



Zdravotně  
sociální fakulta  
Faculty of Health  
and Social Sciences

Jihočeská univerzita  
v Českých Budějovicích  
University of South Bohemia  
in České Budějovice

**Vliv stromů na kontaminaci půdy  $^{137}\text{Cs}$**

## **Diplomová práce**

Studijní program: **OCHRANA OBYVATELSTVA**

**Autor:** Bc. Michaela Trnková

**Vedoucí práce:** Mgr. Jiří Havránek

České Budějovice 2019

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci s názvem *Vliv stromů na kontaminaci půdy <sup>137</sup>Cs* jsem vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou Univerzitou v Českých Budějovicích na jejich internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby stejnou elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 13. 5. 2019

.....

Bc. Trnková Michaela

### **Poděkování**

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu diplomové práce Mgr. Jiřímu Havránkovi za ochotu, cenné rady, čas strávený konzultacemi, odborné vedení a veškeré informace, které byly nezbytné pro vypracování této diplomové práce.

# Vliv stromů na kontaminaci půdy $^{137}\text{Cs}$

## Abstrakt

Zkoušky jaderných zbraní v atmosféře a havárie na jaderně energetických zařízeních v posledních padesáti letech způsobily významnou kontaminaci životního prostředí. Některé uniklé radionuklidy mají poločas přeměny až několik desítek let a jsou stále přítomny v životním prostředí. Z tohoto důvodu stále probíhá monitorování radiační situace na území České Republiky s cílem zjistit chování a kinetiku umělých radionuklidů v životním prostředí a závažnost radiologických dopadů na člověka. Výsledky tohoto monitorování slouží k přehledu o radiační situaci, sledování dlouhodobých trendů a v neposlední řadě i k získání nových poznatků, které mohou usnadnit zvládnutí radiační mimořádné události.

Cílem této diplomové práce bylo změřit obsah  $^{137}\text{Cs}$  v půdách odebraných pod a kolem korun listnatých stromů na území zasaženém radiačním spadem a zjistit, zda koruna stromu má vliv na distribuci cesia v půdách pod nimi. Za tímto účelem byla stanovena výzkumná otázka: Mají koruny stromů vliv na distribuci cesia v půdách pod nimi?

Pro lepší srozumitelnost je úvod práce věnován informacím o ionizujícím záření, základním pojmům a veličinám z oblasti ionizujícího záření, zdrojům kontaminace radionuklidy, především havárii jaderné elektrárny Černobyl, kontaminaci životního prostředí a obyvatelstva a prvkům důležitým pro praktickou část této práce. Na teoretickou část pak navazuje metodika výzkumu. Vzorky půd byly odebírány pod pěti listnatými stromy druhu ořešák královský, které vyhovovaly stanoveným kritériím pro odběr. Pod každým stromem byly odebírány vzorky do třech směrů svírajících úhel  $120^\circ$  vždy u kmene, v polovině koruny, na kraji koruny a mimo korunu. Tedy 12 vzorků u každého stromu, celkem 60 vzorků. Suché a vyčištěné vzorky půd byly změřeny pomocí polovodičové gama spektrometrie, která určila hodnoty hmotnostní aktivity radionuklidu  $^{137}\text{Cs}$  a také přirozeně se vyskytujícího radionuklidu  $^{40}\text{K}$ .

Z naměřených hodnot byly vytvořeny grafy. I přes časté odchylky, které mohou být způsobeny vlivem přírodních jevů či činností člověka z nich vyplývá, že koruny stromů mají vliv na distribuci  $^{137}\text{Cs}$  v půdách pod nimi.

## Klíčová slova

Cesium, stromy, kontaminace, distribuce, hmotnostní aktivita

## **The influence of trees on contamination of soil with $^{137}\text{Cs}$**

### **Abstract**

Nuclear weapons testing in the atmosphere and accidents in nuclear energy facilities in the last 50 years caused significant contamination of the environment. Half-life of certain leaked radionuclides is several decades and therefore they are still present in today's environment. That is the reason why there is still on going monitoring of radiation situation in the Czech Republic in order to determine the behaviour and kinetics of anthropogenic radionuclides in the environment and the severity of radiological impact on humans. The results of this monitoring serve to review the radiation situation, observe long-term trends and last but not least to gain new knowledge that could facilitate the management of radiological emergencies. The aim of this thesis was to measure the content of  $^{137}\text{Cs}$  in soils under and around leafy tree crowns in the area affected by radiation fall and to find out whether the tree's crown has an effect on the distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in the soils below them. To this end, a research question has been set: Do tree crowns affect the distribution of cesium in the soils below them? For better intelligibility, the introduction of the thesis is devoted to information about ionizing radiation, basic terms and quantities in the field of ionizing radiation, sources of radionuclide contamination, especially the Chernobyl nuclear power plant accident, environmental and population contamination, and elements important for the practical part of this work. The theoretical part is followed by research methodology. The soil samples were collected under five leafy trees of the Walnut species that met the set criteria for collection. Under each tree, samples were taken in three directions at an angle of  $120^\circ$  always at the trunk, in the middle of the crown, at the edge of the crown and outside the crown. Thus, 12 samples per tree, a total of 60 samples. Dry and purified soil samples were measured by semiconductor gamma spectrometry which determined  $^{137}\text{Cs}$  radionuclide mass activity values as well as naturally occurring radionuclide  $^{40}\text{K}$ . Graphs were generated from the measured values. Despite the frequent deviations that may be caused by natural phenomena or human activities, it was found out that tree crowns affect the distribution of  $^{137}\text{Cs}$  in the soils below them.

### **Keywords**

Cesium, trees, contamination, distribution, specific activity

## Obsah

Úvod.....	8
1. Teoretická část .....	9
1.1. Základní informace o ionizujícím záření .....	9
1.1.1 Pojmy .....	10
1.1.2 Veličiny IZ.....	12
1.2 Zdroje kontaminace radionuklidy .....	14
1.2.1 Zkoušky jaderných zbraní.....	14
1.2.2 Havárie jaderné elektrárny Černobyl .....	17
1.3 Kontaminace životního prostředí .....	21
1.3.1 Půda .....	21
1.3.2 Flóra.....	23
1.3.3 Fauna.....	24
1.4 Expozice obyvatelstva.....	25
1.5 Nejčastěji měřené prvky.....	28
1.5.1 Cesium .....	28
1.5.2 Draslík.....	29
1.6 Způsoby měření.....	29
1.6.1 Polovodičová gama spektrometrická analýza .....	30
2. Cíl práce a výzkumná otázka .....	31
3. Metodika .....	32
3.1 Odběr vzorků .....	33
4. Výsledky .....	36
4.1 Výsledky měrné aktivity $^{137}\text{Cs}$ jednotlivých stromů.....	40
4.2 Porovnání výsledků hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ u stromů ze stejné lokality .....	51
4.2.1 Výsledky z lokality Radonice 1 a Radonice 2 .....	52
4.2.2 Výsledky z lokality Mnich 1 a Mnich 2 .....	54
4.3 Výsledky měření hmotnostní aktivity $^{40}\text{K}$ .....	55
5. Diskuse.....	58

5.1	Výsledky měrné aktivity $^{137}\text{Cs}$ jednotlivých stromů.....	59
5.2	Porovnání výsledků hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ u stromů ze stejné lokality .....	62
5.3	Výsledky měření hmotnostní aktivity $^{40}\text{K}$ .....	63
5.4	Faktory ovlivňující distribuci $^{137}\text{Cs}$ v půdě.....	64
6.	Závěr .....	67
7.	Seznam použitých zdrojů.....	69
8.	Seznam obrázků a tabulek .....	76
9.	Seznam zkratk .....	78

## Úvod

Ačkoli si to většina lidí ani neuvědomuje, ionizující záření (dále jen IZ) je nedílnou součástí našich životů. Jsme mu vystavováni jak z přírodního prostředí, tak i kvůli činnosti člověka. Přírodními zdroji záření jsou záření kosmické a záření terestriální. Často monitorovaným prvkem v přírodním pozadí je draslík 40 (dále jen K). V některých ohledech významnějšími jsou ale určitě umělé zdroje IZ. Ty se do našeho prostředí dostaly především z atmosférických testů jaderných zbraní a z havárie jaderné elektrárny v Černobylu. Z dlouhodobého hlediska je nejvýznamnějším prvkem cesium 137 (dále jen Cs), které má poločas rozpadu 30 let, proto je stále měřitelné v našem životním prostředí. To se po havárii v Černobylu přesunem kontaminovaných vzdušných mas společně s dalšími radionuklidy rozšířilo nad území téměř celé Evropy a následně se vlivem srážek v podobě radioaktivního spadu dostalo na zemský povrch. Překážkou rovnoměrné distribuce tohoto radionuklidu na zemském povrchu mohly být mimo jiné koruny stromů, které zastíňují část území. Cesium se následně kumuluje v půdě, odkud se kořenovým systémem dostává do rostlin, mechů, hub a plodů. Tyto komponenty se pak jako součást potravního řetězce stávají zdrojem kontaminace pro zvěř, jejíž maso je následně zdrojem kontaminace také pro člověka.

Cílem této práce je změřit obsah  $^{137}\text{Cs}$  v půdách odebraných pod a kolem korun listnatých stromů na území zasaženém radiačním spadem a zjistit, zda koruna stromu má vliv na distribuci  $^{137}\text{Cs}$  v půdách pod nimi.

V úvodu práce jsou shrnuty teoretické informace objasňující danou problematiku, základní pojmy a veličiny, významné zdroje  $^{137}\text{Cs}$ , informace ohledně kontaminace životního prostředí a způsob měření. Další část práce je věnována samotnému výzkumu. Nejdříve je popsána metodika sběru vzorků půd a jejich měření. Následují výsledky měřené hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  ve vzorcích půd. Lokality pro odběr vzorků byly vybrány tak, aby vyhovovaly podmínkám pro odběr a zároveň se nacházely na území zasaženém radiačním spadem. Pro lepší prokazatelnost výsledků bylo stanoveno, že všechny stromy, pod kterými se odebíraly vzorky půd, budou listnaté. Ve všech lokalitách byly vzorky odebrány pod ořešákem královským. Jednalo se o lokality Červený vrch, kde byly vzorky odebrány pod jedním stromem. Dále lokality Radonice a Mnich, kde v každé lokalitě byly vzorky odebrány pod dvěma stromy.



## 1. Teoretická část

Člověk, aniž by si toho byl vědom, je neustále vystaven ionizujícímu záření z přírodních radionuklidů v zemské kůře, nebo například radonu v budovách. K této dávce ozáření ovšem přispívá také ozáření z umělých radionuklidů, které se do životního prostředí dostaly jako následek zkoušek jaderných zbraní, nebo také následkem havárie jaderného zařízení. Na našem území je stále jedním z nejvýznamnějších zdrojů ozáření umělými radionuklidy pozůstatek radioaktivního spadu po havárii jaderné elektrárny Černobyl. (Přírodní radioaktivita a problematika radonu, 2019)

### *1.1. Základní informace o ionizujícím záření*

Ionizující záření je záření s natolik vysokou energií, že jsou jeho kvanta schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a látku tím ionizovat (Ullman, 2016). Vzniká mimo jiné při jaderných procesech v jaderném reaktoru a tak je mu často věnována velká pozornost, protože je spojováno s jadernými haváriemi (Navrátil et al., 2016). Dalšími umělými zdroji ionizujícího záření jsou urychlovače částic, jaderné zbraně, terapeutická zařízení a další (Ionizující záření, 2019). V největší míře se ale na ozáření obyvatel podílí záření z přírodních zdrojů, kterému naopak už taková pozornost věnována není. Přirozená radiace pochází z vesmíru i ze zdrojů přímo na Zemi. Všechny přírodní zdroje tvoří až 83 % ročního ozáření jednotlivce. Zbýlé ozáření je tvořeno především ozářením lékařským, a v téměř zanedbatelné míře se na něm pak podílejí pozůstatky atmosférických testů jaderných zbraní a radionuklidy z radiační havárie v Černobylu (Králová, 2019).

Ionizující záření našlo časté využití v lékařství, při havarijním ozáření může mít ale i nepříznivé zdravotní účinky. Ty se dělí do dvou hlavních kategorií. První z nich jsou účinky tkáňové (deterministické), které se projevují v důsledku zabití či poškození buněk vysokými dávkami záření (Publikace ICRP 103, 2009). Vznikají, až pokud dávka překročí tzv. dávkový práh, který je charakteristický pro tento typ účinků. Mezi tyto účinky patří například akutní nemoc z ozáření, pozdní nenádorová poškození, poškození plodu in utero a další. Intenzita těchto účinků je závislá na absorbované dávce záření (Pejchal, 2013; Matoušek et al., 2007). Druhou kategorií jsou účinky stochastické, vznikající v důsledku mutací reprodukčních buněk (Publikace ICRP 103, 2009). Projevují se až s časovým odstupem a nelze jejich vznik s jistotou předpovědět.

Víme pouze, že se zvyšující se dávkou záření roste lineárně pravděpodobnost vzniku těchto účinků. Jedná se o účinky se vztahem k mutacím nepohlavních buněk (vztah ke vzniku rakoviny), nebo o vznik genetických změn týkajících se buněk pohlavních. V tomto případě může být genetické poškození přeneseno do další generace (Matoušek et al., 2007).

Podle charakteru ionizačního procesu rozlišujeme také přímo a nepřímo ionizující záření. Přímou ionizující záření je tvořeno nabitými částicemi, tedy elektrony, pozitrony, protony a částicemi  $\alpha$ . Tyto částice mají dostatečnou kinetickou energii k vyvolání ionizace. Nepřímo ionizujícími částicemi jsou fotony a neutrony. Ty nejsou schopny prostředí ionizovat samy a tak je ionizace způsobena až sekundárně uvolněnými nabitými částicemi. (Súkupová, 2014)

### *1.1.1 Pojmy*

#### **Ionizující záření**

IZ rozumíme přenos energie, který je schopný vytvářet ionty v podobě elektromagnetických vln, které mají vlnovou délku nižší nebo rovnou 100 nm s frekvencí vyšší nebo rovnou  $3 \times 10^{15}$  Hz nebo v podobě částic. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

#### **Zdroj IZ**

Zdrojem IZ může být generátor záření, který je způsobilý generovat ionizující záření, nebo radioaktivní látka a předmět nebo zařízení které ji obsahuje nebo uvolňuje. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

#### **Radioaktivita**

Jev náhodného rozpadu atomů, který doprovází emise záření. (IAEA Safety Glossary, 2007)

#### **Radionuklid**

Nestabilní forma chemického prvku, která se rozkládá a zároveň uvolňuje emisi jaderného záření. (Medical Definition of Radionuclide, 2018)

## **Radioaktivní látka**

Radioaktivní látka je jakákoli látka, která je kontaminovaná v takové míře že vyžaduje regulaci podle atomového zákona, nebo jakákoli látka obsahující radionuklid. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

## **Kontaminace**

Přítomnost radioaktivních látek na povrchu nebo uvnitř pevných látek, tekutin či plynů (včetně lidského těla), kde je jejich přítomnost nežádoucí a neúnmyslná. (IAEA Safety Glossary, 2007)

## **Vnitřní ozáření**

Neboli vnitřní kontaminace znamená kontaminace organismu radionuklidy, které se do těla dostali vdechnutím (inhalace), konzumací potravin (ingesce) anebo přes poraněnou kůži (penetrace). (Patnáct let od Černobyli, 2001)

## **Zevní ozáření**

Ozáření organismu způsobené radionuklidy nacházejícími se mimo tělo. (Patnáct let od Černobyli, 2001)

## **Expozice**

Stav nebo proces kdy je objekt vystaven ozáření. Expozice by neměla být používána jako synonymum k dávce, protože dávka udává velikost expozice. (Patnáct let od Černobyli, 2001)

## **Expoziční situace**

Expoziční situací je jakákoli situace, jejíž okolnosti vedou k vystavení životního prostředí nebo osoby ionizujícímu záření. Patří mezi ně plánovaná expoziční situace, která je spojena se zdrojem ionizujícího záření záměrně. Dále nehodová expoziční situace, která může nastat během plánované expoziční situace, nebo může být vyvolána svévolným činem, a proto vyžaduje přijetí okamžitých opatření k odvrácení nebo omezení důsledků. A poslední možností expoziční situace je již existující expoziční situace, která při rozhodování o její regulaci již existuje. Zahrnuje také dlouhodobý následek nehodové

expoziční situace nebo ukončené činnosti v rámci plánované expoziční situace. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

### **Poločas rozpadu**

Doba, za kterou se přemění jedna polovina radionuklidu z počátečního množství. (Vokurka, 2015)

### **Radiační ochrana**

Radiační ochrana je systém organizačních a technických opatření k ochraně životního prostředí před účinky ionizujícího záření a k omezení ozáření fyzické osoby. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

### **Havarijní ozáření**

Je ozáření zasahující osoby při nehodové expoziční situaci, nevztahuje se ovšem na zasahující osoby. Zasahující osobou rozumíme fyzickou osobu, která má stanoveny úkoly v rámci nehodové expoziční situace a která je vystavena ozáření při provádění opatření v rámci odezvy na radiační mimořádnou událost. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

### **Jaderné zařízení**

Je jakékoli zařízení, stavba nebo celek, jehož součástí je jaderný reaktor, který využívá štěpnou řetězovou reakci nebo jinou řetězovou jadernou reakci. Dále sklad vyhořelého jaderného paliva, sklad čerstvého jaderného paliva, sklad radioaktivního odpadu nebo úložiště radioaktivního odpadu. (Zákon č. 263/2016 Sb.)

#### *1.1.2 Veličiny IZ*

### **Aktivita**

Podíl počtu jaderných přeměn z energetického stavu a časového intervalu těchto přeměn. (Vyhláška č. 422/2016 Sb.)

Jednotkou aktivity je becquerel (Bq), je to velice malá jednotka, která udává jednu přeměnu za sekundu. K přesnější charakteristice radionuklidu se používají odvozené jednotky aktivity, například hmotnostní aktivita ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), objemová aktivita ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ) nebo plošná aktivita ( $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ ). (Navrátil et al., 2016)

### **Absorbovaná dávka**

Absorbovanou dávku lze definovat jako podíl střední sdělené energie  $d\bar{\varepsilon}$  a hmotnosti objemového elementu  $dm$  v bodě, kterému byla tato energie předána (často se používá jen termín dávka). (Klener, 2000)

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

Jednotkou absorbované dávky je Gray, jehož rozměrem je  $\text{J.kg}^{-1}$ . (Navrátil et al., 2016)

### **Dávkový příkon**

Dávka vyjadřuje předávání energie za určitý časový úsek, zato okamžitou situaci vyjadřuje dávkový příkon. (Klener, 2000)

### **Ekvivalentní dávka**

Ekvivalentní dávka udává součin radiačního váhového faktoru  $w_t$  a střední absorbované dávky v konkrétní tkáni nebo orgánu  $D_{T,R}$ . (Vyhláška č. 422/2016 Sb.)

