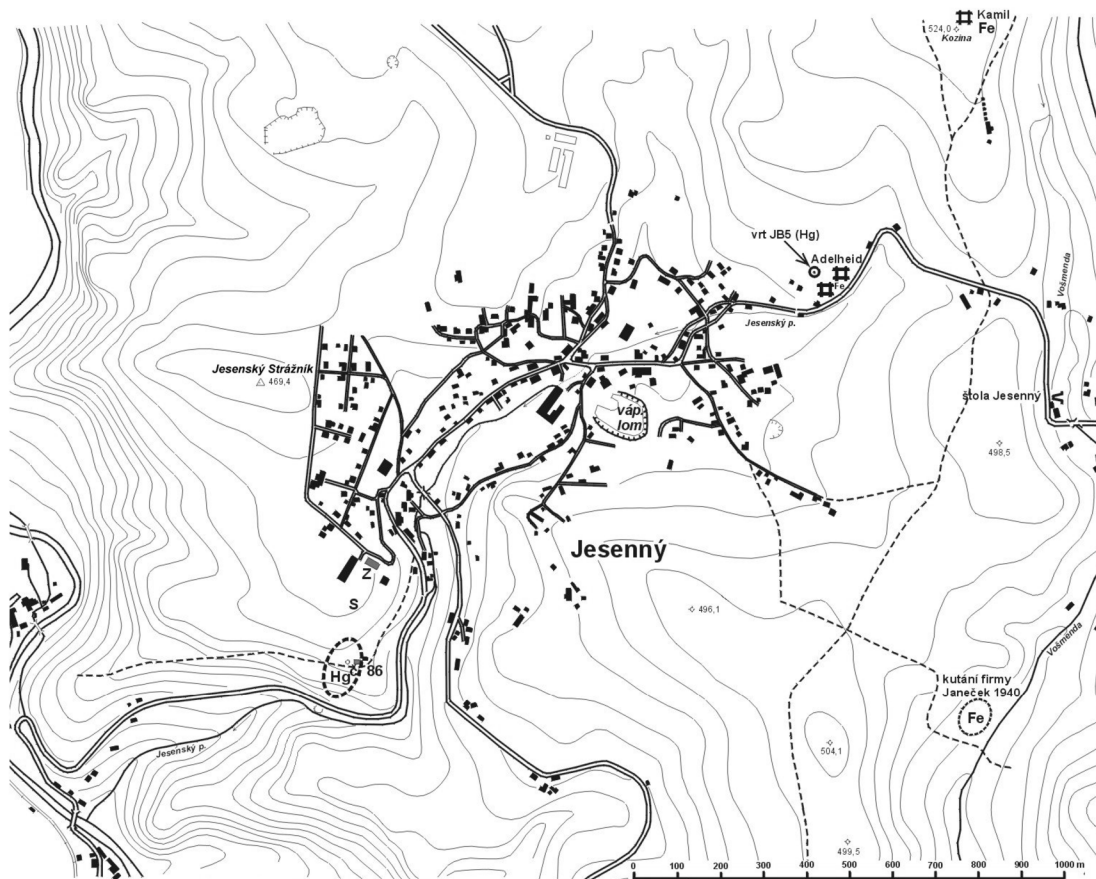
4.1. Oblast Jesenný u Semil

4.1.1. Lokalizace

Obec Jesenný se nachází v okrese Semily, Liberecký kraj severovýchodně od Železného Brodu v nadmořské výšce 433 m. Cinabaritový důl se nacházel jihozápadně na okraji obce poblíž dnešního domu č. p. 86. Na obrázku (obr. 4) je zvýrazněna lokalita, kde se obec Jesenný v České republice nachází.



Obr. 4. Mapa České republiky s vyznačeným místem obce Jesenný (Google maps)



Obr. 5. Přehledná mapa okolí Jesenného s vyznačením železornudného dolu Adolheid, na jižní části obce je označen dům č. p. 86, u kterého v roce 2001 nastal propad u bývalé šachty z těžby cinabaritu (Veľbil 2008).

Obec Jesenný leží v lužické oblasti, v komplexu nížce až středně metamorfovaných vulkanosedimentárních hornin a je součástí železnobrodského krystalinika. V Jesenném byl minerál cinabarit dolován v letech 1625–1634. Doložené množství získaného cinabaritu z této lokality se pohybuje okolo 78 kg vyprodukovaného cinabaritu. Způsoby s nakládáním a využitím cinabaritu z lokality Jesenný nejsou doloženy. Za předpokladu, že surovina byla velmi čistá a kvalitní, našla uplatnění jako cenný červený pigment v malířství (Veľbil 2010).

4.1.2. Odběrové místo

Samotné vzorkování a odběry vzorků probíhalo v okolí bývalé zasypané šachty z těžby cinabaritu u domu č. p. 86 v obci Jesenný. Celkem bylo odebráno 10 vzorků půdy. Vzorek číslo 1 byl odebrán v blízkosti zasypané šachty viz obrázek (obr. 6) s vyznačenou šípkou. Vzorkování probíhalo směrem na jih od šachty v lesním okolí směrem ze svahu dolů. Dle obrázku (obr. 7) pokračovalo po odběru šestého vzorku návrat směrem k domu, kde byl odebrán poslední desátý vzorek jihovýchodně od šachty.



Obr. 6. Místo zasypaného propadu u domu č. p. 86 (Velebil 2008)



Obr. 7. Mapa odběrů vzorků půdy v obci Jesenný (Google maps)

K zaměření lokace odběru vzorků bylo provedeno pomocí GPS. Na každém stanovišti 1-10 bylo do igelitového sáčku odebráno vypichovačem přiměřené množství půdy ze tří vpichů v průměru 10-20 cm hluboko do půdy. Na místě u odběru vzorku č. 5 byla odebrána houba liška obecná, u vzorku č. 6 byla nalezena holubinka (přesný druh se nepodařilo určit) a lesklokorka lesklá a na místě u vzorku č. 9 byl nalezen hřib žlutomasý. U těchto hub byl měřen obsah rizikových prvků a obsah rtuti.

4.2. Analytické metody

4.2.1. Použité přístroje a chemikálie

Atomový absorpční spektrometr AMA-254

Optický emisní spektrometr s indukčně vázaným plazmatem (ICP – OES, Agilent 720, Agilent Technologies Inc., USA)

Analytické váhy Sartorius

System pro rozklad vzorků na mokré cestě s mikrovlnným ohřevem (Ethos 1, MLS GmbH, Německo)

Kyselina dusičná 65% (Analytika, spol s.r.o.)

Kyselina chlorovodíková 37% (VWR)

Standardní referenční materiál 1573A Tomato leaves (NIST)

Certifikovaný referenční materiál AN7003N (Analytika, spol s.r.o.)

Pipeta

Kádinky

Laboratorní mixér

Síto s velikostí ok 2 mm

Třecí miska s tloučkem

4.2.2. Příprava vzorků

Každý ze vzorků půdy byl vysušen při laboratorní teplotě. Následovalo drcení každého vzorku zvláště v třecí misce s tloučkem a poté se vzorek přesal na síto s velikostí ok 2 mm. Obsah rtuti se přímo stanovil v takto připravených vzorcích pomocí atomového absorpčního spektrometru AMA 254. Také u těchto deseti vzorků byl stanoven obsah rizikových prvků pomocí extrakce lučavkou královskou v zařízení pro rozklad vzorků za zvýšeného tlaku s mikrovlnným ohřevem a s následným měřením pomocí optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES).

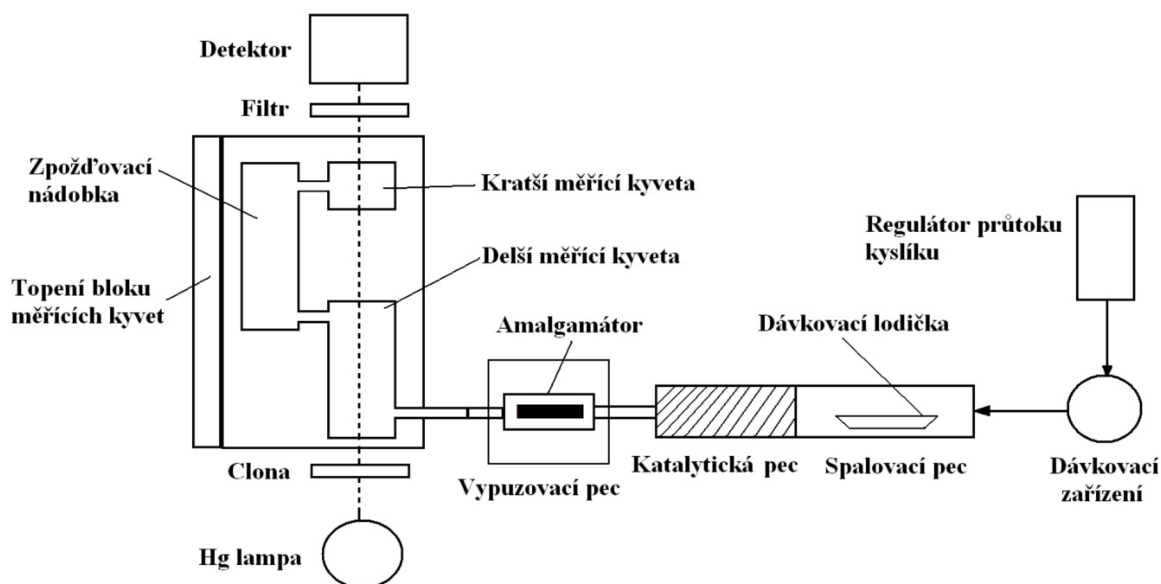
4.2.3. Spektrometr AMA 254

Přístroj AMA 254 je jednoúčelový atomový absorpční spektrometr pro stanovení rtuti. Je určen pro přímé stanovení obsahu rtuti v pevných a kapalných vzorcích bez potřeby chemické předúpravy vzorku (mineralizace apod.) Využitím techniky generování par kovové rtuti s následným zachycením a nabohacením na zlatém amalgátoru se dosahuje mimořádně vysoké citlivosti stanovení a nezávislosti výsledku stanovení na matici vzorku.

