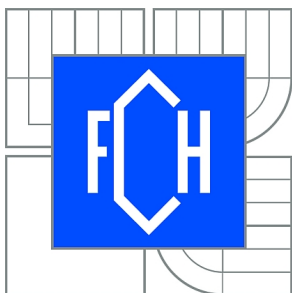




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ

ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY  
ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

FACULTY OF CHEMISTRY

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF  
ENVIRONMENTAL PROTECTION

## METODY STANOVENÍ RADIOLOGICKÝCH DOPADŮ V POTRAVNÍCH ŘETĚZCÍCH

METHODS FOR THE DETERMINATION OF RADIOLOGICAL IMPACT OF THE FOOD CHAINS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAKUB TESAŘ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Barbora Havránková

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně  
**Fakulta chemická**  
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

## Zadání diplomové práce

|                        |                                                             |                                  |
|------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Číslo diplomové práce: | <b>FCH-DIP0551/2010</b>                                     | Akademický rok: <b>2010/2011</b> |
| Ústav:                 | Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí      |                                  |
| Student(ka):           | <b>Bc. Jakub Tesař</b>                                      |                                  |
| Studijní program:      | Chemie a technologie ochrany životního prostředí (N2805)    |                                  |
| Studijní obor:         | Chemie a technologie ochrany životního prostředí (2805T002) |                                  |
| Vedoucí práce          | <b>Mgr. Barbora Havránková</b>                              |                                  |
| Konzultanti:           | doc. Ing. Josef Čáslavský, CSc.                             |                                  |

### Název diplomové práce:

Metody stanovení radiologických dopadů v potravních řetězcích

### Zadání diplomové práce:

Cílem práce bude rešeršní zpracování uceleného přehledu problematiky stanovení radiologických dopadů v potravních řetězcích včetně rozboru metod "prvního třídění" kontaminovaných komodit potravních řetězců. Praktická část práce bude spočívat v popisu rozřídění, přípravy a měření vzorků potravních řetězců. Na základě znalostí osvojených studiem a praxi bude provedena modelace dvou různých situací vyžadujících si rozlišné metody stanovení radiologických dopadů v potravních řetězcích a jejich vzájemné porovnání v kontextu analýzy potřeb krizového štábu v případě mimořádné radiační situace.

### Termín odevzdání diplomové práce: 13.5.2011

Diplomová práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu diplomové práce. Toto zadání je přílohou diplomové práce.

-----  
Bc. Jakub Tesař  
Student(ka)

-----  
Mgr. Barbora Havránková  
Vedoucí práce

-----  
doc. Ing. Josef Čáslavský, CSc.  
Ředitel ústavu

V Brně, dne 15.1.2011

-----  
prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce podává ucelený přehled o metodách stanovení radiologických dopadů v potravních řetězcích. Popisuje stanovení radionuklidů v potravinách za obvyklé radiační situace a za mimořádné radiační situace. V praktické části jsou modelovány dvě radiační události a to radiační událost na území ČR a radiační událost na území jiného státu a její dopad na ČR. Na závěr jsou obě modelové situace porovnány.

## **ABSTRACT**

The master`s thesis presents comprehensive overview of methods of determination of radiological impact on food chains. It describes the determination of radionuclides in groceries in common radiation situation and in unusual radiation situation. Practical part of the thesis presents two model radiation events. These are radiation event in the territory of Czech Republic and radiation event in the territory of other country and its impact on Czech Republic. In the end both model situations are compared.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

radionuklid, mimořádná radiační situace, monitorování, potravní řetězec

## **KEYWORDS**

radionuclide, radiological emergency, monitoring, food chain

TESAŘ, J. Metody stanovení radiologických dopadů v potravních řetězcích. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2011. 61s. Vedoucí diplomové práce Mgr. Barbora Havránková.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

### *Poděkování:*

Především bych chtěl poděkovat slečně Mgr. Barboře Havránkové za vedení práce, velmi přínosné konzultace, čas který mi věnovala a doporučení vhodné literatury.

Dále bych chtěl poděkovat oddělení spektrometrie SÚRO Praha, jmenovitě Ing. Heleně Malé, RNDr. Petru Rulíkovi a Ing. Janu Škrkalovi za poskytnuté informace a především za umožnění účastnit se reálného měření potravin přímo u nich v laboratořích.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodičům a přítelkyni za podporu během celého studia.

## OBSAH

|         |                                                                                        |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1       | Úvod.....                                                                              | 7  |
| 2       | Cíl práce .....                                                                        | 8  |
| 3       | Teoretická část.....                                                                   | 9  |
| 3.1     | Stanovení radionuklidů v potravinách za obvyklé radiační situace .....                 | 9  |
| 3.1.1   | Složky potravních řetězců monitorované za obvyklé radiační situace v rámci RMS .....   | 9  |
| 3.1.2   | Metody stanovení alfa .....                                                            | 11 |
| 3.1.2.1 | Záření alfa .....                                                                      | 11 |
| 3.1.2.2 | Alfa radionuklidy .....                                                                | 11 |
| 3.1.2.3 | Princip stanovení .....                                                                | 13 |
| 3.1.2.4 | Samotné stanovení.....                                                                 | 14 |
| 3.1.3   | Metody stanovení beta .....                                                            | 16 |
| 3.1.3.1 | Záření beta.....                                                                       | 16 |
| 3.1.3.2 | Beta radionuklidy .....                                                                | 16 |
| 3.1.3.3 | Princip stanovení .....                                                                | 18 |
| 3.1.3.4 | Samotné stanovení.....                                                                 | 19 |
| 3.1.4   | Metody stanovení gama .....                                                            | 21 |
| 3.1.4.1 | Záření gama.....                                                                       | 21 |
| 3.1.4.2 | Gama radionuklidy .....                                                                | 22 |
| 3.1.4.3 | Princip stanovení .....                                                                | 24 |
| 3.1.4.4 | Samotné stanovení.....                                                                 | 25 |
| 3.1.5   | Radiochemické stanovení.....                                                           | 27 |
| 3.2     | Stanovení radionuklidů v potravinách za mimořádné radiační situace.....                | 28 |
| 3.2.1   | Složky potravních řetězců monitorované za mimořádné radiační situace v rámci RMS ..... | 28 |
| 3.2.2   | Prvotní třídění.....                                                                   | 28 |
| 3.2.2.1 | Průběh prvotního třídění v laboratorních podmínkách .....                              | 29 |
| 3.2.2.2 | Průběh prvotního třídění v terénních podmínkách .....                                  | 30 |
| 3.2.3   | Rychlé stanovení .....                                                                 | 31 |
| 3.2.4   | Zpřesnění výsledků .....                                                               | 31 |
| 3.3     | Vyhodnocení situace a její dopady na potravní řetězce .....                            | 32 |
| 3.3.1   | Státní úřad pro jadernou bezpečnost .....                                              | 32 |
| 3.3.2   | Ochranná opatření .....                                                                | 33 |
| 3.3.3   | Vývoz a dovoz.....                                                                     | 34 |
| 4       | Praktická část.....                                                                    | 36 |
| 4.1     | Modelace radiační události na území České republiky .....                              | 36 |
| 4.1.1   | Popis události .....                                                                   | 36 |
| 4.1.2   | Výčet možných uniklých radionuklidů .....                                              | 38 |
| 4.1.3   | Kontaminované potraviny .....                                                          | 38 |
| 4.1.3.1 | Úniková fáze .....                                                                     | 38 |
| 4.1.3.2 | Poúniková fáze .....                                                                   | 39 |
| 4.2     | Modelace radiační události na území jiného státu a její dopad na ČR.....               | 43 |
| 4.2.1   | Popis události .....                                                                   | 43 |
| 4.2.2   | Radionuklidy uniklé do životního prostředí.....                                        | 45 |
| 4.2.3   | Ochranná opatření .....                                                                | 45 |

|         |                                 |    |
|---------|---------------------------------|----|
| 4.2.3.1 | Opatření přímo v Japonsku ..... | 45 |
| 4.2.3.2 | Opatření týkající se ČR .....   | 46 |
| 4.3     | Porovnání obou situací .....    | 48 |
| 5       | Výsledky a diskuze.....         | 49 |
| 6       | Závěr.....                      | 52 |
| 7       | Seznam použité literatury.....  | 53 |
| 8       | Seznam použitých zkratk.....    | 60 |

# 1 ÚVOD

V dnešní vyspělé a přetechizované době zaměřené na bezpečnost je možnost radiační havárie, jakou byla např. havárie na jaderné elektrárně v Černobylu, až téměř nemyslitelná. Ještě začátkem roku 2011 by jistě nikdo nepředpovídal, že může nastat závažná havárie na jaderné elektrárně. Vždyť pravděpodobnost jejího vzniku je menší než 1:1 000 000, jak uvádí i Státní úřad pro jadernou bezpečnost.

I přesto nám události z března roku 2011 v japonské Fukušimě potvrdily, že tato možnost tu je i když se jednalo o obrovskou shodu náhod.

Ani v našich podmínkách není radiační událost na jedné z dvou jaderných elektráren zcela vyloučena. Nejen proto se provádí pravidelné bezpečnostní a havarijní cvičení, ale také kvůli přípravě a cvičení reakcí na případnou havárii.

V obecném povědomí jsou havárie na jaderných zařízeních spojeny s dopady na životní prostředí a se zaváděním neodkladných ochranných opatření. To je ovšem jen jedna jejich část. Neméně významné jsou i dopady na složky potravních řetězců a s nimi spojená následná opatření.

I z tohoto důvodu vznikla tato diplomová práce, která má podat ucelený přehled o metodách stanovení radiologických dopadů v potravinách a s nimi spojenými opatřeními.

Přál bych si, aby následující řádky uvedly na pravou míru skutečnosti spojené s jadernými haváriemi a jejich vlivem na potraviny a naopak vyvrátili některé bludy, kterými nás komerční sdělovací prostředky „zásobují“ dnes a denně.

## 2 CÍL PRÁCE

Cílem práce je rešeršní zpracování uceleného přehledu problematiky stanovení radiologických dopadů v potravních řetězcích včetně rozboru metod „prvotního třídění“ kontaminovaných komodit potravních řetězců a s tím spojený popis roztrídění, přípravy a měření vzorků potravních řetězců.

V praktické části práce má být, na základě znalostí osvojených studiem a praxí, provedena modelace dvou různých situací vyžadujících si rozlišné metody stanovení radiologických dopadů v potravních řetězcích a jejich vzájemné porovnání v kontextu analýzy potřeb krizového štábu v případě mimořádné radiační situace.

## 3 TEORETICKÁ ČÁST

### 3.1 Stanovení radionuklidů v potravinách za obvyklé radiační situace

Vyhláška č. 319/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů, definuje obvyklou radiační situaci jako „situaci s výjimkou mimořádné radiační situace“. [1]

Pro stanovení radionuklidů v potravinách za obvyklé radiační situace (dále ORaS) se využívají tzv. měřicí místa kontaminace potravin (dále MMKP). MMKP jsou prostředky pro zajištění odběru vzorků z článků potravních řetězců a pro stanovení aktivity radionuklidů v těchto vzorcích. [1]

MMKP jsou po celém území České republiky (dále ČR). Zajišťuje je resort Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (dále SÚJB) a Ministerstva zemědělství (dále MZe). Monitorování složek potravních řetězců provádí i ČEZ, a.s. v rámci monitorování okolí jaderných elektráren a monitorování radiační monitorovací sítě (dále RMS). Využití monitorování radiační situace prostřednictvím MMKP je důležité i při větších radiačních haváriích a mimořádných událostech. [2]

Za ORaS známe předpokládanou aktivitu a provádíme stanovení konkrétních radionuklidů. Charakteristické jsou dlouhé časy měření způsobené mimo jiné velmi nízkými aktivitami, většinou až na hranici detekovatelnosti, tedy na úrovni přírodního pozadí. Důvodem měření za ORaS je především získání dlouhodobých dat a časových trendů, které slouží k porovnání při mimořádné radiační situaci, udržování stálé připravenosti personálu a vývoj nových metod stanovení.

#### 3.1.1 Složky potravních řetězců monitorované za obvyklé radiační situace v rámci RMS

Výběr jednotlivých složek potravních řetězců zcela vychází ze stravovacích návyků na našem území.

V rámci RMS se monitorují tyto potraviny: mléko a tzv. smíšená strava, kterou reprezentuje klasický spotřební koš české populace. V tomto spotřebním koši jsou zahrnuty všechny Čechy nejčastěji konzumované potraviny. V neposlední řadě je nutné uvést i monitorování krmiv, jakožto jedné ze složek potravních řetězců.

Jednotlivé složky potravních řetězců se odebírají jak od distributorů tak i od samotných producentů. Důležité je, aby odběr pokryl celé území ČR. [1, 2, 3]

- 1) **Mléko:** měřenou veličinou je objemová aktivita radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}$  a  $^{90}\text{Sr}$ ). Odebírá se jednak z běžné obchodní sítě a to každé čtvrtletí a také se odebírá vzorek mléka přímo od producentů s frekvencí rovněž čtvrtletní. Složkami RMS podílejícími se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS.
- 2) **Smíšená strava:** měřenou veličinou je hmotnostní aktivita radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}$  a  $^{90}\text{Sr}$ ). Odebírá se celodenní strava (od snídaně až po večeři) a to ze zdravotnických zařízení, kde je zajištěna vyváženost stravy. Dále se odebírá (např. nákupem v obchodních řetězcích) tzv. spotřební koš potravin (maso, brambory, obiloviny, zelenina, ovoce nebo produkty z nich vyrobené). A nakonec komodity u nichž lze předpokládat vyšší obsah umělých radionuklidů (např. lesní plody, lesní houby, zvěřina a med). Vzorky se odebírají každé čtvrtletí. Složkami RMS podílejícími se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS.

- 3) **Krmiva:** měřenou veličinou je hmotnostní aktivita radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}$ ). Mezi odebírané vzorky patří kukuřičný šrot, směsný šrot, ječmenný šrot, krmná řepa, píce a seno, krmná kukuřice, jetel, vojtěška, syrovátka a ostatní krmiva a krmné plodiny. Složkami RMS podílejícími se na monitorování jsou LS a MMKP.

Do roku 2006, tj. do doby před novelizací vyhlášky 319, bylo povinností monitorovat i tyto potraviny: maso, ryby, brambory, obilí, zelenina, ovoce, houby, lesní plody a med. Po novelizaci vyhlášky 319, které proběhlo v souladu s předpisy a doporučeními Evropské komise (v návaznosti na doporučení mezinárodních organizací IAEA a FAO), a při kterém došlo k mírné změně monitorovaných komodit, pokračuje RMS i nadále v monitorování výše uvedených položek (a to i nad rámec vyhlášky) z důvodů velkého množství historických dat (sledování trendu v jednotlivých komoditách sahá do roku 1986) a z důvodů jejich nesporného významu.

- 1) **Maso:** měřenou veličinou je hmotnostní aktivita radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}$ ). Odebírají se vzorky masa vepřového, hovězího, drůbežího, králíčího, skopového a zvěřina (nebo produkty z nich vyrobené). Tyto vzorky odebírá resort SÚJB čtvrtletně a to z obchodní sítě. Vzorky produktů vyrobených z vepřového, hovězího a drůbežího masa přímo z farem se odebírají jednou ročně SZPI a SVÚ. Se stejnou frekvencí tedy jedenkrát ročně se také odebírá maso králíčí nebo skopové a zvěřina. Dále se také odebírají vzorky syrového masa nebo výrobků z něho vyrobených, z nichž se připravuje směsný vzorek, který se vyhodnocuje. Složkami RMS podílejícími se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS.
- 2) **Ryby:** měřenou veličinou je hmotnostní aktivita radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}$ ). Vzorky odebírá RC SÚJB ČB a VÚV TGM, v.v.i. jedenkrát za rok. Složkami RMS podílejícími se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS.
- 3) **Brambory:** měřenou veličinou je hmotnostní aktivita radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}$ ). Jsou monitorované resortem SÚJB čtvrtletně, přímo z obchodní sítě. Odběr vzorků přímo od pěstitelů zajišťuje SZPI a to dvakrát za rok ranné odrůdy a dva odběry za rok pozdní sběr. Složkami RMS podílejícími se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS.
- 4) **Obilí:** měřenou veličinou je hmotnostní aktivita radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}$  a  $^{90}\text{Sr}$ ). Resortem SÚJB se odebírají vzorky pšenice, ječmene, ovsa, žita a kukuřice a to přímo u pěstitelů jedenkrát ročně, pro každý druh obilí. V případě, že se v daném regionu pěstuje obilí na zrno, připravuje se jeden směsný vzorek. Dále pak se v každém regionu v působnosti RC SÚJB odebírá z obchodní sítě čtvrtletně jeden směsný vzorek pšenice nebo žita či produktu, z nich vyrobených. SZPI odebírá jedenkrát ročně vzorek obilí a kukuřice přímo od producentů. Složkami RMS podílejícími se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS.
- 5) **Zelenina:** měřenou veličinou je hmotnostní aktivita radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}$ ). Je odebírána opět resortem SÚJB a MZe (SZPI), s tím, že resort SÚJB odebírá a analyzuje čtvrtletně vzorky z obchodní sítě. Resort MZe (SZPI) provádí odběr (listovou zeleninu, zelí, kořenovou zeleninu a plodovou zeleninu) přímo od producentů a to jedenkrát ročně. Složkami RMS podílejícími se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS.
- 6) **Ovoce:** měřenou veličinou je hmotnostní aktivita radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}$ ). Vzorky vybraného ovoce odebírá resort SÚJB a to vždy jednou ročně. SZPI odebírá vybrané

druhy přímo u pěstitelů, také jedenkrát ročně. Složkami RMS podílejícími se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS.

- 7) **Houby a lesní plody:** měřenou veličinou je hmotnostní aktivita radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}$ ). Vzorke se odebírají jednou za rok a to vždy dva druhy volně rostoucích jedlých hub a jeden vzorek lesních plodů. Odběr zajištěný resortem SÚJB je buďto přímo z obchodní sítě nebo sběrem. Na odběru hub a lesních plodů se také podílí resort MZe (VÚLHM, v.v.i.), který provádí odběr volně rostoucích jedlých hub a jeden vzorek lesních plodů jedenkrát ročně. Složkami RMS podílejícími se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS.
- 8) **Med:** měřenou veličinou je hmotnostní aktivita radionuklidů ( $^{137}\text{Cs}$ ). Vzorke jsou odebírány opět rezortem SÚJB, SVÚ, SZPI a VÚLHM, v.v.i. a to s frekvencí jedenkrát ročně přímo z obchodní sítě i od producentů. Složkami RMS podílejícími se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS.

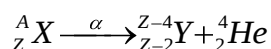
Považuji za nutné na tomto místě zmínit odběr, vyhodnocení a následné využívání dat všech výše zmíněných komodit získaných z radiačního monitoringu prováděném ČEZ, a.s. Rozsah odběru, frekvence a výčet měřených radionuklidů je přesně stanoven v monitorovacím programu jednotlivých JE. [1, 2, 3]

Pro úplnost ještě dodávám, že se ve své práci podrobněji nezabývám problematikou radioaktivní kontaminací vody, jak povrchové, tak pitné. Monitorování vody za radiační obvyklé situace je velice složité a vydalo by na samostatnou práci.

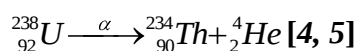
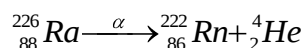
### 3.1.2 Metody stanovení alfa

#### 3.1.2.1 Záření alfa

Záření alfa jsou jádra helia, které se uvolňují z jader rozpadajících se prvků (z jádra odnášejí dva protony a dva neutrony). Alfa záření je pohlcováno již listem papíru a ve vzduchu se pohltí na dráze asi 40 cm. Před alfa zářením se lze snadno chránit. Ovšem alfa zářič může být nebezpečný při vdechnutí či požití, kdy působí uvnitř organismu. Alfa záření je nejvíce destruktivní formou ionizujícího záření. Nese kladný elektrický náboj a má nejkratší dosah. Prvek, jež vyzářil alfa částici se posune v Mendělejevě tabulce o dvě místa doleva. Toto lze vyjádřit následujícím vztahem:



Jako příklad lze uvést:



#### 3.1.2.2 Alfa radionuklidy

Výčet předpokládaných radionuklidů alfa v potravinách:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ . [6, 7, 8]

Na následujících příkladech radionuklidů  $^{210}\text{Po}$  a  $^{241}\text{Am}$  demonstruji jejich nebezpečnost v potravinách.

