

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Provozně ekonomická fakulta**

**Katedra systémového inženýrství**



**Bakalářská práce**

**Cost-benefit analýza dekontaminace v pozdní fázi  
nápravy po jaderné havárii**

**Ing. Anna Selivanova**

© 2019 ČZU v Praze

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Anna Selivanova

Provoz a ekonomika

Název práce

**Cost-benefit analýza dekontaminace v pozdní fázi nápravy po jaderné havárii**

Název anglicky

**Cost-benefit analysis of decontamination in late-phase recovery from a nuclear accident**

---

### Cíle práce

Cílem bakalářské práce je cost-benefit analýza nápravy vybraného objektu v případě kontaminace radioaktivní látkou. K analýze budou použity nástroje systémové dynamiky a počítačové simulace v programu Vensim.

### Metodika

- Studium odborné literatury
- Analýza datových podkladů
- Konzultace s odborníky Státního ústavu radiační ochrany
- Tvorba simulačního modelu
- Simulace, interpretace a analýza výsledků

## Doporučený rozsah práce

30-40 stran

## Klíčová slova

systemová dynamika, simulační model, zpětnovazebná smyčka, diagram stavů a toků, jaderná havárie, dekontaminace, cost-benefit analýza

---

## Doporučené zdroje informací

CHEN, S.Y., D.J. BARNETT, B.R. BUDDEMEIER, et al. Decision making for late-phase recovery from major nuclear or radiological incidents. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements, 2014. NCRP report, no. 175. ISBN 9780983545057.

KREJČÍ, Igor a Roman KVASNIČKA. Systemová dynamika I. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Provozně ekonomická fakulta, 2014. ISBN 9788021324787.

MEADOWS, Donella H. a Diana WRIGHT. Thinking in systems: a primer. White River Junction, Vt.: Chelsea Green Pub., 2008. ISBN 9781603580557.

ŠUSTA, Marek. Průvodce systemovým myšlením. Praha: Proverbs, 2015. ISBN 9788026076025.

---

## Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – PEF

## Vedoucí práce

Ing. Igor Krejčí, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra systemového inženýrství

---

Elektronicky schváleno dne 19. 10. 2018

**doc. Ing. Tomáš Šubrt, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 19. 10. 2018

**Ing. Martin Pelikán, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 11. 03. 2019

---

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Cost-benefit analýza dekontaminace v pozdní fázi nápravy po jaderné havárii" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne \_\_\_\_\_

### **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Igoru Krejčímu, Ph.D. jako vedoucímu bakalářské práce za vedení, všechny konzultace a připomínky. Chtěla bych také poděkovat svým kolegům ze Státního ústavu radiační ochrany za užitečné konzultace a ochotu vysvětlovat.

# **Cost-benefit analýza dekontaminace v pozdní fázi nápravy po jaderné havárii**

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá nákladově-přínosovou analýzou dekontaminace vybraného objektu po zamoření umělými radionuklidy za použití metod systémové dynamiky. V rešeršní části je věnována pozornost jak popisu teorie systémové dynamiky a jejím principům, tak i základům nákladově-přínosové analýzy. Dále jsou popsány dekontaminační postupy aplikovatelné na vybraný objekt – velkou louku. Potom jsou shrnuty dozimetrické výpočty, na které jsou vázána ekonomická hodnocení dekontaminace (spojená s výpočty efektivních dávek).

Praktická část popisuje vytvoření samotného simulačního modelu, jeho omezení a validaci. V této části jsou shrnuty výpočty zatravněné plochy, odhad skupiny nejvíce ozářených osob, implementace vybraných scénářů dekontaminace a náklady potřebné na realizaci vybraných metod nápravy. Dále jsou diskutovány a porovnány výsledky simulací navržených scénářů – jak mezi sebou, tak i s údaji v odborné literatuře.

**Klíčová slova:** systémová dynamika, dekontaminace, cost-benefit analýza, jaderná havárie, cena, přínosy, obyvatelstvo, dávka, radionuklidy, simulace

# **Cost-benefit analysis of decontamination in late-phase recovery from a nuclear accident**

## **Abstract**

This work is dedicated to the cost-benefit analysis of the remediation of the selected object after contamination with artificial radionuclides using methods of system dynamics. In the research part, a short description of the system dynamics theory and its principles and basics of the cost-benefit analysis are summarized. Afterwards, decontamination procedures applicable to the selected object (large meadow) are described. Thereafter, dosimetric calculations are also explained, including economic assessments connected with doses calculations.

The practical part describes the creation of the simulation model itself, its limitation and validation. This section summarizes an estimation of area of the meadow, an estimation of the group of the most irradiated people, implementations of selected decontamination scenarios and the cost of selected remediation methods. Furthermore, the results of the simulations of the proposed scenarios are discussed and compared – among themselves and with data in the specialized literature.

**Keywords:** system dynamics, decontamination, cost-benefit analysis, nuclear accident, cost, benefits, population, dose, radionuclides, simulation

## Obsah

1	Úvod .....	11
2	Cíl práce a metodika .....	12
2.1	Cíl práce .....	12
2.2	Metodika .....	12
2.2.1	Studium odborné literatury .....	12
2.2.2	Analýza datových podkladů .....	12
2.2.3	Konzultace s odborníky .....	12
2.2.4	Tvorba simulačního modelu .....	12
2.2.5	Simulace a interpretace výsledků .....	12
3	Teoretická východiska .....	13
3.1	Systémová dynamika .....	13
3.1.1	Zpětnovazebné smyčky .....	13
3.1.2	Příčinně smyčkový diagram .....	13
3.1.3	Diagram stavů a toků .....	13
3.1.4	Archetypy chování .....	14
3.2	Nákladově-přínosová analýza .....	15
3.3	Dekontaminační postupy .....	16
3.3.1	Odstranění vegetace .....	17
3.3.2	Hnojení půdy .....	17
3.3.3	Slupování travního drnu .....	18
3.3.4	Orba půdy .....	18
3.3.5	Překopání půdy .....	19
3.3.6	Odstranění půdy .....	20
3.4	Změna aktivity radionuklidu .....	22
3.5	Výpočet efektivní dávky .....	23
3.6	Výpočet prostorového dávkového ekvivalentu .....	23
4	Vlastní práce .....	23
4.1	Popis vybraného objektu .....	23
4.2	Výpočet rozlohy zatravněné plochy .....	24
4.3	Skupina nejvíce ozářených obyvatel .....	25
4.3.1	Panelové domy .....	26
4.3.2	Rodinné domy .....	26
4.3.3	Souhrn nejvíce ozářené skupiny .....	27
4.4	Dozimetrické výpočty při vytvoření matematického modelu .....	27
4.4.1	Omezení simulačního modelu .....	27
4.4.2	Přepokládaná kontaminace louky .....	28
4.4.3	Efektivní dávky .....	28
4.4.4	Příkon prostorového dávkového ekvivalentu .....	28



4.5	Kontrola simulačního modelu .....	29
4.5.1	Dimenzionální analýza .....	29
4.5.2	Dozimetrické výpočty .....	29
4.6	Opatření a metody nápravy.....	29
4.7	Popis vybraných scénářů dekontaminace .....	30
4.7.1	Vytyčení louky .....	30
4.7.2	Sekání louky .....	30
4.7.3	Slupování travního drnu .....	32
4.7.4	Odstranění horní vrstvy půdy .....	34
4.7.5	Dekontaminace osob a techniky.....	35
4.8	Implementace vybraných scénářů .....	35
4.9	Implementace výpočtu efektivních dávek .....	35
4.10	Odhad kolektivní efektivní dávky a výpočet přínosů opatření .....	36
4.11	Kalkulace nákladů pro jednotlivé scénáře .....	36
4.11.1	Náklady na vytyčení louky.....	38
4.11.2	Náklady na sekání trávy .....	39
4.11.3	Náklady na slupování travního drnu .....	40
4.11.4	Náklady na odstranění horní vrstvy půdy .....	42
4.11.5	Náklady na dekontaminaci osob a techniky .....	43
5	Výsledky a diskuse.....	43
5.1	Vytvořený model .....	43
5.2	Kontrola modelu .....	43
5.2.1	Dimenzionální analýza .....	43
5.2.2	Dozimetrické výpočty .....	44
5.3	Pokles plošné aktivity.....	44
5.3.1	Vytyčení louky .....	45
5.3.2	Sekání trávy.....	45
5.3.3	Slupování drnu .....	45
5.3.4	Odstranění půdy .....	45
5.3.5	Porovnání scénářů .....	45
5.4	Pokles příkonu prostorového dávkového ekvivalentu.....	45
5.4.1	Porovnání simulací a analytických výpočtů.....	45
5.4.2	Porovnání simulací a skutečné dekontaminace .....	46
5.5	Efektivní dávky.....	46
5.5.1	Efektivní dávky obyvatelstva .....	46
5.5.2	Efektivní dávky pracovníků podílejících se na nápravě.....	47
5.6	Přínosy .....	47
5.6.1	Výpočet zdravotní újmy .....	47
5.6.2	Výpočet přínosů .....	48

5.7	Náklady.....	48
5.7.1	Celkové náklady .....	48
5.7.2	Náklady na nápravu jednoho metru čtverečního .....	48
5.7.3	Porovnání s náklady na dekontaminaci ve Fukušimě .....	49
5.8	Porovnání nákladů a přínosů .....	49
6	Závěr.....	50
7	Seznam použitých zdrojů .....	51
7.1	Tištěné dokumenty .....	51
7.2	Elektronické dokumenty.....	52
7.3	Ostatní internetové zdroje.....	56
8	Přílohy .....	58
	Příloha 1 – fotografie vybraného objektu.....	58
	Příloha 2 – pomocná lišta .....	60
	Příloha 3 – dozimetrické výpočty.....	61
	Příloha 4 – pokles plošné aktivity $^{134}\text{Cs}$ .....	62
	Příloha 5 – pokles <i>PPDE</i> .....	63
	Příloha 6 – časový průběh dávek pro jednotlivce z obyvatelstva.....	64
	Seznam obrázků .....	65
	Seznam tabulek .....	66
	Seznam zkratk .....	67

# 1 Úvod

Tato práce se zabývá možnostmi dekontaminace vybraného objektu po jaderné havárii. Na základě dostupných dat byl pomocí metod systémové dynamiky a software Vensim PLE (Ventana Systems, Inc., 2015) vytvořen matematický model řešeného úkolu. Model umožňuje simulace navržených scénářů nápravy pro objekt zamořený vybranými umělými radionuklidy. Výsledky simulací poskytují informace o ozáření vybraných skupin osob a nákladech na dekontaminaci. Náklady na realizaci navržených scénářů je poté možné porovnat s benefity pro obyvatelstvo plynoucích z implementace vybraných metod nápravy.

Rešeršní část práce shrnuje obecné principy systémové dynamiky včetně popisů vybraných archetypů chování systémů. Potom jsou v práci zmíněny základy nákladově-přínosové analýzy. Dále jsou shrnuty dekontaminační scénáře vztažené k vybranému objektu a základní dozimetrické výpočty.

V praktické části práce je popsána tvorba simulačního modelu a také jeho omezení. Velká pozornost je dále věnována kontrole a ověření výpočtů. Výsledky získané ze simulací vybraných scénářů jsou poté diskutovány a porovnány s dostupnými údaji v odborné literatuře.

Výstupy získané v této práci budou použity při řešení projektu Ministerstva Vnitra České republiky VH20172020015 – *Strategie řízení nápravy území po radiační havárii*.

## **2 Cíl práce a metodika**

### **2.1 Cíl práce**

Hlavním cílem práce bylo vytvoření podkladů pro krizový management a pro rozhodování o způsobu dekontaminace vybraného objektu v případě zamoření radionuklidy po jaderné havárii. Mezi dílčí cíle patřilo:

- navržení možných scénářů nápravy s ohledem na reálný objekt (velkou louku),
- vytvoření simulačního modelu v software Vensim PLE,
- porovnání variant nápravy mezi sebou pomocí cost-benefit analýzy.

### **2.2 Metodika**

#### **2.2.1 Studium odborné literatury**

V prvním kroku bylo provedeno nastudování odborných publikací o dekontaminaci a nápravě území po Černobylské havárii a havárii jaderné elektrárny Fukušima I, vybraných legislativních předpisů a bezpečnostních standardů Mezinárodní agentury pro atomovou energii (dále IAEA). Současně byla nastudována doporučená literatura o systémové dynamice a vybrané práce o cost-benefit analýze.

#### **2.2.2 Analýza datových podkladů**

S použitím výsledků předchozí podkapitoly byly vybrány možné postupy dekontaminace. Navržení scénářů nápravy bylo vztaženo k reálné louce a předpokládané kontaminaci. Dále byla prozkoumána skupina lidí bydlících v blízkosti louky, kteří by mohli být nejvíce ozáření.