Vzorek o známé navážce je umístěn na spalovací lodičku, která je nad kahanem vyžeháná a zbavena nečistot. Povelom z řídicího počítače je vzorek zaveden do spalovací trubice. Řízeným ohřevem se vzorek vysuší a poté je spálen. Rozkladné produkty procházejí přes katalyzátor, kde je dokončena jejich oxidace a jsou zachyceny látky kyselého povahy (halogeny, oxidy síry). Rozkladné produkty jsou dále vedeny přes amalgamátor, kde je selektivně zachycena rtuť. Protože rozkladné produkty obvykle obsahují vodní páru je celá plynová cesta měřících kyvet vyhřívána na 120 °C, aby se zabránilo kondenzování vody.

Po dokončení rozkladu vzorku a ustálení teploty je změřeno zachycené množství rtuti. Nejprve je automaticky nastaveno zesílení signálového zesilovače a je provedena korekce na temný proud detektoru a automatické nulování pro měření absorbance. Poté se rtuť uvolní z amalgamátoru krátkodobým ohřevem. Oblak rtuťových par je nosným plynem unášen přes delší měřící kyvetu (měřeno jako 1 peak). Dále se prakticky veškerá rtuť shromáždí ve zpoždovací nádobce a z ní vstupuje do kratší měřící kyvety. To samé množství rtuti je tedy měřeno dvakrát s odlišnou citlivostí, takže celkový dynamický rozsah je 0,05 – 600 ng rtuti v jednom měření.

Zároveň s ukončením vyhřívání amalgamátoru je spuštěno chladicí čerpadlo, které ochladí amalgamátor tak rychle, aby následující měření mohlo být odstartováno bez delšího prodlení. Data jsou vysílána do řídicího počítače a ovládacím programem převedena do formy vhodné pro uživatele. Na obrázku (obr. 7) je znázorněno funkční schéma přístroje (Komínková 2010; příručka ke stroji AMA 254).



Obr. 8. Funkční schéma přístroje AMA 254 (příručka přístroje AMA 254)

4.2.4. Měření vzorků v AMA 254

Vzorky půdy byly v třecí misce rozemlety tloučkem a následně přesáty přes síto s velikostí ok 2 mm. Před analýzou byl spuštěn čistící program Clean a následně změřena prázdná lodička jako slepý vzorek kontroly čistoty tzv. blank. Po dokončení čistícího programu a změření slepého blanku byl na lodičku navážen vzorek na analytických vahách v rozmezí 30–15 mg půdy dle povahy vzorku. Lodička se vzorkem byla umístěna do přístroje AMA 254, byla zapsána navážka v softwarovém programu a následně spuštěna měřicí analýza. Výsledek měření je celkový obsah rtuti v mg/kg. Měření každého vzorku probíhalo dvakrát a bylo zprůměrováno.

Vzorky hub, nalezené v lesním prostředí, byly vysušeny a rozemlety laboratorním mixérem na homogenní prášek. Vzorky hub byly stejně jako zeminy naváženy na analytických vahách v rozmezí 10-25 mg do předem vyžíhaných lodiček. Lodička se vzorkem houby byla umístěna do přístroje AMA 254 a po zapsání navážky v softwarovém programu bylo spuštěno měření. U všech hub měření probíhalo duplicitně a bylo zprůměrováno, kromě holubinky, u které kvůli malému množství vzorku probíhalo měření jen jednou.

4.2.5. Obsah dalších rizikových prvků

4.2.5.1. Kontaminace půdy rizikovými prvky

Rizikové prvky v půdě mohou pocházet z antropogenního znečištění, ale kontaminace může být způsobena i přírodními zdroji jako jsou přírodní požáry či vulkanická činnost. Potenciálně rizikové prvky, mezi které řadíme kovy a polokovy, mohou vyvolat projevy akutní či chronické toxicity. Tyto rizikové prvky se vyskytují volně v životním prostředí a některé jsou i běžnou součástí živých organismů v půdotvorných substrátech. Jejich toxicita se projevuje až ve vyšší koncentraci. Intenzivní kontaminaci mohou způsobit prašné úlety z procesů zpracování rud. Mezi rizikové prvky, které byly ve vzorcích měřeny, patří: As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn., tedy prvky sledované vyhláškou 153/2016 Sb. (viz výše).

4.2.5.2. Mikrovlnný rozklad vzorků v prostředí lučavky královské

Vzorky půdy odebrané v lokalitě Jesenný dle obrázku (obr. 6) byly podrobeny analýze na obsah rizikových prvků. Vzorky přesáté na sítu s velikostí ok 2 mm byly naváženy na analytických vahách v rozmezí 0,5 g s přesností na 4 desetinná místa do teflonové patrony. V případě stanovení rizikových prvků v houbách byly houby laboratorním mixérem rozmixovány na jemný prášek a naváženy stejně jako zeminy. Ke vzorku v patroně se přidal pipetou roztok 10 ml lučavky královské tzn. směs kyseliny chlorovodíkové a kyseliny dusičné v poměru 3:1 a přidal se opatrně, aby neulpěla zemina s lučavkou královskou na stěně patrony. Jedna patrona byla prázdná bez matrice, pouze obsahovala lučavku královskou a sloužila jako kontrolní vzorek čistoty tzv. blank.

Navážené a zalité vzorky v patronách byly vloženy do jednotlivých kapslí a uzavřeny pomocí momentového klíče na předem stanovený tlak. Tyto kapsle se vložily do zařízení s mikrovlnným ohřevem. Celkový proces trval přibližně 50 minut, z toho byly vzorky vystaveny podobu 30 minut teplotě 210 °C. Po uplynutí 50 minut byla mikrovlnná pec vypnuta a jednotlivé kapsle vytaženy a ponechány k vychladnutí.

Po vychladnutí byla patrona otevřena pomocí kleští a vzorek z patrony byl vypláchnut do teflonového kalíšku pomocí demineralizované vody. Kalíšky se vzorkem byly následně ponechány k zakoncentrování na topné desce při teplotě 160 °C po dobu 30 minut. Takto zakoncentrované vzorky byly kvantitativně převedeny do skleněné zkumavky a byly doplněny demineralizovanou vodou na objem 25 ml a uchovány při laboratorní teplotě až do doby měření.

4.2.5.3. Měření ICP-OES

Metoda optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem je především využívána k prvkové analýze. Metoda umožňuje stanovení široké škály hlavních, vedlejších i stopových prvků. Spektrometr využívá principu emise a následné detekce světelného záření ionizovaných prvků přítomných ve vzorku.

Zdrojem iontů je argonové plazma. Jedná se o roztokovou metodu, proto je nutné pevné vzorky převést do roztoku. Koncentrace prvků v roztoku byla poté stanovena pomocí optické emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP – OES, Agilent 720, Agilent Technologies Inc., USA) s využitím dvoukanalové peristaltické pumpy, mlžné komory typu StrumanMasters a pneumatického zmlžovače typu „V-groove“ vyrobeného z inertního materiálu. Podmínky měření byly následující: příkon do plazmatu 1.2 kW, průtok plazmového argonu 15.0 L/min, průtok pomocného argonu 0.75 L/min, průtok argonu zmlžovačem 0.9 L/min.

4.3. Vyhodnocení dat a kontrola správnosti výsledků

Výsledný obsah rizikových prvků byl stanoven v mg/L. Od naměřených hodnot byl v případě zinku odečten blank. U ostatních prvků rizikových kovů byl blank pod mezí detekce stanovení. Výsledky byly vynásobeny objemem mineralizátu. Následně byly hodnoty vyděleny navázkou, která byla přibližně 0,5 g a tím byl obsah rizikových prvků přepočten na jednotky mg/kg. Měření probíhalo v duplicitní přípravě a výsledky byly zprůměrovány. Pro kontrolu správnosti výsledků byl použit certifikovaný referenční materiál a jeho hodnoty jsou uvedeny v tabulce (tab. 7).

Tab. 7. Obsahy rizikových prvků v mg/kg v certifikovaném referenčním materiálu AN7003N

	As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
CRM	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Naměřené	16,6	1,3	0,3	11,4	54,7	9,8	29,4	30,0	62,6	74,8
Deklarované	11,6	1,29	0,32	10,3	42,4	25,4	28,8	25,2	52,9	69,4

Pro ověření správnosti měření rizikových prvků u hub bylo použito standardního referenčního materiálu pro rostliny NIST 1573A (Tomato leaves). V tabulce (tab. 8) jsou uvedeny hodnoty naměřené a deklarované. V referenčním materiálu u prvku beryllia a olova není referenční materiál certifikován. Hodnoty u arsenu a olova jsou pod mezí detekce.