#### 3.1.2.2.1 Polonium $^{210}\text{Po}$

Má poločas rozpadu 138,39 dní. Radioaktivní  $^{210}\text{Po}$  se rozpadá na isotop olova  $^{206}\text{Pb}$ . Jeho radiotoxicita je velmi vysoká a je potřeba se na něj zaměřit právě při podezření na kontaminaci potravin. Protože  $^{210}\text{Po}$  je alfa zářič, závažné zdravotní důsledky nastávají po vnitřní kontaminaci (vdechnutím, požitím). Po požití potravin obsahujících  $^{210}\text{Po}$  hrozí závažné zdravotní důsledky. 1 mg  $^{210}\text{Po}$  vyzáří tolik alfa částic, jako 5 g  $^{226}\text{Ra}$ . Rozpustné soli polonia se vstřebávají z gastrointestinálního traktu v množství 7 až 13 % podaného množství a velmi rychle pronikají do krve. Bylo zjištěno, že polonium prochází též přes placentární bariéru a to v množství asi 8 %. Do organismu vniká polonium především dýchacími cestami a ukládá se v plicích, ledvinách, játrech, svalech a kostní dřeni. Polonium vyvolává radiační syndrom. Chronická letální dávka  $^{210}\text{Po}$  je u laboratorního potkana 1,45 MBq/kg (u člověka není známa). Biologický poločas je u člověka 30 až 50 dní, podle zasažených orgánů. Polonium se vylučuje močí a stolicí.  $^{210}\text{Po}$  je pro člověka velmi nebezpečným radionuklidem.

Jako příklad zneužití  $^{210}\text{Po}$  je možné uvést otrávení Alexandra Litviněnka v roce 2006. V těle Litviněnka bylo nalezeno velké množství vysoce toxického radioaktivního izotopu  $^{210}\text{Po}$ , které mu bylo přidáno do čaje. Díky tomu, že polonium neemituje gama paprsky, jako většina radioaktivních izotopů, ale pouze částice alfa, které neprojdou ven z těla přes kůži, bylo otrávení poloniem zjištěno až po smrti Litviněnka při následné pitvě. Litviněnko zemřel 22 dnů od jeho otrávení.

Pro úplnost je nutné dodat, že aktivita  $^{210}\text{Po}$  v případě radiační mimořádné události bude několikanásobně nižší, než v případě teroristického útoku.[9, 10, 11, 12, 13, 14]



Obr. č. 1: Alexander Litviněnko před a po otravě  $^{210}\text{Po}$  [15]

#### 3.1.2.2.2 Americium $^{241}\text{Am}$

Má poločas rozpadu 432 let. Jedná se o dceřiný produkt plutonia. Jeho nebezpečnost je především ve schopnosti hromadit se v kostní tkáni. Jedná se o alfa i gama emitör, ovšem s převahou alfa částic. Největší podíl radioizotopu americia v životním prostředí pochází z jaderných zkoušek, v menší míře i z jaderných elektráren. Po požití (kontaminované vody či potravin) nebo vdechnutí se americium ukládá v kostech, svalech a játrech. V těle zůstává desítky let a může výrazně zvýšit riziko vzniku rakoviny. Pro informaci jen dodávám, že radioaktivní  $^{241}\text{Am}$  se používá v kouřových detektorech, v hladinoměrech, tloušťkoměrech atd. [16, 17, 18]

#### 3.1.2.3 Princip stanovení

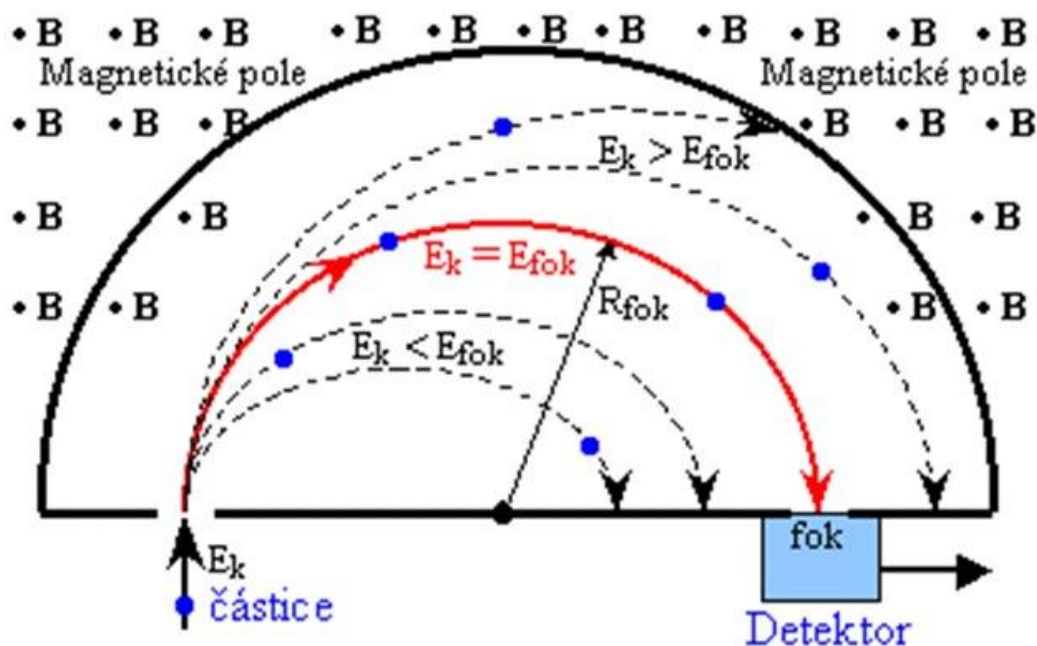
Jelikož alfa záření je málo pronikavé, snadno se absorbuje a obtížně vniká do citlivého prostoru detektoru je i samotná alfa spektrometrie obtížná. Alfa spektrometrie, jak již název napovídá, se používá k analýze radionuklidů, které jsou alfa zářiči.

Nejdokonalějšími přístroji pro měření energie nabitých částic jsou magnetické spektrometry. Tyto spektrometry jsou založeny na silovém působení magnetického pole na pohybující se nabitě částice.

##### 3.1.2.3.1 Spektrometr s příčným magnetickým polem

Je tvořen silným elektromagnetem. Mezi jeho pólovými nástavci, které vytváří téměř homogenní magnetické pole, je umístěna vakuová měřicí komora. Do této komory vlétávají částice vstupní clonkou a po dráze zakřivené v magnetickém poli dopadají přes další clonku na detektor. Zde jsou registrovány převedením na elektrické impulsy. Tento detektor nemusí mít spektrometrické vlastnosti, po detektoru se požaduje jen dobrá detekční účinnost pro nabitě částice v dostatečně širokém rozmezí energií.

Aby bylo dosaženo lepší detekční účinnosti spektrometru, používají se speciální tvary pólových nástavců, vytvářející v hlavním homogenním magnetickém poli určité přídavné gradienty, které způsobují efektem magnetické čočky fokusaci jinak rozbíhavého svazku nabitých částic. Pro danou geometrickou konfiguraci vstupního okénka, clonek a detektoru a určitou konkrétní hodnotu magnetické indukce  $B$  může do detektoru dopadnout jen částice zcela určité energie  $E_k = E_{fok}$ , která je v magnetickém poli zakřivena právě tak, že se trefí do místa detektoru o poloze  $R_{fok}$ . Zvyšováním budícího proudu  $I$ , vinutím elektromagnetu, zvyšujeme magnetickou indukci  $B$  a tím i energii částic, které dopadají do detektoru a jsou registrovány. Každé hodnotě proudu  $I$  cívky elektromagnetu tak odpovídá určitá energie  $E_k$  nabitých částic, které je detektor schopný registrovat. Magnetický spektrometr pracuje cyklicky v dynamickém režimu. Během tohoto režimu dochází k plynulému zvyšování proudu  $I$  elektromagnetem a zároveň jsou registrovány impulsy z detektoru. Pokud vyneseme na vodorovnou osu příslušný kalibrační násobek odmocniny proudu  $I$  a na svislou osu registrovaný počet impulsů pro každou hodnotu  $I$ , získáme graf energetického zastoupení měřených nabitých částic. Magnetické spektrometry mají velmi dobrou rozlišovací schopnost, zpravidla pod 1 %. [4]



Obr. č. 2: Schématické znázornění činnosti magnetického spektrometru s příčným magnetickým polem [4]

#### 3.1.2.3.2 Hmotnostní spektrometry

Pracují podobně jako magnetické spektrometry. Analyzovaná látka je v ionizační komůrce ionizována, vzniklé kationty jsou elektrickým polem urychlovány a v rychlostním filtru se selektují ionty s konstantní rychlostí  $v$ . Ty pak vlétají vstupní štěrbinou do magnetického pole, v němž opisují kružnici úměrnou hmotnosti  $m$ . Ionty o různé hmotnosti opisují různé dráhy a dopadají tím na různá místa základny. Zařízení tedy od sebe odděluje ionty o různé hmotnosti (dané hmotností jadra). Změnou magnetického pole jsou postupně do detektoru fokusovány ionty odpovídajících hmotností a vzniká hmotnostní spektrum. V hmotnostním separátoru je místo detektoru na základně instalován vhodný terčik, na němž se dopadající ionty vybrané hmotnosti absorbují. [4]

#### 3.1.2.4 Samotné stanovení

Jako příklad samotného stanovení uvádím metodu rozkladu živočišných tkání ke stanovení těžkých radionuklidů (např. již zmíněného  $^{210}\text{Po}$ ). Tato metoda je vhodná, jelikož se provádí za nízkých teplot a nedochází tedy ke ztrátě některých radionuklidů. Vzhledem k tomu, že měříme za obvyklé radiační situace a aktivity v jednotlivých vzorcích jsou velmi nízké, provádíme měření v upraveném stavu, jak popisují níže.

Nejprve se vzorek připraví. Zváží se a následně pokrájí na menší kousky. Tyto kousky, vložené do mikrotenového sáčku, se následně nechají hluboce zmrazit. Poté se vyjmou ze sáčku, umístí se na děrovanou misku, která se vloží do lyofilizátoru na dobu nutnou k vysušení (lyofilizace běží při teplotě od  $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Po skončení lyofilizace se vzorek opětovně zváží a jeho hmotnost se zaznamená. Následuje drcení na prach a přesypání do prachovnice. Z takto připraveného vzorku se odeberou aktivní podíly k dalšímu zpracování.

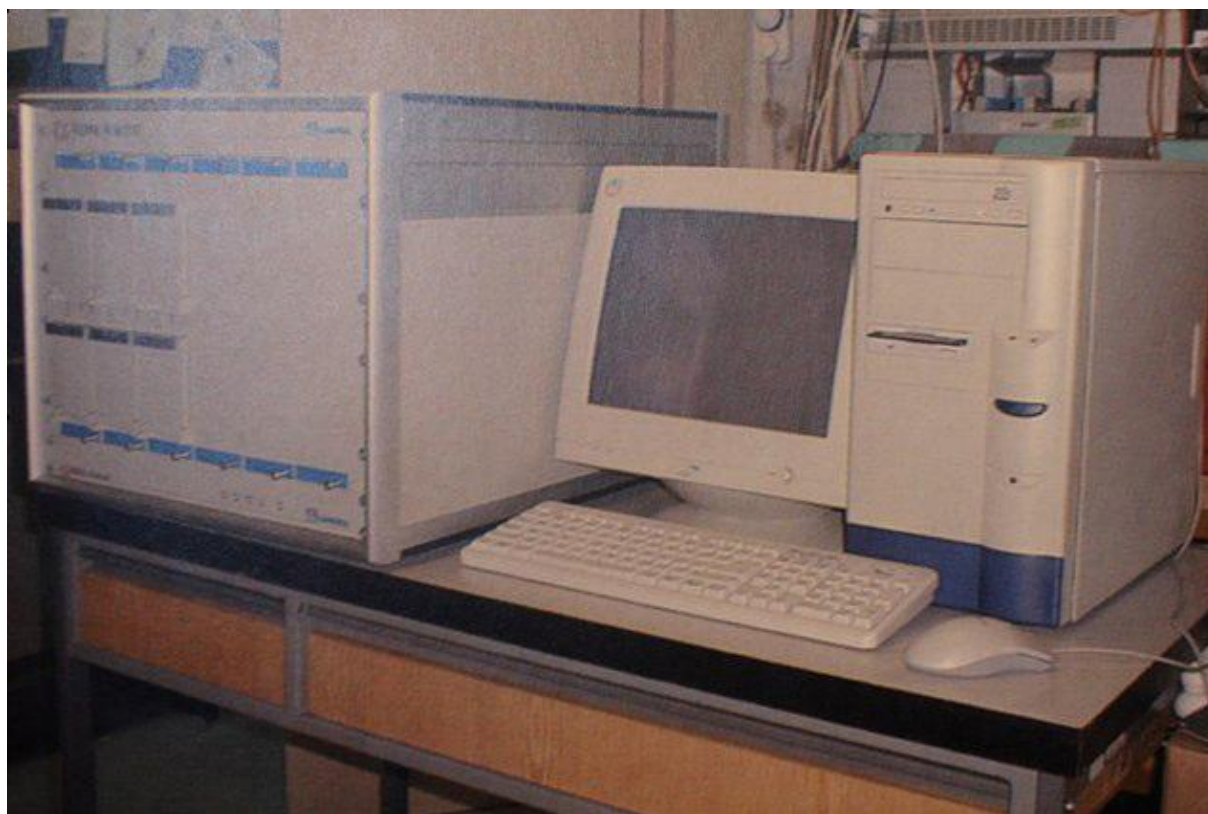
Po přípravě vzorku následuje mineralizace. Do Erlenmayerovy baňky se odváží 10 až 50 g lyofilizovaného vzorku, který se smočí malým množstvím 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Peroxid přidáváme tak dlouho (po kapkách), až vzorek reaguje pěněním. Následně se baňka se vzorkem vloží do ultrazvukové lázně a na vzorek se nechají působit ultrazvukové vlny. Pokud vzorek pění, ultrazvuk se vypne a po vymizení pěny opět zapne. Opět přikápneme peroxid a celý postup opakujeme. Poté do baňky přidáme 5 ml koncentrované  $\text{HNO}_3$ , následně baňku umístíme na vyhřívanou magnetickou míchačku. Za stálého míchání opakovaně přidáváme po několika kapkách  $\text{HNO}_3$ . Mineralizaci dokončíme jemným ohřevem asi na  $75^\circ\text{C}$  s dalšími přídávky  $\text{HNO}_3$ . Na závěr vše vyjasníme přidáním několika kapek 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Obsah baňky ochladíme a mineralizát převedeme do odměrné baňky. Jestliže v Erlenmayerově baňce zůstane tuhá fáze, promyjeme ji 2krát 10 ml horké  $\text{HNO}_3$  a po ochlazení roztok přilijeme k mineralizátu do baňky. Obsah baňky doplníme po rysku destilovanou vodou.

Následuje úprava vzorku k analýze, která už závisí na konkrétním radionuklidu. Analýza může být prováděna např. na analyzátoru Alfa analyst společnosti Canberra.

Výhody této metody jsou následující. Lyofilizace biologických tkání umožní lehké rozmělnění vzorku na velmi jemný „pudr“, který má velký povrch a tudíž je i lépe přístupný smočení minerální kyselinou a peroxidem vodíku. Ultrazvuk pomáhá štěpit složité molekulové struktury a tím urychluje rozklad a snižuje potřebné množství kyseliny. Sniží se ztráty radionuklidů během přípravy vzorku.

Tato metoda má ovšem i nevýhodu a tou je především vysoká finanční náročnost způsobená potřebou lyofilizační jednotky, ultrazvukové lázně a magnetické míchačky.

Metod pro stanovení alfa radionuklidů je samozřejmě víc, ale pro potřeby této práce jsem vybral pouze jednu a to tu z novějších. [19, 20]



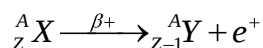
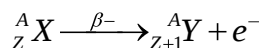
Obr. č. 3: Přístroj pro stanovení nuklidů emitujících záření alfa [19]

### 3.1.3 Metody stanovení beta

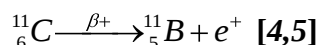
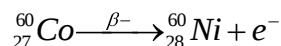
#### 3.1.3.1 Záření beta

Záření beta jsou velmi rychlé elektrony (resp. nabitě částice), vylétávající z jader radionuklidů. Jejich pronikavost je větší než u alfa částic, mohou pronikat materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou a k jejich zastavení stačí vrstva vzduchu silná 1 m nebo kovu o šířce 1 mm. Záření beta je dvojího druhu, v závislosti na emitované částici. Některé radionuklidy, uměle vytvořené, při radioaktivních přeměnách uvolňují z jádra kladné elektrony (tzn. pozitrony), jiné radionuklidy emitují záporně nabitě částice, tzv. elektrony. V případě emise elektronu se radionuklid mění v nuklid prvku s číslem  $Z-1$ . Tím pádem rozlišujeme záření  $\beta^-$  (z jádra se uvolňují elektrony). V případě emise pozitronů hovoříme o záření  $\beta^+$  (z jádra se uvolňují pozitrony), které je charakteristické tím, že původní prvek se mění v prvek s protonovým číslem  $Z+1$ . Elektrony a pozitrony se pohybují velmi rychle, nesou kladný nebo záporný elektrický náboj a jejich pohyb může být ovlivňován elektrickým polem.

Reakce popisují následující rovnice:



Jako příklad lze uvést:



#### 3.1.3.2 Beta radionuklidy

Výčet předpokládaných radionuklidů beta v potravinách:  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^{14}\text{C}$ ,  ${}^{35}\text{S}$ ,  ${}^{90}\text{Sr}$ ,  ${}^{131}\text{I}$ ,  ${}^{132}\text{Te}$ ,  ${}^{140}\text{La}$ ,  ${}^{144}\text{Ce}$ . [6, 8, 21]

Na následujících příkladech radionuklidů  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^{90}\text{Sr}$ ,  ${}^{131}\text{I}$ , a  ${}^{144}\text{Ce}$  popisují jejich nebezpečnost v potravinách.

##### 3.1.3.2.1 Tritium ${}^3\text{H}$

Má poločas rozpadu 12,32 let a vzniká v aktivní zóně reaktoru při štěpení  ${}^{235}\text{U}$  a  ${}^{239}\text{Pu}$ . Mimo tyto případy vzniká tritium zachytem neutronů jádrem deuteria a při interakci neutronů s bórem. Ten je v chladicím médiu některých typů jaderných reaktorů, kde slouží jako prostředek regulace štěpné reakce. Tritium bylo také produkováno při výbuchu jaderných zbraní a v neposlední řadě je také přirozeně produkováno v horních vrstvách atmosféry. Do lidského organismu se tritiem může dostat ingescí, inhalací a přes kůži. Jeho biologický poločas je pouhých 10 dní. Tritium zvyšuje možnost vzniku rakoviny, nicméně jelikož produkuje nízkonoenergetické záření, které navíc opouští tělo velmi rychle, jedná se tedy o jeden z nejméně nebezpečných radionuklidů. [3, 16, 22, 23]

#### 3.1.3.2.2 Stroncium $^{90}\text{Sr}$

Má poločas rozpadu 28,78 let a patří mezi dlouhodobé osteotropní nuklidy.  $^{90}\text{Sr}$  je produktem jaderného štěpení. Je přítomné ve velkém množství ve vyhořelém jaderném palivu a radioaktivním odpadu z jaderných reaktorů.

Velké množství  $^{90}\text{Sr}$  se uvolnilo při černobylské havárii v roce 1986. Uvolnění  $^{90}\text{Sr}$  nemělo na potraviny a s tím spojenou jejich konzumaci lidmi na území ČR, tak zásadní vliv jako  $^{137}\text{Cs}$ , ale i přesto s ním bylo potřeba počítat. Ukládání stroncia bylo zaznamenáno především v rybách. Nižší koncentrace, na zasaženém území, jsou měřitelné ještě dnes. Jedná se především o ryby z uzavřených vodních ploch v Rusku, Bělorusku a Ukrajině.

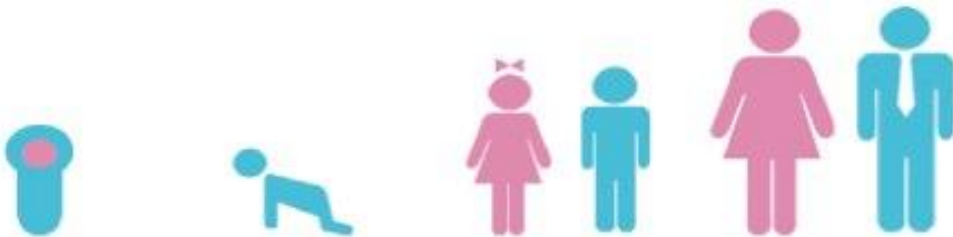
Nebezpečí požití stroncia je v tom, že se v těle váže na místo vápníku do kostí a zubů, kde může způsobit rakovinu kostí, kostní dřeně a měkkých tkání kolem kostí. Již asi po 24 hodinách je inkorporováno do struktury kostí, kde vytěsňuje atomy vápníku. Ovšem většina stroncia je vyloučena v průběhu 3 měsíců od jeho příjmu do organismu, zbylé množství se v kostech zabudovává trvale a navíc nerovnoměrně, což vede k neuniformnímu ozáření kostí.