#### **2.2.3 Konzultace s odborníky**

Součástí procesu tvorby scénářů byly osobní a mailové konzultace s odborníky Státního ústavu radiační ochrany (SÚRO, v.v.i., 2019) a úřadem městské části Prahy 17 (MČ Praha 17, 2019).

#### **2.2.4 Tvorba simulačního modelu**

Simulační model byl vytvořen v software Vensim PLE. Kontrola a správnost modelu byla realizována pomocí vestavěného testu jednotek v prostředí Vensim PLE a porovnáním výsledků testovací simulace s údaji v odborné literatuře. Součástí modelu a zvolených scénářů nápravy byly dozimetrické výpočty umožňující přepočet plošné aktivity (tj. kontaminace povrchů) na roční efektivní dávku (pro posouzení ozáření) a poté na finanční vyjádření zdravotní újmy (pro výpočet přínosů opatření).

#### **2.2.5 Simulace a interpretace výsledků**

Simulace vybraných scénářů byla uskutečněna pomocí přepínačů zabudovaných do simulačního modelu. Výsledky simulace variant nápravy byly porovnány jak mezi sebou, tak i s odbornými publikacemi.

## **3 Teoretická východiska**

### **3.1 Systémová dynamika**

Výpočty uskutečněné v rámci této práce byly realizované pomocí metod systémové dynamiky. Jako vědní disciplína se systémová dynamika zabývá komplexními systémy a jejich chováním (nelineárním) v čase. Komplexní systémy se skládají z prvků, propojených pomocí složitých vazeb a vykazujících dynamické chování. Pomocí počítačových simulací lze pochopit chování systému, odhalit příčiny selhání systému a navrhnout řešení zjištěných problémů. Vztahy mezi proměnnými lze znázornit buď pomocí příčinně smyčkového diagramu, nebo diagramu stavů a toků (Krejčí, Kvasnička, 2014).

#### **3.1.1 Zpětnovazebné smyčky**

Jednotlivé proměnné v modelu mohou být propojeny pomocí vazeb mezi sebou. Vzájemné propojení prvků lze popsat pomocí tzv. zpětnovazebných smyček, jež jsou cyklickými vzorci chování systému (Mildeová, Vojtko a kol., 2008).

##### **3.1.1.1 Sebeposilující smyčka**

Sebeposilující (neboli pozitivní) smyčka je takové vzájemné propojení proměnných, při němž zesiluje jedna proměnná sama sebe přes několik dalších prvků. Klasickým příkladem sebeposilující smyčky je vztah mezi růstem populací a rozením lidí. Populace roste se zvýšením počtu narozených osob a růst narozených osob vede ke zvýšení populace (Šusta, 2013).

##### **3.1.1.2 Vyvažující smyčka**

Vyvažující (negativní) smyčka popisuje stav, při němž je rostoucí proměnná utlumena uvnitř smyčky. Jako příklad lze uvést vazbu mezi dravci a kořistí. Růst počtu dravců vede k poklesu počtu kořistí, což má za následek vymírání dravců – kvůli zlikvidování kořisti (Systems & us – Embracing Complexity, 2016).

#### **3.1.2 Příčinně smyčkový diagram**

Ke znázornění vazeb se běžně používá tzv. příčinně-smyčkový diagram (casual loop diagram). Výhodou tohoto diagramu je přehledné vyjádření zpětných vazeb mezi proměnnými. Tento diagram umožňuje jednodušší komunikaci a porozumění modelu pro nositele problému a osobu, která model vytváří. Nevýhodou tohoto diagramu je nemožnost přímého převodu vazeb do soustavy rovnic, nicméně pro úplnost je nutné zmínit i tento způsob zobrazení. Podrobněji je příčinně smyčkový diagram popsán např. autory (Mildeová, Vojtko a kol., 2008).

#### **3.1.3 Diagram stavů a toků**

Strukturu systému lze v software Vensim znázornit pomocí diagramu stavů a toků (stock and flow diagram), dle autorů (Šusta, 2013) nebo (Mildeová, Vojtko a kol., 2008). Stavové

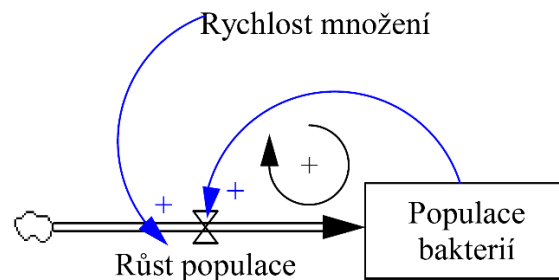
proměnné odpovídají určitým integrálům (akumulaci) a jsou znázorněny jako text ohraničený rámečkem. Tokové proměnné popisují integrandy (rychlost akumulace), na diagramu jsou reprezentovány pomocí větších šipek s ventily a jsou spojeny se stavovými proměnnými. Stavové proměnné mimo model jsou zobrazovány jako mraky. Pomocné proměnné se znázorňují jako prostý text a mohou být zadané v podobě rovnic nebo jako konstanty (v zásadě lze je vždy změnit přes uživatelské rozhraní). Vztahům mezi pomocnými a tokovými, příp. stavovými proměnnými odpovídají tzv. informační vazby, jež lze zobrazit pomocí prostých šipek. Podrobnější popis prvků používaných v diagramech stavů a toků lze najít např. ve skriptech (Krejčí, Kvasnička, 2014).

### 3.1.4 Archetypy chování

V reálném životě lze pozorovat schémata vykazující opakující se chování nezávisle na oblasti řešeného úkolu – tzv. systémové archetypy (Meadows, Wright, 2008).

#### 3.1.4.1 Exponenciální růst

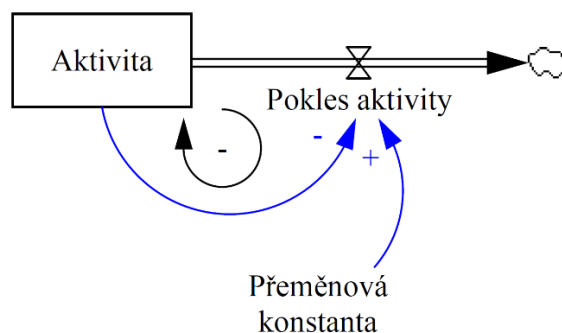
Jedním z archetypů chování je exponenciální růst, který lze popsat pomocí pozitivní zpětnovazební smyčky. Příkladem tohoto archetypu je exponenciální růst bakteriální populace (Ayscue et al., 2009). Tento archetyp je znázorněn na Obr. 3.1. Stavovou proměnnou je v tomto případě *Populace bakterií*, pomocnou proměnnou je *Rychlost množení* a tokovou proměnnou je *Růst populace*. Znak „+“ slouží k označení kladné polarity vazby, tj. přímé úměrnosti mezi proměnnými. Stočená šipka se znakem „+“ uvnitř znázorňuje pozitivní zpětnovazební smyčku.



Obr. 3.1 Diagram stavů a toků – exponenciální růst (zdroj: vlastní zpracování)

#### 3.1.4.2 Exponenciální pokles

Opačná situace, tj. exponenciální pokles, může být popsána jako negativní zpětnovazební smyčka. Jako příklad této struktury lze uvést radioaktivní přeměnu (Albin, 2001). Grafické znázornění schématu radioaktivní přeměny je na Obr. 3.2. Proměnná *Aktivita* je stavovou proměnnou, *Pokles aktivity* je tokovou proměnnou a *Přeměnová konstanta* je pomocná proměnná. Znak „+“, resp. „-“ popisuje přímou, resp. nepřímou úměrnost mezi proměnnými. Negativní zpětnovazební smyčka je znázorněna pomocí stočené šipky se znakem „-“ uvnitř.



Obr. 3.2 Diagram stavů a toků – exponenciální pokles (zdroj: vlastní zpracování)

Kvůli zjednodušení a přehlednosti při znázornění modelu vytvořeného v rámci této práce budou v následujícím textu a grafech polarity vazeb a stočené šipky popisující typ zpětnovazebních smyček vypouštěny.

### 3.2 Nákladově-přínosová analýza

Nákladově-přínosová analýza (cost-benefit analýza, CBA) je ekonomickým nástrojem pro podporu rozhodovacích procesů. Nejjednodušším způsobem realizace cost-benefit analýzy je převod jednotlivých faktorů ovlivňujících zkoumaný systém na peněžní ekvivalent a seskupení nákladů a přínosů na různých stranách podle doporučení č. 101 Mezinárodní komise radiologické ochrany (dále ICRP) (ICRP, 2010). Při volbě ochranného opatření se používá tzv. peněžní hodnota mansievertu (tj. kolektivní efektivní dávky), součinitel, pomocí něhož lze vyjádřit přínos (snížení kolektivní efektivní dávky – tzv. odvrácená dávka) zaváděného opatření ve finančních jednotkách a poté porovnat s náklady.

Pro popis ekonomických nákladů kolektivní efektivní dávky  $Y$  lze využít vztahu (ICRP, 2010):

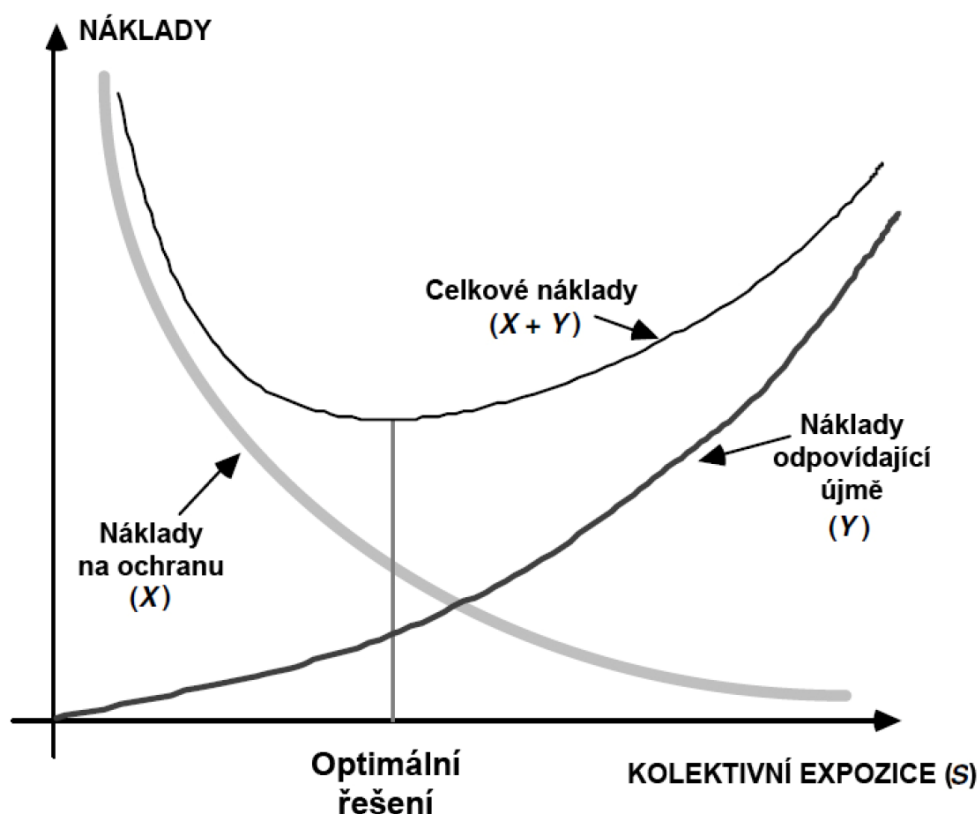
$$Y = \sum_j \alpha_j \cdot S_j, \quad (1)$$

kde  $\alpha_j$  je peněžní ekvivalent kolektivní efektivní dávky pro  $j$ -tou skupinu osob (obyvatelstvo nebo pracovníci),  $S_j$  je kolektivní efektivní dávka skupiny ozářených osob.

Ve vyhlášce Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (dále SÚJB) č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, (SÚJB, 2016) jsou uvedeny součinitele  $\alpha_j$  pro následující případy ozáření:

- 0,5 milionů Kč/Sv pro případ průměrné efektivní dávky nižší než jedna desetina příslušných limitů ozáření,
- 1 milionů Kč/Sv pro průměrné efektivní dávky z intervalu jedna desetina až tři desetin limitů ozáření,
- 2,5 milionů Kč/Sv při překročení efektivní dávky tří desetin příslušných limitů ozáření,
- 1 milion Kč/Sv a lékařské ozáření,
- 2,5 milionů Kč/Sv pro případ havarijního ozáření.

Celkové náklady pro každou variantu opatření lze stanovit jako sumu nákladů na ochranu  $X$  a nákladů kolektivního ozáření  $Y$  z vztahu (1). Minimální hodnota celkových nákladů potom určuje optimální alternativu. Pro optimální variantu platí, že se mezní náklady vynaložené na ochranu rovnají mezní ceně jednotky odvrácené kolektivní efektivní dávky. Graf ilustrující optimální řešení je znázorněn na Obr. 3.3.