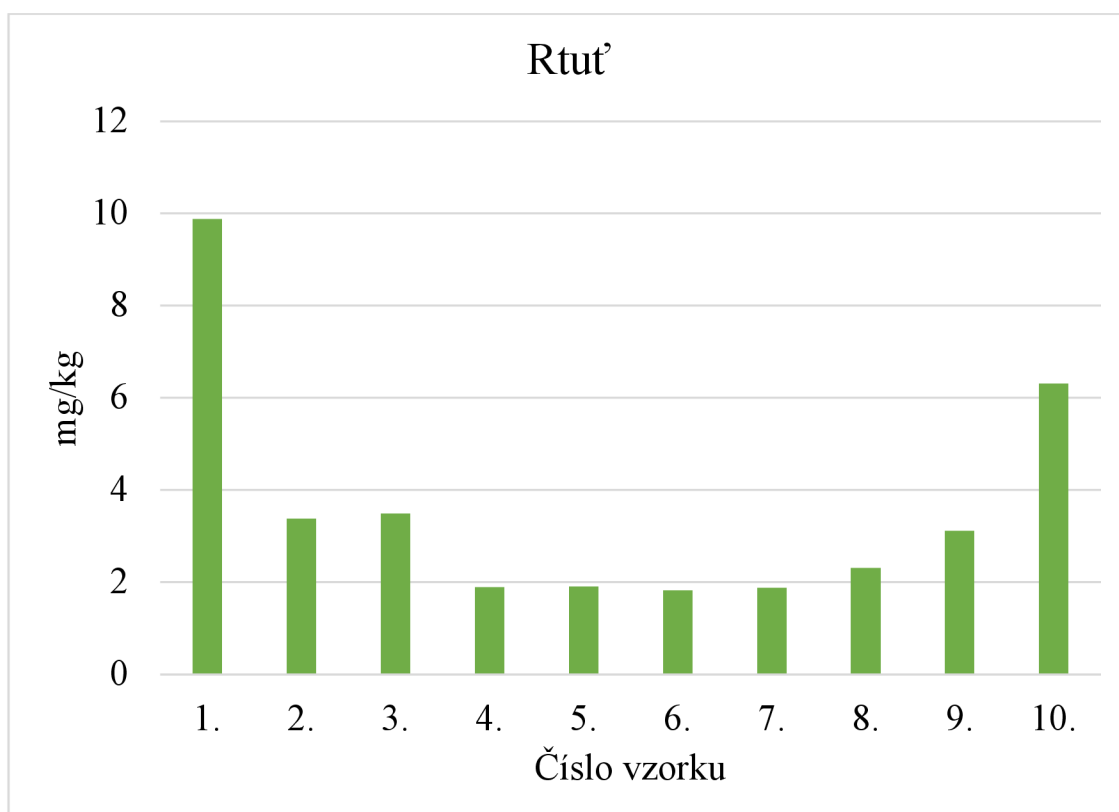
Tab. 8. Obsah rizikových prvků v referenčním materiálu NIST 1573A - Tomato leaves

CRM	As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Naměřené	<	0,12	1,1	1,2	1,8	3,8	1,9	<	1,2	22,5
Deklarované	0,1	-	1.5	0,5	1,9	4,7	1,6	-	0,8	30,9

5. Výsledky

5.1. Obsah rtuti v půdě

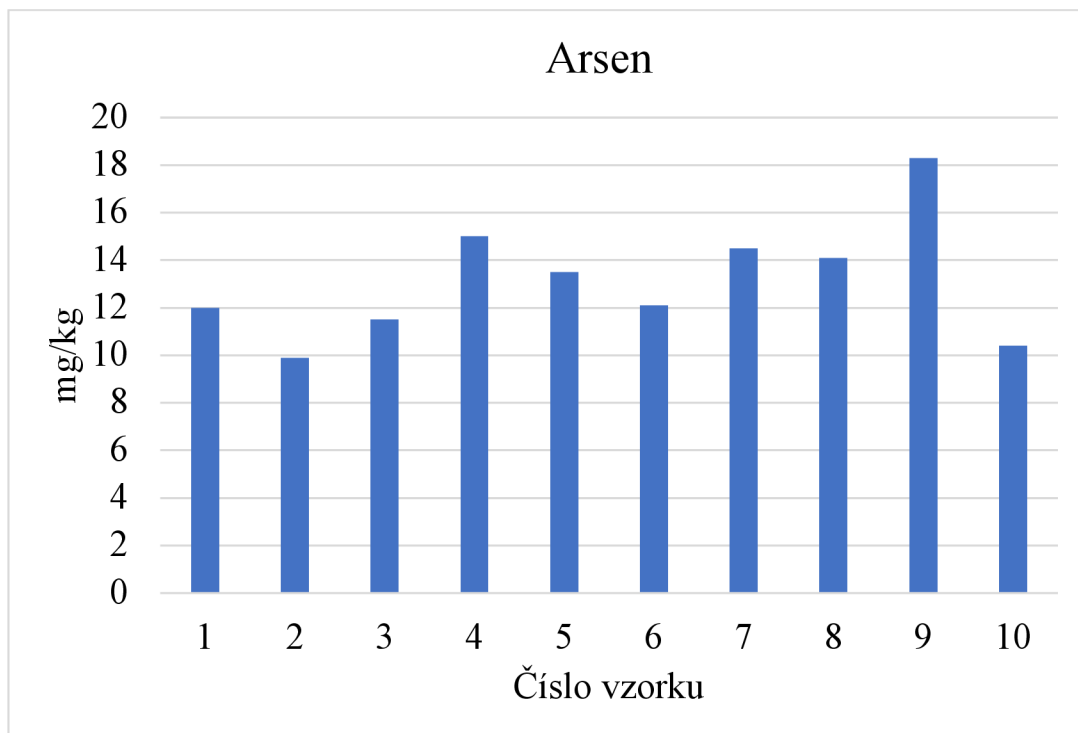
Pomocí přístroje AMA 254 byl naměřen přímý obsah rtuti ve vzorcích půdy. Na obrázku (obr. 8.) můžeme vidět, že největší koncentrace rtuti o hodnotě 9,88 mg/kg byla naměřena u zasypaného vstupu do šachty. Koncentrace klesá s rostoucí vzdáleností od tohoto vstupu. Koncentrace Hg klesá také s klesáním svahu jižně od šachty. Na stanovišti číslo 6 byla naměřena nejnižší koncentrace rtuti a to 1,82 mg/kg. Ta opět narůstá s přiblížením se k místu šachty na jihovýchodní straně značeno jako vzorek číslo 10 o naměřené koncentraci 6,31 mg/kg.



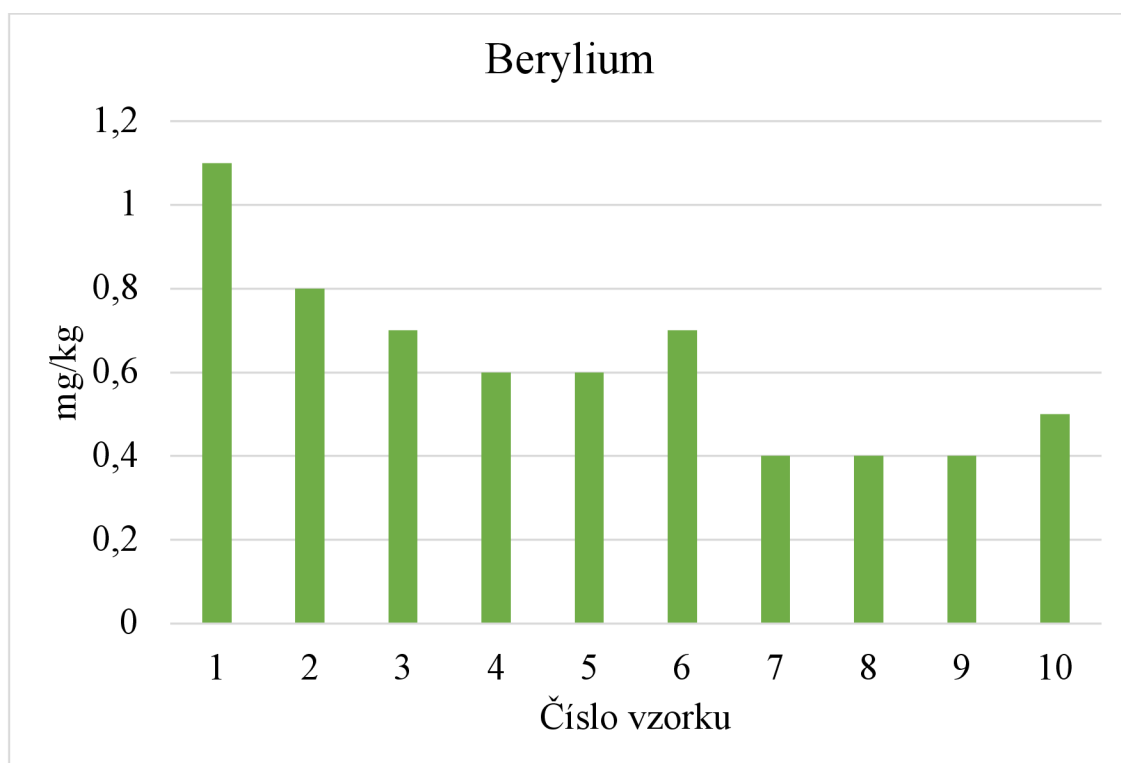
Obr 9. Graf naměřených hodnot obsahu rtuti