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

### **Efektivní dávka**

Efektivní dávka je součtem součinů tkáňových váhových faktorů  $w_T$  a ekvivalentní dávky v konkrétních tkáních nebo orgánech  $H_T$ . (Vyhláška č. 422/2016 Sb.)

$$E = \sum_T w_T H_T$$

### **Dávkový ekvivalent**

Dávkový ekvivalent udává součin absorbované dávky v konkrétním bodě tkáně a jakostního faktoru, který vyjadřuje rozdílnou biologickou účinnost různých druhů ionizujícího záření (Vyhláška č. 422/2016 Sb.). Jednotka dávkového ekvivalentu se nazývá Sievert (Sv) a její rozměr je  $\text{J.kg}^{-1}$ . (Patnáct let od Černobylu, 2001)

## **Efektivní dávkový ekvivalent**

Tato veličina se používá v ochraně před zářením a umožňuje hodnotit ozáření celého lidského organismu, i když je ozářen nerovnoměrně. Respektuje rozdílnou citlivost jednotlivých tkání a orgánů lidského těla. (Patnáct let od Černobyli, 2001)

## **Kolektivní dávkový ekvivalent**

Tato veličina udává míru celospolečenské zdravotní újmy způsobené ozářením lidí. Je vyjádřena součtem dané veličiny pro všechno obyvatelstvo. (Patnáct let od Černobyli, 2001)

### *1.2 Zdroje kontaminace radionuklidy*

Radionuklidy se v životním prostředí vyskytují jak přirozené, tak umělé. Mezi přírodní radionuklidy řadíme radionuklidy kosmogenní a terestrální. Terestrální se pak dále dělí na radionuklidy primordiální a radionuklidy vznikající sekundárně z radionuklidů tvořících přeměnové řady (Navrátil et al., 2016). Mimo tyto radionuklidy, které jsou v našem okolí odjakživa, se setkáváme také s radionuklidy umělými. Ionizující záření našlo uplatnění v mnoha oblastech, především medicíně, v energetice, nebo i ve zbrojním průmyslu (Obecné informace o radioaktivitě a radiační ochraně, 2012). Při činnostech spojených s těmito oblastmi ale může docházet také k nehodám, a tak do životního prostředí mohou uniknout i umělé radionuklidy. Nejvýznamnější podíl umělých radionuklidů na našem území mají na svědomí testy jaderných zbraní v atmosféře a havárie jaderné elektrárny Černobyl. (Navrátil et al., 2016)

#### *1.2.1 Zkoušky jaderných zbraní*

K vývoji a prvnímu úspěšnému pokusnému výbuchu jaderné zbraně s krycím jménem Trinity došlo v USA v červenci roku 1945. Po něm následovalo první válečné použití jaderných zbraní, a to shovení jaderné pumy Little Boy na Hirošimu a poté jaderné pumy Fat Man na Nagasaki, což následně vedlo k finálnímu ukončení druhé světové války (Nuclear testing 1945 - today, 2010). Po ukončení války vývoj jaderných zbraní navázal na dřívější přerušené výzkumy. Z konkurence vývojářů jaderných zbraní byly vynechány poražené země, a tak se mezi hlavní vývojáře zařadili Svaz sovětských socialistických

republik (dále jen SSSR), Británie, Francie, Čínská lidová republika, Izrael (který to nikdy oficiálně nepřiznal), Indie a Pákistán. (Matoušek et al., 2007)

Od roku 1945 tak byly prováděny testy jaderných zbraní. Oficiálně až do roku 2005 bylo zaznamenáno 2056 jaderných testů, to znamená průměrně tři testy za měsíc. Probíhaly ve více než 20 oblastech na téměř všech světadílech a ve vodách všech oceánů. Jaderné testy byly prováděny ve vzduchu, na zemi, na moři, pod zemí a pod vodou. Více než 25 % z celkového počtu výbuchů byly testy atmosférické, které také představují největší nebezpečí. (Pitschmann, 2005)

### **Účinky jaderných zbraní**

Testy jaderných zbraní a jejich válečné použití ukázaly, že mezi jejich účinky nepatří jen výbuch, ale následuje ho celá řada ničivých, možná ještě nebezpečnějších událostí. Dělíme je na primární a sekundární účinky. Mezi primární účinky patří vzdušná tlaková vlna, která představuje pro nejběžnější jaderný výbuch cca 50 % z celkového množství uvolněné energie (Griffith, 1998-2015). Má silné destruktivní účinky a u lidského organismu může poškozovat ušní bubínky, způsobovat lehké pohmožděniny, při větším přetlaku již krvácení z nosu a uší či zlomeniny, nebo může vést až k poranění vnitřních orgánů a končit i smrtí. Důležité jsou i druhotné účinky tlakové vlny, jako zranění způsobená padajícími a létajícími částmi, či úlomky stavebních konstrukcí. Následuje rázová vlna a seizmické účinky, které se projevují jako vibrace způsobené tektonickými jevy, což je typické především pro podzemní výbuchy. Tyto vibrace jsou zcela charakteristické a odlišitelné od zemětřesení. Při jaderném výbuchu na dně vodní nádrže se vytváří vlna dosahující až několika desítek metrů (The Effects of Nuclear Weapons, 2018). Dalším účinkem je ionizující záření neboli pronikavá radiace. Jde o radioaktivitu provázející výbuch způsobenou nezreagovaným zbytkem jaderné náplně a produkty jaderných reakcí. Tento radiační impuls trvá řádově mikrosekundu. Při ozáření pronikavou radiací dochází k překročení prahových hodnot a vzniku tkáňových účinků. Dalším primárním účinkem je světelné (tepelné) záření. V této formě se uvolňuje podstatná část energie výbuchu a teplota dosahuje statisíců, až milionů °K. světelný efekt se dá rozložit na dvě etapy. Nejdříve nastává prvotní záblesk, který trvá řádově mikrosekundy a uvolní se při něm maximum energie výbuchu. V jeho důsledku se vytvoří ohnivá koule, která má trvání několik sekund a ničivé účinky tohoto záření se definují jako světelný (tepelný) impuls. Ten je tak intenzivní že může způsobit dočasné oslepnutí

a účinky na nechráněnou kůži vyvolávají popáleniny. Důležitým následkem tohoto jevu je také uhelnatění materiálů a vznik druhotných požárů. Posledním účinkem z této skupiny je elektromagnetický impuls. Tento faktor nebyl v prvních fázích výzkumu a pokusů zjištěn ani předvídán. Jde o účinek srovnatelný s účinkem blesku, je však daleko výraznější. Při počátečním ionizujícím záření výbuchu je vyvolána intenzivní ionizace vzduchu, jejímž následkem je krátce trvajícím ale silným impulsem elektromagnetického záření. To je sváděno vodivými soustavami, kabely, či anténami které může v okruhu až desítek kilometrů zcela zničit. Tento efekt sice nemá přímý účinek na lidský organismus, působí však nepřímo narušením přenosu komunikace řídicích systémů v průmyslových zařízeních, narušením dopravních systémů, sociálních infrastruktur nebo narušením dodávek elektrické energie. Mezi sekundární účinky jaderného výbuchu pak patří především radioaktivní kontaminace okolí výbuchu. Všechny jaderné výbuchy, kromě podzemního, při kterém nebyly vyneseny zplodiny výbuchu do atmosféry, kontaminují také vyšší vrstvy atmosféry, ve které se radioaktivní částice rozptýlí a dostanou až do velkých vzdáleností. Účinky radioaktivní kontaminace jsou rozdílné od pronikavé radiace, která trvá pouze několik mikrosekund, podstatně dlouhodobější. Podílejí se na ní jak nezreagované štěpné materiály a zplodiny výbuchu, tak i radioaktivní materiály sekundárně vzniklé v místě výbuchu. Rozptýlení radioaktivních částic vytváří takzvaný lokální neboli raný spad. Vlivem tlakové vlny a následně vzdušných proudů se částice rozšíří a vzniká tak zvaný globální neboli zpožděný spad. Mezi další významné sekundární účinky řadíme následky vyvolané mechanickou energií, která může vyvolat malé zemětřesení, vlnu tsunami, záplavovou vlnu způsobenou poničením vodního díla, nebo zničit rozvody energií s následnými výbuchy. Elektromagnetický impuls pak může způsobit také poničení elektrických rozvodů a řídicích systémů. Tepelná vlna je iniciátorem rozsáhlých požárů, či explozí chemických a petrochemických zařízení s následným uvolněním toxických látek. To všechno zanechá následek nejen na živých bytostech ale i na materiálu a technice, infrastrukturách, lidské společnosti a dlouhodobé následky také na životním prostředí. (Matoušek et al., 2007)

### **Zákaz zkoušek jaderných zbraní**

Již v 50. letech bylo odhadováno, že pokud budou testy jaderných zbraní pokračovat, tak se za 30 let zvýší kontaminace rozsáhlých oblastí až o desetinásobek. Jednání o ukončení jaderných testů ovlivnily dvě události, první americký podzemní test Rainier a vypuštění sovětských satelitů typu Sputnik. V roce 1960 byl v Ženevě přednesen návrh na zákaz



jaderných testů v atmosféře, v oceánech, v kosmu a pod zemí v případech, kdy testy nemohou být monitorovány. Bohužel v předvečer podpisu smlouvy došlo k incidentu, při kterém sovětská protivzdušná obrana sestřelila americký špionážní letoun U-2, čímž z podpisu sešlo (Pitschmann, 2005). Nakonec byla v roce 1963 podepsána smlouva o zákazu zkoušek jaderných zbraní v atmosféře, v kosmickém prostoru a pod vodou (Nuclear weapons timeline, 2019). Do roku 1982 ke smlouvě přistoupilo 108 zemí. Po uzavření této smlouvy se testování jaderných zbraní přesunulo pod zem. Testy ovšem často končily narušením struktury půdy, jejím sesuvem a radioaktivní prach unikal až do vzdálenosti stovek kilometrů. Proto následovalo několik dalších smluv zakazujících testy nad určitou mezí mohutnosti výbuchu. Pokusy o přijetí smlouvy o úplném a všeobecném zákazu zkoušek jaderných zbraní narážely na řadu problémů a komplikací, a tak byla smlouva o úplném zákazu jaderných zkoušek přijata až v roce 1996. K 1. 1. 2002 smlouvu podepsalo 165 zemí, včetně České republiky (dále jen ČR). (Pitschmann, 2005)

### *1.2.2 Havárie jaderné elektrárny Černobyl*

Jaderná elektrárna Černobyl leží zhruba 130 kilometrů severně od Kyjeva, hlavního města Ukrajiny, a 20 km jižně od hranic s Běloruskem. Skládá se ze čtyř jaderných reaktorů, první dva byly postaveny mezi roky 1970 a 1977, třetí a čtvrtý blok byly dokončeny v roce 1983. Další dva reaktory byly v období havárie ve výstavbě. Chladící vodu pro reaktory zajišťovalo umělé jezero o rozloze 22 km<sup>2</sup> nacházející se jihovýchodně od továrny u řeky Pripjat. Tato oblast Ukrajiny byla charakteristická nízkou zalidněností. Tři kilometry od elektrárny se nacházelo nové město Pripjat se 49 000 obyvateli. Staré město Černobyl se nacházelo 15 km jihovýchodně a jeho populace čítala 12 500 obyvatel. (Chernobyl Accident 1986, 2018)

#### **Důvod havárie**

Havárie byla způsobena nezdařeným, ač plánovaným experimentem. Ten měl být proveden před odstavením čtvrtého bloku na plánovanou opravu. Šlo o vyzkoušení funkce nového regulátoru magnetického pole rotoru a tím ověření, že turbogenerátor bude po rychlém uzavření přívodu páry do turbíny nadále schopen setrvačně napájet čerpadla havarijního chlazení aktivní zóny reaktoru dalších 40 sekund. (Patnáct let od Černobylu, 2001)

Důležité je zmínit, že celý test byl podceněn, jak z hlediska jaderné bezpečnosti, tak celkové připravenosti. Místo aby ho řídili specialisté na jadernou bezpečnost, měli ho na starost elektrotechnici. (10 let od havárie jaderného reaktoru v Černobylu, 1996)

Dne 25. 4. 1986 v 01:00 hod. začal experiment postupným snižováním výkonu reaktoru. O několik hodin později byl výkon snížen na polovinu a odstaven první turbogenerátor. Součástí plánovaného experimentu bylo odpojení systému havarijního chlazení, aby nezačal působit během testu. Poté neočekávaně došlo na žádost energetického dispečinku k pozastavení dalšího snižování výkonu na devět hodin. Další provoz není za takovýchto podmínek povolen, při experimentu ale došlo k porušení provozních předpisů. Během celé doby zůstal systém havarijního chlazení odpojen, a navíc došlo na střídání směn, a tak experiment prováděli zaměstnanci, kteří na něj nebyli připraveni. Ve 23:10 pokračovalo snižování výkonu, při kterém ale chybou operátora nastal prudký pokles výkonu a téměř úplné zastavení štěpné reakce. Operátoři tím dostali reaktor do nestabilního stavu mimo oblast povoleného provozu a reaktor měl být okamžitě zcela odstaven. Bohužel se následně několikrát rozhodli v experimentu pokračovat, i když se výkon reaktoru nadále pohyboval v předpisy zakázaných hodnotách. Hodnoty tlaku a par se dostali na úroveň, kdy by běžně již zasáhly systémy automatické havarijní ochrany. To mělo za následek pokles tlaku a hladiny vody v separátorech, což je signálem pro zapůsobení havarijní ochrany I. stupně, která ovšem byla za účelem neodstavení generátoru operátorem zablokována. Ačkoli si operátoři měli možnost prohlédnout počítačem vypsaný stav reaktoru, který vykazoval, že počet regulačních tyčí v aktivní zóně odpovídá necelé polovině povolené hodnoty, rozhodli se pokračovat. V tomto momentě bylo ještě stále možné reaktor opět odstavit. Následné počínání operátorů vedlo dalšímu poklesu reaktivity, které vedlo k dalšímu vytažení regulačních tyčí. Z požadované zásoby 30 tyčí jich tak zůstalo pouze 6 až 8. Reaktor se stal velmi nestabilním. Minutu před začátkem experimentu byl prudce snížen průtok napájecí vody a tím došlo ke zvýšení teploty vody na vstupu do reaktoru. V 01:23 26.4. došlo k poslední a nejzásadnější chybě operátorů, kteří zablokovali havarijní signál, který by po uzavření přívodu páry na turbíny odstavil reaktor. (Patnáct let od Černobylu, 2001)

Plánovaný experiment následně započal uzavřením rychlouzavíracího ventilu turbogenerátoru, výkon cirkulačních čerpadel byl snížen a docházelo k snížení průtoku chladicí vody, což mělo za následek nárůst teploty i tlaku, zvýšil se vývin par a tím i reaktivita a výkon reaktoru. Vzrůst výkonu pokračoval nekontrolovatelně i po zasunutí

regulačních tyčí. Rostoucí tlak zabránil chlazení aktivní zóny a vedl k destrukci tlakových kanálů. Přibližně minutu po zahájení experimentu, tedy v 01:24 došlo postupně ke dvěma výbuchům. Reaktor byl přetlakován do takové míry, že výbuch páry zvedl a odsunul horní betonovou desku reaktoru, která vážila 1000 tun. O pár sekund později došlo k druhé explozi. Obě exploze rozmetaly část aktivní zóny včetně hořícího grafitu a paliva, vedly ke vzniku požáru a horní část reaktoru byla zničena. (Patnáct let od Černobylu, 2001)

### **Následky havárie**

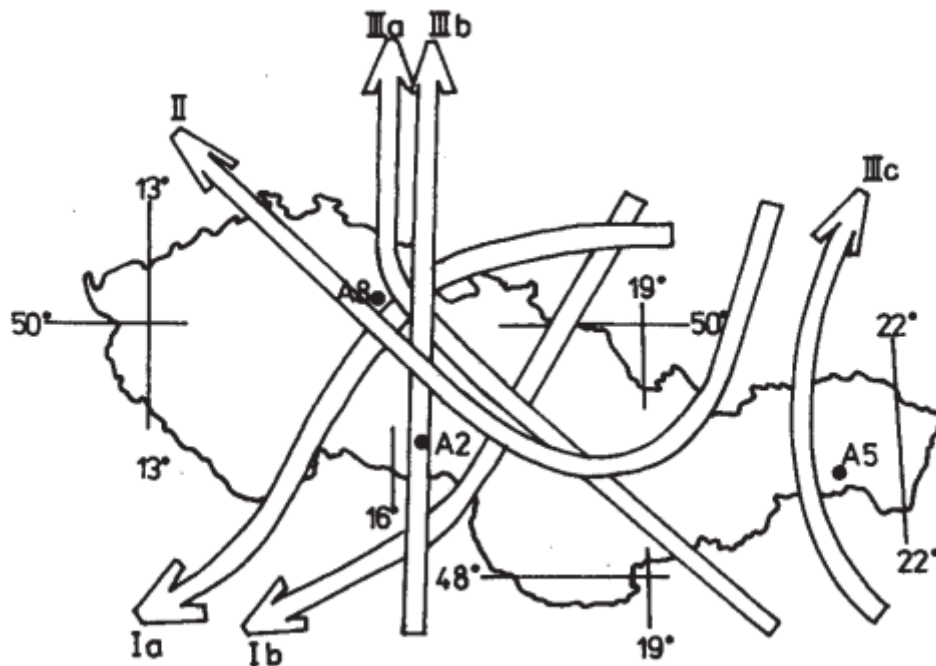
Exploze uvolnila do atmosféry téměř 520 radionuklidů. Rozšířila kontaminaci nad obrovské části Sovětského svazu, nynějšího Běloruska, Ukrajiny a Ruska. Dle oficiální zprávy zemřelo na okamžité následky havárie 31 osob a dalších 600 000 likvidátorů, podílejících se na hašení požárů a odklízecích pracích, bylo vystaveno vysokým dávkám radiace. Oficiální zprávy uvádějí, že jen na území Běloruska, Ukrajiny a Ruska bylo vystaveno radiaci přibližně 8 400 000 lidí a jen v těchto třech zemích bylo kontaminováno asi 155 000 km<sup>2</sup> radionuklidy jako <sup>137</sup>Cs a <sup>90</sup>Sr, které mají poločas rozpadu 30 a 28 let. (History of the United Nations and Chernobyl, 2004)

Až do třetího dne po havárii nebyly zveřejněny žádné informace. Teprve švédské úřady následně zaznamenaly zvýšené hodnoty radiace nad Evropou a oznámily světu, že někde v Sovětském svazu došlo k jaderné havárii. Sovětské úřady sice již před tímto oznámením prováděly nouzové operace, ale rozhodly se, že rozsah nehody v plné míře nezveřejní. Obyvatelstvo tak nemělo důležité informace, jako například zda mají opustit své domy, zda je bezpečné konzumovat místní produkty či vodu a další. Nebylo tak možné zahájit včas neodkladná ochranná opatření, kterými jsou ukrytí, jodová profylaxe a evakuace obyvatel. Včasné varování a informování by pomohlo lidem v okolí elektrárny vyhnout se kontaminaci jódem 131, který je nejnebezpečnější zhruba prvních 8 dní a způsobuje rakovinu štítné žlázy. (History of the United Nations and Chernobyl, 2004)

### **Projevy havárie v ČR**

V době Černobylské havárie byl státní dozor nad radiační ochranou v kompetenci ministerstev zdravotnictví České a Slovenské republiky. Jejich činnost realizovali hlavní a krajští hygienici. První známky příchodu kontaminovaných vzdušných mas nad naše území byly zaznamenány v průběhu noci z 29. na 30. dubna 1986. Odhalily je kontrolní měření jaderných elektráren, obdobně tak tomu bylo i ve většině ostatních zemí v Evropě.

Kontaminované masy prošly nad naším územím celkem třikrát. První průchod nastal 30. dubna, druhý pak 3. až 4. května a poslední 7. května (Obrázek 1). Při prvním průchodu dosahovala objemová aktivita řady radionuklidů desítek Bq/m<sup>3</sup>. Při druhém průchodu byly tyto hodnoty téměř třetinové a při posledním až desetinové. (Bučina et al., 1988)

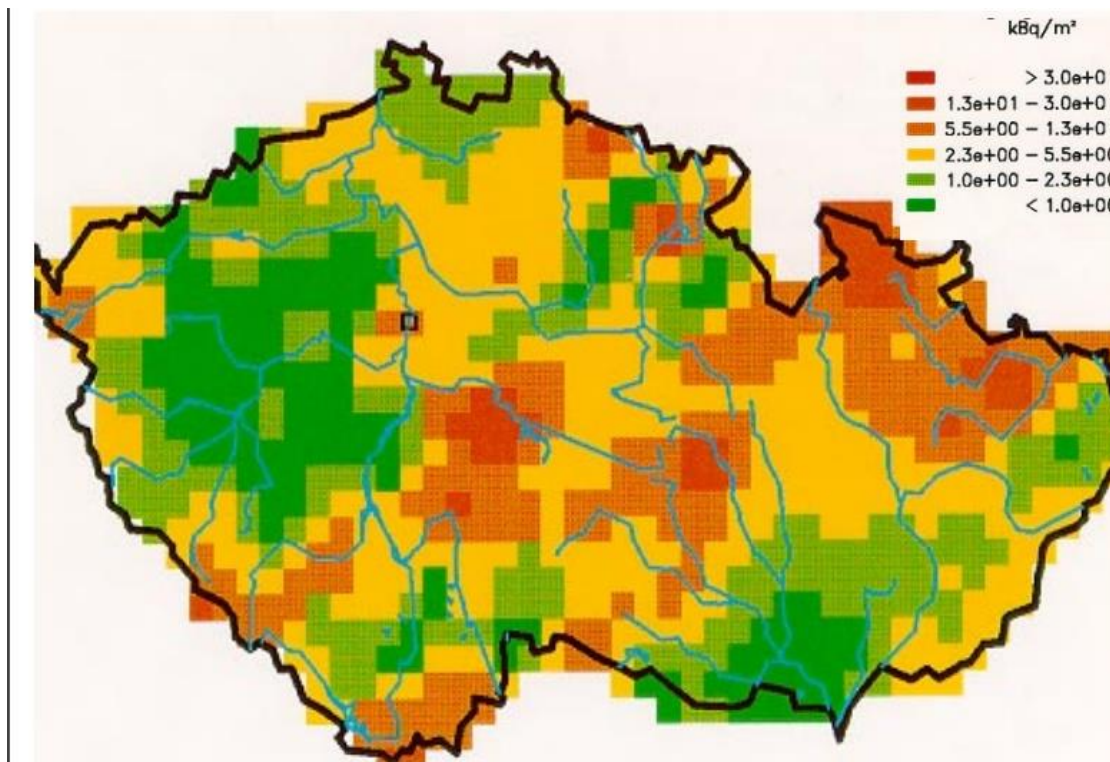


**Obrázek 1: Tři průchody kontaminovaných mas nad územím ČR**

**Zdroj: Některé výsledky monitorování následků Černobylské havárie v ČSSR, 2019**

Vládní havarijní komise tak dala pokyn k měření a vyhodnocování dat na krajských hygienických stanicích. Na základě měření aktivity radionuklidů v ovzduší a v radiačním spadu byly provedeny odhady dávek obyvatelstvu. Zvýšená pozornost byla věnována obsahu <sup>131</sup>I v mléce a čerstvé listové zelenině. Bylo doporučeno, aby byl dobytek, především dojnice, krmen suchým krmivem z předešlých let. Mléku a mléčným výrobkům byla věnována nejvyšší pozornost, protože právě ty jsou v počátečním období nejvýznamnějším příjmem radionuklidů <sup>131</sup>I, <sup>137</sup>Cs a <sup>134</sup>Cs. Expoziční cesta ingescí byla považována za významnější než příjem radionuklidů inhalací. Kulminace obsahu radioaktivního Cs v potravinách se očekávala až později, především v mase. Jako opatření byla zavedena regulace spotřeby zvěřiny, protože do jejího masa se radionuklid dostal z kontaminované půdy, odkud se vstřebal do rostlin a hub, které jsou její potravou. V polovině června 1986 bylo odebráno na území ČR 800 vzorků půd, na základě kterých

byla stanovena plošná aktivita a prostorová distribuce radionuklidů na území ČR (Obrázek 2). (Malátová, 2019)