Obr. 3.3 Nákladově-přínosová analýza (zdroj – publikace (ICRP, 2010))

### 3.3 Dekontaminační postupy

V publikaci K.G. Anderssona (Andersson et al., 2000) nebo např. v reportu M. Ita (Ito, 2012), jsou popsány dekontaminační techniky a možnosti jejich použití. V závislosti na povrchu kontaminovaného objektu činí průnik izotopů  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$  půdou 5–20 cm, s maximální koncentrací v horní vrstvě o tloušťce 5 cm. Agentura pro ochranu životního prostředí (dále EPA) uvádí, že pro terén nenarušený lidskou činností je cesium distribuováno v hloubce do 5 cm, v případě orné půdy proniká cesium až do hloubky 20 cm (U.S. EPA, 2016).

V této práci jako kontaminovaný objekt je předpokládána trávnatá plocha a pro zatravněná hřiště lze aplikovat postupy stejné jako v případě dekontaminace zemědělské půdy – dle (U.S. EPA, 2016). Dále jsou popsány vybrané<sup>1</sup> příklady dekontaminačních technik/technik nápravy kontaminovaných polí/luk/hřišť.

<sup>1</sup> Vzhledem k rozsahu práce není možné popsat úplně všechny možné metody dekontaminace



### 3.3.1 Odstranění vegetace

Prvním krokem dekontaminace zemědělské půdy/travnaté plochy je odstranění vegetace. Patří sem sekání trávy, ořezání kořenů, odstranění zemědělských plodin (Andersson et al., 2000). Fotografie etapy odstranění vegetace je uvedena na Obr. 3.4.



Obr. 3.4 Sekání trávy (zdroj: report (Ito, 2012))

### 3.3.2 Hnojení půdy

Cesium v půdě se chová podobně draslíku. Fixace  $^{137}\text{Cs}$  je vyšší v jílovitých půdách oproti půdám s větším obsahem organické hmoty. Nižší fixace cesia v organických půdách vede k vyššímu přestupu tohoto kontaminantu do rostlin. Snížení přestupu  $^{137}\text{Cs}$  do vegetace lze dosáhnout pomocí hnojení draslíkem. Tato metoda je nutná v případě polí s ornou půdou, na nichž jsou pěstovány zemědělské plodiny, které jsou součástí potravinového řetězce (Andersson et al., 2000).

### 3.3.3 Slupování trávního drnu

Slupování trávního drnu spočívá v sundání trávníku uříznutím a stočením např. do rolí. Při použití této techniky nesmí být povrch obděláván po kontaminaci (např. oráním). Dalšími omezeními je roční období (půda nesmí být zamrzlá) a absence kamínků v půdě (Andersson et al., 2000). Ilustrace slupování je uvedena na Obr. 3.5.



Obr. 3.5 Slupování (zdroj: report (Ito, 2012))

### 3.3.4 Orba půdy

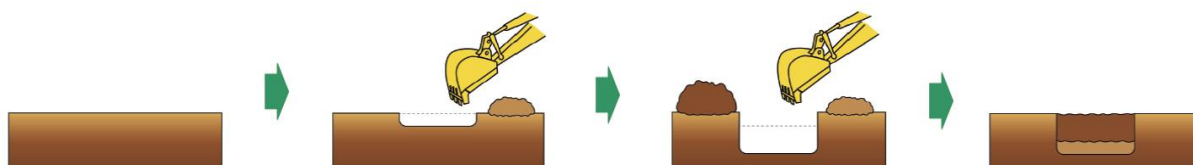
Orba půdy je používána pro snížení dávkových příkonů obrácením půdy (horní kontaminovaná vrstva a dolní nekontaminovaná vrstva) pomocí traktoru s pluhem. Hloubku obrácení je nutné určit dle rozložení kontaminace v půdě (Ito, 2012). Výhodou této metody je možnost použití ve velkém měřítku a absence produkovaného odpadu, mezi nevýhody patří obtížné odstranění kontaminace z půdy po realizaci tohoto opatření (Andersson et al., 2000). Metoda je znázorněna na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 Orba půdy (zdroj: report (Ito, 2012))

### 3.3.5 Překopání půdy

V prvním kroku překopání<sup>2</sup> je sundána horní vrstva půdy (10 cm), topsoil stripping, a umístěna vedle místa práce. V dalším kroku je vykopána druhá vrstva půdy (20 cm), subsoil stripping, a je ponechána na opačné straně od místa práce. Poté je horní vrstva uložena dolů, tj. na místo druhé vrstvy, a je následně zarovnána. Dále je tato půda překryta původní dolní vrstvou půdy a je opět zarovnána. Schéma tohoto postupu a fotografie je na Obr. 3.7, resp. Obr. 3.8 Nevýhodou této metody je pomalejší rychlost oproti jiným metodám (Ito, 2012).



Obr. 3.7 Scéma překopání půdy (zdroj: report (Ito, 2012), vlastní úprava)

<sup>2</sup> Interchanging topsoil with subsoil (Ito, 2012)



Obr. 3.8 Překopání půdy (zdroj: report (Ito, 2012))

### 3.3.6 Odstranění půdy

Odstranění půdy<sup>3</sup> je doporučováno v případě větší kontaminace, kdy je překročena hmotnostní aktivita horní vrstvy půdy rovná  $10 \text{ kBq kg}^{-1}$  (Ito, 2012). Odstranění půdy lze realizovat několika způsoby:

- odstranění tenké vrstvy pomocí traktoru s kladívkovým mulčovačem,
- odstranění vrstvy půdy o tloušťce cca 5 cm za použití bagru/rypadla,
- odstranění tenké vrstvy po použití fixačního/ztužovacích činidla.

#### 3.3.6.1 Použití traktoru s kladívkovým mulčovačem

Odstranění tenké vrstvy (cca 1 cm) traktorem s kladívkovým mulčovačem není možné v případě zamrzlé půdy. Výhodou této metody je možnost sloučení etapy sekání trávy a odstranění horní vrstvy půdy (Ito, 2012). Fotografie této metody je na Obr. 3.9.



Obr. 3.9 Použití traktoru s kladívkovým mulčovačem (zdroj: report (Ito, 2012))

<sup>3</sup> Soil stripping (Ito, 2012)

### 3.3.6.2 Použití bagru

Odstranění půdy bagrem je aplikovatelné pro případ odstranění tlustší vrstvy půdy. Pro tloušťky půdy menší 5 cm není tato metoda vhodná. Dalším omezením této metody je dobrá únosnost podloží (Ito, 2012). Tato metoda je znázorněna na Obr. 3.10.



Obr. 3.10 Odstranění horní vrstvy půdy pomocí bagru (zdroj: report (Miyahara et al., 2013))

### 3.3.6.3 Aplikace fixačního/solidifikačního činidla

V některých případech lze před odstraněním půdy aplikovat fixační nebo solidifikační činidlo umožňující odstranění **tenké** vrstvy půdy. Příkladem takových činidel jsou spreje na bázi magnézia nebo cementu (U.S. EPA, 2016). Po odstranění vegetace jsou spreje aplikovány na půdu za použití rozprašovačů. Po uplynutí tří dní od aplikace činidla je horní vrstva půdy odstraněna pomocí techniky umožňující separovaný sběr ztužené půdy nebo bagru (Ito, 2012). Výhodou aplikace fixačních/ztužovacích činidel je možnost lepší kontroly tloušťky odstraňované vrstvy a následná redukce objemu produkovaného odpadu (Ishida, 2012). Fixace nebo ztužení horní vrstvy půdy není efektivní v případě mrazivého počasí. Dalším omezením této metody je nemožnost aplikace na půdách s vyšším obsahem vody (Ito, 2012). Tento postup je znázorněn na Obr. 3.11.



Obr. 3.11 Aplikace fixačního/solidifikačního činidla (zdroj – report (Ito, 2012))

### 3.4 Změna aktivity radionuklidu

V matematickém modelu byly zahrnuty časové změny aktivit vybraných radionuklidů. Dle (Ahn et al., 2014) bylo předpokládáno, že klesá aktivita radionuklidů  $A(t)$  v čase  $t$  vlivem radioaktivní přeměny, v důsledku působení přírodních jevů a také případnou dekontaminací:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-(\lambda_r + \lambda_w + \lambda_d) \cdot t}, \quad (2)$$

kde  $A_0$  je počáteční aktivita,  $\lambda_r$  je přeměnová konstanta,  $\lambda_w$  je úbytek radionuklidu působením přírodních faktorů<sup>4, 5</sup> a  $\lambda_d$  je úbytek radionuklidu dekontaminací.

Přeměnová konstanta  $\lambda_r$  byla vypočtena pomocí poločasu přeměny  $T_{1/2}$  (Ullmann, 2019):

$$\lambda_r = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}. \quad (3)$$

Úbytek kontaminace  $\lambda_d$  byl vypočten pro všechny vybrané radionuklidy a všechny zvolené metody dekontaminace pomocí vzorce (2) a za předpokladu (Severa, Bár, 1985):

$$A_d = \eta_d \cdot A_0, \quad (4)$$

kde  $A_d$  je aktivita po dekontaminaci vybranou metodou,  $\eta_d$  je parametr popisující účinnost zvolené metody dekontaminace (inverzní dekontaminační faktor) a  $A_0$  je počáteční aktivita (tj. aktivita bezprostředně před dekontaminací). Pro parametr  $\eta_d$  bylo využito odvození:

$$\eta_d = 1 - DRR, \quad (5)$$

kde  $DRR$  je snížení dávkového příkonu dekontaminací (tj. frakce ozáření odstraněná dekontaminací). Po dosažení výrazu (5) do vzorců (2) a (4) a následujícím zlogaritmování lze úbytek kontaminace  $\lambda_d$  odhadnout pomocí odvozeného vztahu:

$$\lambda_d = \frac{1}{t_d} \cdot \ln \frac{1}{1 - DRR} - \lambda_r - \lambda_w, \quad (6)$$

kde  $t_d$  je doba trvání dekontaminace rovná podílu kontaminované plochy (zelená plocha)  $S$  a rychlosti dekontaminace  $v_d$ :

$$t_d = \frac{S}{v_d}. \quad (7)$$

Rychlost dekontaminace  $v_d$  byla stanovena pomocí vzorce:

$$v_d = v_{d,1} \cdot \#, \quad (8)$$

kde  $v_{d,1}$  je rychlost dekontaminace pro jednoho operátora těžké techniky (normovaná rychlost dekontaminace) a  $\#$  je počet operátorů.

---

<sup>4</sup> Natural dispersion rate (Ahn et al., 2014), loss rate constant (IAEA, 2001)

<sup>5</sup> Ve výpočtech byla uvažována pouze jedna hodnota – dle publikací (Ahn et al., 2014) nebo (IAEA, 2001); v jiných publikacích, např. (IAEA, 2006), jsou ovšem uvedeny dvě komponenty působení přírodních faktorů – krátkodobá a dlouhodobá; kvůli jednodušším výpočtům a konzervativnímu přístupu bylo v modelu využito pouze jedné hodnoty – dle (IAEA, 2001).

### 3.5 Výpočet efektivní dávky

Stanovení kumulované efektivní dávky v simulačním modelu vycházelo ze známé plošné aktivity. Ke stanovení kumulované efektivní dávky pro jednotlivce  $E$  za jeden rok  $t_1$  bylo využito integrace přeměněné aktivity<sup>6</sup> (Ahn et al., 2014) a odvozeného vzorce:

$$E = DF \cdot \frac{1}{\lambda_r + \lambda_w + \lambda_d} \cdot A_0 \cdot (1 - e^{-(\lambda_r + \lambda_w + \lambda_d) \cdot t_1}) \cdot (\Delta_{venku} + \Delta_{uvnitř\ budov} \cdot SF), \quad (9)$$

kde  $DF$  je konverzní koeficient pro přepočtení plošné aktivity na efektivní dávku za rok,  $\Delta_{venku}$  je korekce na čas strávený mimo budovy za rok,  $\Delta_{uvnitř\ budov}$  je korekce na čas strávený uvnitř budov za rok a  $SF$  je koeficient stínění budov.

### 3.6 Výpočet prostorového dávkového ekvivalentu

Pro jednodušší porovnání scénářů dekontaminace s odbornou literaturou byl do modelu zaveden pomocný výpočet. Při sledování nápravy, např. v publikaci (Miyahara et al., 2013), jsou uvedeny měřené hodnoty, jež jsou často vyjadřovány pomocí veličiny příkon prostorového dávkového ekvivalentu (dále  $PPDE$ ). Výpočet  $PPDE$  byl v modelu nastaven pomocí vzorce:

$$PPDE = A_s \cdot CF_3, \quad (10)$$

kde  $A_s$  je plošná aktivita určitého radionuklidu a  $CF_3$  je příslušný konverzní koeficient. Celkový  $PPDE$  byl stanoven jako součet dílčích  $PPDE$  vypočtených pro všechny uvažované radionuklidy.