5.2. Obsahy dalších rizikových prvků ve vzorcích půdy

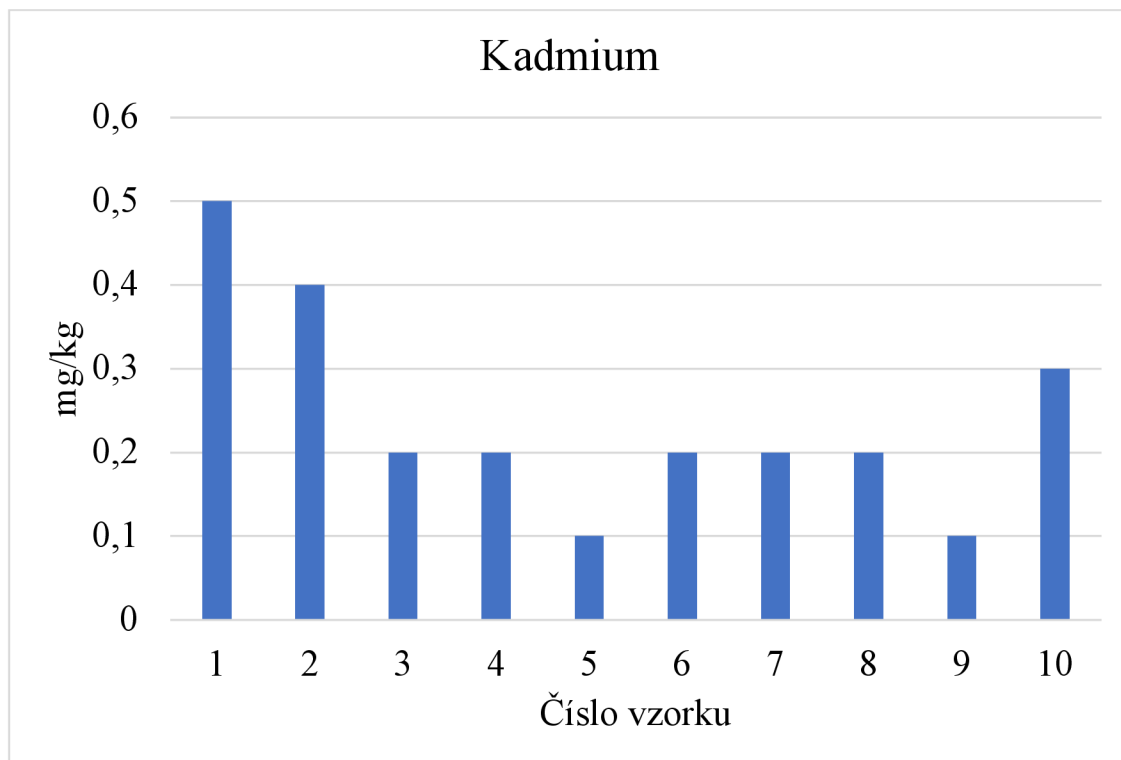
Na uvedených obrázcích (tab. 10–19) můžeme přehledně vidět naměřené hodnoty obsahu rizikových prvků v půdě ze zkoumané lokality Jesenný.



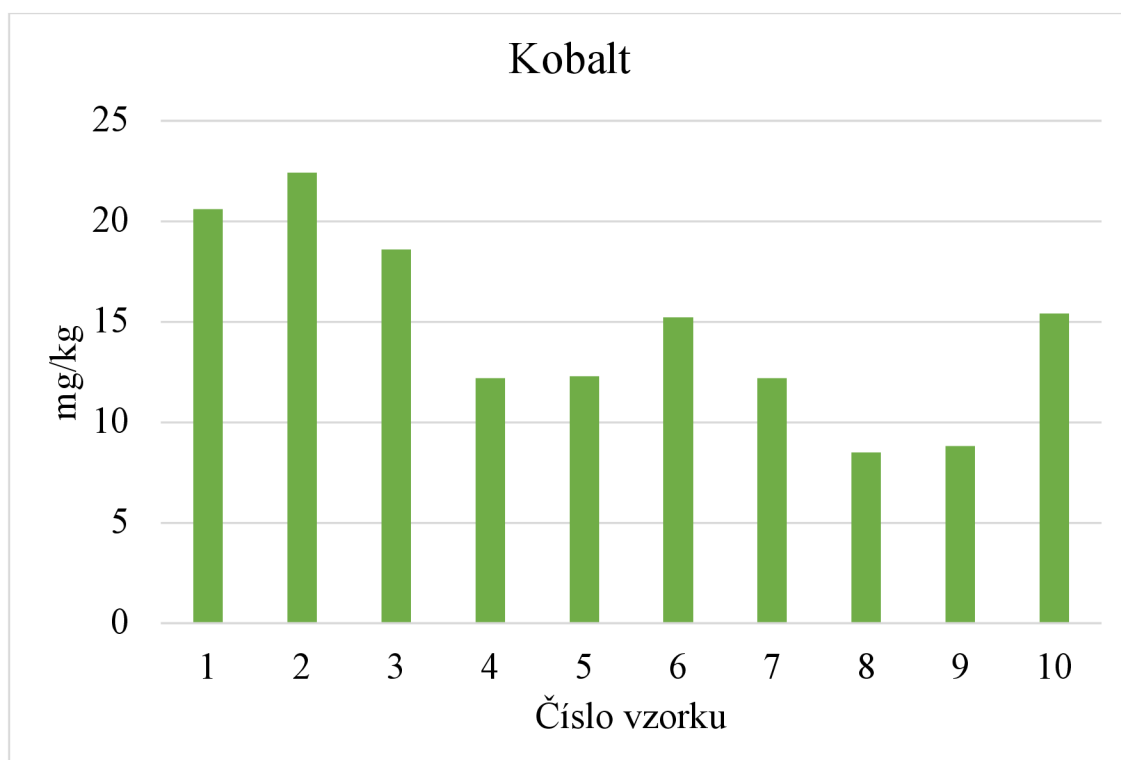
Obr. 10. Graf naměřených hodnot obsahu arsenu



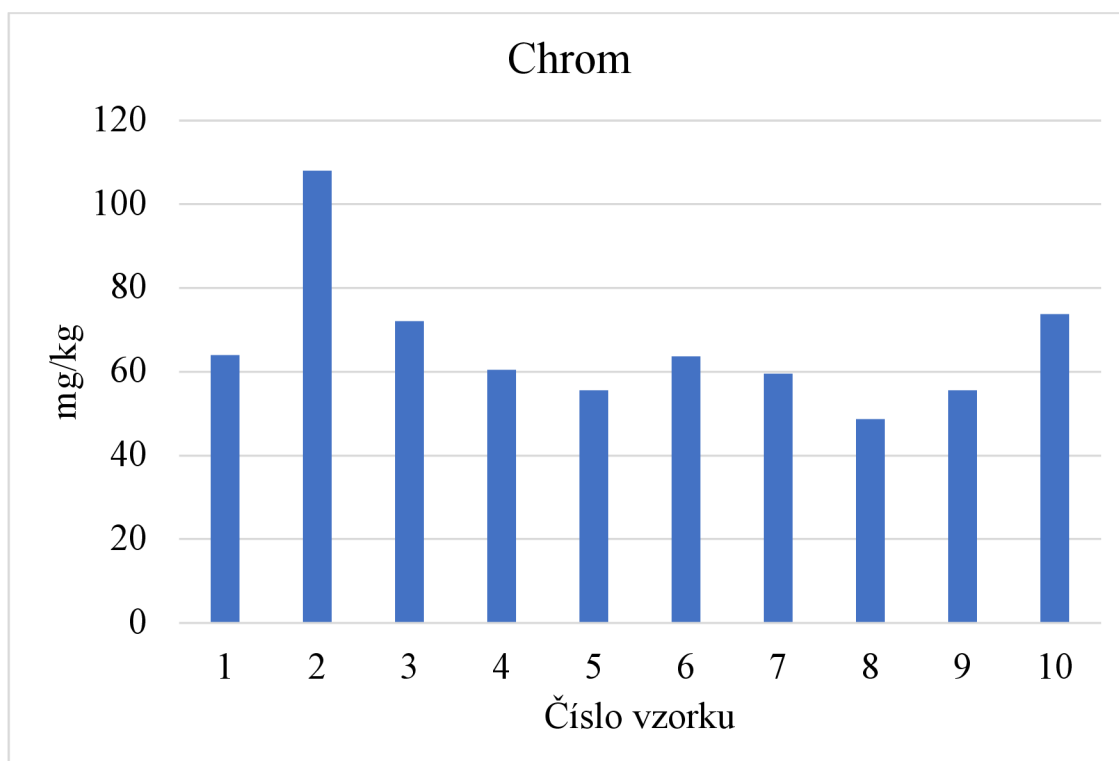
Obr. 11. Graf naměřených hodnot obsahu beryllia