**Obrázek 2: Plošná aktivita a prostorová distribuce radionuklidů na území ČR**

**Zdroj: Malátová, 2019**

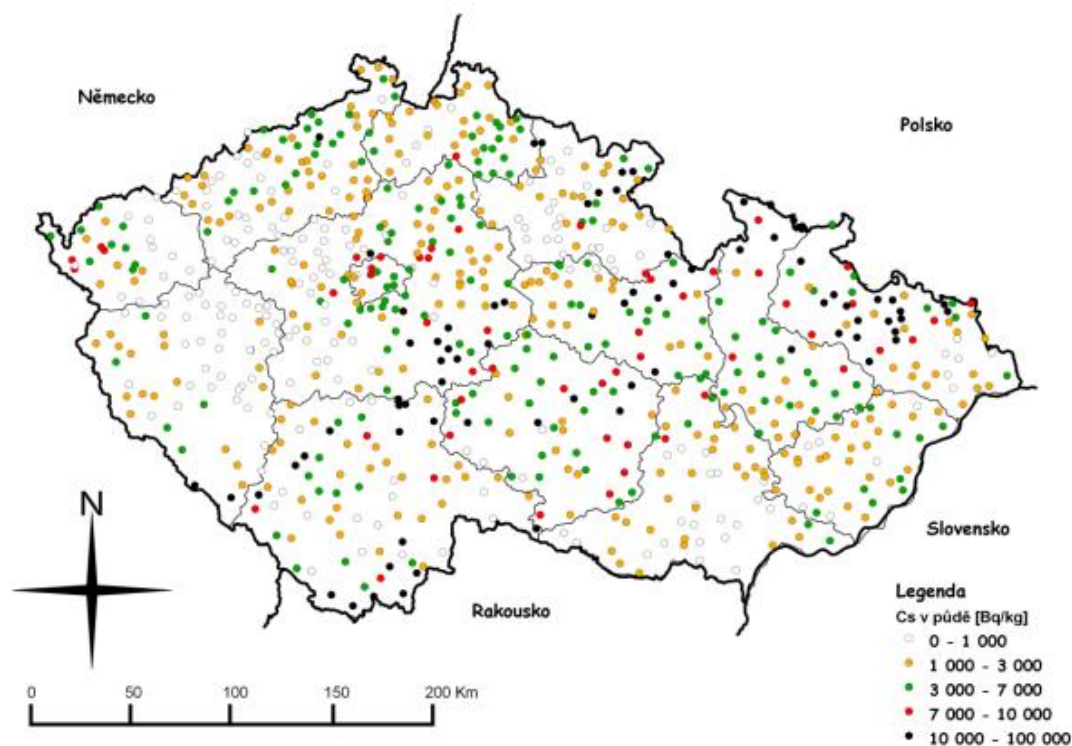
### *1.3 Kontaminace životního prostředí*

Životní prostředí bylo ve velké míře kontaminováno radionuklidy jak ze zkoušek jaderných zbraní v 60. letech, tak z jaderné havárie v Černobylu v roce 1986. Z hlediska dlouhodobé kontaminace životního prostředí je nejvýznamnějším a nejčastěji monitorovaným radionuklidem  $^{137}\text{Cs}$ , jehož poločas rozpadu je 30 let. (Cesium, 2019)

#### *1.3.1 Půda*

Půda je prvním článkem potravního řetězce člověka. Také proto bylo zahájeno monitorování jak zemědělské, tak neobdělávané půdy. Rozložení aktivit  $^{137}\text{Cs}$  v půdách je velice asymetrické. To je způsobeno především charakterem procesů, které měly vliv na kontaminaci našeho území při průchodu kontaminovaných vzdušných mas. Mezi tyto jevy patří především rychlost větru a dešťové srážky, kvůli kterým se radioaktivní částice

dostanou na zemský povrch (Danielová, 2019). Také distribuce radionuklidů v půdách je ovlivněna několika faktory. Mezi hlavní patří samotný vstup do půdy, který způsobují atmosférické srážky, dále působení kapilárních jevů, difúze, koloběh v kořenových systémech rostlin, a především činnost člověka a zvířat (Hájek, 2014). Těsně po havárii byly prováděny odběry vzorků z povrchu půd, postupem času se však cesium dostává do větších hloubek, především u obdělávaných půd (Danielová, 2019). V neobdělávaných půdách nalezneme největší koncentraci radionuklidů v horních 5 cm. Zemědělsky obdělávané půdy obsahují díky orbě radionuklidu v celé obdělané vrstvě (Hájek, 2014). Vlivem využívání půd v zemědělství dochází také k přechodu  $^{137}\text{Cs}$  do zemědělských plodin. Tento přechod závisí na formě radionuklidu, distribučním koeficientu v půdě, fyzikálně chemických vlastnostech půdy a distribučním koeficientu v plodině. Pomáhá nám znázornit přechodový koeficient, což je poměr měrné aktivity radionuklidu v rostlině a v půdě. U zemědělských rostlin se nemusíme bát kontaminace vyšší než několik Bq/kg, protože jejich přechodový koeficient je nízký (Danielová, 2019). Za poměrně významný můžeme považovat například přechod radionuklidů z neobdělávaných půd do mechů, lesních plodů a hub, které mají vysoký přechodový koeficient a jsou zároveň potravou pro lidi a lesní zvěř (Trnková, 2017). Pro odhad možného přestupu  $^{137}\text{Cs}$  do plodin byla na základě výsledků měření vzorků půd odebraných po havárii jaderné elektrárny Černobyl vytvořena mapa kontaminace půdy ČR (Obrázek 3). (Rulík a Helebrant, 2011)



**Obrázek 3: Mapa plošné kontaminace půdy<sup>137</sup>Cs**

**Zdroj: Rulík a Helebrant, 2011**

### 1.3.2 Flóra

Do veškeré flóry se cesium ihned po havárii dostalo přímým kontaktem následkem radiačního spadu. Postupem času se ale došlo k jeho omývání srážkami, či odnášení větrem a významnějším stal přechod cesia do rostlin kořenovým systémem z půdy. Nejvyšší koncentrace jsou měřitelné například v hřibovitých houbách, protože mají tendenci zadržovat těžké kovy včetně <sup>137</sup>Cs či <sup>210</sup>Pb (Kaňková, 2007). Státní ústav radiační ochrany provedl také měření obsahu <sup>210</sup>Pb a <sup>137</sup>Cs ve smrkových kůrčích na území ČR. Tato měření opět prokázala závislost kontaminace životního prostředí na rozložení srážek při průchodu radioaktivních mas nad naším územím (Pilátová et al., 2011). Při odebrání vzorků jak ze dřeva, tak i kůry smrku se prokázalo, že hmotnostní aktivita cesia v kůře je více než dvojnásobná oproti dřevu (Kaňková, 2007). V oblasti měření hmotnostní aktivity v houbách či rostlinách hraje důležitou roli již zmíněný přechodový koeficient. Různé rostliny totiž mohou mít rozdílnou tendenci absorbovat radionuklidy, a tak výsledky jejich měření nemusí jednoznačně prokázat, že právě v dané lokalitě je

kontaminace nejvyšší. Toto tvrzení potvrdil výzkum srovnávající měrnou aktivitu cesia v různých druzích mechu, kdy ačkoli v půdě pod mechem Rokytíkem skvělým byla naměřena nejvyšší měrná aktivita ze všech vzorků půd, v samotném mechu byla naopak naměřena nejnižší. Naopak tomu bylo u Ploníku ztenčeného, u kterého byla naměřena dokonce vyšší měrná aktivita než v půdě pod ním. (Trnková, 2017)

Z hlediska vnitřní kontaminace lidí hrají důležitou roli nejen již zmíněné houby, ale také lesní plody, které mají také vysokou tendenci absorbovat radionuklidy. Další možností, jak dochází k vnitřní kontaminaci lidí je konzumace těchto plodin, ale i konzumace masa lesní zvěře, pro kterou jsou právě zmíněné lesní porosty potravou. (Červinková, 2012).

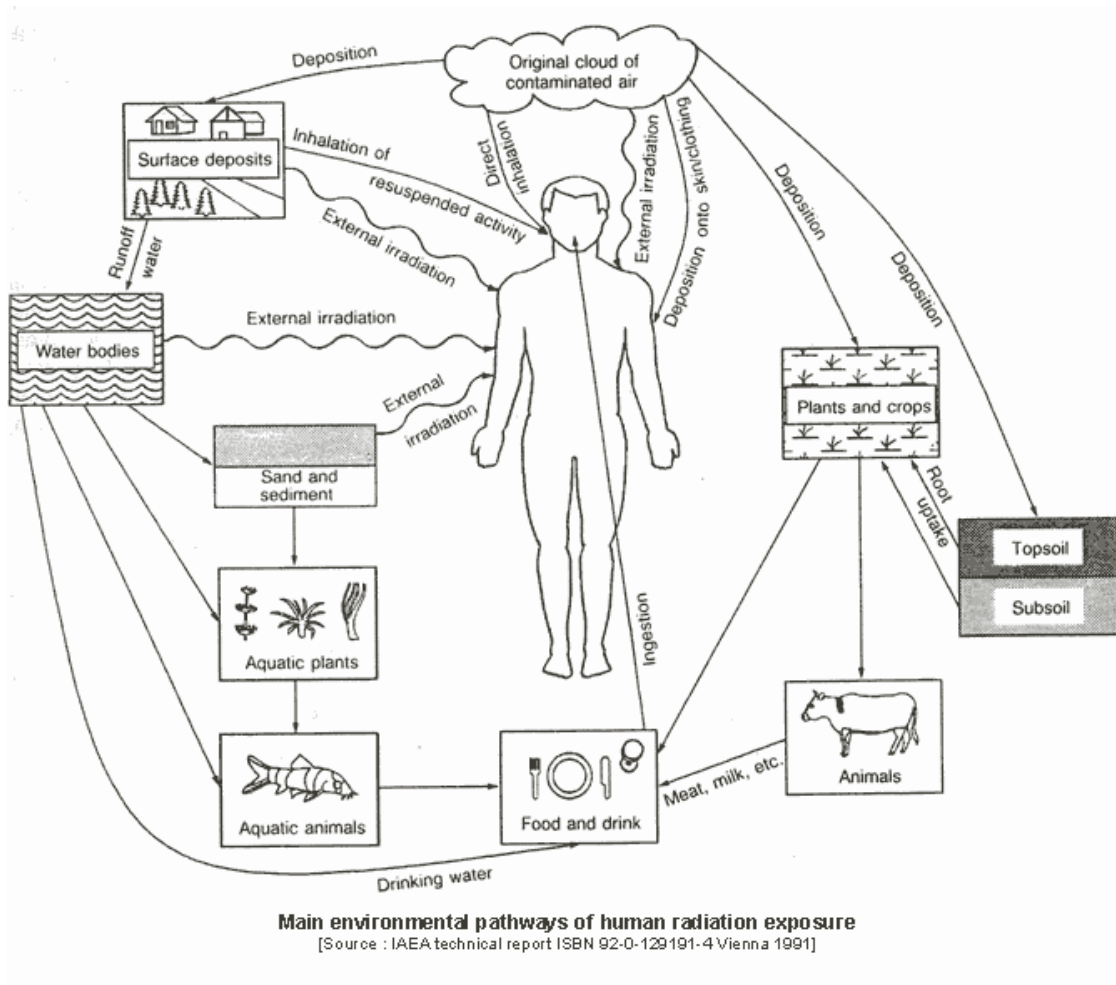
### 1.3.3 Fauna

Konzumací lesních plodů a lesního porostu se radionuklidy ve větší míře dostávají také do těl lesní zvěře. Konzumace jejich masa je pak jedním z nejvýznamnějších zdrojů vnitřní kontaminace osob. V severských zemích se prokázala vysoká míra přenosu radioaktivního cesia z mechu a lišejníků na soby a z jejich masa pak na lidi. U nás se tak obdobně dostává cesium z lesních plodů, porostů, hub či okusování kůry do masa zvěřiny (Venčovská, 2017). Již v roce 1986 krátce po havárii v Černobylu byla zaznamenána vyšší koncentrace  $^{137}\text{Cs}$  v mase prasete divokého. S případy jednotlivého nálezu vyššího obsahu cesia v mase se vždy zvýšil zájem o mapování kontaminace ekosystému. V letech 1994 až 1996 se jednalo o vyšší obsah  $^{137}\text{Cs}$  v jelením mase na Šumavě, o pár let později byly naměřeny zvýšené hodnoty v mase divočáků v Jeseníkách (Problematika kontaminace prasete divokého v ČR, 2012). Ještě 25 let po havárii v Černobylu se ve velké míře zabývali kontaminací životního prostředí a divoké zvěře i v Německu. Ačkoli jsou jejich lesy téměř 1500 km od Černobylu, byly hodnoty cesia v mase divočáků často až desetkrát vyšší, než je doporučený limit pro konzumaci a tisíckrát vyšší, než je běžný stav. Všechny kusy odlovené v zasažených oblastech tak musely být kontrolovány a enormně tak stouply výdaje vlády kompenzacemi, které vyplácela lovcům, pokud jejich úlovek musel být zlikvidován. Hranice, nad kterou není doporučováno konzumovat toto maso, byla stanovena na  $600 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ . (Germany's radioactive boars a legacy of Chernobyl, 2011)



#### *1.4 Expozice obyvatelstva*

Následkem Černobylské havárie došlo k přímé radiační expozici osob nacházejících se na místě havárie v době, kdy se udála, i během několika následujících dnů při zdolávání jejích následků. Tyto osoby ale zdaleka nejsou jediní nesoucí následky vystavení ionizujícímu záření. Nesmíme zapomínat na radioaktivní mrak, který se rozšířil téměř nad celou Evropu a způsobil kontaminaci obrovského území. Došlo ke kontaminaci osob inhalací částic ve vzduchu, či jejich usazením na kůži (The Chernobyl accident, 2002-2019). Radionuklidy se ovšem nahromadily i v životním prostředí, došlo například ke kontaminaci potravin, kdy krátce po havárii nebylo bezpečné konzumovat především zelenolistou zeleninu, nebo mléko, ve kterém se hromadil radioaktivní jód. Některé radionuklidy se díky krátkému poločasu rozpadu již z prostředí vytratily, jiné mají ovšem poločas rozpadu i několik desítek let, a tak se stále nacházejí v životním prostředí, kde kolují potravním řetězcem a přispívají k osobní roční dávce z přírodního prostředí (Obrázek 4). Následky pro obyvatelstvo tak byly a jsou nejen zdravotní, ale také sociální, psychické či ekonomické. (Plokhly, 2019)



**Obrázek 4: Způsoby kontaminace osob a koloběh  $^{137}\text{Cs}$  v potravním řetězci**

**Zdroj: Chernobyl Accident 1986, 2018**

### Zdravotní následky

Účinky ionizujícího záření můžeme z hlediska ozáření osob rozdělit na dvě skupiny: deterministické neboli tkáňové účinky a stochastické účinky. Deterministické účinky jsou charakteristické prahovou dávkou, po jejímž překročení dojde k projevení zdravotního poškození. Jde o tkáňovou reakci na ozáření, kdy s rostoucí dávkou se také zvyšuje závažnost poškození. Příkladem je akutní nemoc z ozáření, která se projeví při celotělovém jednorázovém ozáření překračující dávkou 0,7 Gy. Dále mezi ně patří akutní poškození kůže, účinek na plod v děloze, nebo poškození gonád způsobující pokles fertility. Těmito následky byli postiženi především lidé v bezprostřední blízkosti místa havárie a také velká část osob likvidujících následky havárie. Druhou skupinou jsou účinky stochastické. Tyto účinky nemají žádnou konkrétní prahovou dávku, charakterizuje je pouze pravděpodobnost jejich výskytu, která je lineárně rostoucí

s velikostí dávky. K jejich výskytu dochází po uplynutí poměrně dlouhé doby od ozáření ,mají vztah ke vzniku rakoviny a mohou se přenášet do další generace (genetické účinky). (Navrátil et al., 2016)

V prvních měsících po Černobylské nehodě byla nashromážděna data o bezprostředních následcích ozáření osob (deterministických účincích). S akutní nemocí z ozáření bylo ošetřováno celkem 237 osob. Po všech zhodnoceních se tato diagnóza prokázala u 134 osob a z nich 28 zemřelo v prvních čtyřech měsících po havárii. V letech 1987 až 1998 z tohoto souboru osob zemřelo dalších 11, jejichž smrt měla spojitost s komplikacemi souvisejícími s ozářením. (Patnáct let od Černobylu, 2001)

Mapování stochastických následků se potýká se zásadním problémem, kterým je nemožnost klinického rozlišení nádorů a dědičných následků způsobených ozářením od spontánně vzniklých případů. Zjišťování vyššího výskytu stochastických účinků je uskutečňováno pomocí skupinových šetření, která epidemiologickými metodami srovnává výskyt nádorů a genetických změn v populacích, které se liší mírou ozáření (Patnáct let od Černobylu, 2001). Vzhledem k dlouhé době latence vzniku těchto následků se začaly projevat až v roce 1990 a to zvýšeným výskytem rakoviny štítné žlázy u dětí a adolescentů žijících v nejvíc zasažených oblastech Běloruska, Ukrajiny a Ruské federace. Tato rakovina bývá způsobena například právě radioaktivním jódem, který se koncentroval v kravím mléce krátce po havárii. Dalšími druhy rakoviny, u nichž byl zaznamenán nárůst v oblastech nejvíce zasažených radioaktivním spadem, jsou leukémie, nebo rakovina prsu. Zapříčinění jejich vzniku vlivem radiace je ale těžko prokazatelné. (Health effects of the Chernobyl accident: an overview, 2006)

### **Psychologické následky**

Černobylská havárie vedla k rozsáhlému přesídlení osob ze zamořeného území, jehož následkem často i ke ztrátě ekonomické stability obyvatel. Mimo to je ovlivnila i hrozba dlouhodobých zdravotních následků. K tomu všemu patřily obrovské starosti, zmatek a nedostatek fyzické a emocionální pohody. U osob postižených havárií tak ještě dlouhá léta byla hlášena obrovská míra stresu, úzkosti a dalších lékařsky nevysvětlitelných příznaků. Postižená populace nebyla označována jako „oběti“ ale jako „přeživší“, což vedlo k pocitům bezmoci a nedostatečné kontrole budoucnosti. Měli tak nadměrné obavy o své zdraví, nebo se u nich naopak projevovalo bezohledné chování, jako je nadměrné užívání alkoholu a tabáku. (Health effects of the Chernobyl accident: an overview, 2006)

## **Ekonomické následky**

Během 20 let po havárii vzrostly náklady na stovky miliard dolarů. Tato částka zahrnuje výdaje spojené se škodami způsobenými přímo havárií, se zakonzervováním reaktoru, s vytvořením třicetkilometrové zóny kolem elektrárny, s přesídlením 330 000 obyvatel, zahrnuje i zdravotní péči o zasažené osoby. Sedm milionů Ukrajinců, Bělorusů a Rusů dostávalo finanční podporu od vlády, dalším výdajem byl také výzkum spojený s vyřešením produkce nekontaminovaných potravin, monitorováním kontaminace v životního prostředí, dekontaminace a zbavení se kontaminovaného odpadu a nesmíme zapomínat také na ztrátu z produkce energie ze samotné elektrárny a v neposlední řadě se zrušením Běloruského jaderného programu. (Amadeo, 2018)

### *1.5 Nejčastěji měřené prvky*

Během havárie v Černobylu uniklo do životního prostředí obrovské množství radionuklidů, mezi které patří například  $^{33}\text{Xe}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  a mnoho dalších. Z radiologického hlediska však nejvýznamnějšími radionuklidy na území SSSR bylo  $^{90}\text{Sr}$  a na území dnešní ČR pak  $^{131}\text{I}$  a  $^{137}\text{Cs}$ , protože tyto dva prvky mají největší podíl na radiační expozici populace. Jód má ovšem poločas rozpadu pouhých osm dní, a tak nemá v monitorování současné situace žádnou roli. Zato poločas rozpadu  $^{137}\text{Cs}$  činí 30 let, a tak je stále hlavním umělým radionuklidem, jehož výskyt je sledován v životním prostředí. Dalším důležitým monitorovaným prvkem je pak pro srovnání přírodní radionuklid  $^{40}\text{K}$ . (Pollanen et al., 1997)

#### *1.5.1 Cesium*

Cesium patří mezi alkalické kovy. Vyskytuje se přirozeně v kombinaci s dalšími prvky v zemské kůře, půdě a v malém množství v prachu. Využívá se v několika odvětvích průmyslu, například na přípravu hustých výplachů pro hlubinné vrtání, či ve fotočláncích pro přímou přeměnu světelné energie na elektrickou. Přirozeně se vyskytuje pouze  $^{133}\text{Cs}$ , při jaderných explozích či při rozpadu uranu v palivových článcích vznikají jeho radioaktivní izotopy  $^{134}\text{Cs}$  s poločasem rozpadu dva roky a  $^{137}\text{Cs}$  s poločasem rozpadu 30 let (Cesium, 2019). Při svém rozpadu uvolňuje  $^{137}\text{Cs}$  záření beta i gama (Caesium 137, 2019). Využívá se k procesu sterilizace v potravinářství,

nebo nemocničního prostředí. V medicíně se dále používá například v brachyterapii nebo v teleterapii k léčbě nádorů (Cesium CS-137, 2019).