## 4 Vlastní práce

### 4.1 Popis vybraného objektu

Objekt, k němuž se vztahují výpočty scénářů dekontaminace po jaderné havárii, je velká travnatá plocha. Fotografie louky jsou uvedeny v **Příloha 1 – fotografie vybraného objektu**. Louka slouží pro rekreační účely a je umístěna v lokalitě Praha – Řepy. Součástí louky je umělé navýšení, stromy, lavice, odpadkové koše, informační tabule, lampy pouličního osvětlení, zpevněné cesty a dětská hřiště. Dále v areálu louky je restaurace, několik hospodářských staveb a parkoviště. Louka byla vybrána jako modelový objekt **pouze** pro ilustraci výpočtů – z důvodu umístění v lokalitě místa bydliště autorky této práce.

Na území České republiky se nacházejí dvě jaderné elektrárny (dále JE) – JE Temelín a JE Dukovany (Skupina ČEZ, 2019), vzdálené od Prahy cca 130 km, resp. 200 km. Zóna

---

<sup>6</sup> Při simulaci dekontaminačních scénářů byla uvažována aktivita již snížená o aktivitu odstraněnou dekontaminací; pro odhad efektivní dávky v případě scénáře bez dekontaminace byl parametr  $\lambda_d$  nastaven na 0

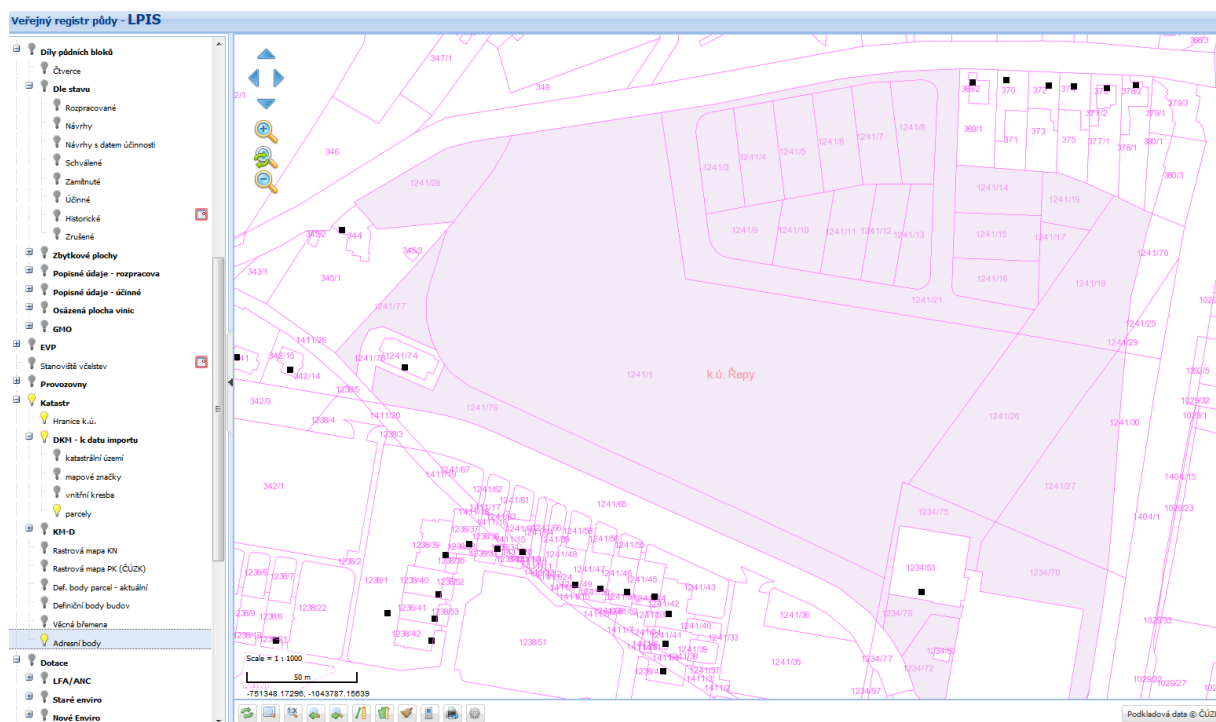
havarijního plánování (dále ZHP) pro JE Temelín a JE Dukovany je stanovena jako území o poloměru<sup>7</sup> 13 km, resp. 20 km (Skupina ČEZ, 2011).

Při havárii JE Fukušima I v březnu 2011 byli obyvatelé postupně evakuováni z území ve 2 km až 20 km a více od jaderné elektrárny (National Research Council, 2014). Po únicích radionuklidů při této havárii dle výsledku leteckých měření realizovaných ve spolupráci Ministerstva školství, kultury, sportu, vědy a technologií Japonska (dále MEXT) a Ministerstva energetiky Spojených států amerických (MEXT, 2011) ležela nejvíce kontaminována místa v okolí 60 km od jaderné elektrárny Fukušima I.

Lze tedy očekávat, že je pravděpodobnost vyšší kontaminace vybrané louky po případné havárii na obou jaderných elektrárnách v ČR nízká. Nicméně, vytvořený matematický model a scénáře dekontaminace je možné přizpůsobit a upravit s ohledem na jiné zájmové objekty (např. pole nebo hřiště ze ZHP obou JE).

## 4.2 Výpočet rozlohy zatravněné plochy

Pro vytvoření matematického modelu bylo nutné stanovit rozlohu louky. Ke stanovení celkové plochy louky (bez zastavěných pozemků) bylo využito veřejného registru půdy LPIS (eAGRI, 2019). Zájmová plocha zahrnovala 28 veřejně přístupných parcel o celkové rozloze 60 378 m<sup>2</sup> definovaných jako ostatní plochy nebo orná půda. Zvolené parcely jsou znázorněny fialovou barvou na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Celková plocha louky dle LPIS (zdroj: LPIS, (eAGRI, 2019))

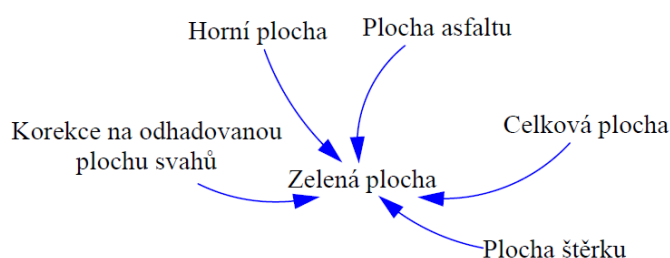
<sup>7</sup> Vnější část



Pro zpřesnění výpočtů byly provedeny korekce a opravy na plochu parkoviště, přístupových cest a navýšení. Pomocí portálu (Mapy.cz, 2018) byla stanovena rozloha asfaltované cesty (cca 266 m<sup>2</sup>), zpevněné šterkovité plochy využívané jako parkoviště (cca 2 454 m<sup>2</sup>) a rovné části navýšení (cca 6 860 m<sup>2</sup>). Ke korekci na svahy byl empiricky, na základě vizuálního zhodnocení, zvolen koeficient 0,4. Zelená plocha louky byla potom odhadnuta dle vzorce (11) a činila přibližně 60 403 m<sup>2</sup>:

$$\begin{aligned} \text{Zelená plocha} = & \text{Celková plocha} - \text{Plocha asfaltu} - \text{Plocha šterku} + \\ & \text{Korekce na odhadovanou plochu svahů} * \text{Horní plocha}. \end{aligned} \quad (11)$$

Vzorec (11) a popsany výpočet byl zaveden ve formě podpůrné kalkulace v software Vensim PLE (Obr. 4.2).

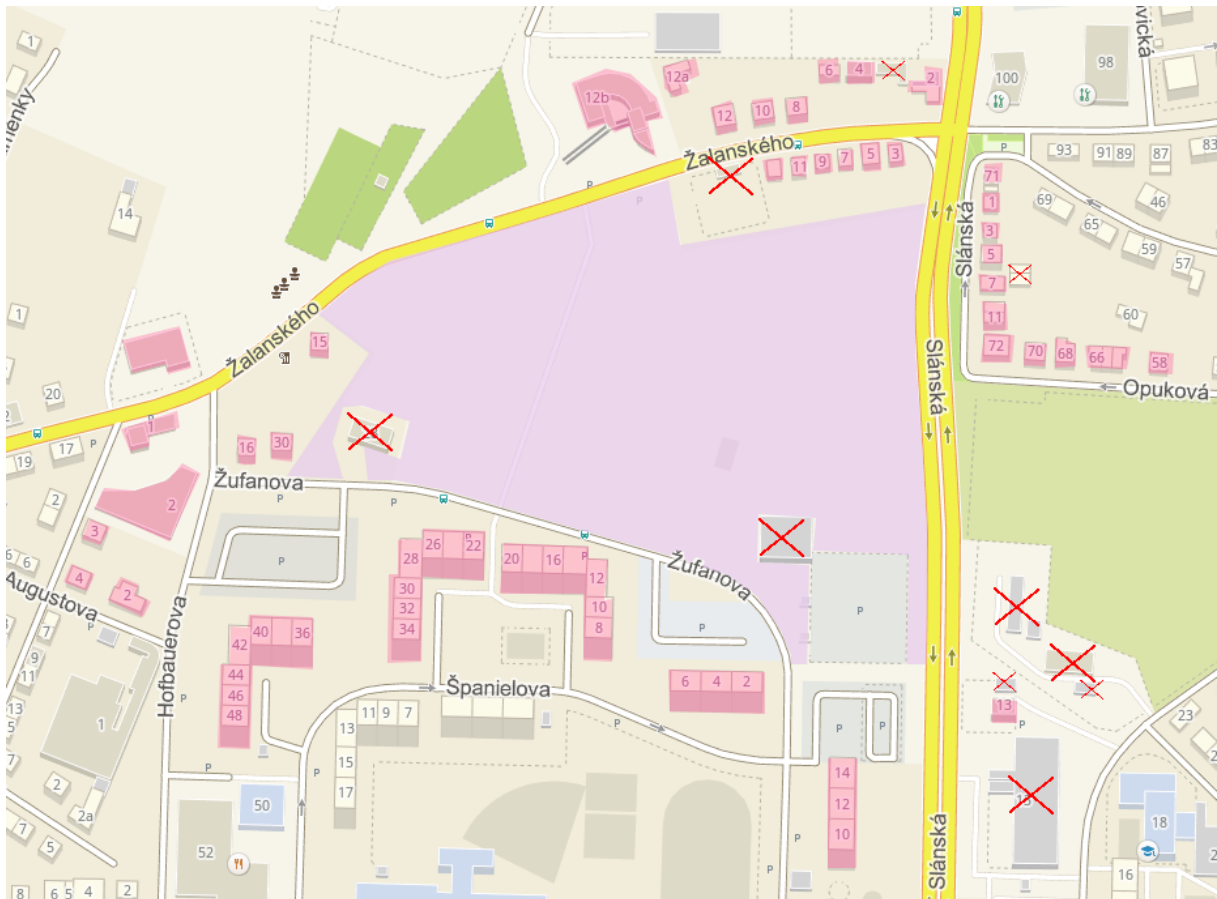


Obr. 4.2 Výpočet zatravněné plochy (zdroj: vlastní zpracování)

### 4.3 Skupina nejvíce ozářených obyvatel

V modelu bylo předpokládáno, že nejvíce ozářeni obyvatelé bydlí v domech v ulicích Žufanova, Žalanského a Slánská, které ohraničují rekreační louku. Okolo louky se nachází pět osmi-podlahových panelových domů, 34 rodinných domů (včetně malých obchodů) s jedním až třemi podlažimi, větší obchod, úřad městské části Praha 17 (dále MČ P17), stanice Hasičského záchranného sboru (dále HZS), úkryt civilní ochrany, hospodářské stavby a restaurace. Vzhledem k umístění restaurace není předpokládán její běžný provoz v době nápravy, proto byl tento objekt vyloučen ze zájmových budov. Úkryt civilní ochrany a hospodářské stavby také nebyly uvažovány v modelu, protože se neočekává běžný pobyt obyvatel v těchto budovách. Vybrané a vyloučené budovy jsou znázorněny na Obr. 4.3 růžovou barvou, resp. přeškrtnutím (vlastní úprava).

Domy z jiných ulic nebyly zahrnuty do modelu z důvodu stínění domy z ulic okolo louky a kvůli větší vzdálenosti od louky. Cílem tohoto výpočtu byl pouze přibližný odhad počtu obyvatel pro navazující kalkulace, **nikoliv** skutečné vymezení kritické skupiny pro účely krizového rozhodování (SÚJB, 2016), které leží mimo rozsah této práce.