Do organismu se dostává potravinovým řetězcem přes rostliny kontaminované na povrchu, přes kořenový systém rostlin a nebo přes další části potravinového řetězce. [3, 16, 24, 25, 26, 27]

#### 3.1.3.2.3 Jód $^{131}\text{I}$

Má poločas rozpadu 8 dní. Jedná se o těkavou látku vznikající při jaderném štěpení, která může vážně ovlivnit zdraví člověka (zkušenosti z testů jaderných zbraní v 50. a 60. letech 20. století, a z havárie jaderné elektrárny v Černobyli). Jód přijatý, nejen v potravinách, se vychytává ve štítné žláze, kde se hromadí a může vést k jejímu poškození. Po černobylské havárii se radioaktivní jód dostával do organismu především inhalací. Cesta ingesce byla především z kravského mléka (krávy spásaly kontaminované krmivo, především trávu ze zasažených pastvin). Aktivita  $^{131}\text{I}$  v mléce z mlékáren po 15. 5. 1986 na žádném z míst ČR nepřesáhla zásahovou úroveň 1000 Bq/l a mléko ze zvolených mlékáren bylo dostatečně reprezentativní pro celý stát. To je samozřejmě dáno krátkým poločasem rozpadu. Pro zabránění hromadění radioaktivního jódu ve štítné žláze a s tím spojeným poškozením zdraví, se užívají tablety jodidu draselného (KI), který nasycí štítnou žlázu a zabrání tak vychytávání radioaktivního jódu. Hovoříme o tzv. jodové profylaxi. Účinnost jodové profylaxe závisí na době podání preparátu. Uskuteční-li se 1 až 6 hodin před příjmem radioaktivního jódu je účinnost profylaxe téměř 100%. Opožděným přijetím preparátu se jeho účinek snižuje. V případě jeho podání 2 hodiny po příjmu radioaktivního jódu je jeho účinnost pouze 50%.

Vzhledem k negativním vedlejším účinkům, se podání KI zavádí pouze v odůvodněných případech. [16, 27, 28, 29, 30, 31, 32]



| Novorozenci<br>do 1 měsíce | Kojenci<br>a děti<br>do 3 let | Děti<br>od 3<br>do 12 let | Osoby<br>starší<br>12 let |
|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| ¼ tablety<br>16 mg KI      | ½ tablety<br>32 mg KI         | 1 tableta<br>65 mg KI     | 2 tablety<br>130 mg KI    |

Obr. č. 4: Dávkování jodidu draselného (KI) [16]

#### 3.1.3.2.4 Cér $^{144}\text{Ce}$

Má poločas rozpadu 285 dní. Patří mezi lanthanoidy. Jedná se o beta i gama emitör, který se velmi špatně vstřebává a může tedy poškozovat tlusté střevo. [16, 33]

#### 3.1.3.3 Princip stanovení

Stejně jako záření alfa, je i beta záření málo pronikavé, snadno se absorbuje a obtížně vniká do citlivého prostoru detektoru. I samotná beta spektrometrie je tedy obtížná (stejně tak analýza spekter beta). Beta spektrometrie, jak již název napovídá, se používá k analýze radionuklidů, které jsou beta zářiči.

##### 3.1.3.3.1 Spektrometry s magnetickou čočkou

U těchto spektrometrů se využívá fokusačních účinků axiálního magnetického pole, které podle zákonitostí elektronové optiky vytváří obraz zdroje podobně jako spojná čočka. Spektrometr je tvořen cívkou, kterou prochází proud  $I$  a budí ve vakuové komoře uvnitř cívky podélné magnetické pole s vektorem  $B$  směřujícím podél osy cívky. Zdroj analyzovaného záření beta je umístěn na ose magnetického pole. Částice, které jsou vysílány tímto zdrojem ve směru k cívce pod úhlem  $\vartheta$  k ose, se vlivem magnetických sil pohybují po prostorových spirálových drahách. Dále jsou fokusovány do jednoho bodu na ose. Při konstantním úhlu  $\vartheta$ , který je vymezen clonkou spektrometru, můžeme změnou magnetického pole  $B$  fokusovat do jednoho bodu na ose cívky postupně částice s různou hybností a tedy i různou energií a detektorem umístěným v tomto místě na ose cívky registrovat částice příslušných energií. V závislosti na proudu vinutím cívky jsou tedy částice, procházející prstencovými clonkami, fokusovány do místa detektoru podle svých energií. Tato závislost, po příslušné kalibraci, vytváří energetické spektrum. Jak již bylo zmíněno výše je analýza spekter beta záření značně obtížná (na rozdíl od analýzy spekter záření gama, které obsahují zřetelné fotopíky). Na vzhledu spojitého spektra záření beta často ani nepoznáme, zda se jedná o záření s jednou maximální energií, či zda je složeno z více energií.

#### 3.1.3.3.2 Ostatní

Dále je možné použít např. *nízkopozadové alfa-beta automaty* nebo *kapalinové scintilační spektrometry*. Pro účely této práce je podrobnější popis daných metod nadbytečný a proto se jimi nebudu zabývat. [4]

#### 3.1.3.4 Samotné stanovení

Pro popis stanovení hmotností (resp. objemové) aktivit jsem vybral  $^{90}\text{Sr}$ , a to konkrétně stanovení hmotnostní aktivity ve smíšené stravě. Stanovení např. v mléce, obilí či jiných komoditách se liší jen v detailech a v principu je metoda obdobná. Mezi smíšenou stravu patří následující komodity: kravské mléko a mléčné výrobky v hodnotě mléka, pšeničná mouka, brambory, chléb, pšeničné pečivo, vepřové maso, drůbež, jablka, vejce, zelí, hovězí maso, cibule, mrkev.

Vzhledem k tomu, že měříme za obvyklé radiační situace a aktivity v jednotlivých vzorcích jsou velmi nízké, provádíme měření v upraveném stavu, jak je popsáno níže.

Stanovení hmotnostní aktivity je založeno na měření beta záření dceřiného  $^{90}\text{Y}$  po odstranění rušících beta radionuklidů a nárůstu  $^{90}\text{Y}$ .

Jako první je potřeba vzorek nakrájet, pomlít atd. (dle druhu komodity) a následně usušit. To probíhá v laboratorní sušárně při teplotě asi  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  (úprava a sušení vzorku viz tab. č. 1). Následně se vzorek mineralizuje a analyzuje se celý nebo paralelně obě poloviny mineralizátu. Po odstranění křemičitanů se vysrážením šťavelanů stroncia a yttria ze slabě kyselého prostředí odstraní radionuklidy z 1a skupiny periodické soustavy ( $^{137}\text{Cs}$  a  $^{40}\text{K}$ ) a fosforečnany.  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  a  $^{226}\text{Ra}$  se oddělí jako chromany. Spolusrážením s  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  a  $\text{Ce}(\text{OH})_3$  se odstraní další rušící radionuklidy tvořící nerozpustné hydroxidy. Po ustavení radioaktivní rovnováhy mezi  $^{90}\text{Sr}$  a dceřiným nuklidem  $^{90}\text{Y}$  se veškeré ytrium oddělí jako hydroxid a po převedení na šťavelan se měří jeho beta. Nosičem pro  $^{90}\text{Sr}$  je vápník obsažený ve vzorku a přídavek stabilního stroncia, k oddělení  $^{90}\text{Y}$  se přidává nosič yttria. Chemický výtěžek stroncia se stanovuje pomocí měření gama záření  $^{85}\text{Sr}$  přidaného do vzorku jako izotopový monitor výtěžku, výtěžek yttria komplexometrickou titrací.

V případě obilí se vzorek nesuší, ale pálí a to při teplotě  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [27, 34, 35, 36, 37]

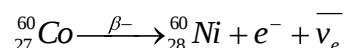
Tab. č. 1: Úprava a sušení některých komodit potravních řetězců podle SÚRO Praha [36]

| Druh potraviny                                | Úprava                                                                            | Sušení                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kravné mléko a mléčné výrobky v hodnotě mléka | Odměřit potřebný objem nebo hmotnost                                              | Tekuté mléko odpařit do sucha, sušené neupravovat                                                                          |
| Pšeničná mouka                                | Odvážit potřebné množství                                                         | Nesušit                                                                                                                    |
| Brambory                                      | Oškrábat a vykrojit nepoživatelné části, rozemlít, odvážit potřebné množství      | Vysušit v laboratorní sušárně při 50 °C po 24 hodin, pečicí plech vyložený alobalem nebo papírem, případně teflonový plech |
| Chléb, pšeničné pečivo                        | Rozkrájet na kostičky, odvážit potřebné množství                                  | Vysušit v laboratorní sušárně při 50 °C po 24 hodin, pečicí plech                                                          |
| Vepřové maso, drůbež, hovězí maso             | Rozemlít na masovém mlýnku („sekaná“), odvážit potřebné množství                  | Vysušit v laboratorní sušárně při 50 °C po 24 hodin, pečicí plech vyložený alobalem nebo papírem, případně teflonový plech |
| Jablka                                        | Vykrojit jádřince, slupku ponechat, rozemlít na mlýnku, odvážit potřebné množství | Vysušit v laboratorní sušárně při 50 °C po 24 hodin, pečicí plech vyložený alobalem nebo papírem, případně teflonový plech |
| Vejce                                         | Rozklepnout do laboratorní misky                                                  | Vysušit v laboratorní sušárně při 50 °C po 24 hodin                                                                        |
| Zelí                                          | Rozkrájet, vykrojit košťál, odvážit potřebné množství                             | Vysušit v laboratorní sušárně při 50 °C po 24 hodin, pečicí plech vyložený alobalem nebo papírem, případně teflonový plech |
| Cibule                                        | Zbavit slupky, rozkrájet nebo rozemlít, odvážit potřebné množství                 | Vysušit v laboratorní sušárně při 50 °C po 24 hodin, pečicí plech vyložený alobalem, případně teflonový plech              |
| Mrkev                                         | Odkrojit horní část a kořen, rozkrájet nebo rozemlít, odvážit potřebné množství   | Vysušit v laboratorní sušárně při 50 °C po 24 hodin, pečicí plech vyložený alobalem nebo papírem, případně teflonový plech |
| Polévková zelenina balená                     | Odkrojit nepoživatelné části, rozkrájet nebo rozemlít, odvážit potřebné množství  | Vysušit v laboratorní sušárně při 50 °C po 24 hodin, pečicí plech vyložený alobalem nebo papírem, případně teflonový plech |
| Špenát polní, salát polní                     | Omyté listy rozkrájet nebo rozemlít, odvážit potřebné množství                    | Vysušit v laboratorní sušárně při 50 °C po 24 hodin, pečicí plech vyložený alobalem, případně teflonový plech              |

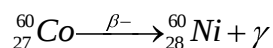
### 3.1.4 Metody stanovení gama

#### 3.1.4.1 Záření gama

Gama záření je často provázeno emisí alfa či beta záření, vznikajícím při radioaktivním rozpadu jader. Při vyzáření částice alfa či beta, většinou dochází ke změně stavu daného prvku, nové jádro je tzv. v excitovaném stavu. Do nižšího energetického stavu může přejít vyzářením fotonu gama záření. Jako příklad mohu uvést beta rozpad  $^{60}\text{Co}$  na  $^{60}\text{Ni}$ . Při něm v prvním stupni nejprve jádro kobaltu vyšle částici beta (tedy elektron  $e^-$ ) a elektronové antineutrino  $\bar{\nu}_e$  a přemění se na jádro niklu v excitovaném stavu:



Následně se vzniklé excitované jádro zbaví přebytečné energie vyzářením kvanta záření gama:



Gama záření je velmi pronikavé elektromagnetické záření. Je to elektromagnetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou. Jeho fotony se uvolňují z jader přeskupováním nukleonů v radionuklidu. Sestavení nukleonů v jádře lze popsat podobně jako sestavení elektronů v obalu (energie nukleonů v jádře je kvantována a každý nukleon se vyskytuje jen v určitém kvantovém stavu). Přejít z jednoho stavu do stavu druhého se může dít pouze za současného dodání či uvolnění energie.

Záření gama je pro živé organismy, člověka nevyjímaje, nebezpečné. Způsobuje podobná poškození jako rentgenové záření: popáleniny, rakovinu a genové mutace. Proto je nutno se před jeho účinky chránit. Záření gama z nukleárního spadu v případě použití jaderných zbraní či z radioaktivity uvolněné v důsledku jaderné havárie bude působit na organizmy, tedy bude mít za následky jak stochastické tak deterministické účinky, jejichž příklady jsem uvedl výše.

K pohlcení gama záření je potřeba velké masy materiálu. Nejvhodnější materiály jsou ty s vyšším atomovým číslem a s vysokou hustotou. Schopnost materiálu pohlcovat záření se zpravidla vyjadřuje polotloušťkou materiálu, tj. tloušťkou, po jejímž průchodu se původní intenzita záření sníží na polovinu. [4, 5, 38]



Obr. č. 5: Stínění gama záření olovem [38]

### 3.1.4.2 Gama radionuklidy

Výčet nejpravděpodobnějších radionuklidů gama v potravinách:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  a  $^{239}\text{Pu}$ . [6, 8, 39]

Na následujících příkladech radionuklidů  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{239}\text{Pu}$  popisují jejich nebezpečnost v potravinách. ( $^{131}\text{I}$  jsem již uvedl v kapitole 3.2.3.2 Beta radionuklidy a proto jej zde zmiňuji jen okrajově).

#### 3.1.4.2.1 Kobalt $^{60}\text{Co}$

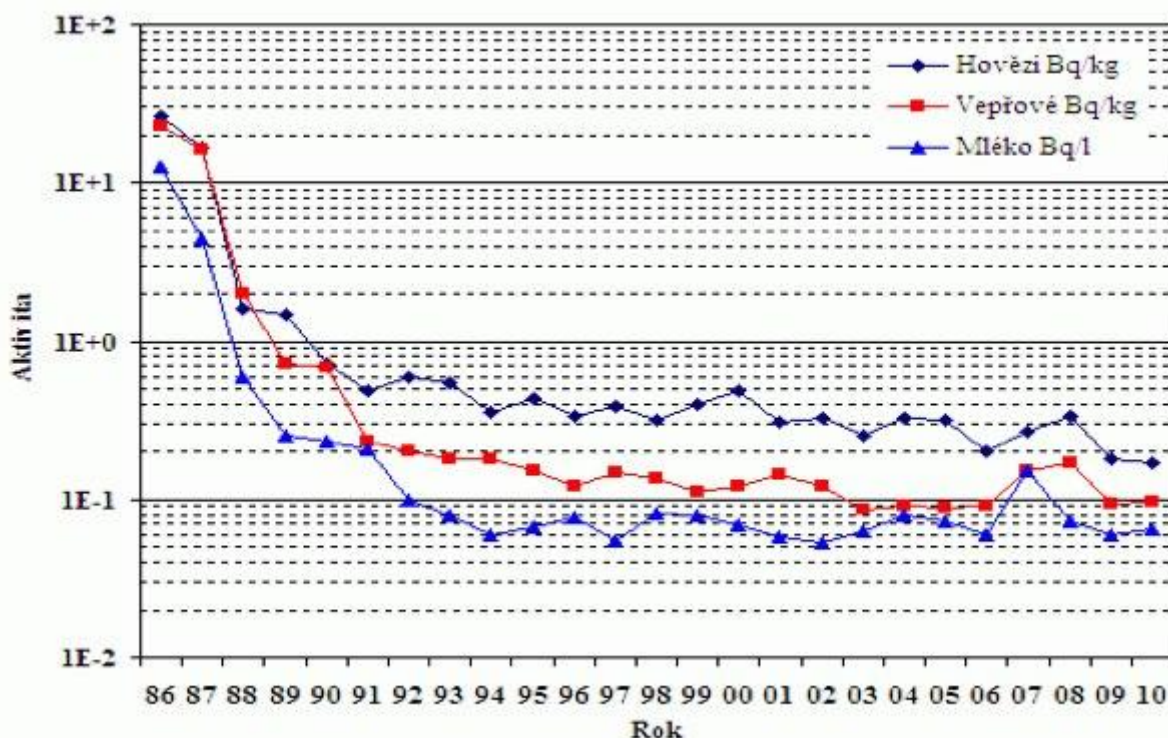
Má poločas rozpadu 5,26 let. Je produktem aktivace v jaderných reaktorech. Využívá se taky v radioterapii, ke sterilizaci potravin a koření, k odhalení konstrukčních vad v kovových dílech a podobně. Do prostředí se může dostat při jaderné havárii. Do těla se může dostat spolu s kontaminovanými potravinami či vodou popřípadě vdechnutím. V těle se rychle vstřebává do krve a tkání, především do jater, ledvin a kostí. Tělo následně opouští velmi pomalu v moči. Stejně jako všechny radioaktivní zářiče může i kobalt způsobovat buněčné bujení. V případě vnitřní kontaminace se k jeho odstranění používá výplach žaludku a podání penicilínu s chelatačním účinkem. [16, 40, 41]

#### 3.1.4.2.2 Cesium $^{137}\text{Cs}$

Je jedním z nejvýznamnějších gama radionuklidů, který kontaminuje potraviny a to hlavně při velkých únicích spojených s jadernými haváriemi. Poločas rozpadu je 30 let. Tento dlouhý poločas rozpadů způsobuje, že i desítky let po radiační události jej stále nacházíme v zemědělských produktech ze zasaženého území. Do nich se dostává z půdy a vodních sedimentů. Radiotoxicita je velmi vysoká a je potřeba se na něj zaměřit právě při podezření na kontaminaci potravin.  $^{137}\text{Cs}$  je velmi silným emitorem gama záření. Jedná se o produkt štěpení vznikající v jaderných reaktorech. Pevně se váže na půdu a do potravního řetězce se dostává z povrchově zamořené vegetace, píce a potravin. Radioaktivní izotop cesia se v těle chová jako draslík, který je nitrobuněčný kationt. Usazuje se ve svalovině a ve vaječnicích. Jelikož jeho pohyb v buňce je volný, může svými účinky velmi závažně ovlivnit buněčné organely i jádra buněk. Tím dochází k poškození buněčné struktury a chromozomů v jádře buněk. Asi 80 % přijatého  $^{137}\text{Cs}$  se vstřebává. V těle zůstává relativně krátkou dobu a vylučuje se močí. Dceřiným prvkem  $^{137}\text{Cs}$  je *cesium*  $^{134}\text{Cs}$ , které má poločas rozpadu 2,5 roku. Metabolizuje se jako draslík a ukládá se hlavně ve svalech. [16, 25, 42, 43, 44]

K jednomu z nejzávažnějších úniků radioizotopu  $^{137}\text{Cs}$  v dějinách lidstva došlo v roce 1986 při havárii na černobylské jaderné elektrárně. Spolu s izotopy  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$  a  $^{134}\text{Cs}$  měl izotop  $^{137}\text{Cs}$  největší dopad na zdraví lidí zasažených touto havárií. Ihned po havárii byla naměřena zvýšená hmotnostní resp. objemová aktivita  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$  v mléce a mase a následně i v ostatních potravinách na kontaminovaném území. Ke kontaminaci došlo na začátku vegetačního období, kdy byla vzrostlá pouze tráva a některá listová zelenina. V období na přelomu dubna a května se při krmení hospodářských zvířat teprve přecházelo na zelené krmivo. Hmotnostní aktivity významných radionuklidů se u trávy (tráva je zdrojem potravy pro dobytek) pohybovaly v rozmezí stovek až tisíců Bq/kg. Hlavní pozornost byla proto soustředěna na sledování obsahu radionuklidů v mléce a mléčných produktech, protože tyto produkty byly nejvýznamnějším zdrojem příjmu  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$  potravním řetězcem.

Obzvlášť vysoké koncentrace aktivity  $^{137}\text{Cs}$  byly zjištěny v houbách, bobulích a zvěřině a tyto vysoké hladiny přetrvávají již dvě desetiletí. [27, 28, 29, 30, 37]



Obr. č. 6: Průměrné roční hmotnostní aktivity <sup>137</sup>Cs ve vepřovém a hovězím mase a objemové aktivity <sup>137</sup>Cs v mléce v ČR od roku 1986 [3]

#### 3.1.4.2.3 Plutonium <sup>239</sup>Pu

Má poločas rozpadu 24 100 let. Vzniká při štěpení uranu v jaderných reaktorech a při jaderných výbuších spojených s jadernými testy. Používá se v jaderných zbraních. Např. atomová bomba použitá na japonské Nagasaki v roce 1945 obsahovala právě plutonium. Do těla se může dostat buďto inhalací nebo ingescí potravin a vody. Při požití se plutonium rychle vylučuje, pokud je ovšem vdechnuto, může se absorbovat v plicích a snadno se dostat do krevního řečiště. Odtud se může pohybovat po celém těle do kostí, jater či jiných orgánů. V těle pak zůstává celá desetiletí a vystavuje tak tkáň možnosti vzniku rakoviny. Plutonium je také těžký kov a může způsobit poškození ledvin. Jedná se o alfa a gama emitör. [16, 45, 46]

#### 3.1.4.3 Princip stanovení

Gama spektrometrie je nedestruktivní analytická metoda tj. metoda, kdy zkoumaný vzorek není při analýze poškozen. Jedná se o studium energie gama záření, která je emitována radionuklidy přítomnými ve zkoumaném vzorku.