### 1.5.2 Draslík

Draslík, stejně jako cesium, patří mezi alkalické kovy. Je měkký, stříbřitý a vyskytuje se v zemské kůře, mořské vodě a živých organismech. Je důležitým kationtem v intracelulární tekutině buněk, a jelikož je silný elektrolyt, hraje významnou roli v udržování acidobazické rovnováhy (Potassium, 2019). Přírodní draslík je směs radioaktivního  $^{40}\text{K}$  a dvou stabilních izotopů  $^{39}\text{K}$  a  $^{41}\text{K}$ . Izotop  $^{40}\text{K}$  je nejrozšířenějším přírodním radionuklidem na zemi. (Draslík, 2009-2017)

### 1.6 Způsoby měření

Oblast zabývající se měřením ionizujícího záření se nazývá dozimetrie. Detekční metody i radiometrické přístroje jsou založeny na fyzikálních, chemických či jiných změnách vlastností látky, která tvoří detektor (Prouza a Švec, 2008). Tyto změny se dějí jako důsledek interakce záření s touto látkou a jejich měřením lze kvalitativně či kvantitativně posoudit pole záření, vlastnosti zdroje záření a míru působení IZ na objekty, či prostředí, na které dopadá. Dozimetr se z pravidla skládá z čidla neboli detektoru záření a aparatury zařízení, které zpracují a převedou odezvu do formy použitelné k registraci a interpretaci. Některé dozimetry jsou vystaveny poli záření i s vyhodnocovací aparaturou, jiné zase vystavují záření detekční čidlo a vyhodnocení odezvy se provádí až odděleně v měřicím a registračním zařízení. Většina laboratorních detekčních systémů má detekční čidla ohraničená stínícím materiálem, kam se umístí měřený vzorek. Tato čidla jsou propojena s měřicími a vyhodnocovacími zařízeními. Podle účelu můžeme detekční systémy dělit na: (Navrátil et al., 2016)

- Spektrometry: měří aktivitu či fluenci IZ
- Radiometry: slouží k odhadu dávky, dávkového příkonu, povrchové kontaminace v daném prostoru, nebo místě
- Radiometrická zařízení: především k průmyslovým aplikacím radionuklidů. Obsahují jak detekční aparaturu, tak i zdroj záření

### 1.6.1 Polovodičová gama spektrometrická analýza

Principem měření polovodičovým detektorem jsou vlastnosti polovodičových materiálů, kterými jsou především křemík či germanium. Ty jsou vodivé pouze v případě, že elektrony z valenčního pásu jsou vybudeny do vodivostního pásu, kde se mohou stát nosiči elektrického náboje. Nejčastěji používaným detektorem k detekci gama fotonů je germaniový detektor z velmi čistého germania, zvaný HPGe-highpurity. Celý detektor je i s předzesilovačem vakuově uzavřen a chlazen tekutým dusíkem na teplotu  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ . To zamezuje uvolnění elektronu, který by se uvolnil přijetím tepelné energie z okolí detektoru. Energie fotonu gama zachycená na detektoru vytváří na elektrodách náboj, který je sečten předzesilovačem a přeměněn na napěťový impulz. Čím je energie fotonu větší, tím vznikne impulz o vyšším napětí (amplitudě). Počet detekovaných impulzů je tak úměrný aktivitě zdroje-počet absorbovaných fotonů za jednotku času. Základním principem spektrometrie gama je tak to, že: *„Amplituda detekovaných impulzů je přímo úměrná energii fotonů a četnost impulzů je přímo úměrná počtu fotonů emitovaných zdrojem, tj. aktivitě zdroje“* (Matzner, 2004, s. 50). Sledováním četnosti impulzů konkrétní amplitudy pomocí dalšího přístroje jsme tedy schopni stanovit aktivitu i identifikovat radionuklidy, pokud známe energii fotonů emitovaných konkrétními druhy radionuklidů. (Matzner, 2004)

## 2. Cíl práce a výzkumná otázka

Cílem diplomové práce je změřit obsah  $^{137}\text{Cs}$  v půdách odebraných pod a kolem korun listnatých stromů na území zasaženém radiačním spadem a zjistit, zda koruna stromu má vliv na distribuci cesia v půdách pod nimi.

Na základě cíle práce byla stanovena výzkumná otázka: *Mají koruny stromů vliv na distribuci  $^{137}\text{Cs}$  v půdách pod nimi?*

### 3. Metodika

V úvodu práce byla vypracována rešerše objasňující současnou radiační situaci a události a děje, které ji ovlivnily. Vychází z dostupných publikací, právních norem a literatury z této oblasti.

Praktická část se zabývá výzkumem vzorků odebraných pod korunami stromů a jejich následným měření polovodičovou spektrometrií gama za účelem stanovení hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$ .

Lokality pro odběr vzorků byly vybrány především tak, aby vyhovovaly podmínkám pro odběr a zároveň se nacházely na území zasaženém radiačním spadem. Důležitým aspektem byl výběr vhodného druhu stromu. Pro lepší prokazatelnost výsledků bylo stanoveno, že všechny stromy, pod kterými se odebíraly vzorky půd, budou listnaté. Ve všech lokalitách byly vzorky odebrány pod stejným stromem, a to ořešákem královským.

Ořešák královský obvykle dorůstá výšky 20-25 metrů a dožívá se až 100 let. Listy má lichozpeřené, složené z 5-9 tuhých tmavozelených lístků dlouhých 6-15 cm. Ořešák kvete od dubna do května a plodem jsou peckovice, zvané také vlašský ořech (Hejný a Slavík, 2003).

Tyto stromy se většinou nacházejí na zahradách. Majitelé stromů, pod kterými probíhal odběr vzorků, se zaručili za dostatečné stáří stromů (minimálně 45-50 let) potvrzující, že se tam nacházeli již v období havárie v Černobylu. Dále také bylo potvrzeno, že pod korunami stromů od té doby nedošlo k žádným výkopům, či jiným pracím, které by ovlivnily distribuci  $^{137}\text{Cs}$  v půdě. Souřadnice stromů, pod nimiž došlo k odběru, jsou uvedeny v Tabulce 1.

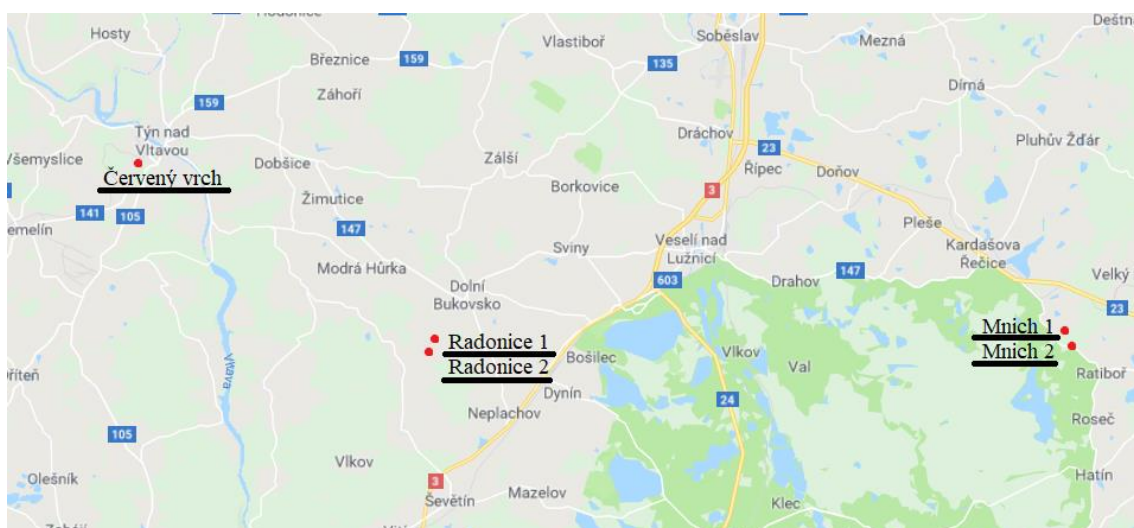


**Tabulka 1: GPS souřadnice stromů, pod kterými došlo k odběru vzorků**

GPS souřadnice	
Červený vrch	N 49°12.815'
	E 14°24.352'
Radonice 1	N 49°08.717'
	E 14°32.817'
Radonice 2	N 49°08.710'
	E 14°32.832'
Mnich 1	N 49°09.883'
	E 14°53.179'
Mnich 2	N 49°09.892'
	E 14°53.259'

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Vzorky byly odebrány celkem pod pěti stromy. První v lokalitě Červený vrch u Týna nad Vltavou, dva stromy v lokalitě Radonice a poslední dva v lokalitě Mnich (Obrázek 5).



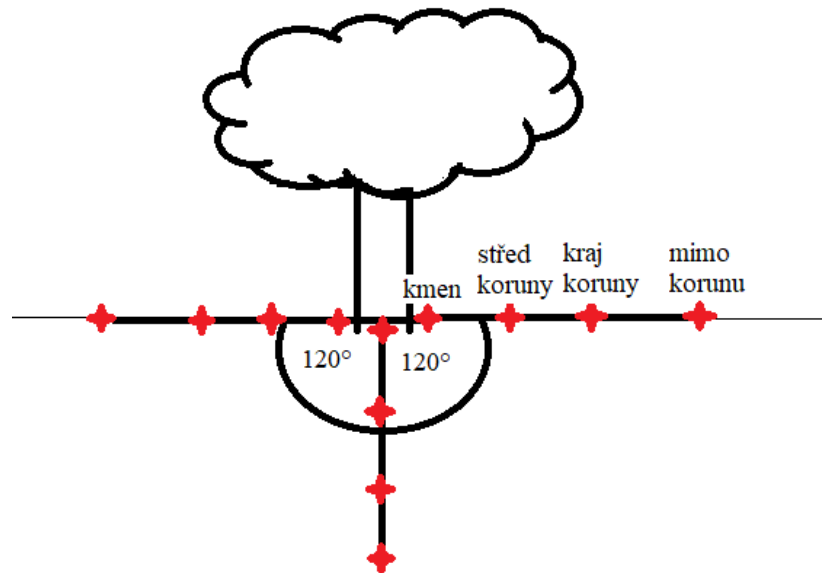
**Obrázek 5: Lokality stromů, pod kterými byly odebrány vzorky**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

### *3.1 Odběr vzorků*

Vzorky půd byly odebírány v období od července do září 2018. Všechny vzorky byly odebrány jednotnou metodikou. Nejdříve byly nalezeny stromy ořešáku královského, u kterých bylo potvrzeno stáří 45 a více let. Vybrané stromy se musely nacházet na území se sklonem maximálně 5°, kde nebyly v posledních 30 letech prováděny žádné výkopové, orné či jiné práce, které by ovlivnily přirozený koloběh <sup>137</sup>Cs. Půdy byly odebírány do tří

směrů směrem od kmene svírajících úhel  $120^\circ$ , vždy u kmene (kmen), v polovině koruny (mezi), na kraji koruny (kraj) a mimo korunu (mimo). Konkrétní místa odběru vzorků půd jsou znázorněny na Obrázku 6.



**Obrázek 6: Konkrétní místa odběru vzorků pod každým stromem**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Celkem tedy bylo odebráno 12 vzorků pod každým stromem. V každém odběrovém místě byl vyměřen čtverec o rozměrech 20x20 cm, v něm pomocí zahradní lopatky odebrána vrstva travnatého povrchu a pod ní odebrána půda do hloubky 5 cm (Obrázek 7). Půda byla vždy propustná, ale ne písčitá.



**Obrázek 7: Čtverec o rozměru 20x20 cm, ze kterého byla odebrána půda**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

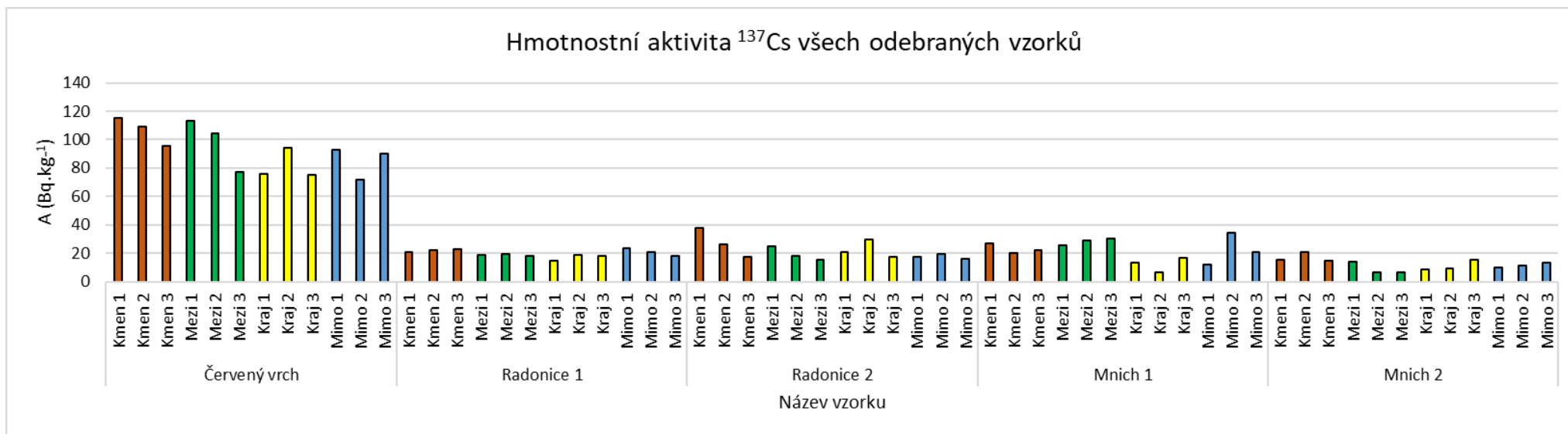
Půda byla odebírána vždy po alespoň týdnu sucha, a tak nebylo nutné půdu dále dosušovat. Vzorky byly zváženy a následně opakovaně prosety sítem s oky o průměru 0,5 cm, aby byly zbaveny kořínků, větších kamenů a dalších nečistot. Po prosetí byly vzorky opět zváženy. Vyčištěné vzorky suché půdy byly umístěny do měřících nádob a následně změřeny pomocí polovodičové gama spektrometrie.

## 4. Výsledky

Všechny hodnoty naměřené gama spektrometrií byly zaznamenány do tabulek a z hodnot byly vytvořeny pro lepší názornost grafy.

Výsledkem měření každého vzorku je hmotnostní aktivita  $^{137}\text{Cs}$ , jejíž jednotkou je becquerel na kilogram ( $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). V tabulkách je pro srovnání uvedena i hmotnostní aktivita přírodního radionuklidu  $^{40}\text{K}$ .

Souhrnně jsou všechny výsledné hodnoty hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  odebraných vzorků půd seřazené podle lokalit zobrazeny v Obrázku 8.



**Obrázek 8: Výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  všech vzorků půd ze všech lokalit**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Obrázek 8 znázorňuje souhrnné zobrazení všech výsledků měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  u vzorků půd odebraných z lokalit Červený vrch, Radonice 1, Radonice 2, Mnich 1 a Mnich 2. Nejvyšší naměřená hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  byla naměřena u vzorku odebraného u kmene ořešáku v lokalitě Červený vrch ( $115 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ). Nejnižší hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  byla neměřená u vzorku odebraného ze středu koruny v lokalitě Mnich 2 ( $6,35 \text{ Bq.kg}^{-1}$ ).

Všechny vzorky, jejich váha při odebrání, po prosetí i váha vzorku, která byla měřena polovodičovou gama spektrometrií a naměřené hodnoty  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{40}\text{K}$  jsou souhrnně uvedeny v Tabulce 2.

**Tabulka 2: Vzorky půd (lokalita, vzorek, váha po sběru, po prosetí, měřená hmotnost, hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  a hmotnostní aktivity  $^{40}\text{K}$ )**

	Název vzorku	Váha po sběru (g)	Váha po prosetí (g)	Měřená hmotnost (g)	$^{137}\text{Cs}$ ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )	$^{40}\text{K}$ ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )
<b>Červený vrch</b>	Kmen 1	1021	594	490	<b>115</b>	783
	Kmen 2	913	633	526	<b>109</b>	772
	Kmen 3	889	533	520	<b>95,7</b>	771
	Mezi 1	809	570	493	<b>113</b>	766
	Mezi 2	874	560	485	<b>104</b>	721
	Mezi 3	1095	791	486	<b>77,4</b>	753
	Kraj 1	957	581	516	<b>75,8</b>	707
	Kraj 2	1009	667	498	<b>94,3</b>	689
	Kraj 3	960	596	495	<b>74,8</b>	781
	Mimo 1	921	536	524	<b>93</b>	712
	Mimo 2	1106	620	480	<b>71,6</b>	783
	Mimo 3	1190	685	499	<b>90,3</b>	751
<b>Radonice 1</b>	Kmen 1	691	496	478	<b>20,8</b>	618
	Kmen 2	789	432	425	<b>21,9</b>	596
	Kmen 3	839	521	451	<b>22,5</b>	602
	Mezi 1	789	436	430	<b>18,6</b>	614
	Mezi 2	945	457	455	<b>19,3</b>	588
	Mezi 3	798	454	449	<b>18,2</b>	598
	Kraj 1	940	520	511	<b>14,7</b>	563
	Kraj 2	856	561	445	<b>18,6</b>	<b>486</b>
	Kraj 3	915	660	477	<b>18,2</b>	634
	Mimo 1	732	404	402	<b>23,3</b>	592
	Mimo 2	896	559	484	<b>20,7</b>	628
	Mimo 3	796	469	463	<b>18,1</b>	662

<b>Radonice 2</b>	Kmen 1	955	499	499	<b>38</b>	710
	Kmen 2	1051	631	631	<b>26,4</b>	785
	Kmen 3	943	524	524	<b>17,1</b>	682
	Mezi 1	853	479	479	<b>24,5</b>	614
	Mezi 2	921	459	459	<b>18</b>	674
	Mezi 3	897	448	448	<b>15,3</b>	738
	Kraj 1	1022	527	427	<b>20,7</b>	713
	Kraj 2	985	410	410	<b>29,9</b>	630
	Kraj 3	997	519	519	<b>17</b>	595
	Mimo 1	1132	620	497	<b>17,1</b>	641
	Mimo 2	892	443	443	<b>19,3</b>	693
	Mimo 3	926	427	427	<b>16,3</b>	760
<b>Mnich 1</b>	Kmen 1	1155	759	598	<b>26,6</b>	859
	Kmen 2	1336	876	567	<b>20,1</b>	875
	Kmen 3	1002	716	551	<b>22,2</b>	789
	Mezi 1	1120	723	590	<b>25,4</b>	903
	Mezi 2	1083	664	521	<b>29,1</b>	842
	Mezi 3	1269	968	539	<b>30,4</b>	800
	Kraj 1	1325	845	572	<b>13,5</b>	673
	Kraj 2	1764	905	708	<b>6,67</b>	617
	Kraj 3	1491	777	565	<b>16,4</b>	781
	Mimo 1	1490	809	583	<b>11,8</b>	659
	Mimo 2	1683	768	556	<b>34</b>	630
	Mimo 3	1487	545	530	<b>20,6</b>	624
<b>Mnich 2</b>	Kmen 1	1377	980	532	<b>15,6</b>	677
	Kmen 2	1232	945	527	<b>20,7</b>	718
	Kmen 3	1616	1153	545	<b>14,3</b>	669
	Mezi 1	1241	732	530	<b>13,8</b>	673
	Mezi 2	1460	850	538	<b>6,35</b>	872
	Mezi 3	1393	925	533	<b>6,43</b>	699
	Kraj 1	1563	997	534	<b>8,68</b>	726
	Kraj 2	1207	883	516	<b>8,92</b>	707
	Kraj 3	1369	971	497	<b>15,3</b>	629
	Mimo 1	1471	1030	536	<b>9,69</b>	587
	Mimo 2	1841	1205	497	<b>11,3</b>	600
	Mimo 3	1825	1010	548	<b>13,1</b>	578

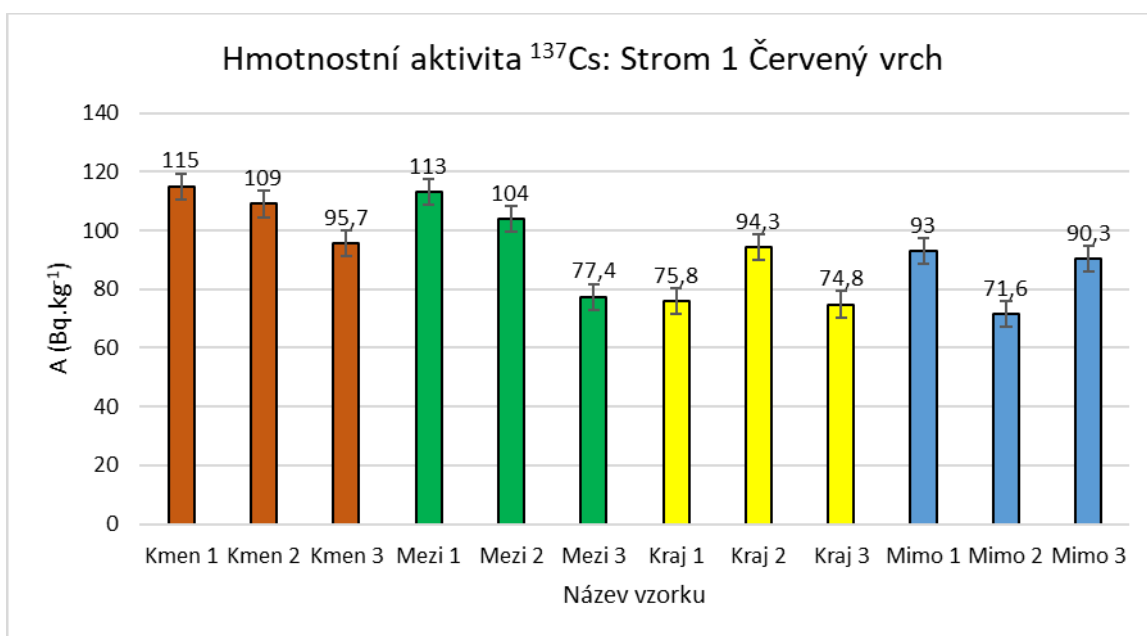
**Zdroj: Vlastní výzkum**

Na každém odběrovém místě bylo vždy odebráno 1-1,5 kg zeminy, po prosetí a vyčištění půdy se váha zredukovala zhruba na polovinu a měřené množství se pohybovalo kolem 500g čisté suché zeminy. Nejvyšší hodnoty byly jednoznačně naměřeny v první lokalitě Červený vrch, kde hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  dosahovaly až  $115 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Nejnižší hodnota byla naměřena naopak v poslední lokalitě Mnich 2 a to pouhých  $6,35 \text{ Bq.kg}^{-1}$ .

Hodnoty přirozeně se vyskytujícího radionuklidu  $^{40}\text{K}$  se pohybovaly na rozdíl od  $^{137}\text{Cs}$ , jehož hodnoty dosahovaly i v maximu pouze  $115 \text{ Bq.kg}^{-1}$ , v hodnotách několika stovek  $\text{Bq.kg}^{-1}$ . Nejvyšší hodnota byla naměřena v lokalitě Mnich 1 a to  $903 \text{ Bq.kg}^{-1}$  a nejnižší v lokalitě Radonice 1 a to  $486 \text{ Bq.kg}^{-1}$ .

#### 4.1 Výsledky měrné aktivity $^{137}\text{Cs}$ jednotlivých stromů

Konkrétní výsledky vzorků z první lokality Červený vrch jsou zobrazeny na Obrázku 9.