Obr. 4.3 Zájmové budovy okolo louky (zdroj: mapy.cz (Mapy.cz, 2018), vlastní úprava)

#### 4.3.1 Panelové domy

Při vytvoření modelové skupiny pro hodnocení ozáření bylo předpokládáno, že jedinci bydlící v prvních třech podlažích jsou ozařováni nejvíce. Dle serveru (Kurzy.cz, 2019) byl stanoven počet bytů ve vybraných osmi panelových domů – 519 bytů. Dále byl odhadnut počet bytů na jedno podlaží pro uvažovanou skupinu domů – cca 65 bytů. Po násobení zvoleným počtem podlaží, tj. 3, byl počet zájmových bytů roven cca 195 bytů. Podle Českého statistického úřadu (dále ČSÚ) v jednom trvale obydleném bytě bydlí cca 2,5 osob (ČSÚ, 2001). Potom byl počet nejvíce ozářených osob ve vybraných panelových domech odhadnut na cca 488 lidí (po zaokrouhlení na celá čísla).

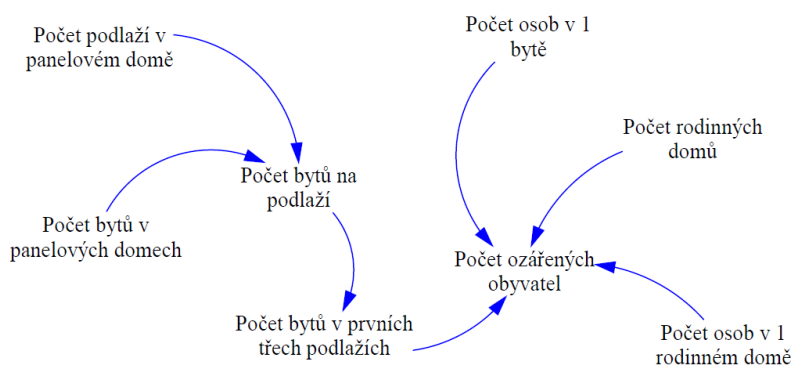
#### 4.3.2 Rodinné domy

Mimo rodinných domů se u louky nachází větší obchod, stanice HZS a úřad MČ P17. Kvůli větší zastavěné rozloze pozemků, na nichž se nacházejí tyto budovy a očekávanému vyššímu počtu osob uvnitř (oproti rodinným domům), byly tyto tři objekty aproximovány třemi rodinnými domy (tj. dohromady šesti domy). Po tomto přiblížení byl počet uvažovaných rodinných domů zvýšen na 40 budov. Český statistický úřad uvádí, že v Praze v roce 2011 bylo 57 354 rodinných domů. Počet osob bydlících v rodinných domech v Praze byl v tomto roce

roven 208 308 osob (ČSÚ, 2012). Potom byl průměrný počet osob na rodinný dům odhadnut jako podíl těchto dvou hodnot a rovnal se cca 3,6 lidí. Počet osob v zájmových rodinných domech byl poté stanoven jako součin průměrného počtu osob na jeden rodinný dům (tj. 3,6 osob na dům) a počtu zájmových domů (tj. 40 domů) a byl rovný 144 osobám.

### 4.3.3 Souhrn nejvíce ozářené skupiny

Postup popsáný v odstavcích 4.3.1 a 4.3.2 byl implementován v software Vensim PLE jako doprovodný výpočet pro výsledný matematický model (Obr. 4.4). Celkový počet osob byl potom roven 631 lidí. Dále v modelu byli uvažováni pouze dospělí jedinci.



Obr. 4.4 Stanovení nejvíce ozářené skupiny (zdroj: vlastní zpracování)

## 4.4 Dozimetrické výpočty při vytvoření matematického modelu

### 4.4.1 Omezení simulačního modelu

Dle reportu Národní rady pro radiační ochranu a měření (dále NCRP) se okamžitá, střednědobá a pozdní fáze nápravy po havárii překrývají. Dekontaminace a remediacce území patří do pozdní fáze, která trvá měsíce až roky po havárii (NCRP, 2014). Vzhledem k této skutečnosti nebyly do modelu zahrnuty krátkodobé radionuklidy typické při haváriích jaderných reaktorů, např. izotopy jódu, kryptonu atd. (IAEA, 2006), které kvůli krátkému poločasu přeměny úplně vymřou během několika měsíců po havárii. Z tohoto důvodu byly ve výpočtech uvažovány pouze dva radionuklidy –  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$  s poločasy přeměny  $T_{1/2}$  cca 2 roky, resp. 30 let (LNHB, 2018). Dále v modelu bylo předpokládáno, že již došlo k částečné dekontaminaci „seshora“ (MOE, 2013), tj. dekontaminaci dalších objektů umístěných na louce – staveb, lavic, stromů atd. Výsledný výpočet scénářů dekontaminace byl tedy aplikován jen na zelenou část louky. Dalším omezením modelu bylo zahrnutí do výpočtů pouze externího ozáření. Vnitřní ozáření v důsledku ingesce kontaminovaných potravin/vody vzhledem k účelu objektu (rekreační louka) nebylo zohledněno, i když se tento postup doporučuje ve vyhlášce 422/2016 Sb. (SÚJB, 2016). Dále nebylo do modelu započítáno vnitřní ozáření z inhalace radionuklidů kvůli zanedbatelnému příspěvku ozáření touto cestou k celkovému ozáření podle bezpečnostních standardů (IAEA, 2001).

#### 4.4.2 Předpokládaná kontaminace louky

Počáteční aktivity  $A_0$  pro  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{134}\text{Cs}$  byly ve výpočtech nastaveny na  $1 \text{ MBq m}^{-2}$ , resp.  $0,93 \text{ MBq m}^{-2}$ , což přibližně odpovídá aktivitám a jejich poměrům mezi sebou (poměr rovný cca  $0,9\text{--}1,05$  pro  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ ) v oblastech s vyšší kontaminací po havárii na JE Fukušima (Yang et al., 2016). Rychlost úbytku působením přírodních vlivů pro izotopy cesia byla nastavena na  $0,05 \text{ rok}^{-1}$  (IAEA, 2001).

#### 4.4.3 Efektivní dávky

Pro výpočet efektivní dávky pomocí vzorce (9) byl podle reportu (IAEA, 2001) zvolen konverzní koeficient rovný  $1,8\text{E-}05 \text{ (mSv rok}^{-1}\text{)}/(\text{Bq m}^{-2}\text{)}$ , resp.  $4,9\text{E-}05 \text{ (mSv rok}^{-1}\text{)}/(\text{Bq m}^{-2}\text{)}$  pro  $^{137}\text{Cs}$ , resp.  $^{134}\text{Cs}$ . Finální efektivní dávka byla potom součtem efektivních dávek od obou radionuklidů.

##### 4.4.3.1 Parametry pro výpočet efektivní dávky obyvatelstva

Dle vyhlášky 422/2016 Sb. (SÚJB, 2016) byla pro čas strávený uvnitř budov zavedena hodnota rovná 7 000 hodin za rok. Vzhledem ke skutečnosti, že domy okolo louky jsou panelové nebo cihlové, byl koeficient stínění budov nastaven na 0,2 (IAEA, 2000). Při dosažení do vzorce (9) výše uvedených počátečních aktivit  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$  (odstavec 4.4.2) a součtu obou efektivních dávek byla výsledná efektivní dávka rovna  $20 \text{ mSv rok}^{-1}$ , což je dle vyhlášky 422/2016 Sb. (SÚJB, 2016) referenční hodnotou v případě nehodové expoziční situace, kterou lze použít při rozhodování o odvolání ochranného opatření ukrytí, evakuace nebo přesídlení obyvatel. Efektivní dávka  $20 \text{ mSv rok}^{-1}$  tedy odpovídala scénáři bez dekontaminace trávnaté části louky, který předpokládal možný návrat části obyvatelstva do svých míst bydliště.

##### 4.4.3.2 Parametry pro výpočet efektivních dávek pracovníků podílejících se na nápravě

Při výpočtu efektivních dávek pracovníků realizujících dekontaminaci louky bylo předpokládáno, že budou tyto osoby pracovat pouze venku. Z tohoto důvodu byl vzorec (9) redukován a korekce na čas zahrnovala pouze čas strávený venku, tj. 8 hodin za den. Koeficient stínění budov v tomto případě také nebyl zahrnut do výpočtů.

#### 4.4.4 Příkon prostorového dávkového ekvivalentu

*PPDE* pro oba předpokládané radionuklidy byl vypočten pomocí vztahu (10). Konverzní koeficienty  $CF_3$  byly převzaty z publikace (IAEA, 2000). Pro  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{134}\text{Cs}$  činí tento koeficient  $2,1\text{E-}6 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$ , resp.  $5,4\text{E-}6 \text{ } \mu\text{Sv h}^{-1}$ . Celkový *PPDE* byl potom stanoven jako součet dílčích *PPDE* pro oba uvažované radionuklidy.

## 4.5 Kontrola simulačního modelu

### 4.5.1 Dimenzionální analýza

Vestavěným kontrolním mechanismem v software Vensim je dimenzionální analýza. Správnost modelu je kontrolována pomocí testu *Units Check*, v němž se ověřuje správnost zadání a vzájemná korespondence jednotek u zavedených proměnných. Podrobnější popis lze najít např. v (Krejčí, Kvasnička, 2014). Vzhledem ke komplexnosti řešeného problému byly do modelu uměle zavedeny pomocné koeficienty s hodnotou 1 a pomocnými jednotkami odstraňujícími nesrovnalosti. Například byl do výpočtů implementován *Pomocný koeficient „na osobu“* rovný  $1 \text{ člověk}^{-1}$  kvůli odstranění jednotky [člověk].

### 4.5.2 Dozimetrické výpočty

V publikaci (Ahn et al., 2014) je uveden jednoduchý přepočít plošných aktivit  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$  na dávkové příkony a následně na roční efektivní dávku (bez integrace v čase oproti vytvořenému simulačnímu modelu). Autoři publikace uvažovali plošné aktivity  $^{134}\text{Cs}$ , resp.  $^{137}\text{Cs}$  rovné  $0,5 \text{ MBq m}^{-2}$ , resp.  $1 \text{ MBq m}^{-2}$  a stínící faktor budov 0,4, což v přepočtu odpovídalo roční efektivní dávce 20 mSv. Tyto parametry byly převzaty z publikace a použity pro kontrolu simulačního modelu. Konverzní koeficienty a korekce na čas strávený uvnitř a mimo budov již nastavené v simulačním modelu nebyly při kontrolní simulaci měněny.

## 4.6 Opatření a metody nápravy

Pro velkou rekreační louku uvažovanou ve výpočtech byly zvoleny dvě dekontaminační metody – sundání trávníku (slupování travního drnu) a odstranění horní vrstvy půdy.

Hnojení draslíkem bylo vynecháno z důvodu, že nejsou na vybraném objektu pěstovány zemědělské plodiny, které se mohou dostat do potravinového řetězce.

V reportu (Ito, 2012) je poznamenáno, že při rozhodování o volbě dekontaminačního postupu se používá hraniční hodnota hmotnostní aktivity půdy hodnoty rovná  $10 \text{ kBq kg}^{-1}$  (dle rozhodnutí příslušných orgánů). Při překročení této hodnoty se doporučuje fyzické odstranění horní vrstvy půdy. Za předpokladu hustoty půdy  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$  (Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně, 2015), hloubky 15 cm (Ito, 2012) a sumární plošné aktivity  $1,93 \text{ MBq m}^{-2}$  dle odstavce 4.4.2 činí hmotnostní aktivita půdy cca  $8 \text{ kBq kg}^{-1}$ , což je na hranici pro práh rozhodování. Z důvodu hraniční hodnoty hmotnostní aktivity byla technika překopání a orby půdy vyloučeny z uvažovaných scénářů dekontaminace.

V scénáři odstranění horní vrstvy půdy bylo předpokládáno, že kvůli vyšší kontaminaci bude odstraněna větší vrstva půdy (cca 5 cm), proto byla vybrána metoda využívající bagru/rypadla, nikoliv traktoru s kladívkovým mulčovačem. Použití solidifikačního/fixačního činidla bylo

také vyloučeno ze simulací kvůli skutečnosti, že není známo roční období kontaminace a obsah vody v půdě na uvažované louce.

Při implementaci scénáře pro slupování drnu nebo odstranění horní vrstvy půdy bylo do výpočtů zahrnuto sekání trávy dle publikace (Ishida, 2012), i když v modelu samotném nejsou rozpracována jednotlivá roční období kvůli obtížné předvídatelnosti okamžiku vzniku havárie. Kromě dvou zvolených dekontaminačních postupů byl do simulačního modelu zahrnut scénář bez dekontaminace. Dále ve všech simulačních scénářích bylo předpokládáno vytyčení louky, včetně případu bez dekontaminace. Všechny uvažované scénáře také zahrnovaly dekontaminaci osob a techniky vodou, ve zjednodušené podobě.