Stanovení zářičů gama představuje při komplexní analýze radionuklidů nejjednodušší úkol. Pronikavost fotonového záření je tak velká, že ve většině případů umožňuje přímé nedestruktivní měření i objemových vzorků pevných materiálů, bez jejich rozkladu a separace stanovovaných radionuklidů.

Každý radionuklid je charakterizován energiemi vyzařovaného gama záření a jejich relativní intenzitou. Gama spektrometrie se používá pro kvalitativní i kvantitativní stanovení radionuklidů. V některých případech se pro upřesnění používá i poločas rozpadu (doba, za kterou se rozpadne jedna polovina původně přítomných radionuklidů daného typu).

Energie gama záření emitovaného jednotlivými radionuklidy je určena rozdílem energií stavů jádra (jsou mírně ovlivňovány okolím jádra). Díky tomu jsou spektrální čáry v ideálním gama spektru velice úzké. Jejich experimentální šířka je určena rozlišovací schopností použitého spektrometru. Ze známých typů detektorů, kterými jsou ionizační komory, proporcionální detektory, Geiger-Müllerovy scintilační detektory atd., je dnes nejlepší rozlišení dosahováno polovodičovými detektory.

Gama-spektrometrická analýza je jedna z nejefektivnějších metod stanovení koncentrace radionuklidů ve vzorcích. Tato metoda se používá ke stanovení koncentrace jak přirozených radionuklidů tj. členů přirozených rozpadových řad (radium, thorium, aktinium a radioaktivní izotopy olova a thallia) tak i některých nuklidů mimo tyto řady ( $^{40}\text{K}$ ) či umělých radionuklidů (radiocesium, radiokobalt).

Při analýze jsou spektra záření gama obvykle měřena v rozsahu energií do 2 000 keV. Tento energetický rozsah je dán záměrně a umožňuje analýzu jak koncentrace  $^{40}\text{K}$  a většiny fotonů radionuklidů, které jsou členy přirozených rozpadových řad, tak i umělých radionuklidů jako je například  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$ . Při dostatečném množství vzorku je pro měření obvykle používána geometrie „Marinelliho nádoba“. Menší množství vzorků měříme v tzv. „masťovkách“. Pro každou používanou geometrii měření je pro spektrometr třeba zkonstruovat účinnostní kalibraci pomocí etalonů záření připravených ve shodné nádobce.

[47, 48]



Obr. č. 7: Tzv. masťovky se vzorkem již usušené zeleniny připravené na měření

#### 3.1.4.4 Samotné stanovení

Vzorky ovoce, zeleniny, masa a ostatních komodit se měří v čerstvém stavu nebo po usušení, případně spálení (např. v případě mléka či obilí). Před samotným měřením vzorek projde „rychlým měřením“ následně se zváží, nakrájí (pokud je potřeba) a teprve poté

následuje případné sušení. Po usušení (pokud se provádí) se vzorek měří v Marinelliho nádobách a v tzv. masťovkách, zabalených do mikrotenových sáčků. Pro měření mléka se používá zachyceného sorbentu na Petriho misky. Následně jde vzorek na spektrometrickou trasu s polovodičovým detektorem.

V případě mléka je potřeba vzorek zkoncentrovat a to následujícím způsobem. Mléko (5 l) se slíje do polyetylenové láhve a přidá se k němu 10 ml formaldehydu, vzorek se nechá týden stát v lednici. Poté se oddělí mléčný tuk sebráním nebo odstředěním. Připraví se kolonka a spojí se s nálevkou. Do takto připravené kolonky se spláchne, demineralizovanou vodou, 15 ml sorbentu. Potom se kolonkou prolije vzorek mléka rychlostí 30 až 50 ml za minutu. Po protečení celého objemu vzorku mléka se sorbent promyje 50 ml demineralizované vody, pomocí alkoholu se sorbent převede na Petriho misku o průměru 52 mm.

Způsobů měření je více, ale pro účel této práce jsem vybral způsob měření v SÚRO Praha, které je nejvýznamnějším místem v ČR. [37, 49, 50, 51, 52, 53, 54]



Obr. č. 8: Průběh přípravy vzorku před měřením (nakrájení, sušení, lisování do „masťovek“)

Tab. č. 2: Doba přípravy a měření jednotlivých komodit potravních řetězců podle SÚRO Praha [49, 50, 51, 52, 53, 54]

| Vzorek           | Sušení/spálení/příprava vzorku | Doba měření         |
|------------------|--------------------------------|---------------------|
| Brambory         | 2-3 dny                        | 300 000 – 350 000 s |
| Maso             | 2 dny                          | 250 000 – 350 000 s |
| Obilí            | 1 den                          | 300 000 – 350 000 s |
| Zelenina a ovoce | max. 5 dní                     | 350 000 s           |
| Lesní plody      | max. 5 dní                     | 100 000 – 250 000 s |
| Houby            | max. 5 dní                     | 20 000 – 80 000 s   |
| Mléko            | 8 dní                          | 300 000 – 350 000 s |

### 3.1.5 Radiochemické stanovení

Radiochemicky úpravený vzorek slouží k dalšímu použití při již popsáných metodách (alfa, beta, gama spektrometrie). Může se jednat např. o mineralizaci, srážení, kapalinovou extrakci, extrakční chromatografii, iontoměničovou chromatografii atd.

Např. stanovení <sup>90</sup>Y záření beta <sup>90</sup>Y, bylo již ve stručnosti popsáno v kapitole 3.1.3.4

Radiochemickému stanovení již dále nevěnuji pozornost, jelikož je pro potřeby mé práce nepodstatné.

### 3.2 Stanovení radionuklidů v potravinách za mimořádné radiační situace

Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (Atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů definuje mimořádnou radiační situaci jako „situaci, která následuje po radiační havárii nebo po takové radiační nehodě nebo po takovém zjištění zvýšené úrovně radioaktivity nebo ozáření, které vyžadují naléhavá opatření na ochranu fyzických osob.“ [55]

Pro stanovení radionuklidů v potravinách za mimořádné radiační situace se využívají MMKP. MMKP jsou prostředky pro zajištění odběru vzorků z článků potravních řetězců a pro stanovení aktivity radionuklidů v těchto vzorcích. MMKP jsou po celém území ČR. Zajišťuje je resort SÚJB a MZe. [1, 56, 57]

#### 3.2.1 Složky potravních řetězců monitorované za mimořádné radiační situace v rámci RMS

Důvodem měření potravin za mimořádné radiační situace je buďto zavedení, prodloužení nebo ukončení následných ochranných opatření, kterými mohou být regulace požívání radionuklidy kontaminovaných potravin a vody a regulace používání radionuklidy kontaminovaných krmiv.

Předpokládá se odběr a následné měření téměř všech druhů potravin a krmiv a to z důvodu rozdílné distribuce radionuklidů v jednotlivých rostlinách a živých organizmech. Frekvence měření jednotlivých komodit je zcela závislá na rozhodnutí krizového štábu SÚJB v návaznosti na aktuální situaci. Vyhláška 319 uvádí měření minimálně mléka a smíšené stravy.

- 1) Monitorovanou složkou je **mléko** a měřenou veličinou je objemová aktivita radionuklidů. Složkami RMS podílejících se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS.
- 2) Monitorovanou složkou je **smíšená strava** a měřenou veličinou je hmotnostní aktivita radionuklidů. Složkami RMS podílejících se na monitorování jsou MMKP, LS a CLMS. [1, 56, 57]

Z mého pohledu by monitorování za mimořádné radiační situace v praxi znamenalo monitorování veškeré sezónní zeleniny a sezónního ovoce z oblastí na rozhraní zasaženého a nezasazeného území. Dále pak z oblasti nezasazené, kde bych volil nižší frekvenci monitorování. A v neposlední řadě i monitorování ze zasaženého území vzhledem k nutnosti sledování trendu. Dále pak monitorování komodit zemědělské produkce, jako jsou mléko, mléčné výrobky, maso, ryby, obiloviny atd. Samozřejmě se nesmí opomenout monitorování krmiv s uplatněním obdobných principů jako u ovoce a zeleniny.

#### 3.2.2 Prvotní třídění

Při mimořádné radiační situaci může nastat potřeba rychlého roztřídění velkého množství vzorků podle jejich aktivity. Třídění slouží k různým účelům, především pak k účelům níže uvedeným. K rozdělení komodit kontaminovaných a nekontaminovaných, k roztřídění vzorků se zvýšenou aktivitou u kterých je potřeba zvláštní zacházení, k volbě detektoru a geometrie měření, k oddělení vzorků jejichž aktivity převyšují daný limit atd.

K tomuto odhadu aktivity je možné použít měřiče dávkového příkonu, jakým může být například, v našich podmínkách často používaný GR-135 miniSpec.

Takto odhadnutá aktivita představuje důležitou informaci nutnou před vstupem na spektrometrii, abychom věděli jak velké aktivity očekávat a jak tomu přizpůsobit měření (pro více aktivní vzorky je potřeba použít měření ve větších vzdálenostech od detektoru, detektory s nižší účinnosti nebo je nutné použít menší objemy vzorků).



Obr. č. 9: GR-135 miniSpec [58]

### 3.2.2.1 Průběh prvotního třídění v laboratorních podmínkách

Pro účel této práce jsem vybral popis třídění pomocí přístroje GR-135 miniSpec (dále jen GR). Měření pomocí GR jsem vybral úmyslně, neboť jeho obsluha je velice jednoduchá.

GR je vybaven scintilačním krystalem NaI o objemu  $74 \text{ cm}^3$ . Tento přístroj nám umožňuje zjistit průměrný dávkový příkon v časovém intervalu 1 až 60 s. Dále pak měření absorbované dávky a zjednodušené spektrometrické měření. O tom zda je či není GR vhodný rozhoduje jeho citlivost. Je důležité vědět s jakou přesností odliší přístroj dávkový příkon vzorku od dávkového příkonu z okolního prostředí. Musíme tedy znát jeho minimální detekovatelný dávkový příkon (dále MDDP), respektive minimální detekovatelnou aktivitu (dále MDA). Pro efektivnost měření se používá krátká doba (postačuje 30 s).

Komodity se podle aktivity třídí do 4 skupin:

- |                          |          |        |
|--------------------------|----------|--------|
| 1. nízká aktivita        | < 1      | kBq/kg |
| 2. střední aktivita      | 1 – 10   | kBq/kg |
| 3. vysoká aktivita       | 10 – 100 | kBq/kg |
| 4. velmi vysoká aktivita | > 100    | kBq/kg |

Obecný postup měření je následující. Zkontrolujeme funkčnost přístroje a provedeme stabilizaci, resp. kalibraci kontrolním zdrojem. Styčnou plochu přístroje zabalíme do fólie abychom zabránili kontaminaci přístroje i následné kontaminaci dalších měřených vzorků potravin a krmiv. Nastavíme 30 s časový interval. Opakovaně změříme pozadí, postačí 10krát po dobu 30 s, a z něj stanovíme průměrný dávkový příkon a jeho směrodatnou odchylku<sup>1</sup>. Stanovíme MDDP pro danou situaci<sup>2</sup>. Následně zvolíme třídící hodnotu kritického dávkového příkonu (dále DP<sub>Krit</sub>). V případě závažných rozhodnutí, odvíjejících se od volby DP<sub>Krit</sub> volíme tuto hodnotu vyšší (konkrétně v případě omezení distribuce komodit potravních řetězců zvolíme dvojnásobek MDDP). Následně stanovíme MDA<sup>3</sup>. Nyní se stanoví dávkový příkon neznámého vzorku a zařadí se do jedné ze čtyř skupin (viz. předešlý odstavec). Porovná se dávkový příkon s kritickým dávkovým příkonem. Pokud je dávkový příkon vyšší než kritický, vzorek se označí jako „nadkritický“. Pro ověření správnosti postupů je vhodné některé „nadkritické“ vzorky spektrometricky přeměřit. Dále dle situace ověříme stabilitu poměru nuklidů ve směsi a případně můžeme odhadnout hmotnostní aktivitu.

Kapacita třídění jednoho přístroje by při 30 s intervalu mohla být až 100 vzorků za hodinu. Celou činnost je vhodné provádět ve dvojici. Pro jiné přístroje měřící dávkový příkon je postup obdobný. [59, 60, 61]

### 3.2.2.2 Průběh prvotního třídění v terénních podmínkách

Toto třídění se provádí přímo v terénu a mají ho na starost především mobilní skupiny (dále MS). Oproti laboratornímu třídění se komodity v terénu rozdělují pouze do 2 skupin. A to do skupiny přesahujících svou aktivitou zvolenou kritickou hodnotu a do skupiny s aktivitou nižší než je kritická hodnota. Nejvyšší přípustná hodnota pro potraviny je na úrovni desetin až jednotek kBq/kg. Kritickou hodnotu je dobré volit jako 2 až 3násobek MDA a to z důvodu zabránění vzniku falešných „pozitivních rozhodnutí“. Vzorky s DP nižší než DP<sub>Krit</sub> je potřeba následně změřit přesnější metodou a teprve poté rozhodnout o případném zákazu či povolení distribuce. Vzorky s dávkovým příkonem vyšším než DP<sub>Krit</sub> se již dále nemusí měřit vůbec a rovnou se jejich distribuce zakáže, nebo se jejich přeměření odsune na pozdější dobu.

Obecný postup při měření v terénu je následovný. Je vhodné pracovat ve dvojicích s tím, že jeden měří a druhý zapisuje. V první řadě je potřeba zkontrolovat funkčnost přístroje a provést jeho stabilizaci. Následně se nabere spektrum v blízkosti měřené komodity. Opakovaně se změří dávkový příkon pozadí (nejméně 3krát) a to vždy po dobu 30 s. Je nutné dodržet

<sup>1</sup> Průměrný dávkový příkon DP<sub>Prům</sub> a jeho směrodatná odchylka σ<sub>DP</sub> se spočítají dle následujících vztahů:

$$DP_{Prům} = \frac{\sum DP_j}{n} \quad \text{a} \quad \sigma_{DP} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (DP_j - DP_{Prům})^2}, \text{ kde } DP_{Prům} \text{ je střední hodnota}$$

dávkového příkonu od pozadí, DP<sub>j</sub> je hodnota jednotlivého dávkového příkonu od pozadí, σ<sub>DP</sub> má význam směrodatné odchylky jedné hodnoty dávkového příkonu od pozadí měřeného v 30 s intervalech a n je počet měření.

<sup>2</sup> Vztah pro výpočet MDDP je následující:  $MDDP = 2k\sqrt{2\sigma_{DP}}$ , kde k = 2,326 je kvantit jednostranného normálního rozdělení a σ<sub>DP</sub> je výběrová směrodatná odchylka dávkového příkonu od pozadí měřeného v 30 s intervalech.

<sup>3</sup> Vztah pro výpočet MDA je následující:  $MDA_n = \frac{MDDP}{K_n}$ , kde K<sub>n</sub> je konverzní koeficient dávka-aktivita

pro n-tý nuklid

dostatečnou vzdálenost od místa měření kontaminovaných komodit. Stanovíme MDDP pro danou situaci. Následně zvolíme třídící hodnotu  $DP_{Krit}$ . V případě závažných rozhodnutí, odvíjejících se od volby  $DP_{Krit}$  volíme tuto hodnotu vyšší, konkrétně v případě omezení distribuce komodit potravních řetězců zvolíme minimálně 2 až 3násobek MDDP. Následně stanovíme MDA. Nyní se stanoví dávkový příkon neznámého vzorku. Porovná se dávkový příkon s  $DP_{Krit}$ . Pokud je dávkový příkon vyšší než kritický, vzorek se označí jako „nadkritický“. Pro ověření správnosti postupů je vhodné některé „nadkritické“ vzorky spektrometricky přeměřit. Dále dle situace ověříme stabilitu poměru nuklidů ve směsi a případně můžeme odhadnout hmotnostní aktivitu. Odebere se část vzorku k pozdějšímu upřesnění v laboratoři. Samozřejmostí je zapisování všech hodnot během měření. [78, 79, 80]

### 3.2.3 Rychlé stanovení

Rychlé stanovení je možné jen u gama radionuklidů, které tvoří majoritní složku radionuklidů stanovených v potravinách. Hovoří se zde o tzv. „rychlé gamě“. Nastavení měření je stejné jako při obvyklé radiační situaci (viz. kapitola 3.1.4 Metody stanovení gama).

Rychlé stanovení gama má nesporné výhody mezi které patří:

- 1) rychlost (samotné měření trvá 5 až 10 min),
- 2) schopnost rozpoznat velkou škálu radionuklidů a jejich přibližnou aktivitu,
- 3) možnost měření vzorku v nativním stavu (na rozdíl od klasické spektrometrie gama, kde se preferuje vzorek zkoncentrovaný např. sušený), které dále umožňuje využití vzorku pro zpřesnění klasickou gama spektrometrií či radiochemickou analýzou,
- 4) větší kapacita laboratoře a možnost proměření většího množství vzorku v krátkém časovém úseku,
- 5) výsledky z rychlého stanovení mohou být v krátkém čase předány KŠ SÚJB k využití při tvorbě doporučení.

Nevýhodou rychlého stanovení je nepřesnost měření, kterou ovšem plně vyváží výše uvedené výhody.

Při rychlém stanovení je velice důležité zabránit cross-kontaminaci, která by mohla být způsobená velkým objemem měřených kontaminovaných vzorků, rychlostí měření a rychlostí práce v celé laboratoři, což by následně mohlo znehodnotit další měření. Cross-kontaminaci zabráníme zakonzervováním detektorů, jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách. Vzhledem k dodržení bezpečnosti práce v laboratoři je potřeba mít zapnutou digestoř.

### 3.2.4 Zpřesnění výsledků

Zpřesnění výsledků následuje až po rychlé gamě. Používá se v období řádově týdnů až měsíců po události, neboť je již zřejmé, že měřená komodita je kontaminovaná. Důvody měření jsou zpřesnění trendu vývoje aktivity v daných komoditách, na jejichž základě KŠ SÚJB upřesňuje a doplňuje, zavádí a odvolává svá doporučení. Měření probíhá stejným způsobem jak za obvyklé radiační situace (viz. kapitola 3.1.4 Metody stanovení gama).

### 3.3 Vyhodnocení situace a její dopady na potravní řetězce

Pro pochopení vypracované analýzy mimořádné radiační události uvedené v praktické části této diplomové části, je nutné uvést, kdo se v dané situaci vyhodnocením a dopady v ČR zabývá.

#### 3.3.1 Státní úřad pro jadernou bezpečnost

SÚJB má pro řešení mimořádných událostí, havarijních situací a nehod, tedy všech odchylek od normální situace, ustanoven krizový štáb. Krizový štáb je orgánem krizového řízení SÚJB určeným:

- 1) k řízení činnosti SÚJB při všech vzniklých krizových situacích, které mají na SÚJB dopad, včetně řízení radiační monitorovací sítě za radiační mimořádné situace,
- 2) k vypracování podkladů pro rozhodování o přijetí ochranných opatření v případě vzniku radiační havárie,
- 3) ke zvládnutí situace vzniklé porušením zákona č. 19/1997 Sb., ve znění pozdějších předpisů nebo Úmluvy o zákazu chemických zbraní a porušením zákona č. 281/2002 Sb. [62]

V praxi to znamená, že krátce po radiační události, vydává KŠ SÚJB doporučení zavést ochranná opatření, založené na výsledcích rychlého stanovení. V pozdější době (řádově týdny po havárii) dochází ke zpřesnění výsledků měření a tím i zpřesnění vývojových trendů aktivity v daných komoditách, na jejichž základě KŠ SÚJB upřesňuje a doplňuje, zavádí a odvolává svá doporučení.

Pro posouzení rozsahu radiační havárie, prognózu jejího vývoje a rozhodování o zavádění ochranných opatření má zásadní význam monitorování veličin charakterizujících ionizující záření a stanovení radionuklidů, jakož i jejich šíření a účinky.

Vzhledem k tomu, že v praktické části uvažují o radiačních haváriích na jaderných elektrárnách, dovoluji si vložit poznámku o monitorování jejich okolí.