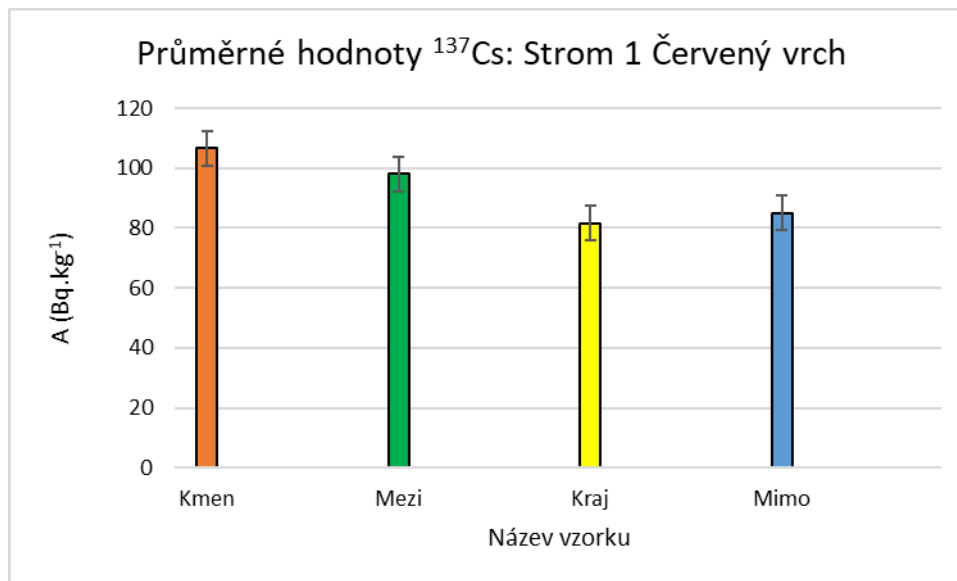
**Obrázek 9:** Výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  ve vzorcích půd z lokality Červený vrch

#### Zdroj: Vlastní výzkum

Na Obrázku 9 vidíme, že nejvyšší hodnota měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$   $115 \text{ Bq.kg}^{-1}$  byla naměřena u vzorku odebraného u kmene stromu. Nejnižší hodnota  $71,6 \text{ Bq.kg}^{-1}$  pak byla naměřena u vzorku odebraného zcela mimo korunu stromu. U všech tří směrů odběru vzorků byla nejvyšší hodnota naměřena vždy u vzorku půdy odebraným u kmene. Nejnižší hodnota pak byla většinou naměřena na okraji koruny, nebo zcela mimo korunu



Na Obrázku 10 jsou zobrazeny průměrné hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  všech tří hodnot z jednotlivých odběrových míst u daného stromu.

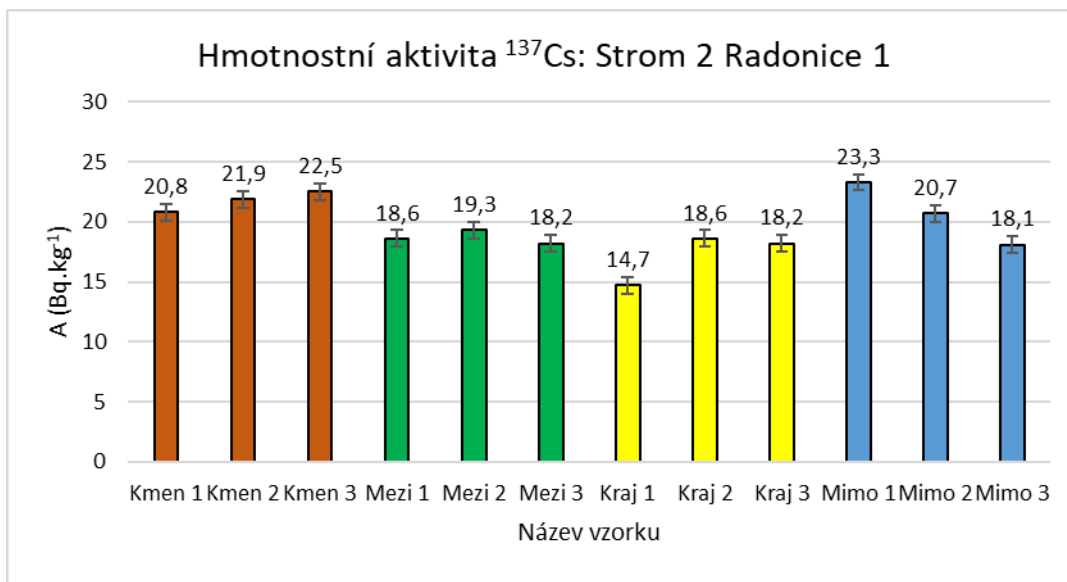


**Obrázek 10: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Červený vrch**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Na Obrázku 10 vidíme průměrné hodnoty měrných aktivit  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Červený vrch. Nejvyšší hodnoty byly v průměru naměřeny u kmene stromu. Nejnižší hodnoty byly naměřeny na kraji koruny.

Na Obrázku 11 jsou zobrazeny výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  u vzorků odebraných z lokality Radonice 1.

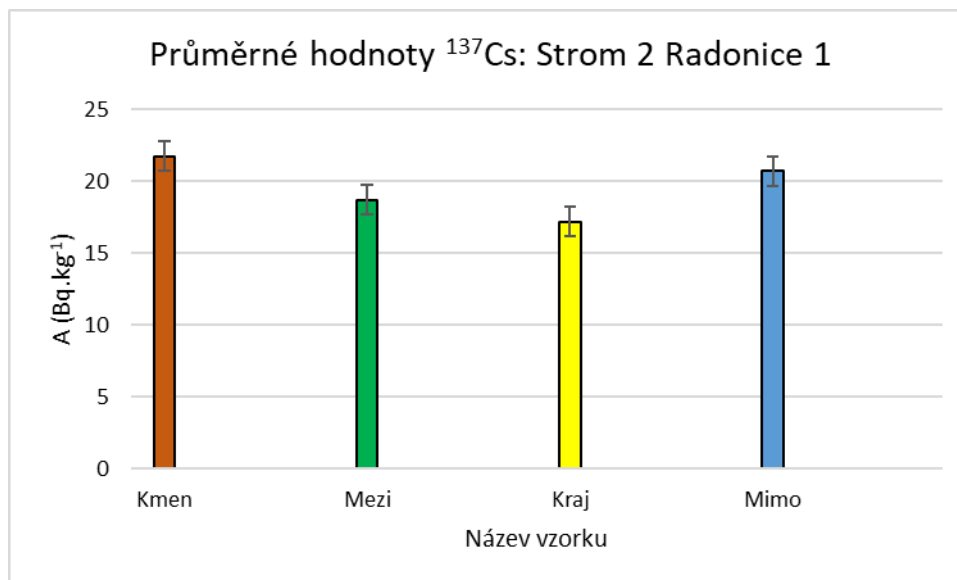


**Obrázek 11:** Výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  ve vzorcích půd z lokality Radonice 1

**Zdroj:** Vlastní výzkum

Na Obrázku 11 jsou zaznamenány výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z lokality Radonice 1. Nejvyšší hodnota měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  23,3 Bq.kg<sup>-1</sup> byla naměřena u vzorku odebraného mimo korunu stromu. Nejnižší hodnota 14,7 Bq.kg<sup>-1</sup> pak byla naměřena u vzorku odebraného na kraji koruny.

Na Obrázku 12 jsou zobrazeny průměrné hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  všech tří vzorků z jednotlivých odběrových míst u daného stromu.

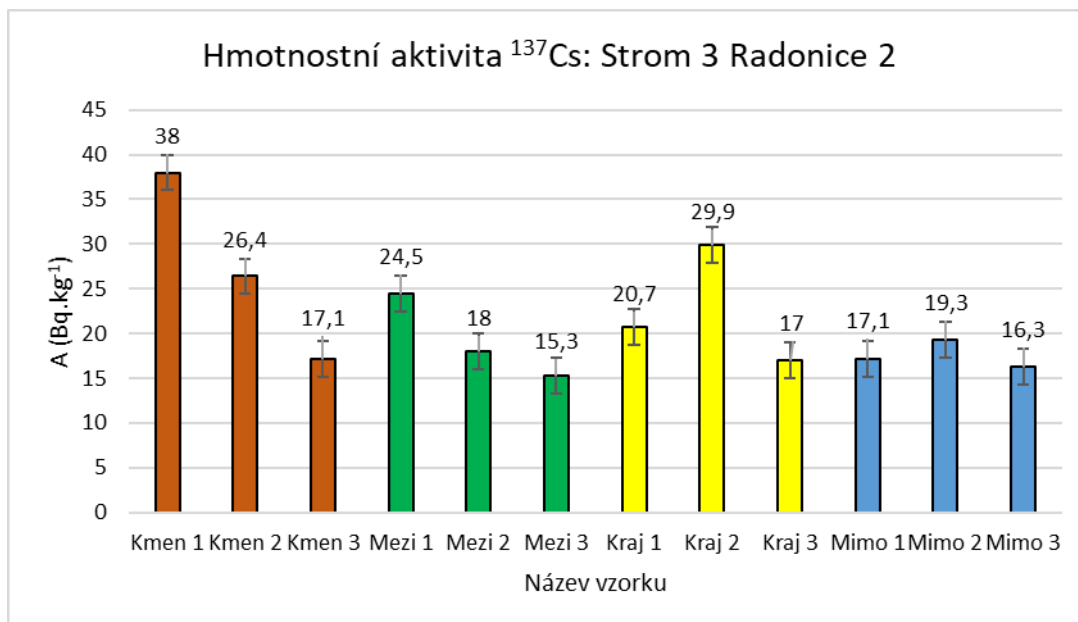


**Obrázek 12: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Radonice 1**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Na Obrázku 12 vidíme průměrné hodnoty měrných aktivit  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Radonice 1. Nejvyšší hodnoty byly v průměru naměřeny u kmene stromu. Nejnižší hodnoty byly naměřeny na kraji koruny.

Na Obrázku 13 jsou zobrazeny výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  u vzorků odebraných z lokality Radonice 2.

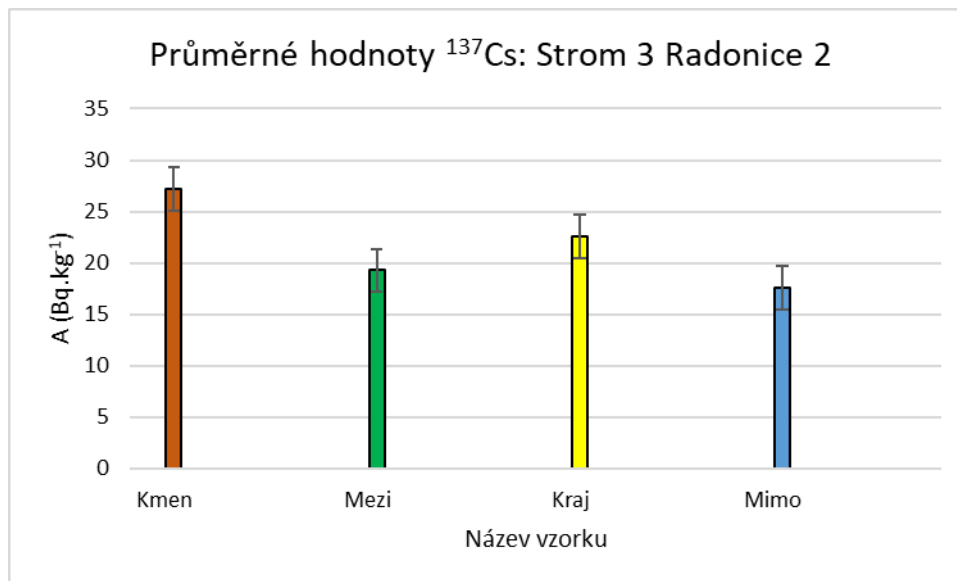


**Obrázek 13: Výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  ve vzorcích půd z lokality Radonice 2**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Na Obrázku 13 jsou zaznamenány výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z lokality Radonice 2. Nejvyšší hodnota měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  38 Bq.kg<sup>-1</sup> byla naměřena u vzorku odebraného u kmene stromu. Nejnižší hodnota 15,3 Bq.kg<sup>-1</sup> pak byla naměřena u vzorku odebraného v polovině koruny.

Na Obrázku 14 jsou zobrazeny průměrné hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  všech tří vzorků z jednotlivých odběrových míst u daného stromu.

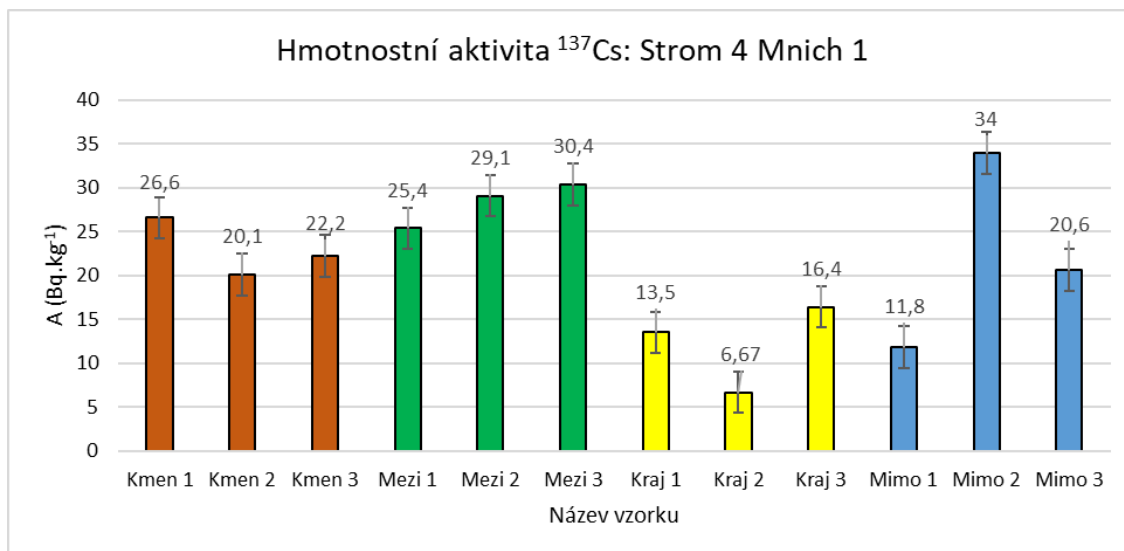


**Obrázek 14: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Radonice 2**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Na Obrázku 14 vidíme průměrné hodnoty měrných aktivit  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Radonice 2. Nejvyšší hodnoty byly v průměru naměřeny u kmene stromu. Nejnižší hodnoty byly naměřeny mimo korunu stromu.

Na Obrázku 15 jsou zobrazeny výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  u vzorků odebraných z lokality Mnich 1.

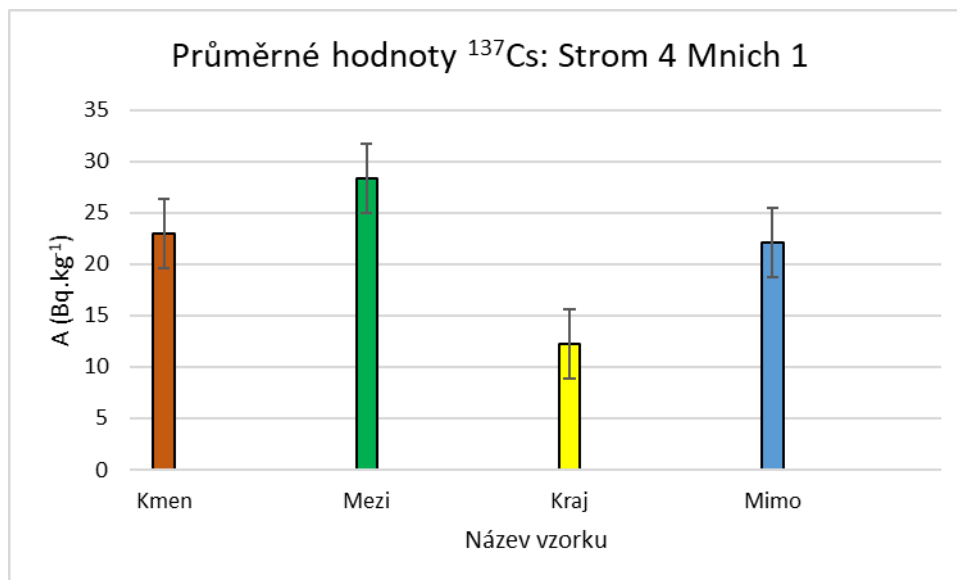


**Obrázek 15:** Výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  ve vzorcích půd z lokality Mnich 1

**Zdroj:** Vlastní výzkum

Na Obrázku 15 jsou zaznamenány výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z lokality Mnich 1. Nejvyšší hodnota měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  34 Bq.kg<sup>-1</sup> byla naměřena u vzorku odebraného mimo korunu stromu. Nejnižší hodnota 6,67 Bq.kg<sup>-1</sup> pak byla naměřena u vzorku odebraného na kraji koruny.

Na Obrázku 16 jsou zobrazeny průměrné hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  všech tří vzorků z jednotlivých odběrových míst u daného stromu.

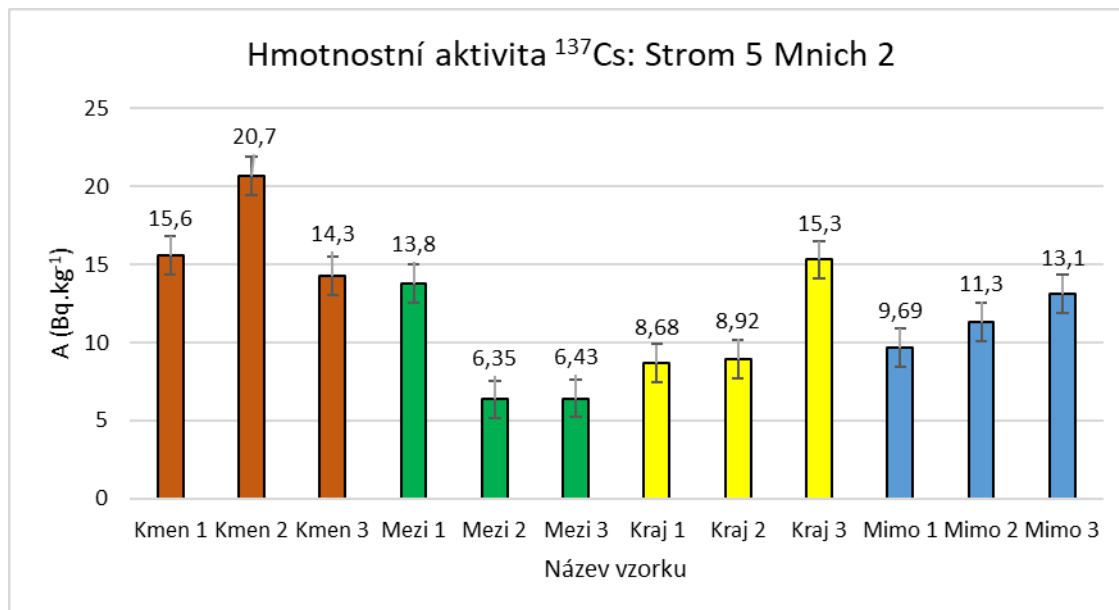


**Obrázek 16: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Mnich 1**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Na Obrázku 16 vidíme průměrné hodnoty měrných aktivit  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Mnich 1. Nejvyšší hodnoty byly v průměru naměřeny v polovině koruny stromu. Nejnižší hodnoty byly naměřeny na okraji koruny stromu.

Na Obrázku 17 jsou zobrazeny výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  u vzorků odebraných z lokality Mnich 2.



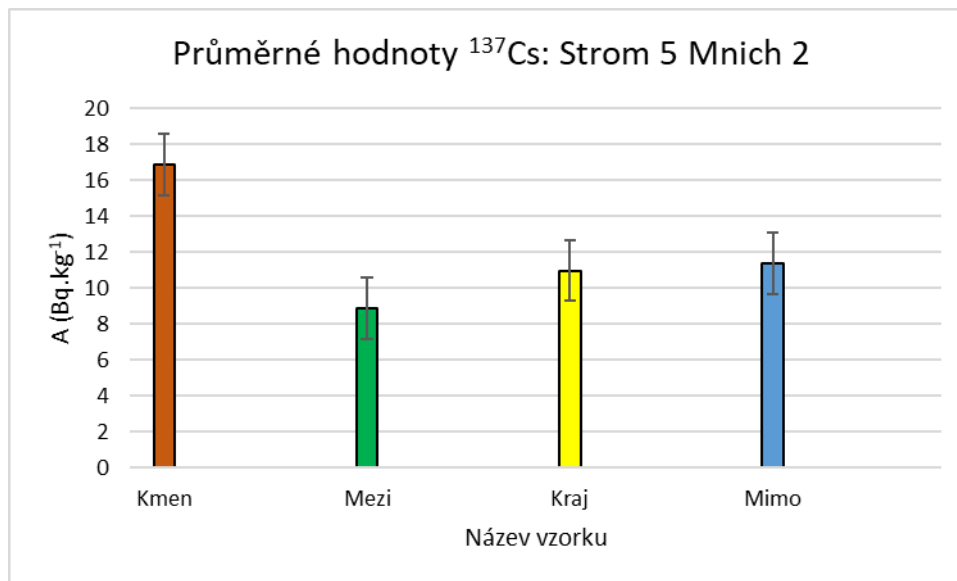
**Obrázek 17: Výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  ve vzorcích půd z lokality Mnich 2**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Na Obrázku 17 jsou zaznamenány výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z lokality Mnich 2. Nejvyšší hodnota měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  20,7 Bq.kg<sup>-1</sup> byla naměřena u vzorku odebraného u kmene stromu. Nejnižší hodnota 6,35 Bq.kg<sup>-1</sup> pak byla naměřena u vzorku odebraného v polovině koruny.



Na Obrázku 18 jsou zobrazeny průměrné hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  všech tří vzorků z jednotlivých odběrových míst u daného stromu.