## **4.7 Popis vybraných scénářů dekontaminace**

### **4.7.1 Vytyčení louky**

V modelu bylo předpokládáno, že každý simulovaný scénář dekontaminace bude začínat vytyčením a zneprístupněním louky. V simulacích bylo nastaveno, že bude doba vytyčení  $t_{vytyčení}$  trvat jeden pracovní den (tj. 8 hodin). Korekce na povinné přestávky kvůli pracím v osobních ochranných pracovních prostředcích (dále OOPP) nebyly zahrnuty do výpočtů. Bylo očekáváno, že se na vytyčení louky budou podílet dvě osoby a jedno auto.

### **4.7.2 Sekání louky**

V simulačním modelu a v obou dekontaminačních scénářích bylo předpokládáno, že po vytyčení louky bude provedeno sekání trávy. Dále bylo očekáváno, že posekaná tráva bude odvezena k dalšímu uložení a uložena ve velkoobjemových vacích podle reportu (Ishida, 2012).

#### **4.7.2.1 Počet osob podílejících se na sekání**

Sekání louky bylo v modelu implementováno za předpokladu práce jednoho operátora traktoru.

#### **4.7.2.2 Snížení dávkového příkonu sekáním**

Při zavedení etapy sekání louky bylo v modelu nastaveno, že sekáním trávy bude odstraněna malá část plošné aktivity deponovaná na vegetaci. Údaje v dostupné literatuře, např. v publikaci (Ishida, 2012) nebo reportu (Roed et al., 1995) se shodují, že samotné sekání má skoro zanedbatelný vliv na dávkové příkony ve vzduchu nad kontaminovanou plochou. V reportu o implementaci protipatření po jaderné havárii (Andersson et al., 2000) je však poznamenáno, že sekání vegetace je účinné, ale ihned po kontaminaci (řádově dny, před možnými srážkami). V simulačním modelu bylo ovšem předpokládáno, že kontaminace pochází pouze od  $^{134}\text{Cs}$  a  $^{137}\text{Cs}$ , tj. přibližně po několika měsících od jaderné havárie. Z tohoto důvodu, ve snáze dosáhnout kompromisu mezi dostupnými prameny, bylo ve výpočetním modelu snížení dávkového příkonu (parametr  $DRR_{sekání}$ ) při sekání trávy aproximováno snížením dávkového

příkonu pro řezání větví. V reportu (U.S. EPA, 2016) je uvedeno, že je tento parametr roven 5–30 % pro 1 cm nad povrchem kontaminovaného objektu. Konzervativně byla zvolena hodnota 5 %. Ve zprávě (Miyahara et al., 2013) je poznamenáno, že přepočtení dávkových příkonů na standardní výšku 1 m lze realizovat vynásobením faktorem 0,8. Po zahrnutí popsaného přepočtu byl parametr  $DRR_{sekání}$  odhadnut na 4 %.

#### 4.7.2.3 Rychlost dekontaminace sekáním louky

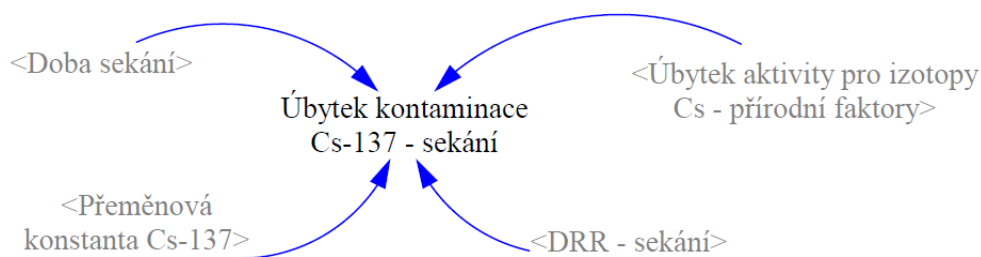
Normovaná rychlost sekání byla stanovena pomocí doby sekání jednoho hektaru jednou osobou za den rovné 0,3 člověk-dny  $ha^{-1}$  (Andersson et al., 2000). V přepočtu na 365 dnů činila potom normovaná rychlost sekání  $v_{d,1, sekání}$  cca  $1,22E7 m^2 \text{ člověk}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ . Přepočtení na jeden rok byl nezbytný kvůli jednotnosti simulace a správnému nastavení jednotek, nikoliv jako reálná úvaha.

#### 4.7.2.4 Doba sekání louky

Za předpokladu práce jedné osoby byla doba sekání louky  $t_{sekání}$  odhadována na 1,8 dnů (za použití pomocného výpočtu v software Vensim PLE).

#### 4.7.2.5 Úbytek kontaminace sekáním

Ke stanovení parametru  $\lambda_{d, sekání}$  (úbytek kontaminace sekáním louky) bylo využito vzorce (6), vypočtené doby sekání  $t_{sekání}$  (přepočtené na rok) a snížení dávkového příkonu  $DRR_{sekání}$ . Pro ilustraci implementace podpůrné kalkulace úbytku kontaminace  $\lambda_{d, sekání}$  do matematického modelu bylo zvoleno schéma pro  $^{137}Cs$  znázorněné<sup>8</sup> na Obr. 4.5. Pomocí výpočtů v software Vensim PLE byl tento parametr stanoven na  $8,15 \text{ rok}^{-1}$  pro  $^{137}Cs$  a pro  $^{134}Cs$  se úbytek kontaminace sekáním rovnal  $7,84 \text{ rok}^{-1}$ . Úbytky kontaminace byly vždy stanoveny jako rychlost úbytku dekontaminací za 365 dnů – pouze kvůli správnosti jednotek ve výpočtu<sup>9</sup>, tj. bez ohledu na reálné možnosti dekontaminace v různých ročních obdobích.



Obr. 4.5 Výpočet úbytku kontaminace sekáním pro  $^{137}Cs$  (zdroj: vlastní zpracování)

<sup>8</sup> Proměnné znázorněné šedou barvou a ve špičatých závorkách jsou tzv. stínové proměnné; v software Vensim jsou to odkazy na proměnné umístěné v dalších částech modelu

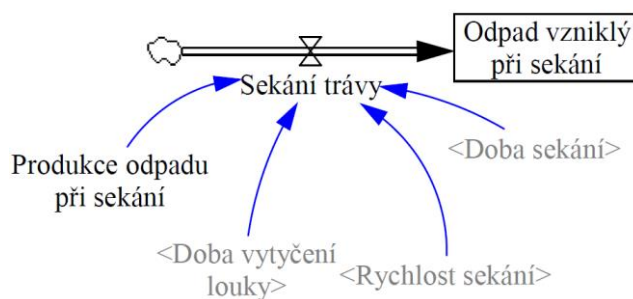
<sup>9</sup> V publikaci (IAEA, 2006) nebo (Ahn et al., 2014) je uvedena hodnota úbytku dekontaminace  $0,223 \text{ rok}^{-1}$ , ovšem v této práci jsou vypočteny vyšší hodnoty úbytku dekontaminace – kvůli zavedení tohoto parametru jako funkce dalších proměnných a matematickému přepočtu na 365 dnů

#### 4.7.2.6 Odpad vzniklý při sekání

Objem odpadu vzniklého při sekání  $V_{\text{sekání}}$  (tj. tráva, půda) byl stanoven pomocí časové integrace od konce doby vytyčení louky  $t_{\text{vytyčení}}$  do konce doby sekání  $t_{\text{sekání}}$ :

$$V_{\text{sekání}} = \int_{t_{\text{vytyčení}}}^{t_{\text{sekání}}} \text{Produkce odpadu při sekání} \cdot \text{rychlost sekání} dt, \quad (12)$$

kde *Produkce odpadu při sekání* je objem odpadů ze sekání trávy (v metrech krychlových) z jednoho metru čtverečného sekané louky. Hodnota tohoto parametru rovná  $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$  byla převzata z reportu (U.S. EPA, 2016). Integrace přes zvolený časový úsek byla zavedena pomocí vestavěné funkce PULSE ve tvaru:  $\text{PULSE}(\text{Doba vytyčení louky}, \text{Doba sekání})$ . Podrobnější popis této funkce lze najít např. v (Krejčí, Kvasnička, 2014). Schéma výpočtu objemu odpadu vzniklého při sekání louky v modelu je uvedeno na Obr. 4.6.



Obr. 4.6 Výpočet odpadu vzniklého při sekání louky (zdroj: vlastní zpracování)

#### 4.7.3 Slupování travního drnu

##### 4.7.3.1 Počet osob podílejících se na slupování

V modelu bylo nastaveno, že se na slupování drnu podíleli dva operátoři slupovačů (a dva slupovací stroje). V reportu (Ito, 2012) se ovšem uvádí, že při práci s těžkou technikou je nutné ručně (za použití pomocného nářadí) odstranit zbytky vzniklého odpadu. Z tohoto důvodu bylo předpokládáno, že dekontaminace louky sundáním travního drnu by probíhala v několika skupinách. V simulacích bylo implementováno, že každý operátor slupovače má dva asistenty. Potom se počet osob zúčastněných slupování rovnal čtyřem osobám.

##### 4.7.3.2 Snížení dávkového příkonu slupováním

V reportu (U.S. EPA, 2016) je uvedeno, že činí snížení dávkového příkonu při slupování travního povrchu  $DRR_{\text{slupování}}$  pomocí velkého slupovače cca 45 %. Ve zprávě (Ito, 2012) je poznamenáno, že leží tento parametr v intervalu 50–80 %. Kvůli dodržení kompromisu mezi oběma zdroji byl v simulacích tento parametr konzervativně nastaven na hodnotu 50 %.



### 4.7.3.3 Rychlost dekontaminace slupováním

V práci (Dostál, 2014) jsou popsány parametry slupovače Brouwer SH 2125 (Brouwer Turf, 2019). Pro vybraný slupovací stroj se uvádí, že nejčastěji pozorovaná rychlost slupování činí  $0,03 \text{ ha h}^{-1}$  ( $300 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ ). Potom byla normovaná rychlost slupování  $v_{d,1, \text{slupování}}$  odhadnuta na  $8,76\text{E}5 \text{ m}^2 \text{ člověk}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ .

### 4.7.3.4 Doba slupování

Dle pomocného výpočtu ve Vensim PLE, za předpokladu slupování travního drnu dvěma operátory slupovačů, trvalo sundání travního drnu louky přibližně 12,6 dnů (parametr  $t_{\text{slupování}}$ ).

### 4.7.3.5 Úbytek kontaminace slupováním

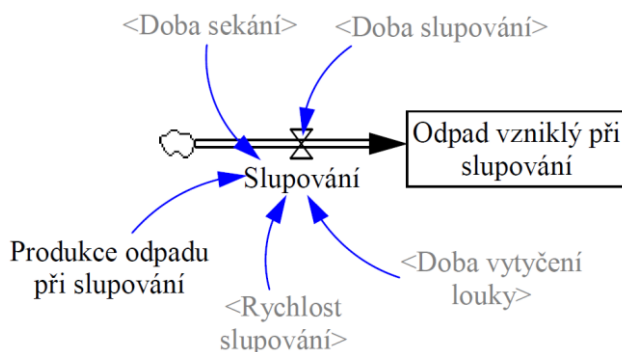
Úbytek kontaminace slupováním  $\lambda_{d, \text{slupování}}$  byl vypočten pomocí vzorce (6) pro oba uvažované radionuklidy –  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{134}\text{Cs}$ . Do matematického modelu byly tyto výpočty implementovány obdobně jako pro úbytek kontaminace sekáním (Obr. 4.5). V programu Vensim bylo stanoveno, že činil úbytek kontaminace slupováním cca  $20,03 \text{ rok}^{-1}$  pro  $^{137}\text{Cs}$ , resp.  $19,72 \text{ rok}^{-1}$  pro  $^{134}\text{Cs}$ .

### 4.7.3.6 Odpad vzniklý slupováním

Časovou integrací od konce doby sekání louky  $t_{\text{sekání}}$  do konce doby slupování drnu  $t_{\text{slupování}}$  byl odhadnut objem odpadu vzniklý v této etapě nápravy. Potom vzorec (12) použitý pro výpočet odpadu při sekání trávy byl modifikován na:

$$V_{\text{slupování}} = \int_{t_{\text{vytyčení}}+t_{\text{sekání}}}^{t_{\text{slupování}}} \text{Produkce odpadu při slupování} \cdot \text{rychlost slupování} dt, \quad (13)$$

kde *Produkce odpadu při slupování* je odpad ze slupování drnu (v metrech krychlových) z jednoho metru čtverečného slupované plochy. Dle publikací (U.S. EPA, 2016) nebo (Ito, 2012) byl tento parametr nastaven na maximální uváděnou hodnotu  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ , za předpokladu odstranění vrstvy drnu o tloušťce 5 cm. Zvolený časový úsek byl zadán pomocí funkce PULSE ve tvaru:  $\text{PULSE}(\text{Doba vytyčení louky} + \text{Doba sekání}, \text{Doba slupování})$ . Schéma podpůrné kalkulace odpadu ze slupování travního drnu je znázorněno na Obr. 4.7.