Ve většině zemí je zajištěno monitorování v areálu a okolí jaderných zařízení a pracovišť se zdroji ionizačního záření součástí legislativních požadavků na držitele povolení. V ČR je tento požadavek ošetřen tzv. monitorováním, prováděným držitelem povolení k pracovišti IV. kategorie a jako kontrolní mechanismus k němu zavedené tzv. nezávislé monitorování.

Kromě monitorování prováděného provozovateli jaderných zařízení a pracovišť se zdroji ionizačního záření existují monitorovací sítě pro teritoriální monitorování provozované státem potřebné v případě velkého rozsahu kontaminovaného území, tedy celostátní RMS.

Pro doplnění uvádím definice z legislativy.

*Radiační nehoda* je událost, která má za následek nepřípustné uvolnění radioaktivních látek nebo ionizujícího záření nebo nepřípustné ozáření fyzických osob.

*Radiační havárie* je radiační nehoda, jejíž následky vyžadují naléhavá opatření na ochranu obyvatelstva a životního prostředí.

*Radiační mimořádná událost* je situace, která následuje po radiační havárii nebo po takové radiační nehodě nebo po takovém zjištění zvýšené radioaktivity nebo ozáření, které vyžadují naléhavá opatření na ochranu fyzických osob.

Vyhláška 318 dále rozděluje radiační mimořádné události do tří stupňů, dle jejich následků na okolí a rozsahu potřebných opatření ke zvládnutí situace.

1. *stupněm* je klasifikována mimořádná událost, která vede nebo může vést k nepřipustnému ozáření zaměstnanců a dalších osob nebo nepřipustnému uvolnění radioaktivních látek do prostor jaderného zařízení nebo pracoviště, která má omezený, lokální charakter. K jejímu řešení jsou dostačující síly a prostředky obsluhy nebo pracovní směny a při přepravě nedojde k úniku radioaktivních látek do životního prostředí.

2. *stupněm* je klasifikována mimořádná událost, která vede nebo může vést k nepřipustnému závažnému ozáření zaměstnanců a dalších osob nebo nepřipustnému uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí, které nevyžaduje zavádění neodkladných opatření k ochraně obyvatelstva a životního prostředí. Její řešení vyžaduje aktivaci zasahujících osob držitele povolení a k jejímu zvládnutí jsou dostačující síly a prostředky držitele povolení, popřípadě síly a prostředky smluvně zajištěné držitelem povolení.

3. *stupněm* je klasifikována mimořádná událost, která vede nebo může vést k nepřipustnému závažnému uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí, vyžadujícím zavádění neodkladných opatření k ochraně obyvatelstva a životního prostředí, stanovená ve vnějším havarijním plánu a v havarijním plánu kraje. Událost 3. stupně je radiační havárie a její řešení vyžaduje kromě aktivace zasahujících osob držitele povolení a zasahujících osob podle vnějšího havarijního plánu, popřípadě havarijního plánu kraje zapojení dalších dotčených orgánů. [1, 56, 57]

### 3.3.2 Ochranná opatření

Mezi základní ochranná opatření vztahující se k potravinám patří regulace či zákaz spotřeby, zákaz vývozu a likvidace kontaminovaných potravin. Pro regulaci distribuce a požívání kontaminovaných potravin v ČR jsou stanoveny obecné akční úrovně.

Po radiační havárii, která vede ke kontaminaci potravin, je potřeba přijmout řadu opatření v různých fázích jejich výroby a prodeje. Je vhodné je přijmout v co největší možné míře, tak aby obsah radionuklidů v potravinách, krmivech i pitné vodě, uváděných na trh a vhodných ke konzumaci, byl pod akční úrovní.

požívání radionuklidů kontaminovaných potravin, pitné vody a krmiv v případě mimořádné radiační události na území ČR jsou dány Vyhláškou 307/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů. Směrná hodnota efektivní dávka je 5 mSv až 50 mSv a směrná hodnota ekvivalentní dávka v jednotlivých orgánech a tkáních je 50 mSv až 500 mSv. Na tomto místě považuji za vhodné podotknout, že tyto úrovně se vztahují na komodity ze zasaženého území ČR, jak vychází z legislativy. [57, 63]

V dalších fázích radiační havárie nastupují další zemědělská a veterinární opatření jako jsou využívání zasažené půdy, problematika kontaminovaného dobytka atd.

Následně pak opatření mající za cíl opětovné využití zemědělské půdy, jako je rehabilitace a rekultivace zemědělské půdy.

Velice důležitá je i problematika zasaženého lesního porostu a neobdělávané půdy, kde budou plodiny s daleko vyšší objemovou aktivitou, navíc tyto plodiny jsou spásány divokou zvěří, což znamená že i jejich konzumace by měla být regulována.

V případě zavádění opatření (radiační havárie na našich jaderných elektrárnách) se vždy uvažuje o tzv. zónách: 1. zóna pro plánovaná opatření, 2. zóna pro neodkladná opatření (tyto zóny se shodují se zónami havarijního plánování v okolí našich elektráren) a 3. zóna dlouhodobých opatření, kterou IAEA doporučuje v radiusu 300 km od centra havárie.

### 3.3.3 Vývoz a dovoz

Vývoz komodit z místa havárie spojené s velkým únikem radionuklidů je vždy zakázán. Vyvážené komodity ze zbytku území dané země nesmí překročit povolené limity na obsah radionuklidů. Je nutné dodržovat národní limity, pokud jsou zavedeny, a mezinárodní legislativu. Rozdílná nařízení jsou pro normální a pro havarijní stav.

Pro vývoz a dovoz potravin je možné použít následující kritéria a to v návaznosti na danou situaci:

- 1) Tzv. „pohavarijní předpisy“ Evropské komise, které nám říkají jaké mohou být nejvyšší přípustné aktivity radionuklidů v potravinách a krmivech. Jak již vyplývá z formulace jsou tyto nejvyšší přípustné aktivity doporučením. Jednotlivé členské státy, ve svojí legislativě, mohou mít zakotveny svoje akční úrovně. Používají se po havárii či radiační mimořádné události. Evropská nařízení doporučující maximální povolené úrovně radioaktivní kontaminace v potravinách a krmivech jsou: Nařízení rady (Euratom) 3954/87 kontaminace potravin a krmiv po jaderné havárii nebo jiném případě radiační mimořádné situace, pozměněné Nařízením komise 2218/89, doplněné Nařízením komise 944/89, kterým se stanoví nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace méně významných potravin po jaderné havárii nebo jiném případě radiační mimořádné situace a Nařízení komise 770/90, kterým se stanoví nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace krmiv po jaderné havárii nebo jiném případě radiační mimořádné situace.
- 2) Tzv. „počernobylské“ předpisy, které nám doporučují maximální povolené úrovně radioaktivní kontaminace ve vyvážených zemědělských produktech ze třetích zemí za normální radiační situace. Mezi ně patří Nařízení rady 733/2008 o podmínkách dovozu zemědělských produktů pocházejících ze třetích zemí po havárii jaderné elektrárny v Černobylu, které bylo pozměněno Nařízením rady 1048/2009 o podmínkách dovozu zemědělských produktů pocházejících ze třetích zemí po havárii jaderné elektrárny v Černobylu. I v případě „počernobylských předpisů“ platí, že jednotlivé členské státy mohou mít své národní limity. Pro úplnost dodávám, že ČR se ve své legislativě odkazuje na úrovně doporučené EU.
- 3) Tzv. dovoz a vývoz potravin a krmiv z Japonska po havárii jaderné elektrárny Fukušima Dai-ichi, stanovující závazné maximální dovolené úrovně radioaktivní kontaminace. Evropská komise reagovala na vzniklou situaci sezávazněním maximálních povolených úrovní radioaktivní kontaminace v potravinách a krmivech již výše uvedených „pohavarijních nařízení“. Sezávaznění je dáno Nařízením komise 297/2011, kterým se stanoví zvláštní podmínky pro dovoz krmiv a potravin pocházejících nebo odesílaných z Japonska po havárii v jaderné elektrárně Fukušima, které bylo pozměněno prováděcím Nařízením komise 351/2011. Pozměňovací nařízení bylo přijato na základě sjednocení akčních úrovní stanovených Japonskem a maximálními úrovněmi radioaktivní kontaminace EU.
- 4) Codex alimentarius, vydaný IAEA ve spolupráci s FAO/WHO, což je sbírka mezinárodně uznávaných standardů, praktických postupů, směrnic a dalších doporučení, vztahujících se k bezpečnosti potravin.
- 5) Jednotlivé členské státy mohou mít stanoveny národní nejvyšší přípustné úrovně.[60, 61, 64, 65, 66, 67, 68, 69]

Limity vždy platí pro zasaženou zemi. Výjimkou by mohl být případ, kdyby se stala událost na území jiného státu, která by ovšem zasáhla i stát vedlejší. V tom případě by limity platili i pro sousední zasažený stát.

Pokud se dovezou kontaminované potraviny, v případě obvyklé radiační situace, je potřeba tuto skutečnost nahlásit RASFF<sup>4</sup>

Pokud se dovezou kontaminované potraviny, v případě země původu, kde je vyhlášena mimořádná radiační situace (např. dovoz z Japonska v souvislosti s havárií jaderné elektrárny Fukušima), je potřeba tuto skutečnost nahlásit RASFF a ECURIE<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> RASFF Systém rychlého varování pro potraviny a krmiva (anglicky Rapid Alert System for Food and Feed - RASFF) je systém, který představuje síť členských států EU, Evropské komise, Evropského úřadu pro bezpečnost potravin a zemí Evropského sdružení volného obchodu. Systém slouží k rychlé výměně informací týkajících se potravin a krmiv, které představují riziko ohrožení zdraví lidí a které se vyskytují na společném trhu těchto zemí. Zabraňuje uvedení zdravotně závadných potravin do oběhu a zajišťuje stažení či likvidaci při jejich výskytu. [70]

<sup>5</sup> ECURIE (European Community Urgent Radiological Information Exchange) je 24hodinový bezpečnostně oznamovací a informační systém. Tento systém informuje vybrané autority zúčastněných států, mezi které patří členové EU, Švýcarsko a Evropská komise o významných jaderných haváriích a radiačních nehodách. [71]

## 4 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktickou část diplomové práce jsem rozdělil do tří vzájemně propojených částí.

V první části jsem provedl modelaci radiační mimořádné události na území ČR. Pro zamýšlenou simulaci jsem použil scénář z havarijního cvičení „ZÓNA 2010“, na jehož základě rozvíjím své pokračování scénáře radiologických dopadů v potravních řetězcích zahrnujících popsání následných opatření, ke kterým by mělo při takové události dojít.

V druhé části praktické části jsem uvedl radiační mimořádnou událost na území jiného státu. Pro úplnost jsem se zmínil o možných variantách tohoto scénáře. Podrobněji se ovšem zabývám scénářem radiační mimořádnou události na území státu vzdáleného od ČR. Jako základ uvažované mimořádné události jsem si dovolil použít aktuální situaci nedávné radiační havárie na jaderné elektrárně Fukušima Dai-ichi. Vzhledem k tomu, že v době zpracovávání diplomové práce ještě neznáme konkrétní radiologické dopady na potravní řetězec opět navrhuji svůj předpokládaný scénář vývoje včetně mnou navržených opatření, týkající se dopadu na ČR.

V třetí části předkládám porovnání obou situací a poukazuji, z mého pohledu, na hlavní rozdíl postupů, rozsahů a přijímání opatření při radiační události na území ČR vůči situaci na území jiné země a její vliv na nás.

### 4.1 Modelace radiační události na území České republiky

Jak už jsem předeslal, pro modelaci mimořádné radiační situace na území ČR jsem vycházel z havarijního cvičení „ZÓNA 2010“<sup>6</sup>. Na jehož základě jsem rozvíjel problematiku kontaminovaných zemědělských plodin. Vzhledem k tomu, že dostupné zdroje k průběhu havarijního cvičení ZÓNA 2010, neuvádějí předpokládané „uniklé“ radionuklidy, průběh zavádění a odvolávání následných opatření, pokračuji v simulaci této události, pro potřeby své diplomové práce, na základě svých znalostí.

#### 4.1.1 Popis události

Popis události pro potřebu této práce byl zkrácen a upraven. K simulované radiační události došlo 22. 9. 2010 na jaderné elektrárně Temelín. Scénář havarijního cvičení „ZÓNA 2010“ nezahrnuje celou poúnikovou fázi.

6:28 Styčné místo SÚJB přijímá fax, prvotní oznámení mimořádné události na elektrárně Temelín (dále ETE). Informace o úniku chladiva primárního okruhu do kontejnmentu doprovázený úplnou ztrátou napájení vlastní spotřeby. Reaktor byl bezpečně odstaven.

6:30 Styčné místo SÚJB svolává KŠ SÚJB.

6:51 KŠ SÚJB kompletní v krizovém koordinačním centru SÚJB a vedoucí KŠ informuje hejtmana jihočeského kraje.

7:10 Směnový inženýr ETE telefonicky informuje styčné místo SÚJB o zhoršení situace na mimořádnou událost 3. stupně. Kontejnment zatím plní svou funkci, k úniku radiace do okolí nedošlo.

---

<sup>6</sup> Cvičení „ZÓNA 2010“ prověřilo činnost orgánů krizového řízení při řešení následků simulované radiační havárie na Jaderné elektrárně Temelín. Cvičení se uskutečnilo 22. a 23. září 2010 a zapojily se do něj orgány krizového řízení dotčených ústředních správních úřadů, Jihočeský kraj a složky integrovaného záchranného systému (dále IZS). [72]

7:15 Situace na jaderné elektrárně vede k velké pravděpodobnosti úniku radiace do okolí, proto vydává směnový inženýr ETE pokyn k varování obyvatelstva v zóně havarijního plánování<sup>7</sup>. Pracovníci elektrárny (kteří nejsou potřeba k zvládnutí situace) dostali pokyn k ukrytí a jodové profylaxi.

7:25 Vedoucí KŠ SÚJB informovala prostřednictvím sekretariátu bezpečnostní rady státu předsedu vlády a upozornila ho na pravděpodobnou potřebu vyhlášení nouzového stavu na území jihočeského kraje.

7:40 Ředitel ETE informuje vedoucí KŠ SÚJB o zhoršující se situaci, nedaří se zprovoznit havarijní chlazení, teplota v aktivní zóně dosáhla 900 °C, kontejnment zatím drží.

7:51 KŠ SÚJB informuje o vzniklé události na jaderné elektrárně Temelíně IAEA a Evropskou komisi.

7:55 RMS byla uvedena do havarijního režimu, mobilní a letecké skupiny dostaly pokyn připravit se k přesunu do zóny havarijního plánování.

8:00 Aktivován regionální KŠ SÚJB.

8:50 Informace z Úřadu vlády, proběhl kontakt s hejtmánem, hejtmán jihočeského kraje vyhlásil stav nebezpečí a předpokládá nutnost vyhlášení nouzového stavu.

9:11 Vedoucí havarijního štábu ETE informuje vedoucí KŠ SÚJB, že došlo v kontejnmentu postiženého bloku k výbuchu vodíku, jeho roztěsnění a začíná únik radioaktivních látek z elektrárny.

9:19 KŠ SÚJB obdržel odhad velikosti úniku od Havarijního štábu ETE. předpokládaný únik by neměl být vyšší než 0,1 % celkového množství v aktivní zóně reaktoru, což potvrzuje oprávněnost vyhlášení ochranných opatření.

9:34 Událost byla přehodnocena na stupeň INES 6<sup>8</sup>

10:00 Po dobu trvání úniku je ve směru větru - tj. ve směru šíření uniklých radioaktivních látek nejúčinnějším opatřením ukrytí a jodová profylaxe. Ve chvíli, kdy akce na elektrárně povedou ke skončení úniku, situaci v zóně havarijního plánování změří LeS a pro podrobnější informace z jednotlivých obcí vyrazí do terénu MS, které potvrdí či vyvrátí nutnost evakuace, která je zatím předpovídána z "modelu šíření". Data z měření bude shromažďovat regionální KŠ SÚJB a po jejich předání a vyhodnocení KŠ v Praze bude upřesněno doporučení k evakuaci a nebo k odvolání ukrytí (tím pádem k normální situaci).

11:12 KŠ SÚJB obdržel od GŘ HZS návrh "Rozhodnutí předsedy vlády o vyhlášení nouzového stavu" a je požádán o připomínkování dokumentu.

12:13 KŠ SÚJB obdržel informaci od vedoucího jaderné bezpečnosti ETE o tom, že se podařilo obnovit napájení jednoho z bezpečnostních systémů a nastartovat tím havarijní nízkotlaké doplňovací čerpadlo. Tím se podařilo zajistit chlazení aktivní zóny a výrazně omezit únik z kontejnmentu.

---

<sup>7</sup> Zóna havarijního plánování – Území v okolí objektu nebo zařízení, v němž krajský úřad, v jehož působnosti se nachází objekt nebo zařízení, uplatňuje požadavky havarijního plánování formou vnějšího havarijního plánu. [74]

<sup>8</sup> INES - Mezinárodní stupnice na hodnocení událostí na jaderných zařízeních „INES“ International Nuclear Event Scale byla vytvořena za účelem porozumění závažnosti událostí, nehod a havárií především na jaderných elektrárnách, ale taktéž i na jiných zařízeních, které využívají jadernou energii nebo výsledkem jejich činnosti je radioaktivní záření. Stupně: 0 – odchylka, 1 – anomálie, 2 – nehoda, 3 – vážná nehoda, 4 – havárie s vážnými účinky na jaderné zařízení, 5 – havárie s účinky na okolí, 6 – vážná havárie s účinky na okolí, 7 – velmi vážná havárie s účinky na okolí [75]

12:23 Únik poklesl natolik, že je možno jej považovat za skončený. [73]

Zde končí ta část scénáře havarijního cvičení „ZÓNA 2010“, která je pro mě důležitá. Dále uvádím svůj předpokládaný vývoj uvažované radiační mimořádné události včetně analýzy potřeb krizového štábu v případě mimořádné radiační události a stanovení radiologických dopadů v potravních řetězcích.

#### 4.1.2 Výčet možných uniklých radionuklidů

V případě této modelové situace předpokládám únik následujících radionuklidů:  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , radioizotopy Kr a Xe.

V další části se budu, pro potřebu kontaminace potravin, zabývat pouze následujícími radionuklidy:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  a  $^{241}\text{Am}$ . Výběr radionuklidů jsem ztotožnil s doporučeními Evropské komise, s tzv. Pohavarijními předpisy.

#### 4.1.3 Kontaminované potraviny

##### 4.1.3.1 Úniková fáze

Na základě informací z TDS bude potvrzeno, že nastal únik. Podle SVZ bude zjištěn směr úniku a dávkový příkon. Z následných zpráv z ČHMÚ o aktuálních klimatických podmínkách (směru a síle větru, teplotě vzduchu, množství srážek atd.) bude znám směrem a rychlostí šíření radioaktivních částic ve vzdušné mase, na základě těchto informací bude KŠ SÚJB hodnotit radiační situaci, šíření kontaminované masy a dále bude usuzovat na předpokládaný vývoj situace.