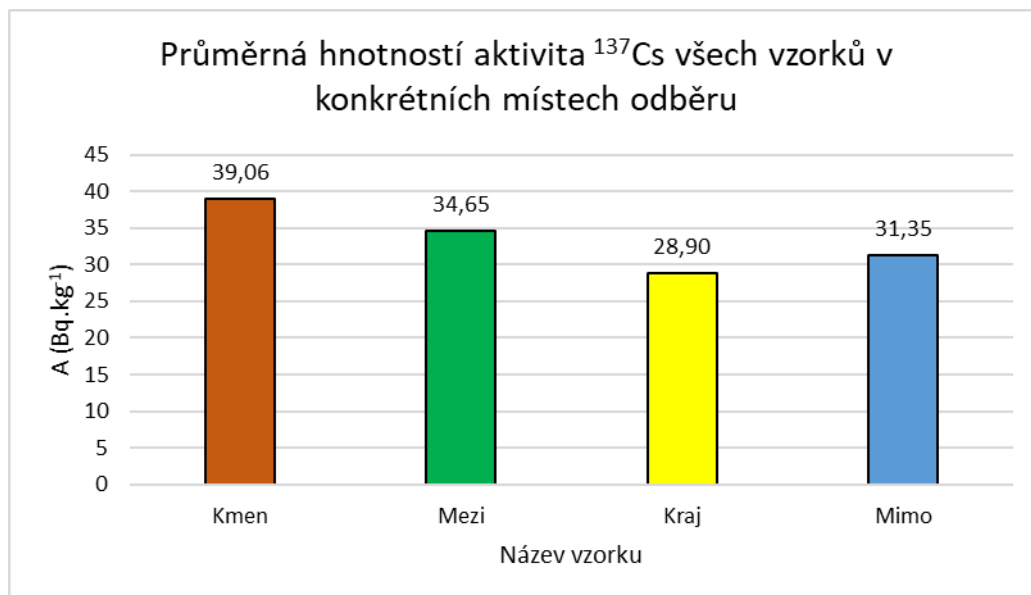


**Obrázek 18: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Mnich 2**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Na Obrázku 18 vidíme průměrné hodnoty měrných aktivit  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Mnich 2. Nejvyšší hodnoty byly v průměru naměřeny u kmene stromu. Nejnižší hodnoty byly naměřeny v polovině koruny stromu.

Na Obrázku 19 jsou zobrazeny průměrné výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  u vzorků od všech stromů, podle místa kde byly odebrány.

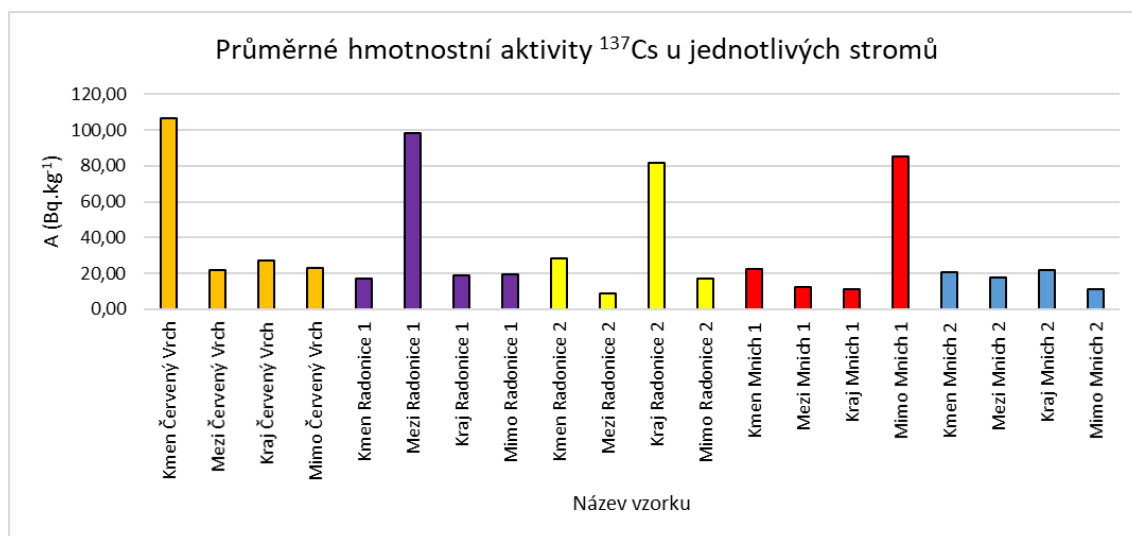


**Obrázek 19: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  všech vzorků dle konkrétního místa jejich odběru**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Na Obrázku vidíme, že průměrně nejvyšší hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  byly naměřeny u vzorků, které byly odebrány přímo u kmene stromu. O něco nižší hodnoty byly naměřeny v polovině koruny a vůbec nejnižší na okraji koruny stromů. Mimo korunu stromů hodnota měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  opět mírně stoupá.

Na Obrázku 20 jsou zobrazeny průměrné hodnoty hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z konkrétních míst odběru pod jednotlivými stromy.



**Obrázek 20: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  vzorků v konkrétních místech jejich odběru pod danými stromy**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

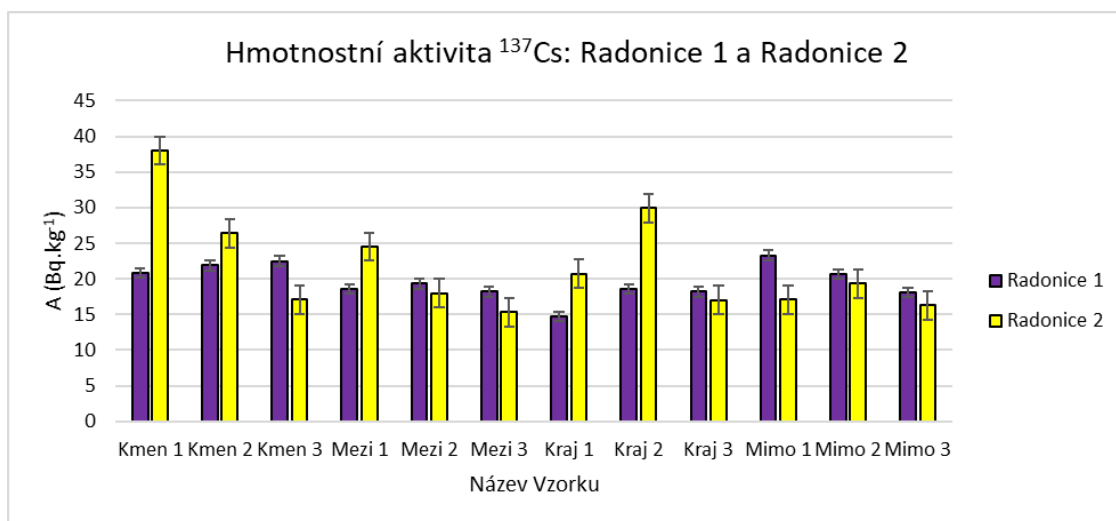
Na Obrázku 20 vidíme průměrné hodnoty měrných aktivit  $^{137}\text{Cs}$  vzorků v konkrétních místech jejich odběru pod danými stromy. Nejvyšší hodnoty byly v průměru naměřeny u kmene stromu z lokality Červený Vrch. Nejnižší hodnoty byly naměřeny v polovině koruny stromu z lokality Mních 2.

#### 4.2 Porovnání výsledků hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ u stromů ze stejné lokality

V lokalitách Radonice a Mních byly, na rozdíl od lokality Červený vrch, odebrány vzorky půdy pod dvěma stromy. Oba dva stromy z dané lokality se nacházejí na prostoru o výměru 100x100 m.

#### 4.2.1 Výsledky z lokality Radonice 1 a Radonice 2

Konkrétní výsledky obou stromů z lokality Radonice jsou uvedeny na Obrázku 21.

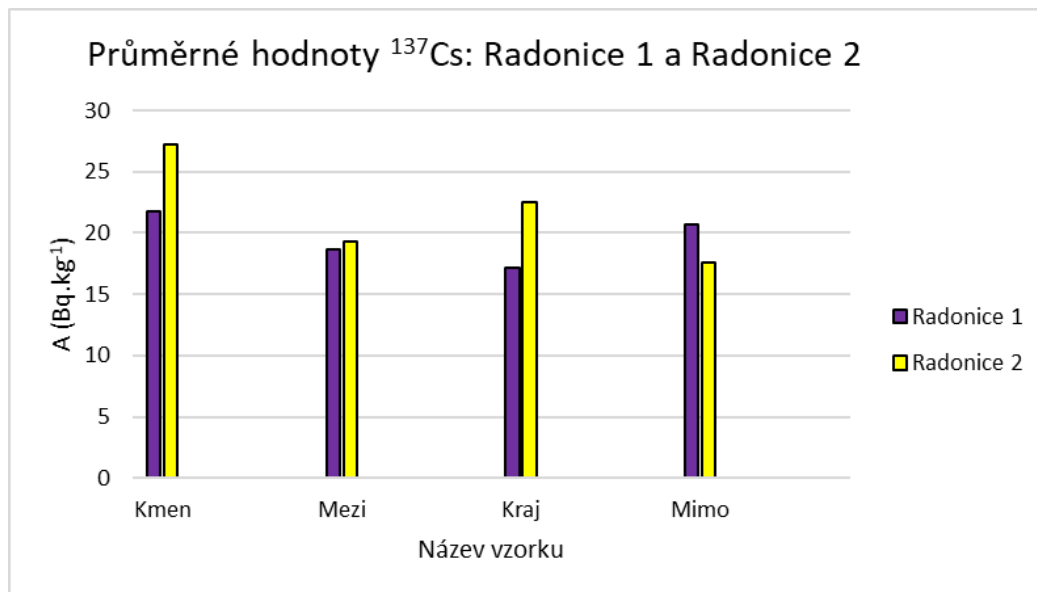


**Obrázek 21: Výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  ve vzorcích půd u obou stromů z lokality Radonice**

#### Zdroj: Vlastní výzkum

Na Obrázku 21 jsou zaznamenány výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  dvou stromů z lokality Radonice. Nejvyšší hodnota měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  u stromu Radonice 1  $22,5 \text{ Bq.kg}^{-1}$  byla naměřena u vzorku odebraného u kmene stromu. Nejnižší hodnota téhož stromu  $18,1 \text{ Bq.kg}^{-1}$  byla naměřena u vzorku odebraného mimo korunu stromu. Nejvyšší hodnota měrné aktivity u stromu Radonice 2  $38 \text{ Bq.kg}^{-1}$  byla naměřena u vzorku odebraného taktéž u kmene stromu. Nejnižší hodnota měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$   $15,3 \text{ Bq.kg}^{-1}$  u tohoto stromu pak byla naměřena u vzorku odebraného v polovině koruny stromu.

Na Obrázku 22 jsou zobrazeny průměrné hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  všech tří vzorků z jednotlivých odběrových míst u obou stromů.



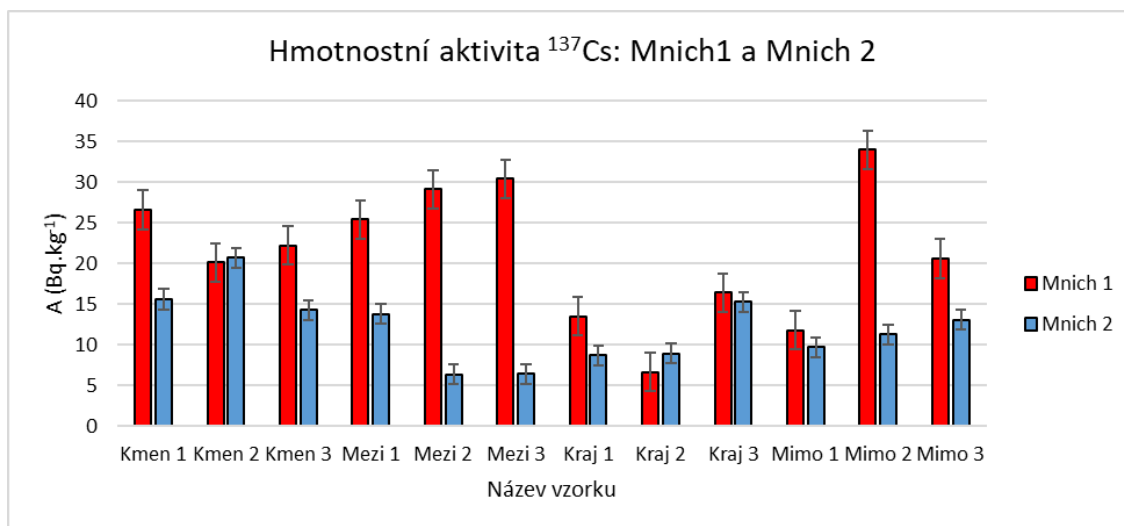
**Obrázek 22: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst obou stromů z lokality Radonice**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Na Obrázku 22 vidíme průměrné hodnoty měrných aktivit  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst u obou stromů v lokalitě Radonice. Nejvyšší hodnoty byly v průměru naměřeny u kmene stromu Radonice 2. Nejnížší hodnoty byly naměřeny na okraji koruny stromu Radonice 1.

#### 4.2.2 Výsledky z lokality Mnich 1 a Mnich 2

Výsledky hodnot měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  vzorků obou stromů z lokality Mnich jsou uvedeny na Obrázku 23.

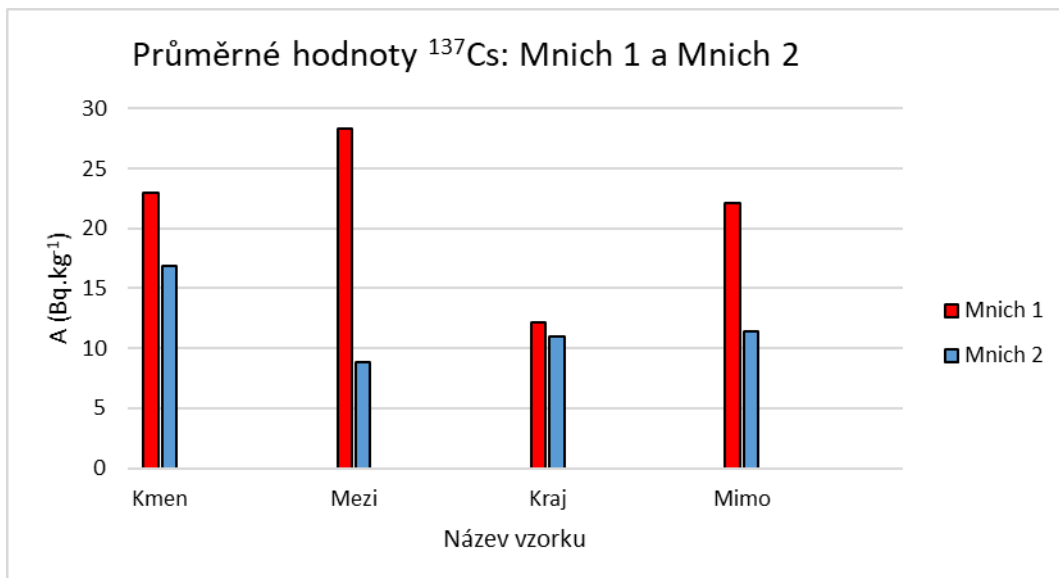


**Obrázek 23: Výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  ve vzorcích půd u obou stromů z lokality Mnich**

#### Zdroj: Vlastní výzkum

Na Obrázku 23 jsou zaznamenány výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  dvou stromů z lokality Mnich. Nejvyšší hodnota měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  u stromu Mnich 1  $34 \text{ Bq.kg}^{-1}$  byla naměřena u vzorku odebraného mimo korunu stromu. Nejnižší hodnota téhož stromu  $6,67 \text{ Bq.kg}^{-1}$  byla naměřena u vzorku odebraného na okraji koruny stromu. Nejvyšší hodnota měrné aktivity u stromu Mnich 2  $20,7 \text{ Bq.kg}^{-1}$  byla naměřena u vzorku odebraného u kmene stromu. Nejnižší hodnota měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$   $6,35 \text{ Bq.kg}^{-1}$  u tohoto stromu pak byla naměřena u vzorku odebraného v polovině koruny stromu.

Na Obrázku 24 jsou zobrazeny průměrné hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  všech tří vzorků z jednotlivých odběrových míst u obou stromů.



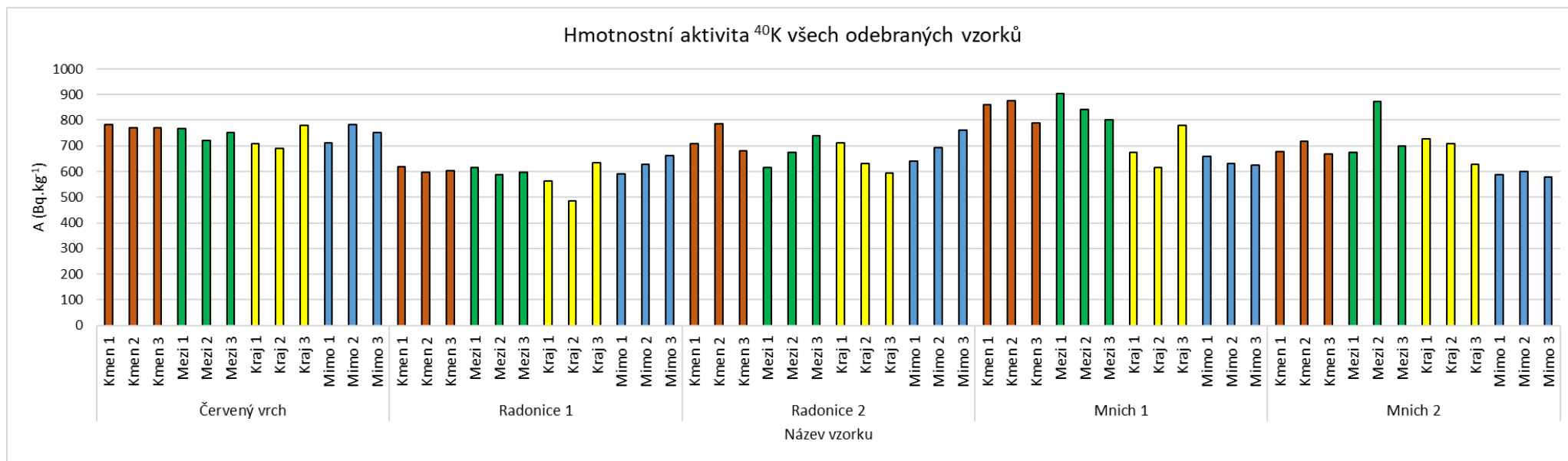
**Obrázek 24: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst obou stromů z lokality Mnich**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Na Obrázku 24 vidíme průměrné hodnoty měrných aktivit  $^{137}\text{Cs}$  z jednotlivých odběrových míst u obou stromů v lokalitě Mnich. Nejvyšší hodnoty byly v průměru naměřeny v polovině koruny stromu Mnich 1. Nejnižší hodnoty byly naopak naměřeny v polovině koruny stromu Mnich 2.

#### 4.3 Výsledky měření hmotnostní aktivity $^{40}\text{K}$

Ve vzorcích půd ze všech lokalit byla kromě hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  měřena také hmotnostní aktivita  $^{40}\text{K}$ . Výsledky hmotnostní aktivity  $^{40}\text{K}$  všech vzorků jsou hromadně znázorněny na Obrázku 25.



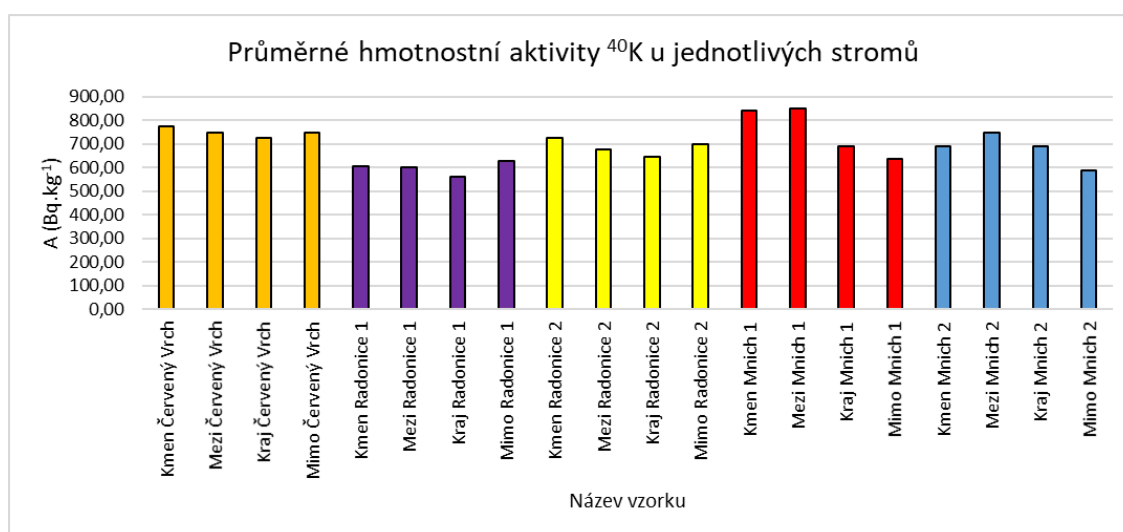
**Obrázek 25: Výsledky měření hmotnostní aktivity  $^{40}\text{K}$  všech vzorků půd ze všech lokalit**

**Zdroj: Vlastní výzkum**



Obrázek 25 znázorňuje souhrnné zobrazení všech výsledků měření hmotnostní aktivity  $^{40}\text{K}$  u vzorků půd odebraných z lokalit Červený vrch, Radonice 1, Radonice 2, Mnich 1 a Mnich 2. Nejvyšší naměřená hmotnostní aktivita  $^{40}\text{K}$  byla naměřena u vzorku odebraného v polovině koruny ořešáku v lokalitě Mnich 1 ( $903 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Nejnižší hmotnostní aktivita  $^{40}\text{K}$  byla neměřená u vzorku odebraného na okraji koruny v lokalitě Radonice 1 ( $486 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

Na Obrázku 26 jsou zobrazeny průměrné hodnoty hmotnostní aktivity  $^{40}\text{K}$  z konkrétních míst odběru pod jednotlivými stromy.