Obr. 4.7 Výpočet odpadu vzniklého při slupování travního drnu (zdroj: vlastní zpracování)

#### 4.7.4 Odstranění horní vrstvy půdy

##### 4.7.4.1 Počet osob podílejících se na odstranění půdy

Scénář dekontaminace zahrnující odstranění horní vrstvy půdy předpokládal současnou práci dvou operátorů rypadla. Obdobně jako při slupování drnu byli do výpočtů zahrnuti asistenti – dvě osoby na každého operátora rypadla, jejichž zodpovědností bylo odstranění zbytků vzniklého odpadu.

##### 4.7.4.2 Snížení dávkového příkonu odstraněním půdy

Na základě údajů z reportu (U.S. EPA, 2016) byl nastaven parametr snížení dávkového příkonu  $DRR_{\text{odstranění půdy}}$  na 90 %.

##### 4.7.4.3 Rychlost dekontaminace odstraněním půdy

Ve zprávě (IAEA, 2012) o enviromentálním modelování pro radiační bezpečnost je uvedeno, že činí doba odstranění jednoho hektaru půdy jednou osobou 5–10 člověk-dny  $\text{ha}^{-1}$ . Konzervativně byla zvolena hodnota 10 člověk-dny  $\text{ha}^{-1}$ , jež se v přepočtu na normovanou rychlost  $v_{d,1, \text{odstranění půdy}}$  rovnala  $3,65\text{E}5 \text{ m}^2 \text{ člověk}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ .

##### 4.7.4.4 Doba odstranění půdy

Pro práci dvou operátorů rypadla odhadla podpůrná kalkulace ve Vensim dobu odstranění horní vrstvy půdy na cca 30 dnů.

##### 4.7.4.5 Úbytek kontaminace odstraněním půdy

Za použití vzorce (6) byl stanoven úbytek kontaminace odstraněním horní vrstvy půdy (parametr  $\lambda_{d, \text{odstranění půdy}}$ ) pro oba předpokládané radionuklidy –  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{134}\text{Cs}$ . Pomocný výpočet v matematickém byl uskutečněn podle schématu pro sekání (Obr. 4.5). Potom pro  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{134}\text{Cs}$  byl úbytek kontaminace odstraněním půdy rovný  $27,76 \text{ rok}^{-1}$ , resp.  $27,44 \text{ rok}^{-1}$ .

##### 4.7.4.6 Odpad vzniklý odstraněním půdy

Množství odpadu vzniklého při odstranění horní vrstvy půdy bylo stanoveno pomocí integrace v čase a vzorce (12) upraveného pro tento scénář:

$$V_{\text{odstranění půdy}} = \int_{t_{\text{vytyčení}} + t_{\text{sekání}}}^{t_{\text{odstranění půdy}}} (\text{Produkce odpadu při odstranění půdy} \cdot \text{rychlost odstranění půdy}) dt, \quad (14)$$

kde *Produkce odpadu při odstranění půdy* je odpad produkovaný při odstraňování půdy (v metrech krychlových) z jednoho metru čtverečného plochy louky. Dle reportu (U.S. EPA, 2016) byl tento parametr nastaven konzervativně na  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$ , což odpovídá odstranění 5 cm půdy. Časové omezení bylo nastaveno pomocí funkce PULSE ve tvaru:  $\text{PULSE}(\text{Doba vytyčení louky} + \text{Doba sekání}, \text{Doba odstranění půdy})$ . Schéma výpočtu je obdobné grafům znázorněným na Obr. 4.6 a Obr. 4.7.

#### 4.7.5 Dekontaminace osob a techniky

V modelu bylo předpokládáno, že osoby podílející se na dekontaminaci budou dekontaminovány obyčejnou vodou každý den při ukončení práce. Dekontaminace techniky byla očekávána jednorázově po ukončení každé etapy nápravy. Vzhledem ke skutečnosti, že detailní popis provozu stanovišť dekontaminace osob (dále SDO) a techniky (dále SDT) by přesáhl rozsah této práce, bylo rozhodnuto do výpočtů zahrnout pouze spotřebu vody. Dle práce (Pojeta, 2014) činí spotřeba vody na SDO 25 l člověk<sup>-1</sup>. Dále se v (Pojeta, 2014) uvádí, že spotřeba vody na SDT se rovná 1500 l min<sup>-1</sup> a kapacita počtu vozidel činí 16 vozidel h<sup>-1</sup>.

#### 4.8 Implementace vybraných scénářů

V matematickém modelu byla simulace zvolených scénářů realizována pomocí tří pomocných prepínačů (SWITCH sekání, SWITCH slupování a SWITCH odstranění půdy), logického operátoru AND a podmíněných konstrukcí IF THEN ELSE. Z důvodu odhadu dávkového zatížení pracovníků dekontaminujících louku byl dodatečně simulován scénář uvažující dekontaminací sekáním. V Tab. 4.1 je shrnuto nastavení prepínačů pro výpočet scénářů slupování, odstranění horní vrstvy půdy a podpůrného scénáře sekání louky. Pro simulaci vybraného scénáře musely mít popsané prepínače nastavení z příslušného sloupce tabulky. Jakékoli jiné nastavení prepínačů spouštělo scénář bez dekontaminace. V matematickém modelu byl pokles aktivity dekontaminací vymezen pomocí funkce PULSE se zadanými časovými intervaly pro každý uvažovaný scénář.

Tab. 4.1 Nastavení prepínačů pro výpočet scénářů dekontaminace (zdroj: vlastní zpracování)

Přepínač	Hodnoty pro scénář slupování	Hodnoty pro scénář odstranění půdy	Hodnoty pro pomocný scénář sekání
SWITCH sekání	1	1	1
SWITCH odstranění půdy	0	1	0
SWITCH slupování	1	0	0

#### 4.9 Implementace výpočtu efektivních dávek

Výpočet efektivních dávek v simulacích probíhal jak pro obyvatelstvo, tak i pro osoby realizující dekontaminaci louky. Nastavením prepínače SWITCH obyvatelstvo na hodnotu 1 vždy byl spouštěn výpočet efektivní dávky pro jednotlivce z obyvatelstva (pro jakýkoli scénář). Efektivní dávka pro obyvatelstvo byla vždy stanovena za jeden rok.

Výpočet efektivních dávek pro pracovníky podílející na nápravě louky v jednotlivých etapách probíhal za nastavení prepínačů shrnutých v Tab. 4.2 (ve sloupcích). Současné nastavení

přepínačů bylo implementováno pomocí logického operátoru AND a podmíněných konstrukcí IF THEN ELSE. Pomocí funkce PULSE a nastavení časových hranic byly efektivní dávky pro pracovníky počítány pro každou etapu nápravy zvláště. Potom byly stanoveny efektivní dávky pro osoby podílející se na vytyčení louky, při sekání trávy, po dobu slupování drnu a po dobu odstranění horní vrstvy půdy.

Tab. 4.2 Nastavení přepínačů pro výpočet efektivních dávek pracovníků (zdroj: vlastní zpracování)

Přepínač	Výpočet efektivní dávky při vytyčení louky	Výpočet efektivní dávky při sekání trávy	Výpočet efektivní dávky při odstranění půdy	Výpočet efektivní dávky při slupování
SWITCH obyvatelstvo	0	0	0	0
SWITCH vytyčení	1	1	1	1
SWITCH sekání	0	1	1	1
SWITCH odstranění půdy	0	0	1	0
SWITCH slupování	0	0	0	1

#### 4.10 Odhad kolektivní efektivní dávky a výpočet přínosů opatření

Kolektivní efektivní dávka pro cílovou skupinu (např. obyvatelstvo nebo osoby podílející se na dekontaminaci) byla v modelu vypočtena jako součin efektivní dávky a počtu osob. Pomocí násobení kolektivní efektivní dávky součinitelem pro havarijní ozáření 2,5 milionů Kč/Sv (SÚJB, 2016) bylo stanoveno finanční vyjádření zdravotní újmy pro vybranou ozářenou skupinu osob. Přínos opatření/nápravy, tj. finanční ohodnocení snížení ozáření, byl vypočten pouze ve vztahu ke kritické skupině (tj. obyvatelstvo). Přínosy opatření/nápravy byly stanoveny jako rozdíl finančního vyjádření zdravotní újmy pro scénář bez dekontaminace a zvoleného scénáře dekontaminace. Pro realizaci cost-benefit analýzy byl dále odhadnutý přínos porovnán s náklady na opatření/nápravu.

#### 4.11 Kalkulace nákladů pro jednotlivé scénáře

Kalkulace nákladů zahrnovala variabilní náklady – cenu za pohonné hmoty (dále PHM), mzdy, materiál, OOPP, odvoz odpadu, pomocné nářadí, spotřebu vody při dekontaminaci osob a techniky. Cena za 1 litr PHM v lednu 2019 ležela v intervalu od cca 28 Kč l<sup>-1</sup> do zhruba 35 Kč l<sup>-1</sup> dle serveru (ČeskýBenzín.cz, 2019). V modelu byla konzervativně zvolena horní hranice ceny PHM rovná 35 Kč l<sup>-1</sup>.

Na základě údajů v práci (Foltýn, 2008), v roce 2008 činila mzda 380 Kč h<sup>-1</sup> pro práce v kontrolovaném pásmu na JE Temelín. S ohledem na koeficient inflace pro roky 2008–2018 rovný 1,16 dle serveru (Peníze.cz, 2018), v roce 2018 by tato mzda byla rovna cca 440 Kč h<sup>-1</sup>. Pro manuální práce byla tato částka upravena na 400 Kč h<sup>-1</sup> (zaokrouhлено dolů). Pro řízení velké techniky byla mzda nastavena na 500 Kč h<sup>-1</sup> (zaokrouhлено nahoru). Vzhledem k náročným podmínkám práce (ozáření, práce v OOPP) je možné očekávat, že ve skutečnosti by mzdy pracovníků byly vyšší než sazby nastavené v modelu. Je ovšem možné změnit tyto parametry v modelu dle aktuální situace.

Do ceny materiálu, OOPP, pomocného nářadí nebylo započteno balné a poštovné. Ceny za tyto položky byly konzervativně zaokrouhлены nahoru.

Nakládání s odpadem bylo do modelu implementováno ve zjednodušené podobě bez hodnocení vlivu na okolí a obyvatelstvo. V době publikace práce (Andersson et al., 2000) činila cena odvozu odpadu 20 EUR m<sup>-3</sup>. Tato hodnota byla přepočtena na českou korunu dle průměrného kurzu v roce 2000: 1 EUR = 35,61 Kč dle webu (Kurzy.cz, 2019). Do výpočtu finální ceny byla také zahrnuta korekce na inflaci, již odpovídá koeficient 1,45 pro roky 2000–2018 podle serveru (Peníze.cz, 2018).

Dále do kalkulace nákladů bylo zahrnuto opotřebení fixního kapitálu – traktoru, slupovačů a rypadel, stanoveného dle postupu v publikaci (Roed et al., 1998). Opotřebení SDO a SDT včetně detekčního zařízení nebylo započítáno do nákladů kvůli omezenému množství přístupných údajů. Do modelu ovšem byla zahrnuta cena za spotřebovanou vodu na SDO a SDT. Cena za spotřebu vody byla nastavena na 50 Kč m<sup>-3</sup> dle serveru (Elektřina.cz, 2019). Pro zjednodušení výpočtů bylo předpokládáno, že voda použitá k dekontaminaci osob a techniky má nízkou objemovou aktivitu a lze ji vypouštět do stokové sítě (Drace, 2012), proto nakládání s tekutým odpadem nebylo uvažováno v matematickém modelu.

V publikaci (Ishida, 2012) je zmíněno, že při fyzickém odstranění části půdy a při absenci budov blokujících vítr je doporučováno kropení povrchu vodou kvůli možné další kontaminaci. Vzhledem ke skutečnosti, že okolo louky jsou umístěny budovy, nebyla do modelu tato část nápravy zahrnuta. Dále do simulací nebylo započteno obnovení louky po dekontaminaci.

#### **4.11.1 Náklady na vytyčení louky**

##### **4.11.1.1 Celkové náklady na mzdy**

Celkové náklady na mzdu byly stanoveny jako součin hodinové sazby za manuální práci (400 Kč h<sup>-1</sup>), počtu hodin práce (8 hodin) a počtu osob (dva pracovníci).

##### **4.11.1.2 Celková cena za PHM**

Při vytyčení louky bylo předpokládáno objíždění louky autem se současnou výstavbou oplocení. Dle webu (Mapy.cz, 2018) činil obvod uvažované louky 1 219 m. Potom byla celková spotřeba auta při vytyčení louky odhadnuta jako součin spotřeby auta a obvodu louky. Dle serveru (ČeskýBenzín.cz, 2019) leží průměrné spotřeby automobilů od cca 2 l (100 km)<sup>-1</sup> do cca 16 l (100 km)<sup>-1</sup>. Vzhledem ke značnému rozpětí těchto hodnot byla vybrána průměrná hodnota spotřeby rovná 8 l (100 km)<sup>-1</sup>. Celková cena za PHM při vytyčení louky byla vypočtena jako součin celkové spotřeby auta a ceny za jeden litr PHM (35 Kč l<sup>-1</sup>).