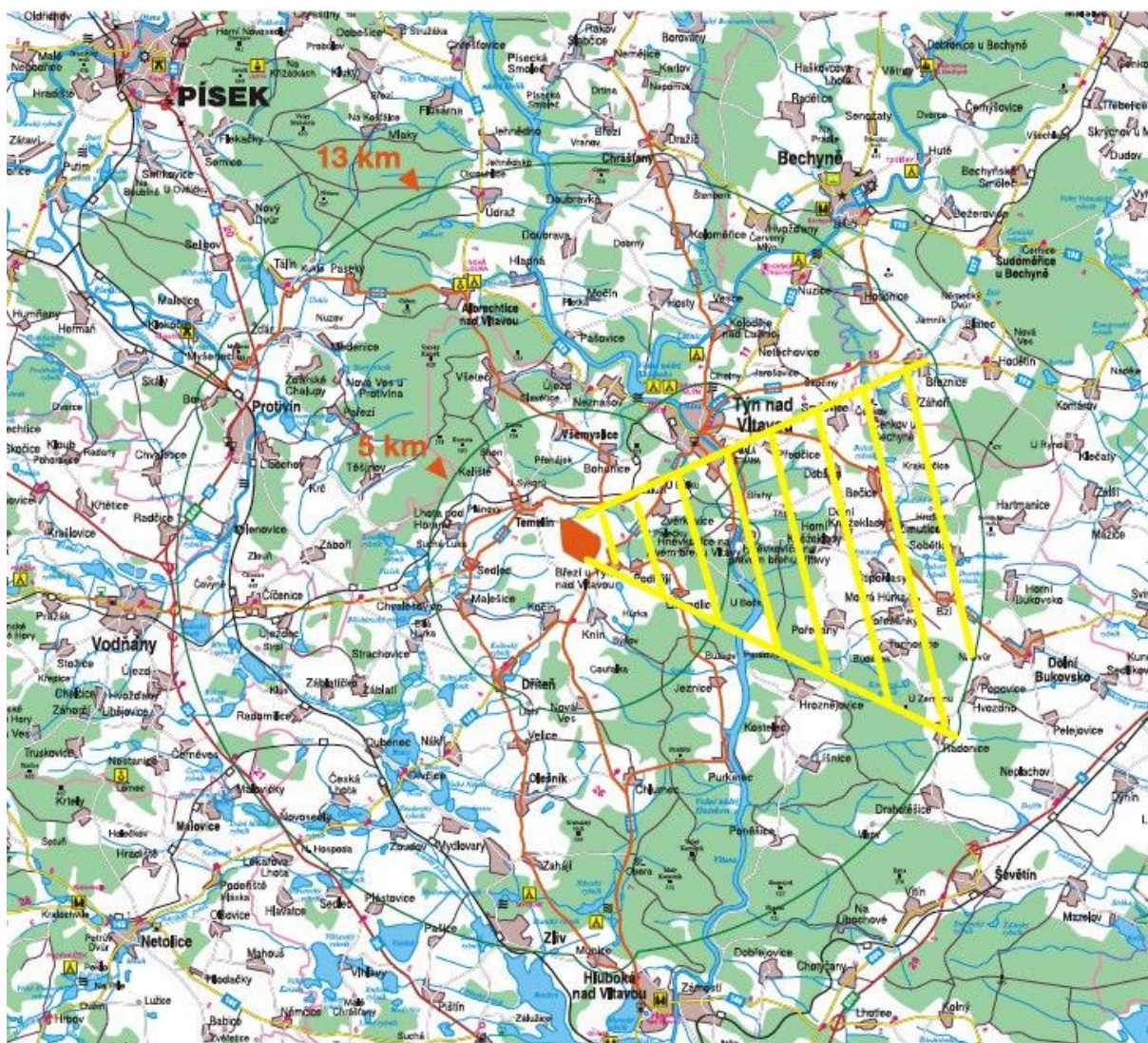
KŠ SÚJB bude řídit monitorování v ZHP k upřesnění radiační situace a neprodleně vydá doporučení k přípravě evakuace v zasažených částech ZHP.

Na základě meteorologických informací, výsledcích měření dávkových příkonů a složek životního prostředí KŠ SÚJB doporučí ochranná doporučení (jen pro zasažená území v rámci ZHP):

- 1) zákaz konzumace a používání pitné vody z povrchových zdrojů a ze studní,
- 2) zákaz konzumace a používání listové zeleniny, sklizené po odvolání ukrytí z nezakrytých ploch, tedy po době průchodu kontaminované vzdušné masy,
- 3) zákaz konzumace hub a lesních plodů, pokud byly sebrány po odvolání ukrytí, tedy po době průchodu kontaminované vzdušné masy
- 4) zákaz požívání potravin, včetně balených potravin, pokud byly umístěny v době ukrytí na volném prostranství, tedy po době průchodu kontaminované vzdušné masy
- 5) zákaz konzumace ulovených ryby po průchodu kontaminované vzdušné masy,
- 6) zákaz konzumace mléka a vajec domácích zvířat, tedy po době průchodu kontaminované vzdušné masy,
- 7) zákaz zalévání plodin dešťovou vodou zachycenou v době ukrytí, tedy v době průchodu kontaminované vzdušné masy.

Ukončení úniku radioaktivních látek do životního prostředí.

Obyvatelstvu ze zbylé část území, tedy nezasažené oblasti bude doporučeno, aby se vyhýbalo konzumaci potravin neznámého původu. Další možná opatření budou doporučena na základě vývoje situace a výsledků měření radiační situace.



Obr. č. 10: Zasažená území v rámci zóny havarijního plánování

#### 4.1.3.2 Poúniková fáze

Na průzkum trasy vyrazí rychlá monitorovací skupina ETE. SÚJB vydá doporučení k přípravě evakuace v zasažené oblasti. Pomocí MS budou odebrány vzorky veškerého sezónního ovoce, zeleniny, obilovin a mléka. V první fázi bude největší množství vzorků odebráno na rozhraní „nezasažené“ a „zasažené“ části ZHP. U odebraných vzorků bude provedeno prvotní třídění pomocí přístroje GR-135 miniSpec (podrobný popis měření jsem uvedl v kapitole 3.2.2 Prvotní třídění). Po obdržení hodnot od MS vydá KŠ SÚJB doporučení k ochranným opatřením. Zde předpokládám, že MS naměřily hodnoty 2 až 3krát větší než MDDP. Vedoucí KŠ SÚJB bude aktivovat laboratorní skupiny k monitorování v havarijním režimu. Tyto skupiny budou stanovovat obsah radionuklidů ve vzorcích dodaných prostřednictvím MS RMS. Předpokládám, že se budou stanovovat objemové a hmotnostní aktivity všech relevantních radionuklidů uvolněných do životního prostředí, zejména pak radionuklidy uvedené v kapitole 4.1.2 Výčet možných uniklých radionuklidů. Frekvence monitorování se bude odvíjet od aktuální situace v dané oblasti. Aktivovány budou laboratoře: SÚRO Praha, SÚRO Ostrava, SÚRO Hradec Králové, SVÚ Praha,

SVÚ Olomouc, VÚV Praha a samozřejmě držiteli povolení tj. laboratoře ČEZ, a.s. (jak Temelín tak Dukovany).

Následně budou vzorky předány na tzv. „rychlou gamu“ (podrobně jsem popsal v kapitole „3.2.3 Rychlé stanovení“)

Důvody proměření budou následující:

- 1) odhadnout situaci z hlediska přípravy a zavedení ochranných opatření. Tím se myslí kontrola potravních řetězců, zjištění území, na kterém je potřeba provést ochranná opatření a samozřejmě omezení/zakázání distribuce a vývozu složek potravních řetězců,
- 2) upřesnit již zavedená ochranná opatření (ať už se jedná o druh komodit nebo o zjištění zasaženého území) .

Výsledky budou předány KŠ SÚJB (bude zde uvedeno jaké radionuklidů byly nalezeny, kde se zasažená oblast nachází a jak vysoké jsou aktivity v jednotlivých vzorcích). Na základě naměřených výsledků vydá SÚJB doporučující opatření. Bude omezena konzumace, používání a distribuce potravin, krmiv a pitné vody z nezasazené části ZHP, tedy tam, kde se naměřily zvýšené úrovně, nepřesahující stanovené akční úrovně. U sezónních potravin pěstovaných v zasažené části zóny, bude nařízená okamžitá likvidace.

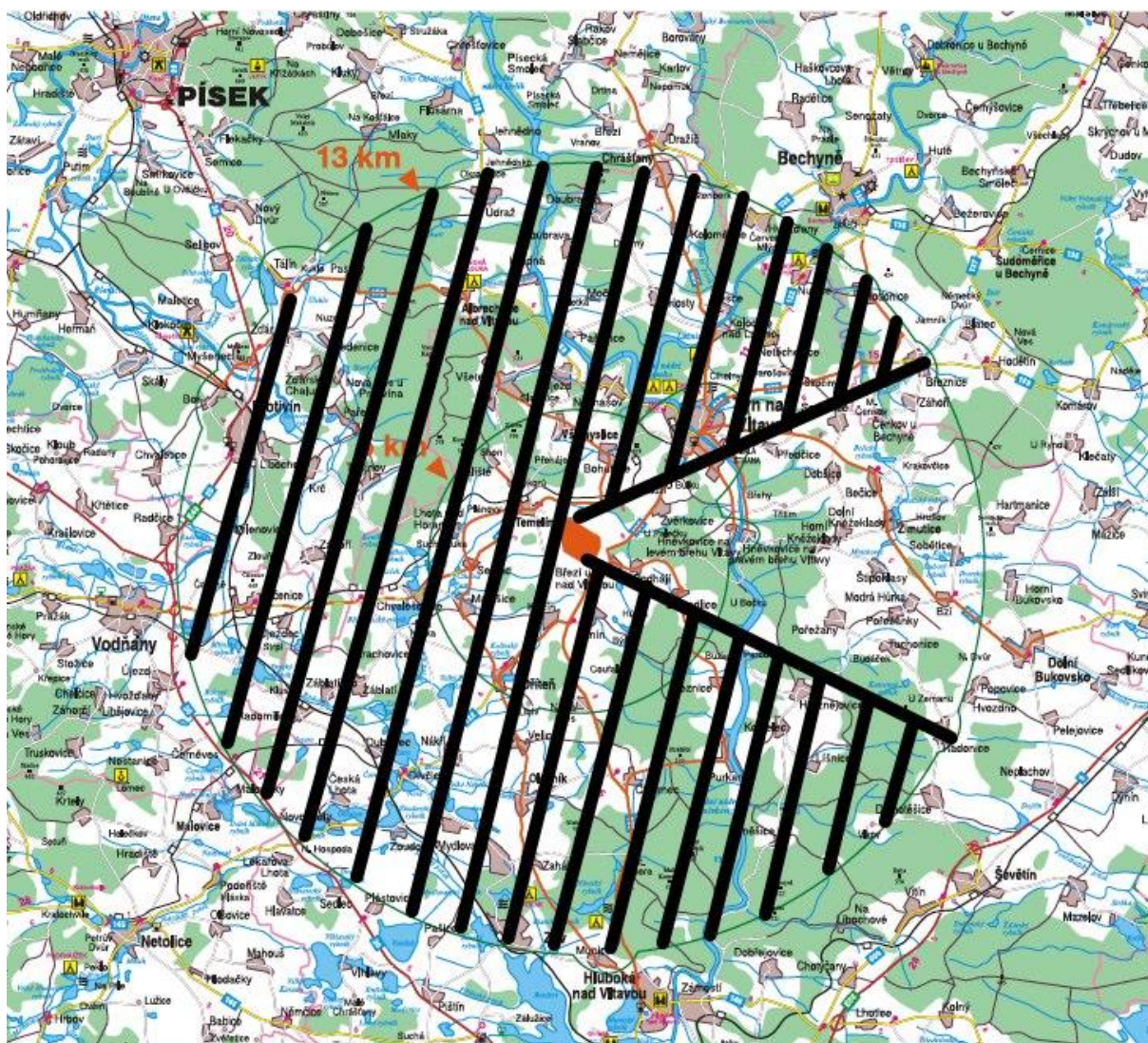
Následné odběry budou provedeny i po celém území ČR, převážně však na trase kudy šla radioaktivní kontaminovaná masa. Na těchto místech ČR, kde budou naměřeny zvýšené hodnoty dávkového příkonu avšak nepřesahující stanovené limity, nebude potřeba žádných zvláštních opatření.

V dalších fázích se ochranná opatření budou zavádět či odvolávat na základě výsledků monitorování. Ve svém scénáři předpokládám, že nedojde ke kontaminaci území mimo ZHP. Proto doporučení k opatřením se budou vztahovat pouze a jenom na její území.

V době simulované havárie již bylo sklizené obilí a kukuřice z polí v zasaženém území, což značně usnadnilo situaci. Problém nastane až v následujících vegetačních obdobích, kdy by se mohly do zemědělských plodin pěstovaných na zasaženém území dostat radionuklidy a to především Cs z půdy. Proto bude vydáno nařízení o zákazu pěstování zemědělských plodin na nejvíce zasaženém území.

V následujících obdobích, kdy již bude prováděna klasická gama spektrometrie a RMS poběží opět v normálním režimu, budou zaznamenány mírně zvýšená množství potravin s povrchovou kontaminací a též vzorky mléka u nichž došlo ke kontaminaci způsobenou inhalací a ingescí (spásáním kontaminované trávy a vdechováním kontaminované vzdušné masy kravami). Na to navazuje i pozdější zjištění kontaminace masa z chovných zvířat. Budou odebírány i vzorky od distributorů. Ani v jednom případě však nebudou přesaženy stanové limity.

Zvýšenou objemovou aktivitu předpokládám v mase divokých zvířat, lesních plodech a houbách. Vzhledem k minoritnímu podílu těchto komodit na spotřebním koši české populace a aktivitám pod akčními úrovněmi budou stačit jen doporučení k omezení konzumace.



Obr. č. 11: “Nezasazená,, území v rámci zóny havarijního plánování

Opatření v horizontu měsíců od radiační havárie budou směřována k opětovnému využití zasaženého území. U zemědělské půdy bude záležet na výsledcích monitorování. Dle mého názoru může nastat několik situací:

- 1) půda bude jen mírně kontaminovaná (těsně na hranici detekovatelnosti) a jen do hloubky několika centimetrů
- 2) půda bude kontaminovaná (nad hranicí detekovatelnosti, asi 1násobek) do hloubky několika centimetrů
- 3) půda bude kontaminovaná (nad hranicí detekovatelnosti, asi 2 až 3násobek) do hloubky několika centimetrů

Případ 1)

Zde by vhodným opatřením bylo provést orbu půdy, případně orbu opakovanou.

Případ 2)

Zde by bylo vhodné opatřením provést hlubokou orbu opakovaně, případně navést vrstvu nové půdy a následně znovu přeorat.

Případ 3)

Jako vhodné bych doporučil odstranit vrchní vrstvu zeminy a dále pokračovat jako v případě 2).

Zavedení ochranných opatření je z mého pohledu vždy opodstatněné. Lidské zdraví a s tím spojená zavedená ochranná opatření by v každém případě měla být na prvním místě. Na základě prostudovaných materiálů a mých úvah, bych doporučil zavedení ochranných opatření v celé ZHP (bez ohledu na to, zda daná část území byla kontaminovaná či nikoliv).

## 4.2 Modelace radiační události na území jiného státu a její dopad na ČR

Radiační událost na území jiného státu může mít vliv i na situaci v ČR. Samozřejmě vliv na území ČR je závislý na několika faktorech: stupeň mimořádné události, radiační dopad dané mimořádné události, resp. vývoj události, hydrometeorologické podmínky a v neposlední řadě také i vzdálenost ČR od místa mimořádné události. Je tedy velký rozdíl zda se bude jednat o radiační mimořádnou událost na území nám geograficky blízkém či dokonce v našem sousedství (tím by mohlo být např. Německo, Slovensko – Jaslovské Bohunice) nebo v zemi nám geograficky velmi vzdálené (např. Japonsko – Fukušima Dai-ichi, USA – Three Mile Island,). V případě prvním, předpokládám, že budou postupy a následná ochranná opatření obdobná těm, které jsem uvedl v kapitole 4.1 tj. při radiační havárii na území ČR. Dle prostudovaných materiálů předpokládám, že by do řešení byly zapojeny složky RMS. Bylo by tedy zbytečné se opakovat. I proto jsem volil druhý případ, tj. zemi nám hodně vzdálenou. Při této uvažované situaci předpokládám neaktivování radiační monitorovací sítě, ale standardní monitorování složek potravních řetězců v rámci obchodní sítě a u producentů. Dovážené zemědělské produkty by byly kontrolovány v rámci RASFF. I díky nedávným událostem jsem volil jako rozehru havárii na jaderné elektrárně Fukušima Dai-ichi v Japonsku, která v době dokončování této práce byla překlasifikována na 7 stupeň INES (stejněho stupně INES dosáhla i havárie v Černobylu, přesto se tyto havárie nedají srovnávat).

Pro potřeby svojí diplomové práce jsem předvídal vývoj událostí, který uvádím v následujících podkapitolách.

### 4.2.1 Popis události

11. 3. 2011 zasáhla severovýchodní pobřeží Japonska vlna tsunami. Tato vlna spolu se zemětřesením způsobila nejen obrovské škody na majetku a ztráty na životech, ale také způsobila naprosto nestandardní situaci vedoucí až k havárii na jaderných elektrárnách Fukušimě.

Po zemětřesení všechny jaderné elektrárny v oblasti postižené zemětřesením, které byly v provozu, byly bezpečně odstaveny a štěpná řetězová reakce v nich byla zastavena. Na některých z nich však byly nahlášeny problémy s odvodem zbytkového tepla. Odvod tohoto tepla zajišťují speciální bezpečnostní systémy, které jsou napájeny většinou dieselgenerátory. Tyto generátory se v Japonsku nastartovaly, ale krátce poté byly na blocích jaderné elektrárny Fukušima odstaveny vlnou tsunami.

Protože poté nebylo možno do reaktorů dodávat chladivo, došlo v nich k poklesu hladiny a nárůstu tlaku a k částečnému poškození pokrytí paliva. Pro snížení tlaku v primárním okruhu byly použity pojistné ventily, kterými byla odpuštěna pára do primárního kontejnmentu a poté ventilována do budovy reaktoru. Protože jedním z prvků, který se při poškození pokrytí paliva vyvíjí je vodík, došlo v budově reaktoru při jednom z dalších otřesů k explozi směsi plynů, které do ní byly odpuštěny.

Zaměstnanci jaderné elektrárny Fukušima se snažili dodávat chladicí vodu do reaktorů z moře. Protože tato akce směřovala k zachování chlazení reaktorů na jaderné elektrárně Fukušima vedlo toto k řízenému vypouštění určitého množství radioaktivních látek do okolí.

Došlo k bezprostřednímu ohrožení způsobeného poškozením paliva v bazénech vyhořelého paliva mimo primární kontejnment na blocích 1, 2, 3 a 4. Na bloku 3 probíhalo od 17. 3. 2011 chlazení bazénu.

Pokračovaly intenzivní práce na připojení potřebných čerpadel a zařízení, potřebných pro obnovení odvodu tepla z reaktorů a bazénů skladování vyhořelého paliva k elektrickému napájení a současně úsilí o zprovoznění těchto zařízení. Na blocích 5 a 6 byly uvedeny do provozu dieselgenerátory a obnoveno chlazení bazénů vyhořelého paliva.

Na blocích 1 a 2 byla vstřikována mořská voda k nouzovému chlazení reaktorů. Blok 3 byl dne 17. 3. 2011 čtyřikrát zalit mořskou vodou z vojenských helikoptér.

Na bloku č. 2 byly ke dni 19. 3. 2011 dokončeny práce na zprovoznění napájení z vnější sítě a pokračovaly aktivity na obnovení činnosti projektových chladicích systémů. Na bloku 3 bylo ke dni 20. 3. 2011 dosaženo sprchování vodou v plném rozsahu. Na bloku 4 bylo ke dni 20. 3. 2011 zahájeno zastřikování bazénu skladování vyhořelého paliva vodou. V tuto chvíli byla situace hodnocena stupněm INES 5.

K 21. 3. 2011 byly zaznamenány zvýšené hodnoty dávkového příkonu až do vzdálenosti 40 km od elektrárny. Pro příklad uvádím jarní cibulku a špenát, prefektura Ibaraki, 6 100 Bq/kg  $^{131}\text{I}$  a 478 Bq/kg  $^{137}\text{Cs}$ .

Vzhledem ke změně větru došlo 22. 3. 2011 ke zvýšenému dávkovému příkonu na jih od elektrárny. Mírně zvýšené objemové koncentrace  $^{131}\text{I}$  a  $^{137}\text{Cs}$  byly změřeny v Petropavlovsku, Kamčatce, Sacramento, Kalifornii a Aljašce.

23. 3. 2011 začal dávkový příkon v okolí elektrárny mírně stoupat. V čerstvém mléce byly uváděny hodnoty jódu od jednotek až po několik tisíc Bq/kg jódu a převážně jednotky Bq/kg cesia. Vysoké hodnoty byly stále nacházeny ve špenátu a jarní cibuli, kde se jednalo až o desetitisíce Bq/kg jódu. Práce na obnovení dodávek proudu ze sítě k blokům 1 až 4 úspěšně pokračovaly. Úspěšné bylo i postupné obnovování napojení bloků 5 a 6. U bloků 1 a 2 byla nadále vstřikována mořská voda do tlakové nádoby reaktoru. Teplota vyhořelého paliva byla relativně stabilní. Blok 3 byl také stále chlazen mořskou vodou. Chlazení mořskou vodou pokračovalo i na bloku 4. Bloky 5 a 6 byly stabilní. Bylo doporučováno vyhnout se potravinám neznámého původu, zejména čerstvé zelenině a mléku.

24. 3. 2011 pokračovaly práce na obnovení dodávek proudu ze sítě k blokům 1 až 4. Elektrické rozvodny na blocích 2 a 4 již byly připojeny k síti. Dodávky proudu pro bloky 5 a 6 byly obnoveny. Na bloku 1 pokračovalo chlazení tlakové nádoby reaktoru mořskou vodou, díky němuž došlo k lehkému snížení teploty. Rovněž dávky v okolí reaktoru poklesly. Blok 2 byl stále chlazen mořskou vodou a teplota tlakové nádoby reaktoru byla stabilní. Dávky v okolí reaktoru lehce poklesly. V důsledku chlazení bloku 3 mořskou vodou došlo k výraznému poklesu teploty v tlakové nádobě reaktoru. U ostatních bloků byl stav stabilní. V potravinách, zejména v čerstvé zelenině a v mléce, byl i nadále nacházen jód a cesium. Potraviny byly průběžně kontrolovány a nebyla povolena jejich distribuce do obchodní sítě, pokud kontaminace překračovala stanovené limity.