**Obrázek 26: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity  $^{40}\text{K}$  vzorků v konkrétních místech jejich odběru pod danými stromy**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

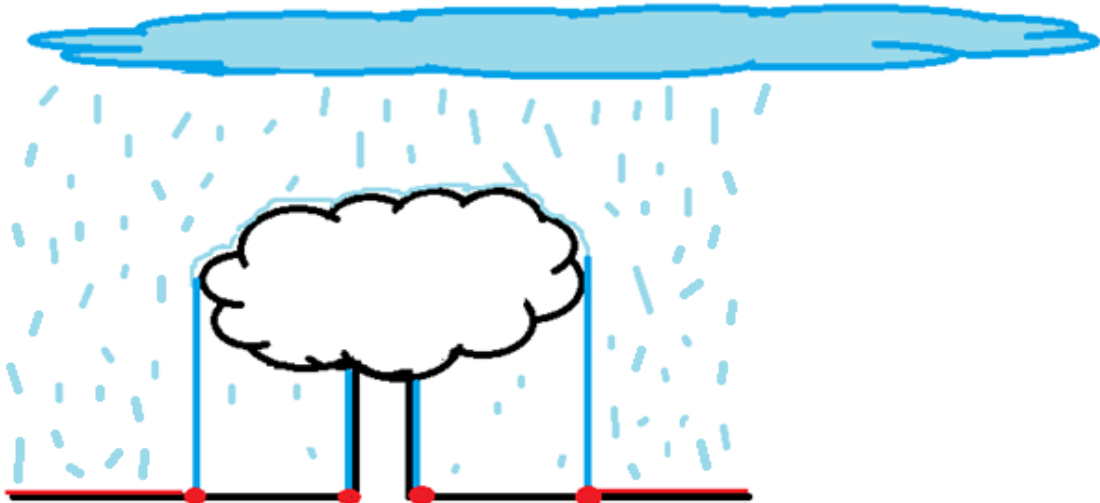
Na obrázku 26 vidíme průměrné hodnoty měrných aktivit  $^{40}\text{K}$  vzorků v konkrétních místech jejich odběru pod danými stromy. Nejvyšší hodnoty byly v průměru naměřeny v polovině koruny stromu z lokality Mnich 1. Nejnižší hodnoty byly naměřeny na okraji koruny stromu z lokality Radonice 1.

## 5. Diskuse

Z výsledku měření hmotnostní aktivity vzorků je jasné, že i když naměřené hodnoty jsou poměrně nízké, stále je dopad radiačního spadu po havárii v Černobylu znatelný. Tak máme možnost pokračovat v mapování dlouhodobých dopadů havárie a provádět výzkum za účelem poučení se a lepší připravenosti pro možnost vzniku další radiační havárie. Můžeme se tedy dozvědět, jak se uniklé radionuklidy chovají během spadu z radioaktivního mraku na zemský povrch a jaký je nadále jejich koloběh v životním prostředí. Významný vliv při jejich dopadu na zemský povrch mají nepochybně také koruny stromů, jejichž listy zachytí padající částice. Za účelem zhodnocení vlivu koruny stromu na kontaminaci životního prostředí byla vypracována tato práce.

Cílem diplomové práce bylo změřit obsah  $^{137}\text{Cs}$  v půdách odebraných pod a kolem korun listnatých stromů na území zasaženém radiačním spadem a zjistit, zda koruna stromu má vliv na distribuci cesia v půdách pod nimi. Proto byla stanovena výzkumná otázka: Mají koruny stromů vliv na distribuci  $^{137}\text{Cs}$  v půdách pod nimi?

Radioaktivní masy vzniklé při radiační havárii v Černobylu se rozšířily v několika vlnách nad územím téměř celé Evropy. Některé oblasti byly kontaminovány více než jiné, především vlivem srážek v období průchodu radioaktivního mraku danou oblastí. Předpokladem pro tento výzkum byla hypotéza, že kontaminace zemského povrchu radioaktivním spadem je do velké míry ovlivněna korunami stromů (Obrázek 27). Koruna zachytí většinu částic a tak pod ní bude následná kontaminace nižší, než v okolí kde dopadu částic nic nebrání. Dalším výrazným modifikujícím faktorem jsou dešťové srážky, kdy déšť jednak podporuje vymývání radionuklidů z atmosféry a potom dešťové srážky stékají po listech směrem k okraji koruny, a tudíž v místě jejich dopadu na zem bude kontaminace vyšší. Dalším předpokladem bylo, že část srážek steče po větvích a následně kmeni stromu na zem a proto přímo u kmene bude kontaminace také zvýšená, ne-li zcela nejvyšší.



**Obrázek 27: Ilustrace předpokladu dopadu srážek společně s radionuklidy na a kolem koruny stromu**

**Zdroj: Vlastní výzkum**

Díky tomuto předpokladu byla také vybrána místa odběru vzorků tak, jak je znázorněno na Obrázku 6. Tedy u kmene, v polovině koruny, na okraji koruny a zcela mimo korunu stromu. Předpokladem bylo, že měření potvrdí, že nejvyšší aktivity  $^{137}\text{Cs}$  v půdě budou přímo u kmene stromu a na kraji koruny, oproti tomu pod korunou budou aktivity nejnižší.

### *5.1 Výsledky měrné aktivity $^{137}\text{Cs}$ jednotlivých stromů*

Všechny výsledky měření jsou souhrnně uvedeny v Tabulce 2, ve které vidíme, že hodnoty hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  se pohybovaly mezi  $6,35 \text{ Bq.kg}^{-1}$  v lokalitě Mnich 2 až  $115 \text{ Bq.kg}^{-1}$  v lokalitě Červený vrch. Hodnoty  $^{40}\text{K}$  se pohybovaly mezi  $486 \text{ Bq.kg}^{-1}$  v lokalitě Radonice 1 až  $903 \text{ Bq.kg}^{-1}$  v lokalitě Mnich 1. Hodnoty  $^{137}\text{Cs}$  jsou sice měřitelné, ale dokonce i oproti přirozeně se vyskytujícímu radionuklidu jsou už o několik set  $\text{Bq.kg}^{-1}$  nižší.

#### **Strom 1 Červený vrch**

Výsledky hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  z první lokality Červený vrch jsou zaznamenány na Obrázku 9. Nejvyšší hodnota u tohoto stromu byla dle předpokladu naměřena u kmene stromu. Je to ovšem jen o pár becquerelů vyšší hodnota, než dvě hodnoty ze vzorků odebraných v polovině koruny, kde by naopak měly být výsledky nejnižší. Třetí hodnota

odebraná v polovině koruny již však odpovídá předpokládanému výsledku. Výchylna těchto dvou hodnot mohla být způsobena tím, že v období průchodu kontaminovaných mas a pádu radionuklidů na korunu byly v této části koruny listy prořídle, nebo byla koruna stromu nesouměrná a tak v těchto místech byly větve kratší. Dalším aspektem, který mohl mít na tuto okolnost vliv je vítr. Pokud v době dopadu částic foukal vítr, zanesl je v tomto směru dál pod korunu stromu. Na okraji koruny by hodnoty měly být téměř nejvyšší, tomu ale výsledky tohoto stromu neodpovídají. Pravděpodobně je to zapříčiněno tím, že vzorky byly odebírány na čtverci o výměru 20x20 cm a těžko se tak lze trefit do místa, kde se před třiceti lety, kdy se havárie odehrála, nacházel okraj koruny. Mimo korunu jsou již výsledky zase o něco vyšší. Z průměrů výsledků všech tří hodnot z konkrétního místa odběru pak jednoznačně vyplývá, že nejvyšší hodnoty byly naměřeny právě u kmene stromu.

Zajímavé také je, že hodnoty vzorků odebraných pod tímto stromem se pohybovaly okolo 100 Bq.kg<sup>-1</sup>. V ostatních lokalitách však výsledky nedosahovaly více než 30 Bq.kg<sup>-1</sup>. Způsobeno je to pravděpodobně tím, že v době průchodu radioaktivního mraku touto oblastí nastaly vydatné srážky.

### **Strom 2 Radonice 1**

Výsledky hmotnostní aktivity <sup>137</sup>Cs z druhé lokality Radonice 1 jsou znázorněny na Obrázku 11 a jejich průměry na Obrázku 12. Nejvyšší hodnoty byly opět naměřeny přímo u kmene stromu. V polovině koruny byly hodnoty o něco nižší, ale na kraji koruny, kde by měly být hodnoty vyšší, jsou naopak nejnižší ze všech míst odběru. Způsobeno je to pravděpodobně opět minutím místa kde se před 30 lety nacházel okraj koruny. Mimo korunu stromu jsou výsledky téměř stejně vysoké jako u kmene. To potvrzuje, že při radioaktivním spadu částicím nic nebránilo a dopadly volně na zemský povrch.

### **Strom 3 Radonice 2**

Výsledky měření hmotnostní aktivity <sup>137</sup>Cs z třetí lokality Radonice 2 jsou zobrazeny na Obrázku 13 a jejich průměrné hodnoty na Obrázku 14. Ačkoli výsledky jednotlivých vzorků kolísají, což může být způsobeno již zmíněnými okolnostmi a vlivy, průměrné hodnoty tří hodnot z konkrétního místa odběru tohoto stromu přesně odpovídají předpokladu, jaký vliv má na distribuci <sup>137</sup>Cs koruna stromu. U kmene jsou hodnoty jednoznačně nejvyšší, neboť po něm stékala kontaminovaná dešťová voda z listů a větví,

v polovině koruny hodnoty klesají, protože tento prostor byl zastíněn listy před dopadajícími částicemi a na okraji koruny jsou hodnoty opět vyšší což je způsobeno stékáním vody s radionuklidy po listech až na okraj, kde dopadly na zem. Tyto hodnoty jsou dokonce vyšší než mimo korunu stromu, kde jsou výsledky srovnatelné s výsledky vzorků z poloviny koruny.

#### **Strom 4 Mnich 1**

Výsledky hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  čtvrtého stromu a to z lokality Mnich 1 jsou znázorněny na Obrázku 15 a jejich průměrné hodnoty na Obrázku 16. U tohoto stromu je nejvyšší hodnotou výsledek jednoho vzorku odebraného mimo korunu, mimo něj jsou však nejvyšší hodnoty překvapivě u vzorků odebraných z poloviny koruny stromu. Na okraji koruny jsou pak naopak hodnoty nejnižší. Mohlo tedy dojít k tomu, že během třiceti let po havárii byla půda promíchána činností člověka, nebo byla půda pod stromem špatně propustná a tak se voda s radionuklidy tekoucí z kmene se nevsákla hned, ale až ve větší vzdálenosti od kmene. Nejnižší jsou pak hodnoty vzorků odebraných na okraji koruny. Místo kde byly vzorky odebrány, však mohlo minout konec koruny před 30 lety, pravděpodobně bylo zastíněno buď ještě korunou stromu, nebo jiným porostem, například křovím, které se tam již nevyskytuje.

#### **Strom 5 Mnich 2**

Výsledné hodnoty hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  ze vzorků od posledního stromu z lokality Mnich 2 jsou znázorněny na Obrázku 17. Průměry výsledků z konkrétních míst odběru pak na Obrázku 18. U tohoto stromu se opět projevil předpoklad o dopadu kontaminovaných srážek na distribuci cesia pod a kolem koruny stromu. Nejvyšší hodnoty jsou u kmene, v polovině koruny je kontaminace menší, na okraji koruny hodnoty opět stoupají vlivem dopadu srážek ztékajících po listech. Mimo korunu již výsledky opět odpovídají tomu, že srážky s radionuklidy dopadly na zemský povrch, aniž by jim něco stálo v cestě.

#### **Celkový průměr**

Na závěr byly zprůměrovány výsledky hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  všech 15 vzorků odebraných u kmenů měřených pěti stromů, stejně tak všechny vzorky z prostředku koruny, z okrajů koruny a odebrané mimo korunu stromů. Výsledné hodnoty těchto čtyř průměrů jsou znázorněny na Obrázku 19. Tento průměr prokázal, že předpoklad

o nejvyšší kontaminaci u kmene a na okraji koruny byl téměř správný. U kmene je opravdu hodna měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  nevyšší, protože se tam nahromadila voda s radionuklidy, která postupně z listů stékala na větve a dále po kmeni na zem. Na okraji koruny byly však naměřené hodnoty průměrně ze všech míst odběru nejnižší. Způsobeno je to však pravděpodobně tím, že je velice těžké odhadnout, kde přesně se okraj koruny nacházel tak, aby byl do tohoto prostoru umístěn čtverec 20x20 cm, ze kterého byly vzorky odebírány. Průměr hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  vzorků odebraných z poloviny koruny je sice dokonce vyšší, než u vzorků odebraných mimo korunu stromů, to však mají za následek především hodnoty od čtvrtého stromu, kde se tyto výsledky významně lišily od normálu. Pravděpodobné důvody této výchyly jsou již uvedeny přímo u výsledku tohoto stromu.

### *5.2 Porovnání výsledků hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ u stromů ze stejné lokality*

Pro odběr vzorků bylo vybráno pět stromů splňujících podrobná kritéria. Mezi ty patřilo například to, aby půda pod stromem nebyla obdělávaná a nedošlo tak k umělému promíchání cesia do hlubších vrstev. Aby se strom nacházel na rovině a nedocházelo tak k odplavení radionuklidů. Aby byl strom starý alespoň 45 let a v době havárie v Černobyli měl již rozsáhlejší korunu, aby pod stromem za posledních 33 neprobíhaly žádné výkopové ani jiné práce. Půda pod stromy aby byla propustná ale ne písčitá. Také aby strom stál osamoceně a prostor kolem něj a pod ním nebyl stíněn dalšími stromy či porosty a aby koruna všech vybraných stromů měla stejnou velikost listů, tudíž stejnou měrou bránila průniku kontaminovaných kapek na půdu pod ní. Těmto kritériím nejlépe vyhovoval strom ořešák královský, který se často nachází na zahradách. Majitelé zahrad tak mohli potvrdit nejen stáří stromů, ale například i to, že s půdou pod stromy se nijak nemanipulovalo. V lokalitách Radonice a Mnich se ořešáků na jedné zahradě vyskytovalo dokonce více a tak pro srovnání byly odebrány vzorky u dvou stromů.

#### **Radonice**

Výsledky hmotnostní aktivity  $^{137}\text{Cs}$  obou stromů z lokality Radonice jsou znázorněny na Obrázku 21. Srovnání průměrných hodnot z jednotlivých míst odběru těchto stromů pak na Obrázku 22. Ačkoli se oba dva stromy nacházejí na území o rozloze 100x100 m výsledky se v určitých místech odběru poměrně výrazně liší. První vzorek odebraný u kmene stromu Radonice 1 má téměř dvakrát nižší měrnou aktivitu než vzorek od stromu

Radonice 2. Na průměrných hodnotách ovšem můžeme vidět, že u obou stromů byla nejvyšší měrná aktivita  $^{137}\text{Cs}$  naměřena u vzorků odebraných u kmene. Průměrná hodnota vzorků odebraných pod korunami se téměř shoduje, koruny tedy mají stejný zastiňující efekt. Hodnoty z okrajů koruny se ale liší. Jak už bylo zmíněno dříve, příčinou je pravděpodobně minutí kraje koruny stromu Radonice 1. Mimo korunu stromů se výsledky lehce liší, ale v rámci chyby jsou srovnatelné.

## **Mnich**

Výsledné hodnoty stromů z lokality Mnich zobrazené na Obrázku 23 a 24 se poměrně výrazně rozcházejí. Zatímco strom Mnich 2 odpovídá předpokladu o distribuci  $^{137}\text{Cs}$  pod a kolem koruny stromu, strom Mnich jedna je úplným opakem tohoto předpokladu. Možné příčiny výchylek hodnot stromu Mnich 1 jsou diskutovány již u samotného výsledku tohoto stromu. Na srovnání těchto dvou stromů je názorně vidět, že i na poměrně malém území se výsledky mohou lišit. Vliv na to může mít velké množství faktorů: síla a směr větru, překážky a další porosty v okolí stromu, souměrnost koruny, hustota listů, propustnost půdy a další.

### *5.3 Výsledky měření hmotnostní aktivity $^{40}\text{K}$*

Polovodičovou spektrometrií gama nebyla změřena pouze hmotnostní aktivita  $^{137}\text{Cs}$  ale také přirozeně se vyskytujícího radionuklidu  $^{40}\text{K}$ . Výsledky všech odebraných a měřených vzorků jsou souhrnně znázorněny na Obrázku 25. Průměrné hodnoty z jednotlivých míst odběru pod každým stromem pak na Obrázku 26. Hodnoty hmotnostní aktivity  $^{40}\text{K}$  se pohybovaly mezi  $486 \text{ Bq.kg}^{-1}$  v lokalitě Radonice 1 a  $903 \text{ Bq.kg}^{-1}$  v lokalitě Mnich 1. Na první pohled je zjevné, že měrná aktivita  $^{40}\text{K}$  je o několik stovek  $\text{Bq.kg}^{-1}$  menší než měrná aktivita radionuklidu  $^{137}\text{Cs}$ , který se do půdy dostal následkem radiační havárie v Černobylu. Jelikož se  $^{40}\text{K}$  v půdě vyskytuje přirozeně, nemá koruna stromu žádný vliv na jeho distribuci v půdě. To je názorně vyobrazeno právě na Obrázku 25, kde nelze sledovat žádnou pravidelnost ani rozdílnost hodnot v různých místech odběru pod korunou stromu a kolem ní. Dokonce i u stromu z lokality Červený vrch, kde hmotnostní aktivita  $^{137}\text{Cs}$  výrazně převyšovala výsledky ostatních stromů, jsou hodnoty měrné aktivity  $^{40}\text{K}$  v půdě srovnatelné s ostatními stromy.

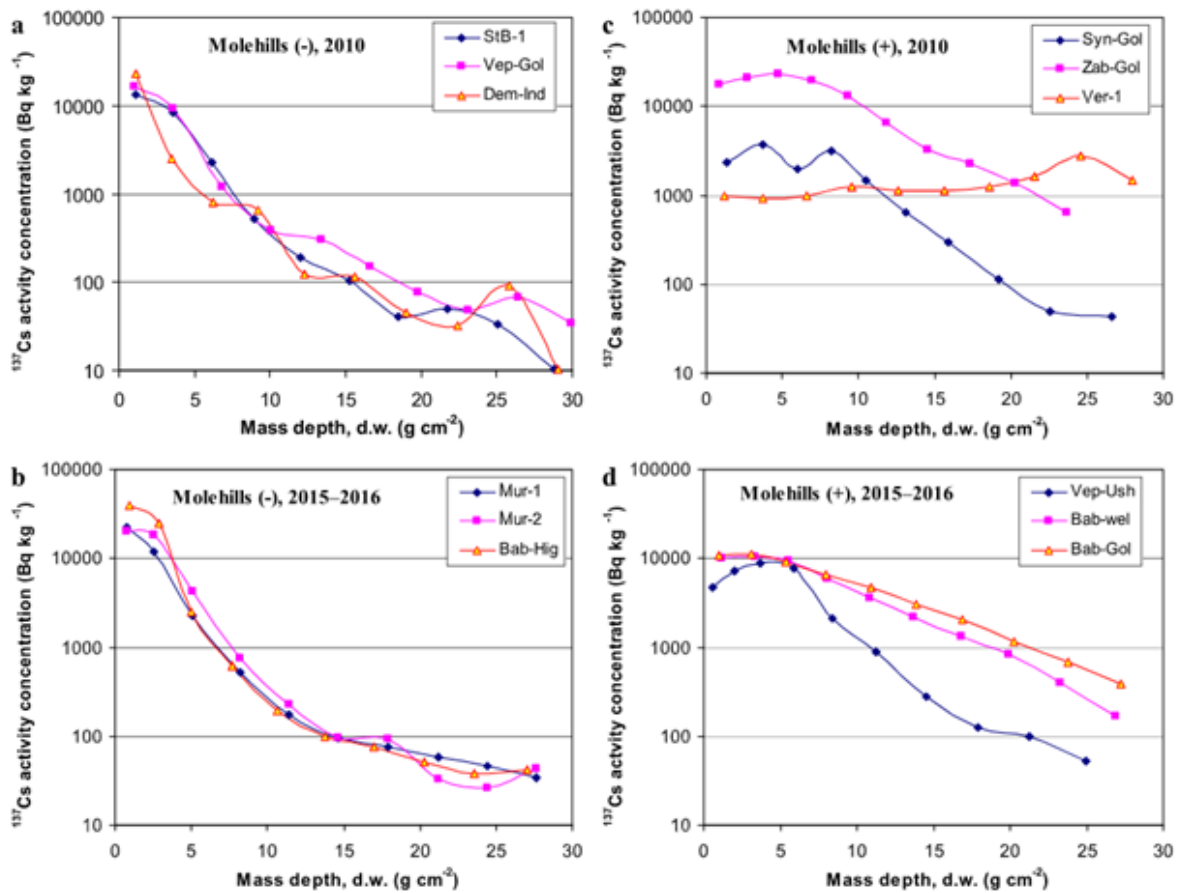
#### 5.4 Faktory ovlivňující distribuci $^{137}\text{Cs}$ v půdě

Distribuce  $^{137}\text{Cs}$  v půdě je značně nerovnoměrná. Způsobuje to množství faktorů. Jak prokázal tento výzkum, poměrně významným faktorem jsou i koruny stromů. Ještě než se ale radionuklidy vůbec dostanou na zemský povrch, hraje velice významnou roli také počasí. Radionuklidy jsou totiž ve formě kontaminovaných vzdušných mas roznášeny do okolí. Jakým směrem a do jaké vzdálenosti se dostanou, ovlivňuje především směr větru, jeho síla a také překážky, které mu stojí v cestě. Po střetu s překážkami totiž může začít cirkulovat a tím se radionuklidy nerovnoměrně rozmístí. Ještě významnějším faktorem než je vítr, jsou ale srážky. Ty na sebe váží radionuklidy ze vzdušných mas, a čím vydatnější v dané oblasti srážky jsou, tím více radionuklidů je sneseno na toto území. Tímto byla pravděpodobně ovlivněna výrazně vyšší měrná aktivita  $^{137}\text{Cs}$  v oblasti Červený vrch, kde byly odebrány vzorky půd pro tento výzkum. Distribuce radionuklidů po dopadu na zemský povrch je také ovlivněna sklonem povrchu. Pokud kontaminované srážky dopadnou na rovinu, distribuce bude poměrně rovnoměrná. Pokud ale dopadnou na oblast s větším sklonem, budou srážky po povrchu stékat a s nimi i radionuklidy. Proto byly vzorky pro tento výzkum odebrány vždy na rovinném povrchu. Do jaké hloubky se radionuklidy dostanou, je především dáno půdním typem. V případě těžkých jílovitých půd, kde se srážky obtížně vsakují, bude největší měrná aktivita u povrchu. Naopak u lehkých písčitých půd se srážky společně s radionuklidy vsáknou a dostanou do větších hloubek. V půdě se radionuklidy pomalu postupem let dostávají do větších hloubek. Tento proces ale může být ovlivněn činností člověka, jako jsou výkopové práce, stavby, či v případě zemědělské půdy její obdělávání a orba. Distribuce radionuklidů je pak významně nerovnoměrná. U neobdělávaných půd ale také existují faktory, ovlivňující distribuci radionuklidů.