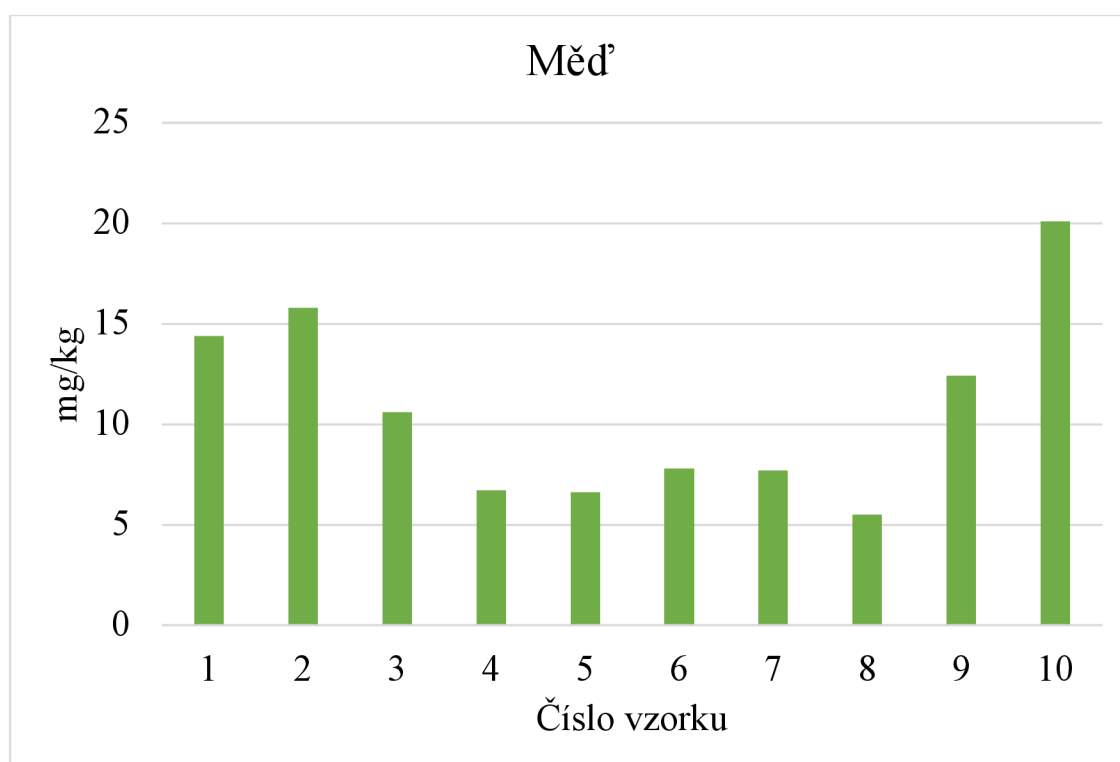
Obr. 12. Graf naměřených hodnot obsahu kadmia



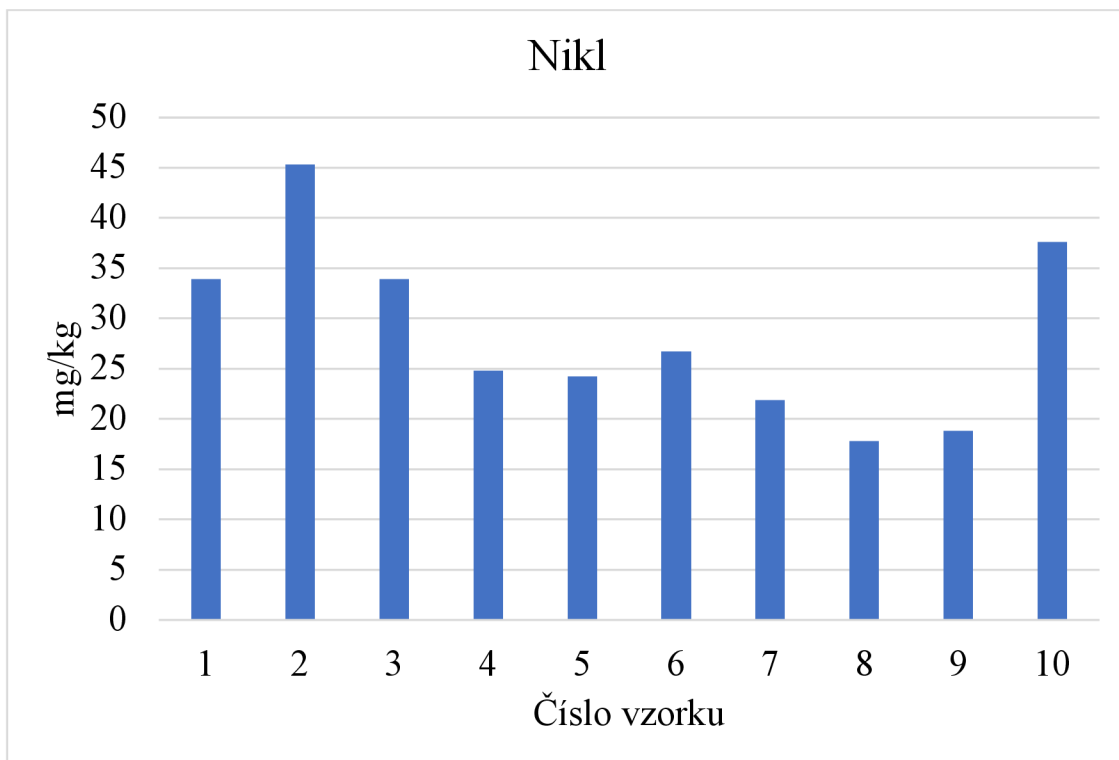
Obr. 13. Graf naměřených hodnot obsahu kobaltu



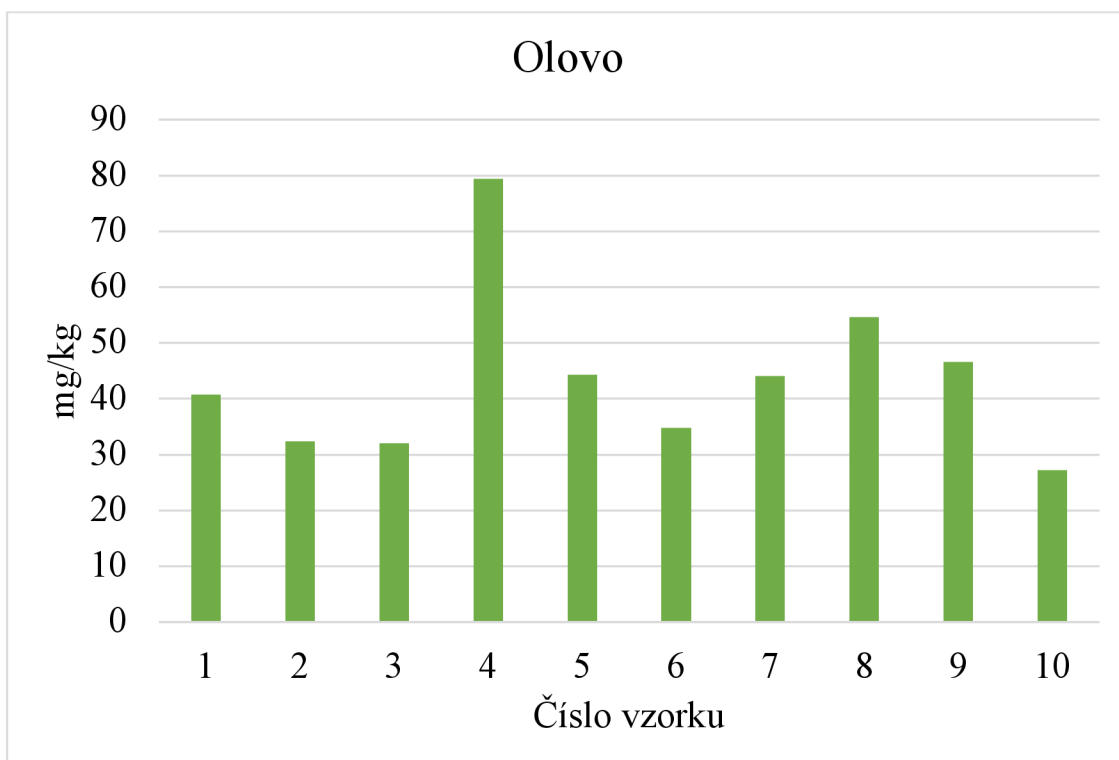
Obr. 14. Graf naměřených hodnot obsahu chromu