Dále postupně probíhaly pokusy o vyřešení situace, odčerpávala se voda z turbínových hal reaktoru 1 a 3, které stěžovala práce na opravách a chlazení. Tlakové nádoby bloků 1, 2 a 3 byly chlazeny čerstvou vodou (již ne mořskou). Situace u potravin se nezlepšovala. Stále byly nacházeny vysoké koncentrace izotopů jódu a cesia v nejvíce zasažených oblastech. Velké množství  $^{131}\text{I}$  a  $^{137}\text{Cs}$  uniklo do mořské vody – s tím je spojena kontaminace mořských ryb a plodů.

2. 4. 2011 byla objevena trhlina v druhém bloku odkud odtékala radioaktivní voda přímo do moře. Hledalo se řešení a zároveň bylo zahájeno měření ve vzdálenosti 15 km od elektrárny, k přesnějšímu monitorování přímo tohoto problému.

6. 4. 2011 probíhalo a blocích 1 až 3 odčerpávání kontaminované vody z turbínových hal. K uvolnění již zaplněných vnitřních prostor elektrárny bylo zahájeno vypuštění 11 500 tun lehce radioaktivní vody do moře, aby bylo získáno místo pro uskladnění vysoce radioaktivní vody z okolí reaktorů. Trhlina, již unikala kontaminovaná voda z bloku 2 do moře byla úspěšně uzavřena.

7. 4. 2011 Japonské úřady povolily společnosti TEPCO vhánění dusíku do kontejnmentu bloku 1. Dusík by měl nahradit kyslík ve výbušné směsi kyslíku s vodíkem uvnitř kontejnmentu, čímž by měla být snížena pravděpodobnost exploze. Veškerý lodní provoz v oblasti 30 km od elektrárny byl zakázán a dle informací z prefekturních úřadů rybolov i za tímto pásmem ustal. TEPCO odhadovalo možnou dávku na obyvatele ve výši 0,6 mSv, pokud by dotyčný konzumoval každý den po celý rok řasy a mořské plody z oblasti, do níž byla radioaktivní voda vypouštěna.

12. 4. 2011 byla zvýšena závažnost havárie podle stupnice INES na 7.

Záměrně jsem neuváděl skutečnosti týkající se jiných oblastí než potravin. Pro tuto práci by to bylo zbytečné a zdlouhavé. [76]

Další vývoj události již nebyl v době dokončení práce znám.

#### **4.2.2 Radionuklidy uniklé do životního prostředí**

V souvislosti s výše popsanou havárií byla v potravinách naměřena zvýšená množství následujících radionuklidů:  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$ . S těmito radionuklidy budu tedy i dále uvažovat v modelaci.

#### **4.2.3 Ochranná opatření**

##### **4.2.3.1 Opatření přímo v Japonsku**

Ačkoliv jsou z hlediska této práce důležité dopady přímo na ČR, považuji za nutné zmínit i opatření provedená v Japonsku.

V zasaženém území byly zjištěny kontaminace zemědělských produktů a potravin a to konkrétně u jarní cibulky (6 100 Bq/kg  $^{131}\text{I}$ , 478 Bq/kg  $^{137}\text{Cs}$ ), špenátu (14 050 Bq/kg  $^{131}\text{I}$  a 524 Bq/kg  $^{137}\text{Cs}$ ) a mléka (1 510 Bq/kg  $^{131}\text{I}$ ; 18,4 Bq/kg  $^{137}\text{Cs}$ ). Byla naměřena aktivita vyšší než dovolují japonské maximálně přípustné hodnoty (toto byl stav pár dní po havárii).

Potraviny byly průběžně kontrolovány a nebyla povolena jejich distribuce do obchodní sítě, pokud kontaminace překračovala stanovené limity. Japonsko nařídilo zákaz vývozu všech potravinářských výrobků pocházejících z prefektury Fukušima.

Tab. č. 3: *Limity pro potraviny stanovené japonským Ministerstvem zdravotnictví [77]*

| Nuklid                                                                                                        | Komodita                 | Bq/kg |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|
| Izotopy jódu, zejména $^{131}\text{I}$                                                                        | Pitná voda               | 300   |
|                                                                                                               | Mléko                    |       |
|                                                                                                               | Zelenina                 | 2 000 |
| Všechny ostatní nuklidy s poločasem přeměny překračující 10dní, zejména $^{134}\text{Cs}$ a $^{137}\text{Cs}$ | Pitná voda               | 200   |
|                                                                                                               | Mléko                    |       |
|                                                                                                               | Zelenina                 | 500   |
|                                                                                                               | Obilí                    |       |
|                                                                                                               | Maso, vejíčka, ryba atd. |       |
| Izotopy stroncia, zejména $^{90}\text{Sr}$                                                                    | Dětská strava            | 20    |
|                                                                                                               | Pitná voda               |       |
|                                                                                                               | Mléko                    |       |
|                                                                                                               | Zelenina                 | 100   |
|                                                                                                               | Obilí                    |       |
|                                                                                                               | Maso, vejíčka, ryba atd. |       |
| Izotopy plutonia a transplutoniové prvky emitující alfa                                                       | Dětská strava            | 1     |
|                                                                                                               | Pitná voda               |       |
|                                                                                                               | Mléko                    |       |
|                                                                                                               | Zelenina                 | 10    |
|                                                                                                               | Obilí                    |       |
|                                                                                                               | Maso, vejíčka, ryba atd. |       |

#### 4.2.3.2 Opatření týkající se ČR

Díky velké vzdálenosti Japonska od ČR je nepravděpodobné, že by radioaktivní částice významně zasáhly náš stát. Byla naměřena stopová množství cesia a jodu ve vzduchu, ale tato množství nemají a nebudou mít žádný vliv na občany ČR. RMS poběží v normálním režimu.

Takto vzdálená havárie zasáhne ČR jen v souvislosti s dovozem potravin. U zemědělských produktů a krmiv dovezených z Japonska či jakékoliv země mimo EU se provede kontrola SZPI, SVÚ a dalšími organizacemi. Kvůli nastalé události doporučí Evropská komise zvýšit kontrolu dovážených potravin. Budou se provádět kontroly i na obsah radionuklidů. Zvýšené pozornosti se dostane potravinám z Japonska. Tato kontrola se provede před uvedením na trh. Z každé ze zásilek budou odebrány vzorky na stanovení radionuklidů a výsledky budou porovnány s nejvyššími přípustnými úrovněmi.

SZPI, složka radiační monitorovací sítě, bude sledovat situaci na trhu s potravinami. Inspektoři SZPI odeberou a proměří vzorky potravin zasílaných z Japonska a zaměří se i na potraviny z jiných států, přes které by mohly kontaminované potraviny do ČR přijít. Zjištěné hodnoty se porovnávají s nařízením Komise 297/2011 a 351/2011.

Pokud by byla zjištěna hodnota přesahující limity, byla by ČR povinna informovat EU prostřednictvím RASFF a pomocí systému ECURIE a samozřejmě Japonsko. Dále by bylo nutné kontaminované potraviny zlikvidovat. Naštěstí i kvůli přísným vývozním limitům, by

neměli být z Japonska do ČR dovezeny žádné kontaminované potraviny. SZPI je připravena o případné kontaminaci okamžitě informovat veřejnost.

*Tab. 4: Nejvyšší přípustné limity pro potraviny a krmiva v EU při mimořádné radiační situaci [60]*

| Nuklid                                                                                                        | Komodita                              | Bq/kg |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------|
| Izotopy jódu, zejména $^{131}\text{I}$                                                                        | Potraviny pro kojence                 | 150   |
|                                                                                                               | Mléčné výrobky                        | 500   |
|                                                                                                               | Jiné potraviny, kromě méně významných | 2 000 |
|                                                                                                               | Tekuté potraviny                      | 500   |
| Všechny ostatní nuklidy s poločasem přeměny překračující 10dní, zejména $^{134}\text{Cs}$ a $^{137}\text{Cs}$ | Potraviny pro kojence                 | 400   |
|                                                                                                               | Mléčné výrobky                        | 1 000 |
|                                                                                                               | Jiné potraviny, kromě méně významných | 1 250 |
|                                                                                                               | Tekuté potraviny                      | 1 000 |
| Izotopy stroncia, zejména $^{90}\text{Sr}$                                                                    | Potraviny pro kojence                 | 75    |
|                                                                                                               | Mléčné výrobky                        | 125   |
|                                                                                                               | Jiné potraviny, kromě méně významných | 750   |
|                                                                                                               | Tekuté potraviny                      | 125   |
| Izotopy plutonia a transplutoniové prvky emitující alfa                                                       | Potraviny pro kojence                 | 1     |
|                                                                                                               | Mléčné výrobky                        | 20    |
|                                                                                                               | Jiné potraviny, kromě méně významných | 80    |
|                                                                                                               | Tekuté potraviny                      | 20    |

### 4.3 Porovnání obou situací

V následujících řádcích se zabývám porovnáním obou situací (radiační události na území ČR vůči radiační události na území jiného státu a její dopad na ČR).

Z prostudovaných materiálů a mnou definovaných radiologických dopadů radiační havárie na složky potravních řetězců mohou konstatovat tyto odlišnosti v samotných dopadech, tak i postoji kompetentních orgánů ČR:

- 1) Složky monitorování – při radiační události na území ČR je zapojena RMS, běžící v havarijním režimu, je zapojen KŠ SÚJB. Probíhá prvotní třídění a rychle stanovení radionuklidů a teprve v pozdějších fázích probíhá měření v normálním režimu. Při radiační události na území jiného státu běží RMS v normálním režimu, KŠ SÚJB se nesvolává, situaci řeší tým expertů (v našem případě) a i měření probíhá v normálním režimu s tím rozdílem, že se více kontrolují dovážené komodity s zasažené země.
- 2) Limity pro regulaci potravin – při události u nás jsou limity stanoveny vyhláškou 307/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů. Limity v jiné zasažené zemi pro nás nejsou podstatné (mimo limitů pro vývoz a dovoz, což je uvedeno dále).
- 3) Vývoz a dovoz – na území ČR se řídíme tzv. „pohavarijními předpisy“ Evropské komise, které nám říkají jaké mohou být nejvyšší přípustné aktivity radionuklidů v potravinách a krmivech. Jedná se o Nařízení rady (Euratom) 3954/87, pozměněné Nařízením komise 2218/89, doplněné Nařízením komise 944/89, a Nařízením komise 770/90. Naopak pro potraviny dovážené z Japonska platí tzv. „dovoz a vývoz potravin a krmiv z Japonska po havárii JE Fukushima Dai-ichi“, stanovující závazné maximální dovolené úrovně radioaktivní kontaminace. Jedná se o Nařízení komise 297/2011, které bylo pozměněno prováděcím Nařízením komise 351/2011.
- 4) Co se monitoruje – při události v ČR se monitorují vzorky z celé zasažené oblasti a i z celé ČR, následně i z potravních řetězců. Při události na území jiného státu se monitorují pouze komodity přicházející na náš trh. Monitorování potravin a krmiv na území ČR je standardní, RMS nadále pracuje v režimu obvyklé radiační situace.
- 5) Jaké radionuklidy se stanovují – při události v ČR se monitorují všechny radionuklidy, které by mohly v potravinách být. Mezi nejvýznamnější patří  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  a  $^{241}\text{Am}$ . Při události na území jiného státu se zaměřujeme pouze na  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$ .
- 6) Doporučení KŠ SÚJB – při události v ČR se doporučení zavádí ihned. Při události na území jiného státu až pokud je nutnost a kontaminované komodity k nám dojdou.
- 7) V případě radiační havárie na území ČR je nutné počítat i s opatřeními týkajícími se opětovného využití zasažené oblasti. Což v případě druhého popsaného scénáře neřešíme.

Jak je z předešlých řádků patrné, radiační událost na našem území je na řešení podstatně náročnější a samozřejmě i víc nebezpečnější. Je tedy jasné, že radiační událost nám tak vzdálená, jako je nedávná havárie v Japonsku, nás nijak zvlášť nezasáhne a v žádném případě nás neohroží.

## 5 VÝSLEDKY A DISKUZE

Po podrobném prostudování dostupných materiálů k dané problematice, po absolvování odborné praxe v laboratořích SÚRO Praha a po mnoha konzultacích s odborníky, zabývajícími se touto problematikou, jsem došel k následujícím závěrům.

Měření vzorků potravních řetězců je v ČR na velmi dobré úrovni. Za obvyklé radiační situace probíhá měření v rámci RMS v pravidelných intervalech. Toto neustálé měření objemové či hmotností aktivity, pohybující se na úrovni přírodního pozadí, se může zdát až zbytečné, ale opak je pravdou. Nebýt těchto měření, neměli bychom s čím v případné mimořádné radiační situaci porovnávat výsledky, personál by byl nepřipraven (přeci jen je rozdíl znát danou věc jen teoreticky a provádět jí dnes a denně), nemohly by se zlepšovat stávající a vymýšlet nové metody apod.

V případě mimořádné radiační události na našem území, bych asi viděl velký problém v počtu odborníků, jejichž malé množství by mohlo být velkým problémem. Např. pro prvotní třídění a rychlou gamu by k samotné obsluze vůbec nebylo zapotřebí práce odborníků. Bylo by tedy vhodné navrhnout metodiku, podle které by bylo možné stanovení aktivity i „laikem“. Tímto laikem samozřejmě myslím např. členy mobilních skupin Radiační monitorovací sítě, výzkumných institucí, či vysokých škol daného nebo obdobného zaměření. Dalším problémem by mohla být celková materiální nepřipravenost na podobnou situaci. Např. nádoby pro odběr a měření vzorků nejsou k dispozici v takovém množství, jaké si vyžaduje radiační havárie (i když se jedná o položky v ceně řádově několika tisíc Kč). Samozřejmě se počítá s jejich nákupem až v případě mimořádné události. Jsou to jen detaily, ale právě i na takových detailech může celá akce ztroskotat.

Když pominu tyto drobnosti je ČR velmi dobře připravena i na mimořádnou radiační událost. Tato připravenost je kontrolována pravidelnými cvičeními. Je ale pravdou, že sebelepší cvičení nemůže plně nahradit zkušenosti ze skutečné události.

Pokud bych se měl podívat na konkrétní modelované situace v praktické části, myslím, že se mi povedlo zvládnout tuto část, v rámci „poučeného laika“, na velmi dobré úrovni. V době výběru této práce jsem samozřejmě nemohl tušit, že se v Japonsku stane to, co se stalo. Na jednu stranu mi tato událost pomohla v tom, že jsem se měl od čeho odrazit, na stranu druhou jsem musel začít podrobněji sledovat, jak na to zareaguje jak svět, tak ČR a jak se změní samotná legislativa. V neposlední řadě jsem musel tuto část neustále opravovat a aktualizovat. Zde bych chtěl uvést, že práce byla dokončena 14.4.2011 a k tomuto datu jsou také informace týkající se události v Japonsku a i týkající se samotné legislativy aktualizovány. Je tedy možné, že v době kdy tuto práci čtete již došlo k jistým změnám.

Podstatné rozdíly, ve kterých se mnou modelované situace liší, jsem shrnul v poslední podkapitole 4.3. Významné rozdíly shrnuje následující tabulka.

Tab. 5: Porovnání obou situací

|                                       | <b>Radiační událost na území ČR</b>                                                                                                                                                                                 | <b>Radiační událost na území jiného státu a její dopad na ČR</b>                                                                                                                           |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Složky monitorování</b>            | je zapojena RMS běžící v havarijním režimu, je zapojen KŠ SÚJB, probíhá prvotní třídění a rychlé stanovení radionuklidů a teprve v pozdějších fázích probíhá měření v normálním režimu                              | RMS běží v normálním režimu, KŠ SÚJB se nesvolává, situaci řeší tým expertů, měření probíhá v normálním režimu s tím rozdílem, že se více kontrolují dovážené komodity ze zasaženého státu |
| <b>Limity pro regulaci potravin</b>   | limity stanoveny vyhláškou 307/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů                                                                                                                                               | limity v jiném zasaženém státu pro nás nejsou podstatné (mimo limitů pro vývoz a dovoz)                                                                                                    |
| <b>Vývoz a dovoz</b>                  | řídíme se tzv. „pohavarijními předpisy“ Evropské komise - Nařízení rady (Euratom) 3954/87, pozměněné Nařízením komise 2218/89, doplněné Nařízením komise 944/89, a Nařízením komise 770/90.                         | řídíme se tzv. „dovoz a vývoz potravin a krmiv z Japonska po havárii JE Fukushima Dai-ichi“ - Nařízení komise 297/2011, které bylo pozměněno prováděcím Nařízením komise 351/2011          |
| <b>Co se monitoruje</b>               | monitorují se vzorky z celé zasažené oblasti a i z celé ČR, následně i z potravních řetězců                                                                                                                         | monitorují se pouze komodity přicházející na náš trh, monitorování potravin a krmiv na území ČR je standardní, RMS nadále pracuje v režimu obvyklé radiační situace                        |
| <b>Jaké radionuklidy se stanovují</b> | monitorují se všechny radionuklidy, které by mohly v potravinách být, mezi nejvýznamnější patří $^{90}\text{Sr}$ , $^{131}\text{I}$ , $^{134}\text{Cs}$ a $^{137}\text{Cs}$ , $^{239}\text{Pu}$ a $^{241}\text{Am}$ | zaměřujeme se pouze na $^{131}\text{I}$ , $^{134}\text{Cs}$ a $^{137}\text{Cs}$                                                                                                            |
| <b>Doporučení KŠ SÚJB</b>             | doporučení se zavádí ihned                                                                                                                                                                                          | doporučení se zavádí až pokud je nutnost a kontaminované komodity k nám dojdou                                                                                                             |
| <b>Opětovné využití dané oblasti</b>  | nutné počítat s opětovným využitím                                                                                                                                                                                  | kompetentní orgány ČR neřeší                                                                                                                                                               |

Odtud je jasné, že pro nás mnohem horší situace je samozřejmě ta, která se stane na našem území a také to, že se v případě japonské havárie nemáme čeho obávat. A to i přes „zaručeně pravdivé informace“, které se na nás poslední dobou z různých médií hrnou.

Podstatný rozdíl je také v tom, zda zavádíme ochranná opatření ve velkém či malém rozsahu. Lidské zdraví a s tím spojená zavedená ochranná opatření, by v každém případě měla být na prvním místě.

Až po podrobném prostudování celé problematiky jsem zjistil, jak moc je zvolené téma obsáhlé. Jen samotná opatření by si zasloužila rozebrat v samostatné práci.

## 6 ZÁVĚR

V této diplomové práci jsem se zabýval metodami stanovení radiologických dopadů v potravních řetězcích. Rozdělil jsem ji do několika podstatných částí.

Teoretickou část jsem rozdělil na tři zásadní podkapitoly.

První podkapitola je zaměřená na stanovení radionuklidů v potravinách za obvyklé radiační situace. Zde jsem popsal, jaké jsou složky potravních řetězců monitorované za obvyklé radiační situace v rámci RMS. Následně jsem se zabýval popisem metod stanovení alfa, beta a gama radionuklidů v potravních řetězcích. U každé z metod jsem popsal co si pod daným zářením představit, jaké radionuklidy sem patří, jaký je princip stanovení a jak samotné stanovení probíhá.

Druhá podkapitola je zaměřená na stanovení radionuklidů v potravinách za mimořádné radiační situace. Opět jsem zde uvedl, jaké jsou složky potravních řetězců monitorované za mimořádné radiační situace v rámci RMS. Dále jsem se zabýval popisem prvotního třídění a jeho samotným průběhem ať už v podmínkách laboratorních, či v podmínkách terénních. Dále jsem popsal rychlé stanovení a následné zpřesnění výsledků.

Třetí podkapitola, tedy poslední část teoretické části je zaměřena na vyhodnocení celé situace s jejími dopady na potravní řetězec. Zde jsem stručně popsal význam SÚJB a následně se zmiňuji o ochranných opatřeních a o tom, jaké náležitosti je potřeba dodržet při vývozu a dovozu potravin.

Na základě teoretické části jsem následně vypracoval část praktickou.

V té jsem modeloval dvě radiační situace, vyžadující rozličné metody stanovení radiologických dopadů.

Tou první je radiační událost na území ČR. Pro modelaci této události jsem využil cvičení „ZÓNA 2010“ a na jeho základě jsem dále rozvíjel svoji situaci. Na začátku jsem stručně popsal danou událost. Následoval výčet možných uniklých radionuklidů a dále jsem se již zabýval kontaminovanými potravinami. Zde jsem popsal postup při únikové a podnikové fázi.