Mezi lety 1999 až 2016 proběhl v Brjanské oblasti v západní části Ruska výzkum zabývající se vertikální distribucí  $^{137}\text{Cs}$  v půdách pastvin narušených krtky. Tato oblast byla v roce 1986 významně zasažena radiačním spadem z Černobylu. Hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  se pohybovaly mezi  $327 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$  až  $2360 \text{ kBq}\cdot\text{m}^{-2}$ . Tento výzkum prokázal, že v bodech odběru vzorků narušených krtky byla koncentrace  $^{137}\text{Cs}$  ve významně větší hloubce, než u vzorků odebraných na nenarušených plochách (Obr. 28). Rozdíl v rychlosti migrace  $^{137}\text{Cs}$  do větších hloubek v narušených a nenarušených bodech odběru vzorků půd přiměřeně koreloval s množstvím půdy, která mohla být vyhrabána krtky na



jednotku plochy za rok. Závěrem této studie tak je, že hrabavá aktivita krtek zvýšila vertikální migraci  $^{137}\text{Cs}$  z Černobylské havárie v půdách pastvin. (Ramzaev a Barkovsky, 2018)



**Obrázek 28: Vertikální distribuce  $^{137}\text{Cs}$  v svrchních 20 cm půdy pastvin v bodech nenarušených krtek (a, b) a v bodech narušených krtek (c, d) v letech 2010 a 2015- 2016**

**Zdroj: Ramzaev a Barkovsky, 2018**

Na Obrázku 28 v grafech a) a b) můžeme vidět, že na pastvinách nenarušených krtek je nejvyšší měrná aktivita  $^{137}\text{Cs}$  v prvních 5 cm pod povrchem (více než  $10\,000\text{ Bq.kg}^{-1}$ ) a v hloubce 15 cm již klesá až pod  $100\text{ Bq.kg}^{-1}$ . V grafech c) a d) jsou zaznamenány hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  vzorků půd odebraných z bodů narušených krtek. Hodnoty jsou opět ve svém maximu ve hloubce kolem 5 cm, ale na rozdíl od krtek nenarušených pastvin měrná aktivita klesá s hloubkou pomaleji, v některých případech je dokonce ve větší hloubce vyšší než u povrchu.

Z půdy se již radionuklidy dostávají do koloběhu, kdy se nejdříve kořenovým systémem vstřebávají do hub, lišejníků, rostlin a jejich plodů. Tím se jako zdroj potravy stávají zdrojem kontaminace zvíře (a lidí) a maso zvíře je pak zdrojem kontaminace osob.

## 6. Závěr

Cílem práce bylo změřit obsah  $^{137}\text{Cs}$  v půdách odebraných pod a kolem korun listnatých stromů na území zasaženém radiačním spadem a zjistit, zda koruna stromu má vliv na distribuci cesia v půdách pod nimi.

Nasbírané a vyčištěné vzorky půd byly změřeny polovodičovou spektrometrií gama a výsledky prokázaly, že ačkoli od havárie v Černobylu uběhlo více než třicet let, půdy jsou stále kontaminovány  $^{137}\text{Cs}$  uvolněným při této havárii. V porovnání s přirozeně se vyskytujícím radionuklidem  $^{40}\text{K}$  je ale vliv kontaminace  $^{137}\text{Cs}$  na většině území ČR již zcela zanedbatelný.

Nejvyšší hodnota měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  byla naměřena v lokalitě Červený vrch a to  $115 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Měrná aktivita vzorků půd odebraných z této lokality převyšovala výsledky ze všech ostatních lokalit až o několik desítek  $\text{Bq.kg}^{-1}$ , nejnižší naměřená hodnota byla naměřena v lokalitě Mnich 2 a to pouze  $6,35 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Způsobeno je to pravděpodobně tím, že v době průchodu kontaminovaných mas nad lokalitou Červený vrch nastaly vydatné srážky.

Pro lepší názornost vlivu korun stromů na distribuci  $^{137}\text{Cs}$  v půdách pod nimi, byly vzorky odebrány ve čtyřech bodech do tří směrů od kmene stromu. Vlivem počasí, překážek či činnosti člověka byly ve výsledcích některých vzorků značné výkyvy hodnot měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$ . Proto byly výsledky vzorků půd odebraných ze stejných bodů pod a kolem koruny stromu zprůměrovány (Obr. 19). Nejvyšší průměrná hmotnostní aktivita  $^{137}\text{Cs}$  byla naměřena u vzorků půd odebraných u kmene stromu, směrem ke kraji koruny hodnoty klesají, mimo korunu však opět stoupají. Toto srovnání průměrných hodnot měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  potvrdilo výzkumnou otázku: *Mají koruny stromů vliv na distribuci  $^{137}\text{Cs}$  v půdách pod nimi?* Nejvyšší hodnoty měrné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  v půdách u kmene stromu jsou zapříčiněny stékáním kontaminovaných srážek z listů, po větvích a následně po kmene na zem. Plocha půdy pod korunou stromu je zastíněna listy a tak je kontaminace nižší než mimo korunu, kde dopadu kontaminovaných srážek nestojí nic v cestě.

Cíl práce byl tedy naplněn. Koruny stromů mají vliv na distribuci  $^{137}\text{Cs}$  v půdách pod nimi a kolem nich. Tento závěr může být prakticky využit v případě vzniku další radiální havárie a návrhu postupu dekontaminace zasaženého území. Slouží jako další část stále probíhajícího monitorování kontaminace našeho území radionuklidy z havárie Černobylu a může být také užitečný při výběru lokalit sběru vzorků pro další výzkumy, kde by výsledky měření mohly být ovlivněny odběrem vzorku z míst, kde je distribuce  $^{137}\text{Cs}$  ovlivněna korunou stromu. Mimo jiné může tato práce sloužit také jako studijní materiál.

## 7. Seznam použitých zdrojů

- 1) *10 let od havárie jaderného reaktoru v Černobylu: důsledky a poučení*, 1996. Praha: SÚJB, SÚRO [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/10let\\_od\\_Cernobylu.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/10let_od_Cernobylu.pdf)
- 2) AMADEO, Kimberly, *The Economic Impact of the Chernobyl Disaster*. In: The balance [online]. 2018 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://www.thebalance.com/chernobyl-nuclear-power-plant-disaster-economic-impact-3306335>
- 3) BUČINA, I., et al. *Radionuklidy z černobylské havárie v půdě na území ČSSR: jejich původ, depozice a distribuce*. In: Některé výsledky monitorování následků černobylské havárie v ČSSR. Praha: Československá komise pro atomovou energii. Ústřední informační středisko pro jaderný program, 1988
- 4) *Caesium 137*, ©2019. In: RADIOACTIVITY.EU.COM [online]. [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: [http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Caesium\\_137.htm](http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Caesium_137.htm)
- 5) *Cesium CS-137*, 2019. In: Pubchem: Open chemistry database [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cesium-137#section=Top>
- 6) *Cesium*, 2019. In: Pubchem: Open chemistry database [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/cesium#section=Top>
- 7) ČERVINKOVÁ, Andrea, 2012. *Radiocesium v plodech lesních rostlin*. Brno. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce: prof. RNDr. Michael Pöschl, CSc.
- 8) DANIELOVÁ, Lenka, ©2019. *Výskyt <sup>137</sup>Cs v orných půdách České republiky* [online]. [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/34/022/34022403.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/022/34022403.pdf)

- 9) *Draslík*, ©2009-2017. In: Periodická tabulka [online]. [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/>
- 10) *Germany's radioactiveboars a legacy of Chernobyl*, In: CTV News [online]. 2011 [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.ctvnews.ca/germany-s-radioactive-boars-a-legacy-of-chernobyl-1.626286>
- 11) GRIFFITH, Carrie a Chris ROSSENFELD, ©1998-2015. *The Effects of Nuclear Weapons*. In: Atomicarchive.com [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.atomicarchive.com/Effects/index.shtml>
- 12) HÁJEK, Daniel, 2014. *Vertikální distribuce 137Cs v neobdělávaných půdách*. České Budějovice. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita. Vedoucí práce: Mgr. Jiří Havránek
- 13) *Health effects of the Chernobyl accident: an overview*, 2006. In: World Health Organization [online]. [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: [https://www.who.int/ionizing\\_radiation/chernobyl/backgrounder/en/](https://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/backgrounder/en/)
- 14) HEJNÝ, Slavomil a Bohumil SLAVÍK, ed., 2003. *Květena České republiky*. 2., nezm. vyd. Praha: Academia. ISBN 80-200-1089-0.
- 15) *Historyofthe United Nations and Chernobyl*, ©2004. United Nations [online]. UN Office fortheCoordinationofHumanitarianAffairs [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <http://www.un.org/ha/chernobyl/history.html>
- 16) *Chernobyl Accident 1986*, 2018. World Nuclear Association [online]. England and Wales: World Nuclear Association, April 2018 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/chernobyl-accident.aspx>
- 17) IAEA *SafetyGlossary: Terminologyused in nuclearsafety and radiationprotection*, 2007 edition. Vienna: International AtomicEnergyAgency. ISBN 90-0-100707-08.

- 18) *Ionizující záření*, In: EBOZP: Encyklopedie BOZP [online]. ©2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: [http://ebozp.vubp.cz/wiki/index.php/Ionizuj%C3%ADc%C3%AD\\_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD](http://ebozp.vubp.cz/wiki/index.php/Ionizuj%C3%ADc%C3%AD_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD)
- 19) KAŇKOVÁ, Jaroslava, 2007. *Cesium 137 v lesním ekosystému*. České Budějovice. Diplomová práce. Jihočeská univerzita. Vedoucí práce: Mgr. Jiří Havránek
- 20) KLENER, V. 2000. *Principy a praxe radiační ochrany*. 1. vydání. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost. ISBN 80-238-3703-6
- 21) KOLEKTIV AUTORŮ 2001. *Patnáct let od havárie Černobylu: Důsledky a poučení*. In: *SÚJB* [online]. Praha: [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/15let\\_od\\_havarie\\_Cernobylu.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/15let_od_havarie_Cernobylu.pdf)
- 22) KRÁLOVÁ, Magda, *Zdroje radioaktivního záření*. In: Techmania: Science Center [online]. ©2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/atomy-castice/detekce-ionizujiciho-zareni/zdroje-radioaktivniho-zareni>
- 23) MALÁTOVÁ, Irena, *Situace po černobylské havárii v České republice*, ©2019 In: Státní ústav radiační ochrany [online] [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: [https://www.suro.cz/cz/publikace/cernobyl/situace\\_po\\_cernobylske\\_havarii\\_v\\_ceske\\_republice.pdf](https://www.suro.cz/cz/publikace/cernobyl/situace_po_cernobylske_havarii_v_ceske_republice.pdf)
- 24) MATOUŠEK, Jiří, Jan ÖSTERREICHER a Petr LINHART, 2007. *CBRN: jaderné zbraně a radiologické materiály*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-029-6.

- 25) MATZNER, Jan, 2004. *Praktika z dozimetrie*. České Budějovice: Jihočeská univerzita, Zdravotně sociální fakulta. ISBN 80-704-0707-7.
- 26) *Medical Definition of Radionuclide*, 2018. In: MedicineNet [online]. 12/21/2018 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.medicinenet.com/script/main/art.asp?articlekey=24809>
- 27) NAVRÁTIL L., FREITENGER SKALICKÁ Z., HALAŠKA J., HAVRÁNKOVÁ R., KUBEŠ J., NAVRÁTIL V., SABOL J., SIROVÝ L., ZÖLZER F. ©2019 *Radiobiologie* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/>
- 28) *Některé výsledky monitorování následků Černobylské havárie v ČSSR*, 1988. In: Státní ústav radiační ochrany [online]. ©2019 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: [https://www.suro.cz/cz/publikace/cernobyl/nektere\\_vysledky.pdf](https://www.suro.cz/cz/publikace/cernobyl/nektere_vysledky.pdf)
- 29) *Nuclear weapons timeline*, ©2019. In: Ican: International Campaign to Abolish Nuclear Weapons [online]. Geneve [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.icanw.org/the-facts/the-nuclear-age/>
- 30) *Obecné informace o radioaktivitě a radiační ochraně*, ©2012. In: FN MOTOL: Fakultní nemocnice v Motole [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.fnmotol.cz/kliniky-a-oddeleni/cast-pro-dospеле/klinika-nuklearni-mediciny-a-endokrinologie-uk-2-1/oddeleni-radiologicke-fyziky/obecne-informace-o-radioaktivite-a-radiacni-ochran/>
- 31) PEJCHAL, Jaroslav, 2013. *Biofyzika pro záchranáře*. Hradec Králové: Univerzita obrany. ISBN 978-80-7231-352-5.
- 32) PILÁTOVÁ, Helena, et al. *Mapy obsahu <sup>137</sup>Cs ve smrkových kůrách lesního ekosystému České republiky v roce 1995*, 1988 In: Státní ústav radiační ochrany [online]. ©2019 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/rms/monitorovani-slozek-zivotniho-prostredi/mapy-obsahu-137cs-ve-smrkovych-kurach-v-1995>
- 33) PITSCHMANN, Vladimír, 2005. *Jaderné zbraně: nejvyšší forma zabíjení*. Praha: Naše vojsko. Historie a vojenství. ISBN 80-206-0784-6.



- 34) PLOKHY, Serhii, ©2019. *The True Cost of the Chernobyl Disaster Has Been Greater Than It Seems*. In: TIME [online]. Time USA, APRIL 26, 2018 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://time.com/5255663/chernobyl-disaster-book-anniversary/>
- 35) POLLANEN, Roy, Ilkka VALKAMA a Harri TOIVONEN, ©1997. *Transport of radioactive particles from the chernobyl accident*. Atmospheric Environment. Elsevier Science, **31**(21), 3575-3590.
- 36) *Potassium*, 2019. In: Pubchem: Open chemistry database [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5462222#section=Top>
- 37) *Problematika kontaminace prasete divokého v ČR*, 2012. In: SÚJB [online]. Praha [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/aktualne/detail/clanek/problematika-kontaminace-prasete-divokeho-v-cr/>
- 38) PROUZA, Zdeněk a Jiří ŠVEC, 2008. *Zásahy při radiační mimořádné události*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-046-3.
- 39) *Přírodní radioaktivita a problematika radonu*, ©2019. In: SÚRO: Státní ústav radiační ochrany, v. v. i. [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/prirodnioz>
- 40) *Publikace ICRP 103*. 2009. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Publikace ICRP
- 41) RAMZAEV, V. a A. BARKOVSKY, 2018. *Vertical distribution of <sup>137</sup>Cs in grassland soils disturbed by moles (Talpa europaea L.)*. Journal of Environmental Radioactivity. Elsevier Science, (184-185), 101-108. ISSN 0265-931X.

- 42) RULÍK, P. a J. HELEBRANT, *Mapa kontaminace půdy České republiky  $^{137}\text{Cs}$  po havárii JE Černobyl: Zpráva SÚRO č. 22/2011* [online]. 2-4 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/publikace/cernobyl/plosna-aktivita-radionuklidu-zjistena-ve-vzorcich-odebranych-pud/Zprava%202011%20-%202022%20-%20Kontaminace%20pudy%20Ceske%20republiky%20137Cs%20-%20Mapa.pdf>
- 43) SÚKUPOVÁ, Lucie, 2014. *Prímo a nepřímo ionizující záření*. In: Lucie Súkupová: Něco málo o zobrazování a dávkách v radiodiagnostice, ale i mimo ni, aneb co by Vás mohlo zajímat...[online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/primo-a-neprimo-ionizujici-zareni/>
- 44) *The Effects of Nuclear Weapons*, 2018. In: Campaign for Nuclear Disarmament [online]. London [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://cnduk.org/the-effects-of-nuclear-weapons/>
- 45) *The Chernobyl accident: UNSCEAR's assessments of the radiation effects*, ©2002-2019. In: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation [online]. Vienna, 16 July 2012 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.unscear.org/unscear/en/chernobyl.html>
- 46) TRNKOVÁ, Michaela, 2017. *Srovnání měrných aktivit cesia  $^{137}$  v různých druzích mechu*. České Budějovice. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita. Vedoucí práce: Mgr. Jiří Havránek
- 47) ULLMAN, V., 2016. *Ionizující záření*. In: AstruNuklFyzika [online]. [cit. 2016-12-06]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika4.htm>
- 48) VENČOVSKÁ, Petra, 2017. *Cesium-137 v mase lesní zvěře na území Šumavy*. České Budějovice. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita. Vedoucí práce Jiří Havránek

- 49) *Vyhláška č. 422/2016 Sb.,: o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje*, 2016. In: Sbíрка zákonů České republiky, ročník 2016, částka 172, s. 6618-6904.
- 50) *Zákon č. 263/2016 Sb.,: zákon atomový zákon*, 2016. In: Sbíрка zákonů České republiky, ročník 2016, částka 102, s. 3938-4060.

## 8. Seznam obrázků a tabulek

Obrázek 1: Tři průchody kontaminovaných mas nad územím České Republiky..	20
Obrázek 2: Plošná aktivita a prostorová distribuce radionuklidů na území ČR ...	21
Obrázek 3: Mapa plošné kontaminace půdy $^{137}\text{Cs}$ .....	23
Obrázek 4: Způsoby kontaminace osob a koloběh $^{137}\text{Cs}$ v potravním řetězci .....	26
Obrázek 5: Lokality stromů, pod kterými byly odebrány vzorky .....	33
Obrázek 6: Konkrétní místa odběru vzorků pod každým stromem.....	34
Obrázek 7: Čtverec o výměru 20x20 cm, ze kterého byla odebrána půda.....	35
Obrázek 8: Výsledky měření hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ všech vzorků půd ze všech lokalit.....	37
Obrázek 9: Výsledky měření hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ ve vzorcích půd z lokality Červený vrch .....	40
Obrázek 10: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Červený vrch .....	41
Obrázek 11: Výsledky měření hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ ve vzorcích půd z lokality Radonice 1 .....	42
Obrázek 12: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Radonice 1 .....	43
Obrázek 13: Výsledky měření hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ ve vzorcích půd z lokality Radonice 2 .....	44
Obrázek 14: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Radonice 2 .....	45
Obrázek 15: Výsledky měření hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ ve vzorcích půd z lokality Mnich 1 .....	46
Obrázek 16: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Mnich 1 .....	47
Obrázek 17: Výsledky měření hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ ve vzorcích půd z lokality Mnich 2 .....	48
Obrázek 18: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity $^{137}\text{Cs}$ z jednotlivých odběrových míst v lokalitě Mnich 2 .....	49

<b>Obrázek 19: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity <math>^{137}\text{Cs}</math> všech vzorků dle konkrétního místa jejich odběru .....</b>	<b>50</b>
<b>Obrázek 20: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity <math>^{137}\text{Cs}</math> vzorků v konkrétních místech jejich odběru pod danými stromy .....</b>	<b>51</b>
<b>Obrázek 21: Výsledky měření hmotnostní aktivity <math>^{137}\text{Cs}</math> ve vzorcích půd u obou stromů z lokality Radonice.....</b>	<b>52</b>
<b>Obrázek 22: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity <math>^{137}\text{Cs}</math> z jednotlivých odběrových míst obou stromů z lokality Radonice.....</b>	<b>53</b>
<b>Obrázek 23: Výsledky měření hmotnostní aktivity <math>^{137}\text{Cs}</math> ve vzorcích půd u obou stromů z lokality Mnich .....</b>	<b>54</b>
<b>Obrázek 24: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity <math>^{137}\text{Cs}</math> z jednotlivých odběrových míst obou stromů z lokality Mnich.....</b>	<b>55</b>
<b>Obrázek 25: Výsledky měření hmotnostní aktivity <math>^{40}\text{K}</math> všech vzorků půd ze všech lokalit.....</b>	<b>56</b>
<b>Obrázek 26: Průměrné hodnoty měření hmotnostní aktivity <math>^{40}\text{K}</math> vzorků v konkrétních místech jejich odběru pod danými stromy .....</b>	<b>57</b>
<b>Obrázek 27: Ilustrace předpokladu dopadu srážek společně s radionuklidy na a kolem koruny stromu .....</b>	<b>59</b>
<b>Obrázek 28: Vertikální distribuce <math>^{137}\text{Cs}</math> v svrchních 20 cm půdy pastvin v bodech nenarušených krtky (a, b) a v bodech narušených krtky (c, d) v letech 2010 a 2015-2016 .....</b>	<b>65</b>
<b>Tabulka 1: GPS souřadnice stromů, pod kterými došlo k odběru vzorků.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabulka 2: Vzorky půd (lokality, vzorek, váha po sběru, po prosetí, měřená hmotnost, hmotnostní aktivity <math>^{137}\text{Cs}</math> a hmotnostní aktivity <math>^{40}\text{K}</math>) .....</b>	<b>38</b>

## **9. Seznam zkratk**

Cs Cesium

ČR Česká Republika

ČSSR Československá socialistická republika

IZ Ionizující záření

K Draslík