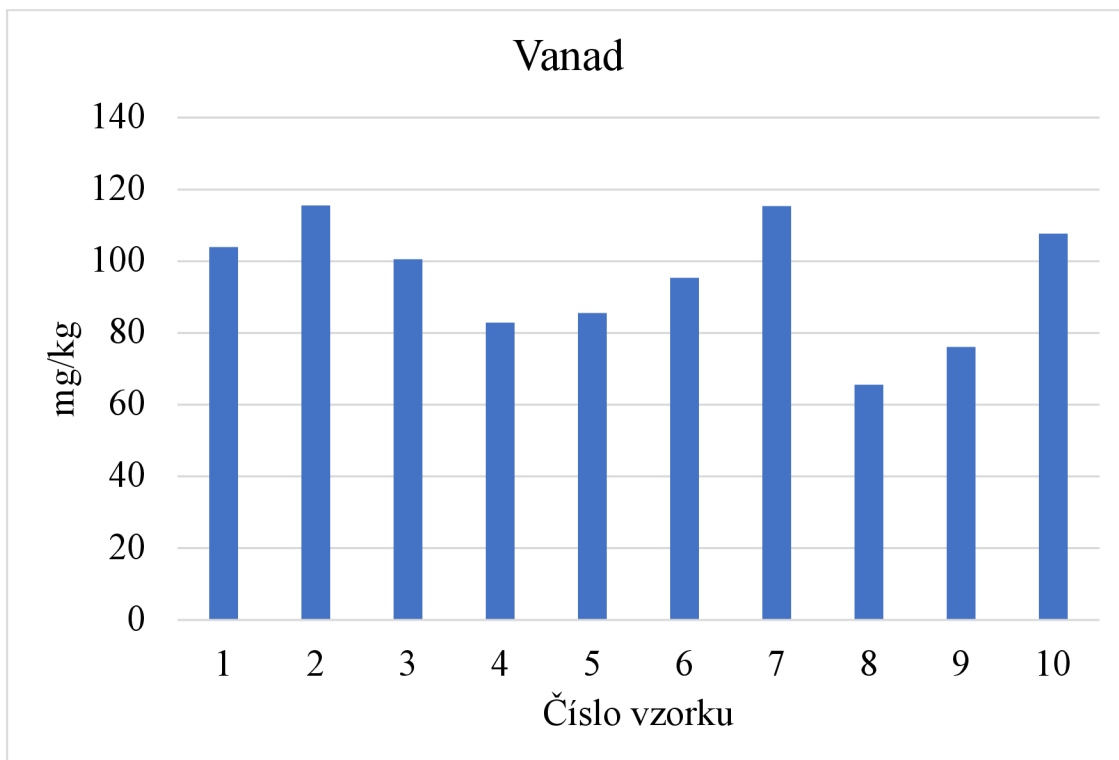
Obr. 15. Graf naměřených hodnot obsahu mědi



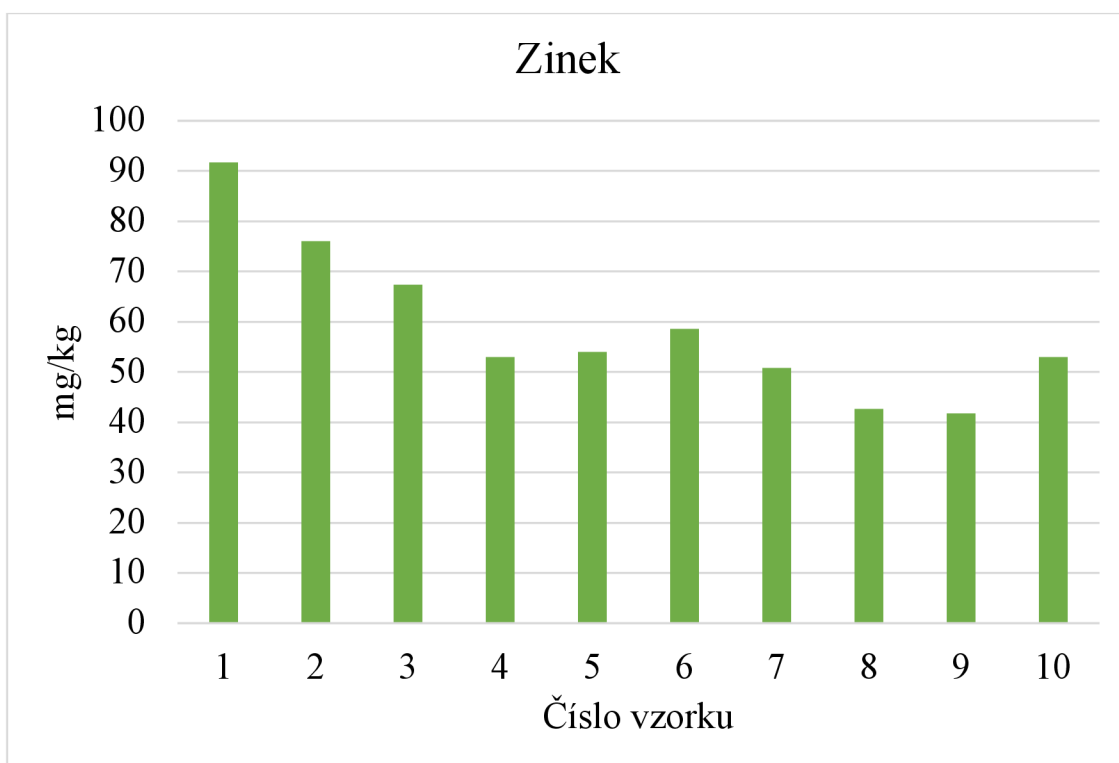
Obr. 16. Graf naměřených hodnot obsahu niklu



Obr. 17. Graf naměřených hodnot obsahu olova



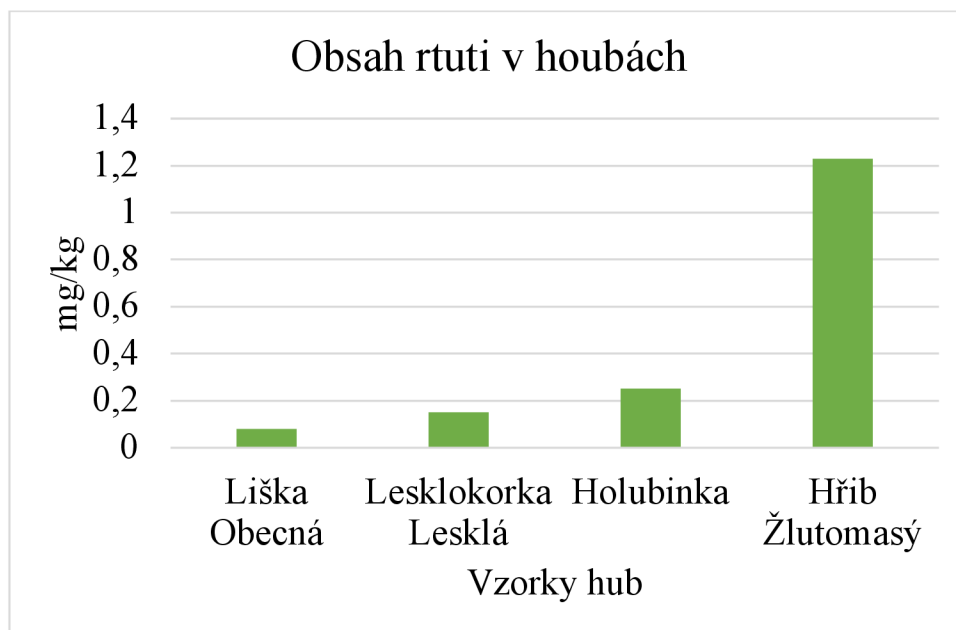
Obr. 18. Graf naměřených hodnot obsahu vanadu



Obr. 19. Graf naměřených hodnot obsahu zinku

5.3. Obsah rtuti ve vzorcích hub

Na obrázku (obr. 20) je přehledně vidět obsah v houbách nalezených v lesním prostředí ze zkoumané lokality. Z odebraných vzorků nejvíce obsahoval rtuti hřib žlutomasý o naměřené hodnotě 1,23 mg/kg.



Obr. 20. Graf naměřených hodnot obsahu rtuti ve vzorcích hub

5.4. Obsah dalších rizikových prvků ve vzorcích hub

V tabulce (tab. 9) je přehledně uveden obsah rizikových prvků, který byl stanoven v houbách. Je patrné, že nejvíce se v houbách vyskytoval rizikový prvek Zn a Cu.

Tab. 9: Obsah rizikových prvků v houbách odebraných z lokality Jesenný

Vzorek	As	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Liška obecná	3,7	0,6	0,4	0,8	0,7	39,1	2,0	2,5	0,6	50,8
Lesklokorka lesklá	3,7	0,6	0,0	0,6	1,1	1,3	1,3	2,5	0,6	45,7
Holubinka	3,7	0,6	1,4	0,7	1,1	46,3	1,3	2,5	0,6	126,6
Hřib žlutomasý	3,7	0,6	0,4	0,6	2,6	41,3	2,1	2,5	0,6	104,3

6. Diskuze

V České republice, kde je rozvinutý průmysl, dochází k únikům škodlivých prvků, včetně rtuti do životního prostředí. Dle IRZ z roku 2021 měla nejvíce vyprodukovaného odpadu se rtutí společnost Spolana Neratovice, která se zabývá výrobou chemických výrobků. Nejvíce zasaženo území v České republice kontaminací rtutí do ovzduší je Ústecký kraj, a to vlivem velkým počtem elektráren, které spalují hnědé uhlí. Například elektrárna Ledvice vyprodukovala 399 kg emisí rtuti, elektrárna Počerady vyprodukovala 337,7 kg emisí rtuti, elektrárna Tušimice vyprodukovala 272,3 kg emisí rtuti a elektrárna Prunéřov vyprodukovala 270 kg emisí rtuti. Působením přírodních vlivů se může rtuť z těchto elektráren při spalování uhlí dále transportovat atmosférou a kontaminovat tak vzdálená místa, kde spádem a následnými srážkami se rtuť snadno dostane do půdy či vodního prostředí.

Česká republika patřila mezi země, kde se těžil cinabarit pro získávání kvalitního červeného pigmentu. Těžba tohoto minerálu byla již dávno ukončena a na místech bývalých dolů proběhly různé výzkumy, které zkoumaly obsah rtuti v haldách. Například místo Svatá u Berouna, kde byl prováděn výzkum a studium kontaminace půdního profilu v bezprostředním okolí zaniklého rtuťového dolu. Celkové obsahy rtuti ve vzorcích z tohoto výzkumu se pohybují v rozmezí 0,40-0,66 mg/kg. Vyšší obsahy byly stanoveny v jílových sedimentech z potoka, který protéká tímto územím. Hodnoty v potoce byly naměřeny v rozmezí 1,5-2,7 mg/kg (Petáková et al. 2009).