Druhou situací je radiační událost na území jiného státu a její dopad na ČR. Zde jsem využil nedávné havárie v Japonské jaderné elektrárně Fukušima Dai-ichi. Na začátku jsem opět stručně popsal danou událost. Následoval výčet možných uniklých radionuklidů. Poté jsem popsal ochranná opatření.

Na závěr jsem obě situace porovnal a celou problematiku radiologických dopadů jsem zhodnotil v kapitole 5 Výsledky a diskuze.

K sepsání teoretické, stejně jako praktické části, jsem využil jak dostupnou literaturu, tak i informace, které jsem načerpal při praxi v laboratořích SÚRO a samozřejmě v neposlední řadě jsem využil i velice cenných informací, které jsem získal při konzultacích s odborníky.

Z prostudované literatury usuzuji, že daná problematika je poměrně složitá a pro laickou veřejnost i málo přehledná. Veřejně dostupné materiály nezahrnují veškeré informace v ucelené formě. Proto doufám, že se mi touto prací podařilo vytvořit souhrnný přehled, a to v přijatelné formě, i pro osoby nezasvěcené v dané oblasti.

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Česká republika. Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost ze dne 13. června 2002 o funkci a organizaci celostátní radiační monitorovací sítě. *Sbírka zákonů*. 2002, 116, s. 6789-6803.
- [2] *Zpráva o výsledcích činnosti SÚJB při výkonu státního dozoru nad jadernou bezpečností jaderných zařízení a radiační ochranou za rok 2007*. Praha (CZ): SÚJB, 2008.
- [3] *Státní ústav radiační ochrany* [online]. 2010 [cit. 2010-09-19]. Radionuklidy v pitné vodě a poživatinách. Dostupné z WWW: <<http://www.suro.cz/cz/rms/pitne-vody-a-pozivacity>>.
- [4] ULLMANN, Vojtěch. *Astronuklfyzika.cz* : Astro Nukl Fyzika: jaderná fyzika, astrofyzika, kosmologie, filosofie [online]. [cit. 2010-10-19]. Jaderná fyzika a fyzika ionizujícího záření. Dostupné z WWW: <<http://astronuklfyzika.cz/Fyzika-NuklMed.htm>>.
- [5] ŠVEC, Jiří. *Radioaktivita a ionizující záření* : Doplnující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářením. 1. vydání. Otrava : Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 2005. 35 s. ISBN 80-86634-62-0.
- [6] *Environmentalchemistry.com* [online]. 2010 [cit. 2010-11-07]. Periodic Table of Elements. Dostupné z WWW: <<http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/>>.
- [7] *Detekce ionizujícího záření* [online]. 2004 [cit. 2010-11-10]. Nejběžnější zářiče alfa. Dostupné z WWW: <[http://www.radioaktivita.cz/alfa\\_zarice.html](http://www.radioaktivita.cz/alfa_zarice.html)>.
- [8] *Codex alimentarius: REPORT OF THE 38th SESSION OF THE CODEX COMMITTEE ON FOOD ADDITIVES AND CONTAMINANTS*. Switzerland, 2006. s. 255.
- [9] PATOČKA, Jiří; NAVRÁTIL, Leoš. *Toxicology.cz* [online]. 2006 [cit. 2010-11-10]. Chemie, radiobiologie a toxikologie polonia. Dostupné z WWW: <<http://www.toxicology.cz/modules.php?name=News&file=article&sid=61>>.
- [10] *Human Health Fact Sheet* [online] : Argonne National Laboratory, 2005 [cit. 2010-11-19]. Polonium, s. Dostupné z WWW: <[www.evs.anl.gov/pub/doc/polonium.pdf](http://www.evs.anl.gov/pub/doc/polonium.pdf)>.
- [11] Poisoning of Alexander Litvinenko. *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-11-19]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Poisoning\\_of\\_Alexander\\_Litvinenko](http://en.wikipedia.org/wiki/Poisoning_of_Alexander_Litvinenko)>.

- [12] *Aktualne.cz* [online]. 2006 [cit. 2010-11-19]. Litviněnko: Radioaktivita potvrzena. Dostupné z WWW: <<http://aktualne.centrum.cz/zahranici/evropa/clanek.phtml?id=288923>>.
- [13] SCHORM, Daniel. *Cbsnews.com* [online]. London : 2007 [cit. 2010-11-19]. Who Killed Alexander Litvinenko. Dostupné z WWW: <<http://www.cbsnews.com/stories/2007/01/05/60minutes/main2333207.shtml>>.
- [14] Polonium. *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-11-22]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polonium>>.
- [15] LATHAM, Edward W. *Wilkinsonlatham.com* [online]. 2007 [cit. 2010-11-22]. From Russia, with no love. Dostupné z WWW: <<http://www.wilkinsonlatham.com/litvinenko.php>>.
- [16] HORÁKOVÁ, Magdaléna. *Nejvýznamnější radionuklidy při havárii jaderné elektrárny, zkušenosti z Černobyli*. České Budějovice, 2007. 114 s. Diplomová práce. JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH.
- [17] *Environmentalchemistry.com* [online]. 2010 [cit. 2010-11-23]. Am – Americium. Dostupné z WWW: <<http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Am-pg2.html#241>>.
- [18] *Epa.gov : Radiation Protection* [online]. 2010 [cit. 2010-11-23]. Americium. Dostupné z WWW: <<http://www.epa.gov/rpdweb00/radionuclides/americium.html>>.
- [19] MIRCHI, Reza; SCHLESINGEROVÁ, Eva. Metodika rozkladu živočišných tkání ke stanovení těžkých radionuklidů a její věření při stanovení  $^{210}\text{Po}$  v játrech jatečního skotu. *Bezpečnost jaderné energie*. 2010, 5/6, s. 167-169.
- [20] *Canberra.com* [online]. 2009 [cit. 2010-11-29]. Alpha Analyst Integrated Alpha Spectrometer. Dostupné z WWW: <<http://www.canberra.com/products/696.asp>>.
- [21] *Detekce ionizujícího záření* [online]. 2004 [cit. 2010-11-29]. Nejběžnější zářiče beta. Dostupné z WWW: <[http://www.radioaktivita.cz/beta\\_zarice.html](http://www.radioaktivita.cz/beta_zarice.html)>.
- [22] Tritium. *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2010-11-29]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Tritium>>.
- [23] *Epa.gov : Radiation Protection* [online]. 2010 [cit. 2010-11-29]. Tritium. Dostupné z WWW: <<http://www.epa.gov/rpdweb00/radionuclides/tritium.html>>.

- [24] *Environmentalchemistry.com* [online]. 2010 [cit. 2011-01-10]. Sr - Strontium. Dostupné z WWW: <<http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Sr-pg2.html#parents>>.
- [25] BARBALACE, Roberta. *Environmentalchemistry.com* [online]. 1999 [cit. 2011-01-10]. Chernobyl Disaster's Agricultural and Environmental Impact. Dostupné z WWW: <<http://environmentalchemistry.com/yogi/hazmat/articles/chernobyl2.html>>.
- [26] Strontium-90. *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-01-12]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Strontium-90>>.
- [27] *Dědictví Černobylu: Zdravotní, ekologické a sociálně-ekonomické dopady a Doporučení vládám Běloruska, Ruské federace a Ukrajiny*. 1. vydání. Vídeň : ČSVTS v koedici s Českou nukleární společností, 2006. 51 s. ISBN 80-02-01806-0.
- [28] *Zpráva o radiační situaci na území ČSSR po havárii jaderné elektrárny Černobyl*. Praha : Centrum hygieny záření, 1987. 168 s.
- [29] HŮLKA, Jiří; MALÁTOVÁ, Irena. Radiační situace v České republice, přehled hlavních výsledků měření a opatření. *Suro.cz* [online]. Praha : SÚRO Praha, 2005 [cit. 2011-01-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.suro.cz/cz/publikace/chernobyl/>>.
- [30] *10 let od havárie reaktoru v Černobylu - důsledky a poučení*. Praha : SÚJB Praha, 1996. 37 s.
- [31] Iodine-131. *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-01-18]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Iodine-131>>.
- [32] ZEMAN, Miloš; MIKA, Otakar J. *Ochrana obyvatelstva*. 1. vydání. Brno : VUT v Brně, 2007. 118 s. ISBN 978-80-214-3449-3.
- [33] *Environmentalchemistry.com* [online]. 2010 [cit. 2011-01-20]. Ce – Cer. Dostupné z WWW: <<http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Ce-pg2.html#parents>>.
- [34] Metodika. *Stanovení hmotnostní aktivity <sup>90</sup>Sr v obilí*. Praha : SÚJB Praha, 2004. 15 s.
- [35] Metodika. *Stanovení objemové aktivity <sup>90</sup>Sr v mléku*. Praha : SÚJB Praha, 2004. 15 s.
- [36] Metodika. *Stanovení hmotnostní aktivity <sup>90</sup>Sr ve vzorcích smíšené stravy*. Praha : SÚJB Praha, 2004. 15 s.
- [37] ŠKRKAL, J.; RULÍK, P. *Zpráva č. 8/2010 : Dlouhodobé monitorování <sup>137</sup>Cs a <sup>90</sup>Sr v potravinách v České Republice v období 1986-2008*. Praha : SÚRO Praha, 2010. 47 s.

- [38] Záření gama. *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-01-25]. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/zareni\\_gama](http://cs.wikipedia.org/wiki/zareni_gama)>.
- [39] *Detekce ionizujícího záření* [online]. 2004 [cit. 2011-02-10]. Nejběžnější zářiče gama. Dostupné z WWW: <[http://www.radioaktivita.cz/gama\\_zarice.html](http://www.radioaktivita.cz/gama_zarice.html)>.
- [40] Cobalt-60. *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-02-10]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Cobalt-60>>.
- [41] *Epa.gov : Radiation Protection* [online]. 2010 [cit. 2011-02-10]. Cobalt. Dostupné z WWW: <<http://www.epa.gov/rpdweb00/radionuclides/cobalt.html>>.
- [42] *Environmentalchemistry.com* [online]. 2010 [cit. 2011-02-15]. Cs - Cesium. Dostupné z WWW: <<http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/Cs.html>>.
- [43] Caesium-137. *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-02-19]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Caesium-137>>.
- [44] *Epa.gov : Radiation Protection* [online]. 2011 [cit. 2011-02-22]. Cesium. Dostupné z WWW: <<http://www.epa.gov/rpdweb00/radionuclides/cesium.html>>.
- [45] Plutonium-239. *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-02-22]. Dostupné z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Plutonium-239>>.
- [46] *Epa.gov : Radiation Protection* [online]. 2010 [cit. 2011-02-22]. Plutonium. Dostupné z WWW: <<http://www.epa.gov/rpdweb00/radionuclides/plutonium.html>>.
- [47] FÄHNRIČH, Jan; VIDENSKÁ, Kateřina; KANIA, Patrik. *Gama spektrometrie : pracovní text pro Podzemní výukové středisko JOSEF* [online]. Praha, 2010 [cit. 2011-03-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.vscht.cz/anl/josef/LACH2/>>.
- [48] STARÝ, J. a kol. *Cvičení z jaderné chemie* [online]. 3.vydání. Praha : ČVUT Praha, 1987 [cit. 2011-03-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.fjfi.cvut.cz/kjch/materialy/RCHP/>>.
- [49] Metodika. *Stanovení hmotnostní aktivity radionuklidů v bramborách pomocí spektrometrie gama*. Praha : SÚJB Praha, 2004. 12 s.
- [50] Metodika. *Stanovení hmotnostní aktivity radionuklidů v dovážených potravinách pomocí spektrometrie gama*. Praha : SÚJB Praha, 2004. 15 s.

- [51] Metodika. *Stanovení objemové aktivity radionuklidů v mléce pomocí spektrometrie gama*. Praha : SÚJB Praha, 2004. 11 s.
- [52] Metodika. *Stanovení hmotnostní aktivity radionuklidů v mase pomocí spektrometrie gama*. Praha : SÚJB Praha, 2004. 11 s.
- [53] Metodika. *Stanovení hmotnostní aktivity radionuklidů v zelenině, ovoci, lesních plodech a lesních houbách pomocí spektrometrie gama*. Praha : SÚJB Praha, 2004. 13 s.
- [54] Metodika. *Stanovení hmotnostní aktivity radionuklidů v obilí pomocí spektrometrie gama*. Praha : SÚJB Praha, 2004. 12 s.
- [55] Česká republika. Zákon č. 18/1997 Sb. ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů. *Sbírka zákonů*. 1997.
- [56] *Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency*. 1999. Vienna : IAEA, 1999. ISSN 1011-4289.
- [57] KLENER, Vladislav, et al. *Principy a praxe radiační ochrany*. Vladislav Klener. 1. vyd. Praha : SÚJB, 2000. 619 s. ISBN 80-238-3703-6.
- [58] *Firebrno* [online]. 2007 [cit. 2011-03-  
WWW: <<http://www.firebrno.cz/tisnov/pristrojove-vybaveni-2>>.
- [59] Bezpečnost jaderné energie 16(54), 2008 č. 3/4 článek Využití měření dávkového příkonu. RULÍK, Petr; MRÁZOVÁ, Zlata; DOBEŠOVÁ, Jana. Využití měření dávkového příkonu k odhadu aktivity objemového vzorku za mimořádné radiační situace, *Bezpečnost jaderné energie*. 2008, 3/4, s. 89-92.
- [60] EU. NAŘÍZENÍ RADY (EURATOM) č. 2218/89 ze dne 18. července 1989, kterým se mění nařízení (Euratom) č. 3954/87, kterým se stanoví nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin a krmiv po jaderné havárii nebo jiném případě radiační mimořádné situace. *Úřední věstník Evropské unie*. 1989, L 211/1, s. 363-365.
- [61] EU. NAŘÍZENÍ KOMISE (Euratom) č. 944/89 ze dne 12. dubna 1989, kterým se stanoví nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace méně významných potravin po jaderné havárii nebo jiném případě radiační mimořádné situace. *Úřední věstník Evropské unie*. 1989, L 101/17, s. 347-348.
- [62] *Sujb.cz* [online]. 2010 [cit. 2011-04-09]. Krizový štáb. Dostupné z WWW: <[http://www.sujb.cz/?c\\_id=256](http://www.sujb.cz/?c_id=256)>.
- [63] Česká republika. Vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost ze dne 13. června 2002 o radiační ochraně. *Sbírka zákonů*. 2002, 113, s. 6362-6540.

- [64] EU. NAŘÍZENÍ RADY (Euratom) č. 3954/87 ze dne 22. prosince 1987, kterým se stanoví nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace potravin a krmiv po jaderné havárii nebo jiném případě radiační mimořádné situace. *Úřední věstník Evropské unie*. 1987, L 371/11, s. 333-336.
- [65] EU. NAŘÍZENÍ KOMISE (EURATOM) č. 770/90 ze dne 29. března 1990, kterým se stanoví nejvyšší přípustné úrovně radioaktivní kontaminace krmiv po jaderné havárii nebo jiném případě radiační mimořádné situace. *Úřední věstník Evropské unie*. 1990, L 83/78, s. 379-380.
- [66] EU. NAŘÍZENÍ RADY (ES) č. 733/2008 ze dne 15. července 2008 o podmínkách dovozu zemědělských produktů pocházejících ze třetích zemí po havárii jaderné elektrárny v Černobylu. *Úřední věstník Evropské unie*. 2008, L 201/1, s. 201/1-201/7.
- [67] EU. NAŘÍZENÍ RADY (ES) č. 1048/2009 ze dne 23. října 2009, kterým se mění nařízení (ES) č. 733/2008 o podmínkách dovozu zemědělských produktů pocházejících ze třetích zemí po havárii jaderné elektrárny v Černobylu. *Úřední věstník Evropské unie*. 2009, L 290/4, s. 290/4.
- [68] EU. PROVÁDĚCÍ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 297/2011 ze dne 25. března 2011, kterým se stanoví zvláštní podmínky pro dovoz krmiv a potravin pocházejících nebo odesílaných z Japonska po havárii v jaderné elektrárně Fukušima. *Úřední věstník Evropské unie*. 2011, L 80/5, s. 80/5-80/8.
- [69] EU. Oprava prováděcího nařízení Komise (EU) č. 351/2011 ze dne 11. dubna 2011, o změně nařízení (EU) č. 297/2011, kterým se stanoví zvláštní podmínky pro dovoz krmiv a potravin pocházejících nebo odesílaných z Japonska po havárii v jaderné elektrárně Fukušima. *Úřední věstník Evropské unie*. 2011, L 98/16, s. 98/16.
- [70] RASFF. *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/RASFF>>.
- [71] European Community Urgent Radiological Information Exchange. *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-04-10]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/European\\_Community\\_Urgent\\_Radiological\\_Information\\_Exchange](http://en.wikipedia.org/wiki/European_Community_Urgent_Radiological_Information_Exchange)>.
- [72] Cez.cz [online]. 2010 [cit. 2011-04-10]. Cvičení ZÓNA 2010 prověří připravenost krizového řízení. Dostupné z WWW: <Cvičení ZÓNA 2010 prověří připravenost krizového řízení>.
- [73] Sujb.cz [online]. 2010 [cit. 2011-04-10]. Reportáž z cvičení ZÓNA 2010. Dostupné z WWW: <[http://www.sujb.cz/?c\\_id=1053](http://www.sujb.cz/?c_id=1053)>.

- [74] *Mvcr.cz* [online]. 2010 [cit. 2011-04-11]. Pojmy - zóna havarijního plánování. Dostupné z WWW: <<http://www.mvcr.cz/clanek/zona-havarijního-planování.aspx>>.
- [75] *Sujb.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-04-12]. INES. Dostupné z WWW: <<http://www.sujb.cz/docs/INES.pdf>>.
- [76] *Sujb.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-04-12]. Přehled dosavadního vývoje jaderné havárie v Japonsku. Dostupné z WWW: <[http://www.sujb.cz/?c\\_id=1079](http://www.sujb.cz/?c_id=1079)>.
- [77] *Sujb.cz* [online]. 2011 [cit. 2011-04-14]. Limity potravin. Dostupné z WWW: <[http://www.sujb.cz/docs/Limity\\_potraviny\\_Jap.JPG](http://www.sujb.cz/docs/Limity_potraviny_Jap.JPG)>.
- [78] EURANOS. *Generic Handbook for Assisting in the Management of Contaminated Inhabited Areas in Europe following a Radiological Emergency*. Health Protection Agency, 2007. 576 s.
- [79] IAEA. *Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency*. IAEA Safety Standards, 2011. ISBN 978-92-0-107410-2.
- [80] US Department of Health and Human Services. *Accidental radioactive contamination of human food and animal feeds : Recommendation for state and local agencies*. 1998. 59 s.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

apod. – a podobně  
a.s. – akciová společnost  
atd. – a tak dále  
CLMS – Centrální laboratoř monitorovací sítě  
č. – číslo  
ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav  
ČR – Česká republika  
DP – Dávkový příkon  
DP<sub>Krit.</sub> – Kritický dávkový příkon  
ECURIE – European Community Urgent Radiological Information Exchange  
ETE – Elektrárna Temelín  
EU – Evropská unie  
FAO – Food and Agriculture Organization  
GR – Měřič dávkového příkonu např. GR-135 miniSpec  
GŘ HZS – Generální ředitelství hasičského záchranného sboru  
HZS – Hasičský záchranný sbor  
IAEA – International Atomic Energy Agency  
INES – International Nuclear Event Scale  
IZS – Integrovaný záchranný systém  
KŠ – Krizový štáb  
KŠ SÚJB – Krizový štáb Státního úřadu pro jadernou bezpečnost  
LeS – Letecké skupiny  
LS – Laboratorní skupiny  
MDA – Minimální detekovatelná aktivita  
MDDP – Minimální detekovatelný dávkový příkon  
MMKP – Měřicí místa kontaminace potravin  
MS – Mobilní skupiny  
MZe – Ministerstvo zemědělství  
např. – například  
Obr. – obrázek  
ORaS – Obvyklá radiační situace  
popř. – popřípadě  
RC SÚJB ČB – Regionální centrum SÚJB České Budějovice  
RASFF - Rapid Alert System for Food and Feed (Systém rychlého varování pro potraviny a krmiva)  
resp. – respektive  
RMS – Radiační monitorovací síť  
Sb. – sbírka  
SÚJB – Státní úřad pro jadernou bezpečnost  
SÚRO – Státní ústav radiační ochrany  
SVÚ – Státní veterinární ústav  
SVZ – Síť včasného zjištění  
SZPI – Státní zemědělská a potravinářská inspekce

Tab. - tabulka

TDS – Teledozimetrický systém

tj. – to jest

tzv. – takzvaná

VÚLHM – Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti

VÚV TGM – Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka

v.v.i. – vědecká výzkumná instituce

WHO - World Health Organization

ZHP – Zóna havarijního plánování