V dalším výzkumu lokality u bývalého dolu na Jedové hoře poblíž obce Hořovice byla naměřena hodnota až 191 mg/kg z půdní hrabanky poblíž šachty Barbora (Roll et al. 2021).

Při mapování kontaminace lesního humusu na území CHKO Brdy dosáhla průměrná koncentrace rtuti 0,51 mg/kg. V povrchových vodách CHKO Brdy se za normálních průtokových podmínek naměřilo 1,3-8,5 ng/l. Mapování v roce 1995 prokázalo zvýšené obsahy rtuti v oblasti mezi Mělníkem, Rakovníkem, Příbrami v důsledku elektrochemické výroby, výroba cementu či historické těžby rud (Nováková et al. 2018).

Z naměřených výsledků obsah rtuti a obsah rizikových prvků v lokalitě Jesenný, kde se těžba cinabaritu pohybovala v letech 1625–1634, je i v roce 2023 dokazatelné, že je okolí bývalé šachty z dolu stále kontaminováno rtutí.

Indikační hodnota rtuti dle vyhlášky 153/2016 Sb. je 20 mg/kg. Ve zkoumané lokalitě byla nejvyšší hodnota rtuti naměřena přímo u zasypaného vstupu do šachty, a to v hodnotě 9,88 mg/kg. Tato hodnota nepřesahuje indikační hodnotu, ale je poměrně vysoká a půda zde je stále kontaminována tímto těžkým a nebezpečným kovem. U vzorku hub bylo nejvíce naměřeno v plodnici hříbu žlutomasého, a to koncentrace rtuti 1,23 mg/kg. Z výzkumu probíhající na Jedové hoře byla nejvíce kontaminovanou houbou čirůvka špinavá s obsahem 32,1 mg/kg a pýchavka obecná v bývalé těžební oblasti Horní Luby měla obsah rtuti 17,5 mg/kg. (Rol et al. 2021). Pokud je půda kontaminovaná rizikovými prvky, může dojít k narušení základních funkcí půdy jako je inhibice mikrobiální činnosti a také přestup kontaminantů do složek prostředí

povrchových a podzemních vod či potravního řetězce. Pokud se takto kontaminovaná půda nachází na zemědělském prostranství můžou kontaminanty působit negativně na rostlinnou produkci a jejich výnos v následkem působení fytotoxicity (eAgri). V tomto sledování nebyly stanoveny půdní vlastnosti, které by nám pomohly určit, zda se jedná o půdu lehkou nebo běžnou. Dle vyhlášky 153/2016 Sb., pokud bychom půdu hodnotili jako lehkou, došlo v ojedinělých případech k překročení preventivní hodnoty u As, Cd, Co, Cr, Ni a Pb. Pokud by bylo možno sledované půdy zařadit mezi běžné, pak došlo k mírnému překročení preventivní hodnoty pouze u jednoho vzorku v případě Cr.

Indikační hodnoty, při jejichž překročení může dojít k ohrožení růstu rostlin, zdraví lidí či zvířat, jsou ve srovnání s preventivními hodnotami mnohem vyšší. Pro arsen platí indikační hodnota 40 mg/kg sušiny. Z naměřených výsledků byl arsen ve zkoumané lokalitě naměřen v hodnotě 18,3 mg/kg na odběrovém místě číslo 9. U kadmia nejvyšší hodnota byla naměřena 0,5 mg/kg a jeho indikační hodnota je 20 mg/kg. Nikl byl naměřen až do hodnoty 45,3 mg/kg, ale indikační hodnotu nepřesáhl, ta činí 150-200 mg/kg. Olovo bylo naměřeno v nejvyšší hodnotě 79,4 mg/kg a pro něj platí indikační limit 400 mg/kg. Pro zinek platí indikační limit 400 mg/kg a naměřen byl v nejvyšší koncentraci 91,7 mg/kg. Posledním prvkem, který udává indikační limit dle vyhlášky 153/2016 Sb. je měď. Limit je 200-300 mg/kg a nejvíce naměřena byla v hodnotě 20,1. Tato bývalá těžební oblast nepředstavuje riziko ohrožení lidského zdraví svým obsahem rizikových prvků, které nepřekročily limity.

Dle výzkumu, který probíhal u závodu Aerometer v polské Varšavě, bylo měřeno množství rtuti v půdě. Závod vyráběl především skleněné teploměry a hustoměry. V roce 1986 se ukázalo, že celý areál byl silně kontaminován rtutí. Obsah rtuti naměřené v půdě z okolí závodu byl přes 200 mg/kg. Po následné sanaci v roce 2003 provedl Ústav ochrany životního prostředí měření této půdy a průměrná koncentrace rtuti na celém území byla v rozmezí 41 mg/kg v povrchové vrstvě půdy a 12 mg/kg v podpovrchové vrstvě (Boszke at el 2008). Takto velké množství rtuti v oblasti Jesenný naměřeno nebylo. Jedná se přesně o lokalitu, kde se dřív těžil cinabarit v menším množství oproti závodu Aerometer, kde se pracovalo přímo s nebezpečnou rtutí.

Obsah rizikových prvků a těžkých kovů v potravě je velký problém. Přítomnost olova v centrálním nervovém systému má za následek poruchy chování a vývoje. Dlouhodobá expozice olovem způsobuje poruchy pozornosti, poškozuje mozek a svalovou slabost. Příznaky otravy olovem jsou nespavost, deprese, ztráta paměti či kardiovaskulární onemocnění. Kadmium se nejčastěji vyskytuje v listové zelenině a z klinického hlediska ovlivňuje ledviny, kardiovaskulární a imunitní systém. Toxicita kadmia je zvýšena interakcí s olovem a arsenem. Podle klasifikace IARC je to lidský karcinogen patřící do skupiny 1 (Nowakowski et al. 2021).

Houby představují cenný zdroj živin. Obsahují vitamíny a minerály a mají nízký obsah kalorií. Houby se konzumují jako delikatesa pro svou specifickou chuť. Kromě nutričních hodnot mají také houby různé zdravotní benefity. Četné studie potvrdily, že houby působí např. protizánětlivě, antioxidantně a antibakteriálně. I přes mnoho pozitivních vlastností s konzumací hub jsou s jejich požitím spojená rizika jako je otrava škodlivými prvky či pesticidy. Olovo, kadmium a arsen se mohou hromadit přímo v houbách a škodit tak lidskému zdraví (Strapač & Baranová 2016).

Některé druhy hub mají vysokou schopnost akumulovat jeden nebo i více prvků. Z faktorů prostředí má zásadní vliv na obsah prvků v půdě daný typ geologického podloží a mobilita prvků v substrátu je ovlivněná kyselostí, přítomností jílových minerálů a organických látek (Borovička 2007).

Obsah rizikových prvků v lesním ekosystému může být dán vlivem člověka jako antropogenní, ale také litogenní související se zvětráváním matečných hornin. Půdní pH je jednou z klíčových veličin, ovlivňujících retenci a mobilitu rizikových prvků v půdním profilu (Roter et al. 2013). V České republice roste vzácně jedovatá houba baňka velkokališná, která může obsahovat až 1000 mg/kg nebezpečného kadmia (Cochi et al. 2006).

Zinek se v houbách vyskytuje v rozmezí 50-150 mg/kg. Vyšší schopnost akumulovat zinek má holubinka černonachová s obsahem v rozmezí 300-1100 mg/kg (Borovička 2007). Nadměrný obsah zinku v organismu může způsobit nevolnost, žaludeční křeče a může poškodit slinivku břišní. Naopak nedostatek zinku vyvolává poruchy imunitního systému (Chasapis et al. 2012).

Ve vzorcích hub odebraných z lokality po bývalé těžbě cinabaritu byl jako jeden z rizikových prvků nejvíce naměřen právě zinek. V největší hodnotě 126,6 mg/kg byl obsah u holubinky a 104,3 mg/kg u hříbu žlutomasého. Indikační limit, jehož překročením může být ohrožena zdravotní nezávadnost potravin, u arsenu udává 40 mg/kg a vzorky hub obsahovaly maximální hodnotu 3,7 mg/kg. Pro kadmium platí limit 1,5-2,5 mg/kg. Tomuto výsledku se nejvíce přibližuje hodnota naměřená u holubinky a to 1,4 mg/kg. Nikl se pohybuje v rozmezí 150-200 mg/kg, kdy u hříbu žlutomasého byl největší obsah 2,1 mg/kg. Olovo je limitováno hodnotou 300 mg/kg, ale vzorky hub obsahují pouze 2,5 mg/kg. Nebezpečí intoxikace lidského organismu olovem či kadmiiem po požití hub v současné době nehrozí, avšak je třeba houby do jídelníčku zařazovat jen ojediněle. Obsah kontaminujících prvků lze v jídle snížit odstraněním rourek či lupenů při samotném čištění hub. U pravidelné konzumace hub by se měly vyloučit volně rostoucí žampiony (Cibulka 1996).

7. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá nebezpečně rizikovým prvkem a to rtutí. Z dostupných zdrojů jako je registr integrovaného znečištění je prokazatelné, že největším znečišťovatelem je Spolana Neratovice, která má největší přenosy látek v odpadech. Do ovzduší mají nejvíce úniků rtuti tepelné elektrárny v Ústeckém kraji. Dále byly sledovány koncentrace rtuti v půdě v okolí zasypané šachty v oblasti Jesenný, kde se těžil cinabarit v nevelkém množství a těžba byla ukončena v roce 1643. Mapování koncentrace rtuti v této lokalitě bylo prováděno na deseti vzorcích půdy, kde byly mimo jiné stanoveny rizikové prvky. Rtuť a rizikové prvky se povedlo změřit také z hub nalezených a odebraných na stanovištích při odběru půdy.

Samotný odběr vzorků půdy a hub proběhl v létě 2022. Dle vyhlášky 153/2016 Sb. je indikační hodnota v zemědělských půdách pro rtuť stanovena na 20 mg/kg sušiny, kdy při jejím překročení dochází k ohrožení zdraví lidí a zvířat. Tato hodnota nebyla překročena. Největší obsah rtuti byl naměřen v rozmezí 9,88 mg/kg. Toto množství je přibližně poloviční hodnota, než udává vyhláška, nicméně se jedná o hodnotu vysokou. Díky zmapování a změření obsahu rtuti v půdě je potvrzeno, že tato lokalita stále obsahuje vyšší hodnoty rtuti v půdě v důsledku bývalé těžby cinabaritu. Rizikové prvky v této zkoumané lokalitě nepřesahují limity stanovené vyhláškou.

Jelikož je tato lokalita v místě Jesenný málo zmapovaná, doporučil bych toto místo více prozkoumat a zjistit jaký obsah rtuti se zde vyskytuje nejen u zasypané šachty, kde bylo prováděno měření, ale také v dalších částech obce. Navrhoval bych provést výzkum na více místech a také změřit, zdali rtuť obsahují různé rostliny, plody ovoce či zeleniny. Bylo by zajímavé také změřit obsah rtuti ve vlasech lidí, kteří žijí v blízkosti zasypané šachty v domě č. p. 86. I přesto, že toto ložisko v rámci Čech je bezvýznamné oproti ložisku Jedová hora nebo Horní Luby, kde se cinabarit těžil ve značně větším množství.

8. Literatura

- Arnika. Spolana Neratovice. Arnika. Available from <https://arnika.org/toxicke-latky/nase-temata/prumyslove-znecistení/kauzy-v-cr/spolana-neratovice> (accessed March 2023).
- Borovička J. 2007. Houby a stopové prvky. *Vesmír* **86**:507-511.
- Boszke L., Kowalski A., Astel A., Baranski A., Gworek B., Siepak J. 2008. Mercury mobility and bioavailability in soil from contaminated area. *Environmental Geology* **55**:1075-1087.
- Casucci C, Okeke B.C, Frankenberger W.T. 2022. Effects of mercury on microbial biomass and enzyme activities in soil. *Biological trace element research* **94**:179-191.
- Cibulka J. 1996. Cizorodé prvky v houbách. *Vesmír* **75**:389-390.
- Cibulka J, Domažlická E. 1991. Pohyb olova, kadmia a rtuti v biosféře. Academia, Praha.
- Cocchi L, Vescovi L, Petrini L.E, Petrini O. 2006. Heavy metals in edible mushrooms in Italy. *Food chemistry* **98**:277-284.
- Driscoll C.T., Mason R.P., Chan H.M., Jacob D.J., Pirrone N. 2013. Mercury as a global pollutant: Sources, pathways, and effects. *Environ. Sci. Technol.* **47**:4967–4983.
- Frišhancová H. 2008. Koloběh rtuti a jejích specií v životním prostředí [BSc Thesis]. Vysoké učení technické v Brně, Brno
- Heintz A, Reinhardt G. 1993. Chemie a životní prostředí. Vysoká škola chemicko technologická, Praha.
- Hojdová M, Navrátil T, Rohovec J, Penížek J, Grygar T. 2009. Mercury Distribution and Speciation in Soils Affected by Historic Mercury Mining. *Water, Air, and Soil Pollution: An International Journal of Environmental Pollution* **200**:89-99.
- Hojdová M, Navrátil T, Rohovec J. 2008. Distribution and Speciation of Mercury in Mine Waste Dumps. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **80**:237-241.
- Houserová P, Janák K, Kubáň P, Pavlíčková J, Kubáň V. 2006. Chemické formy rtuti ve vodních ekosystémech – vlastnosti, úrovně, koloběh a stanovení. *Chemické Listy* **100**:862-876.

Chasapis Ch.T, Loutsidou A.C, Spiliopoulou Ch.A, Stefanidou M.E. 2012. Zinc and human health: an update. Archives of toxicology **86**:521-534.

Integrovaný registr znečišťování. Rtut' a sloučeniny jako Hg. Ministerstvo životního prostředí. Available from <https://www.irz.cz/latky-v-irz/rtut-a-slouceniny-jako-hg> (accessed March 2023).

Komínková J. 2010. Atomová absorpční spektrometrie – stanovení rtuti pomocí analyzátoru AMA 254. Pracovní text pro Podzemní výukové středisko JOSEF. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Praha.

Kumari S, Jamwal R, Mishra N, Singh D.K. 2020. Recent developments in environmental mercury bioremediation and its toxicity: A review. Environmental nanotechnology, monitoring & management **13** (100283) DOI: 10.1016/j.enmm.2020.100283.

Marnane I. 2018. Rtut': přetrvávající hrozba pro životní prostředí a lidské zdraví. European environment agency. Available from <https://www.eea.europa.eu/cs/articles/rtut-pretrvavajici-hrozba-pro-zivotni> (accessed March 2023).

Ministerstvo životního prostředí. 2008. Minamatská úmluva o rtuti. Ministerstvo životního prostředí, Praha. Available from https://www.mzp.cz/cz/umluva_o_rtuti (accessed March 2023).

Ministerstvo životního prostředí. 2016. Vyhláška č. 153 ze dne 17. 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 in Sbírka zákonů České republiky, 2016, částka 59. Česká republika.

Národní muzeum. 2013. Dobývání rtuti v Čechách. Available from <http://muzeum3000.nm.cz/veda/dobvani-rtuti-v-cechach> (accessed January 2023).

Nováková T, Navrátil T, Rohovec J. 2018. Rtut' v prostředí lesních ekosystémů CHKO Brdy. Ochrana přírody **1**:27-31.

Nowakowski P, Markiewicz-Zukowska R, Soroczyńska J, Puścion-Jakubik A, Mielcarek K, Halina Borawska M, Socha K. 2021. Evaluation of toxic element content and health risk assessment of edible wild mushrooms. Journal of Food Composition and analysis **96** DOI: 10.1016/j.jfca.2020.103698.

Nriagu J, Becker Ch. 2003. Volcanic emissions of mercury to the atmosphere: global and regional inventories. Science of the total environment **304**: 3-12.

Odumo B.O, Carbonell G, Angeyo H. K, Patel J.P, Torrijos M, Martín J.A.R. 2014. Impact of gold mining associated with mercury contamination in soil, biota sediments and tailing in Kenya. *Environmental science and pollution research*. **21**:12426-12435.

Pacyna E. G, Pacyna J.M, Steenhuisen F, Wilson S. 2006. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000. *Atmospheric Environment* **40**:4048-4063.

Petáková Z, Poňavič M, Mašek D. 2009. Mapování starých zátěží po těžbě rtuti: Svata u Berouna. *Česká geologická služba Praha* **42**:261-264.

Remy H. 1971. *Anorganická chemie II*. Státní nakladatelství technické literatury, Praha.

Roll M, Borovička J, Nováková T. 2021. Kdo hledá rtuť, najde. *Vesmír* **100**:40-43.

Rotter P, Šrámek V, Vácha R, Borůvka L, Fadrhonsová V, Sářka M, Drábek O, Vortelová L. 2013. Rizikové prvky v lesních půdách. *Zprávy lesnického výzkumu* **58**:17-27.

Strapáč I, Baranová M. 2016. Content of chemical elements in wood-destroying fungi. *Folia Veterinaria* **60** DOI: 10.1515/FV-2016-0035.

Šrámek V, Kosina L. 1996. *Obecná a anorganická chemie*. FIN, Olomouc.

The Zero Mercury Working Group. 2018. Zero Mercury. Available from <https://www.zeromercury.org/> (accessed March 2023).

Tuček M. 2006. Současná zdravotní rizika expozice rtuti a jejím sloučeninám. *České pracovní lékařství* **1**:26-37.

Tuček M, Bencko V, Krýsl S. 2007. Zdravotní rizika rtuti ze zubních amalgámů. *Chemické listy* **101**:1038-1044.

Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. Available from <https://eagri.cz/public/web/ukzuz/portal/> (accessed April 2023).

Velebil D. 2008. Mineralogea geneze historických ložisek cinabaritu v Čechách. [BSc Thesis]. Masarykova univerzita, Brno.

Velebil D. 2009. Dolování cinabaritu v Horních Lubech u Chebu, Česká republika. *Bull. mineral. - petrolog. Odd. Nár. Muz. Praha* **17/2**:39-61.

Velebil D. 2010. Historická ložiska cinabaritu v Čechách – genetická studie [MSc Thesis]. Univerzita Karlova, Praha.