##### **4.11.1.3 Celková cena za ploty**

Pro zneprístupnění louky byly vybrány mobilní panely o délce 3,455 m a výšce 2 m (Levné-oplocení.cz, 2019). Potřebný počet plotů k vytyčení kontaminované oblasti byl odhadnut jako podíl obvodu louky (1 219 m) a délky jednoho plotu. Celková cena za ploty pro vytyčení louky byla potom součinem počtu plotů a ceny za jeden plot. Cena za jeden plot byla zaokrouhlena nahoru a byla v modelu nastavena na 1 000 Kč.

##### **4.11.1.4 Celková cena za bezpečnostní tabulky**

Bylo předpokládáno, že na oplocení louky budou upevněny výstražné tabulky „Nebezpečné ionizující záření“ v intervalu deseti metrů. Počet tabulek byl stanoven jako podíl obvodu louky a zvoleného intervalu mezi nimi (10 m). Ve výpočtu byla cena za jednu tabulku konzervativně zaokrouhlena nahoru a nastavena na 50 Kč. Celková cena za bezpečnostní tabulky byla potom vypočtena jako součin počtu tabulek a ceny za jednu tabulku.

##### **4.11.1.5 Celková cena za vytyčovací pásku**

Kromě upevnění výstražných tabulek se očekávalo, že by bylo oplocení vytyčeno páskou „Vstup zakázán“. Počet vytyčovacích pásek byl roven podílu obvodu kontaminované oblasti a délky jedné pásky. Délka jedné pásky činí 250 m (Traiva s.r.o., 2016). Cena jedné pásky byla zaokrouhlena nahoru a byla v simulacích nastavena na 160 Kč. Celková cena za vytyčovací pásky byla odhadnuta vynásobením celkového počtu pásek a ceny za jednu vytyčovací pásku.

#### 4.11.1.6 Celková cena za OOPP

Pracovníci vytyčující louku by měli mít OOPP. Dle publikace (Ishida, 2012), vzhledem k vysoké úrovni kontaminace na louce, se doporučuje práce v tyveku, gumových holínkách, gumových rukavicích oblečených na bavlněné rukavice, v přilbě, ochranných brýlích, masce s filtry a s elektronickým personálním dozimetrem (EPD). Ceny za OOPP byly převzaty ze serveru oopp.cz (PÍCHA Safety, s.r.o., 2019) a zaokrouhleny nahoru. Cena za EPD (DMC 3000 Personal Dosimeter) byla převzata ze stránek irss.ca (IR Supplies and Services, 2019), následně přepočtena na Kč a také zaokrouhlena nahoru. Celková cena za OOPP byla potom stanovena součtem cen jednotlivých položek (Tab. 4.3) a vynásobením počtem osob. Vzhledem k předpokládané délce práce (jeden den) byly jednorázové tyveky započteny do celkové ceny OOPP pouze jednou.

Tab. 4.3 Ceny OOPP (zdroj: vlastní zpracování)

OOPP	Cena (Kč)
Ochranná kombinéza TYVEK CLASSIC XPERT	200
Elektronický personální dozimetr DMC 3000	13 000
Přilba	300
Gumové holínky z PVC	160
Pracovní bavlněné rukavice	5
Chemicky odolné nitrilové rukavice	50
Brýle ochranné	400
Polomaska	1 300
Filtry pro polomasku	600

#### 4.11.1.7 Opotřebení auta

Kvůli délce vytyčení louky (jeden pracovní den) nebylo do nákladů zahrnuto opotřebení auta.

#### 4.11.2 Náklady na sekání trávy

##### 4.11.2.1 Celkové náklady na mzdy

Celkové náklady na mzdy byly odhadnuty jako součin počtu odpracovaných hodin a hodinové sazby za manuální práci (400 Kč h<sup>-1</sup>) za předpokladu práce jedné osoby.

##### 4.11.2.2 Celková cena za PHM

Objem PHM spotřebovaný sekáním trávy byl zjištěn vynásobením spotřeby traktoru a plochou louky. K.G. Andersson uvádí (Andersson et al., 2000), že se spotřeba traktoru pohybuje okolo 10 l ha<sup>-1</sup>. Vynásobením objemu PHM cenou za jeden litr PHM byla odhadnuta celková cena za PHM při sekání louky.

#### 4.11.2.3 Celková cena za odpad

Celková cena za nakládání s odpadem byla stanovena jako součin ceny za odvoz jednoho kubického metru odpadu, korekce na inflaci a objemu posekané trávy.

#### 4.11.2.4 Celková cena za vaky na odpad

Pro uložení odpadu bylo čekáváno využití vaků s rozměry 95 cm × 95 cm × 200 cm (REO AMOS, spol. s r.o., 2019). Potom byl objem jednoho vaku odhadnut na cca 1,8 m<sup>3</sup>. Cena jednoho vaku ve výpočtech byla po zaokrouhlení nastavena na 300 Kč. Počet vaků pro odpad byl vypočten jako podíl celkového objemu odpadu a objemu jednoho vaku. Celková cena byla potom součinem počtu vaku a ceny za jeden vak.

#### 4.11.2.5 Celková cena za OOPP

V modelu bylo předpokládáno použití OOPP popsanych v odstavci 0 ve všech etapách nápravy. Celková cena za OOPP při sekání trávy byla potom stanovena pouze pro jednu osobu, se započtením tyveku dvakrát kvůli přibližně dvěma dnům práce.

#### 4.11.2.6 Opotřebení traktoru

Vzhledem k vysokým cenám profesionální zahradní a zemědělské techniky bylo vhodnější uvažovat opotřebení fixního kapitálu místo předpokladu nákupu nové techniky kvůli dekontaminaci. Konzervativně byla vždy do výpočtů zahrnuta korekce pořizovací ceny na inflaci s ohledem na 2018 rok. Odhad opotřebení techniky za den byl stanoven dle vzorce:

$$\text{Opotřebení techniky za den} = \frac{\text{Pořizovací cena} \cdot \text{Korekce na inflaci}}{\text{Doba odepsání} \cdot \text{Očekávaná doba použití za rok}}, \quad (15)$$

kde *Doba odepsání* byla nastavena na 6 let (tj. 5 let + 1 rok), *Očekávaná doba použití za rok* byla dle publikace (Roed et al., 1998) zvolena na 25 pracovních týdnů (tj. pro týden o délce 5 dní). Dle (Andersson et al., 2000) činila pořizovací cena traktoru pro sekání trávy v roce 2000 cca 54 000 EUR. V přepočtu na českou korunu dle průměrného kurzu v r. 2000 (Kurzy.cz, 2019) byla tato cena odhadnuta na 1,9 milionů Kč (před korekcí na inflaci) a poté korigována s ohledem na inflaci pomocí koeficientu 1,45 dle (Peníze.cz, 2018). Celkové opotřebení techniky bylo stanoveno násobením počtem jednotek techniky (tj. počtem operátorů) a počtem dnů etapy nápravy.

### 4.11.3 Náklady na slupování travního drnu

#### 4.11.3.1 Celkové náklady na mzdy

Celkové náklady na mzdy  $M$  při slupování travního drnu byly odhadnuty pomocí vzorce:

$$M = (\#_{op} \cdot s_{op} + \#_a \cdot s_m) \cdot \#_{hodin}, \quad (16)$$

kde  $\#_{op}$  je počet operátorů těžké techniky (slupovačů),  $s_{op}$  je hodinová sazba za řízení velké techniky (500 Kč h<sup>-1</sup>),  $\#_a$  je počet asistentů,  $s_m$  je sazba za manuální práci (400 Kč h<sup>-1</sup>) a  $\#_{hodin}$



je celkový počet hodin dekontaminačních prací (slupování). V modelu bylo nastaveno, že slupování drnu by bylo realizováno za práce dvou operátorů a čtyř asistentů.

#### 4.11.3.2 Celková cena za PHM

V modelu bylo předpokládáno použití velkého slupovače Brouwer SH 2125. Podle (Dostál, 2014) má tento stoj spotřebu  $6 \text{ l h}^{-1}$  a rychlost slupování drnu činí v přepočtu  $300 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$ . Potom spotřeba slupovače vztažená na jeden metr čtverečný byla odhadnuta na  $0,02 \text{ l m}^{-2}$ . Vynásobením zelenou plochou byla stanovena celková spotřeba stroje při slupování drnu na celé ploše louky. Celková cena za PHM při slupování byla potom spočtena jako součin celkové spotřeby slupovače a ceny za jeden litr PHM ( $35 \text{ Kč l}^{-1}$ ).

#### 4.11.3.3 Celková cena za odpad a vaky

Celková cena za nakládání s odpadem při slupování (tráva, drn) byla spočtena stejným postupem, jako pro případ sekání trávy (odstavec 4.11.2.3). V modelu bylo předpokládáno, že tráva a drn by byly naloženy do velkoobjemových vaků. Výpočet ceny za vaky pro etapu slupování byl implementován způsobem popsaném pro sekání trávy (odstavec 4.11.2.4).

#### 4.11.3.4 Celková cena za OOPP

Při dekontaminaci slupováním bylo v modelu předpokládáno, že všechny zúčastněné osoby (jak operátoři slupovačů, tak i asistenti) budou mít OOPP, popsané v Tab. 4.3. Při výpočtu celkové ceny za OOPP bylo zohledněno jednorázové použití tyveků a počet dnů slupování.

#### 4.11.3.5 Celková cena za pomocné nářadí

V modelu bylo nastaveno, že by asistenti při ručním odstraňování zbytků odpadu použili kolečko (Alza.cz a.s., 2019), větší smeták a velkou lopatu (Obi Česká republika, 2019). V simulacích bylo předpokládáno, že v každé pracovní skupině sestavené ze dvou asistujících osob budou použita tato tři zvolena nářadí. V Tab. 4.4 jsou shrnuty ceny pomocného nářadí nastavené v modelu (zaokrouhlené nahoru). Celková cena za pomocné nářadí byla potom stanovena jako součin celkové ceny (cena všech položek) a počtu pracovních skupin (tj. počtu operátorů slupovačů).

Tab. 4.4 Pomocné nářadí (zdroj: vlastní zpracování)

Nářadí	Cena (Kč)
Silniční smeták 40 cm s násadou	200
Lopata rovná z hliníku s dřevěnou násadou 130 cm	220
Stavební kolečko	1 200

#### **4.11.3.6 Opotřebení slupovače**

Opotřebení slupovače při dekontaminaci louky bylo odhadnuto pomocí vzorce (15). Pořizovací cena slupovače byla převzata z práce (Dostál, 2014), jež v roce 2014 činila 2,5 milionů Kč. Korekce na inflaci pro roky 2014–2018 byla zavedena pomocí koeficientu 1,06 dle webu (Peníze.cz, 2018). Doba odepsání byla nastavena na 6 let a očekávaná doba použití za rok byla zvolena 25 týdnů rok<sup>-1</sup> dle (Roed et al., 1998). Celkové opotřebení slupovačů bylo získáno vynásobením počtem dnů slupování a počtem slupovačů (tj. počtem operátorů – 2 osoby).

#### **4.11.4 Náklady na odstranění horní vrstvy půdy**

##### **4.11.4.1 Celkové náklady na mzdy**

V scénáři dekontaminace zahrnujícím odstranění horní vrstvy půdy bylo předpokládáno, že by se na nápravě v této etapě podílelo šest osob – dva operátoři rypadel a čtyři asistenti. Celkové náklady na mzdu při odstranění půdy byly spočteny pomocí vzorce (16), známých počtů osob a dvou hodinových sazeb – 500 Kč h<sup>-1</sup> pro řízení rypadel a 400 Kč h<sup>-1</sup> pro doprovodné práce (úklid odpadu).

##### **4.11.4.2 Celková cena za PHM**

Ve zprávě (IAEA, 2012) se uvádí, že spotřeba rypadla činí 0,04 l m<sup>-2</sup>. Při vynásobení spotřeby rypadla zelenou plochou louky byla zjištěna celková spotřeba rypadla. Celková cena za PHM spotřebované při odstranění louky byla stanovena jako součin celkové spotřeby PHM a ceny za jeden litr PHM (35 Kč l<sup>-1</sup>).

##### **4.11.4.3 Celková cena za odpad a vaky**

Celková cena za odpad vzniklý při odstranění půdy (zbytky trávy, drn, zemina) byla vypočtena dle postupu popsaného v odstavci 4.11.2.3. Odhad ceny za vaky pro odpad byl realizován dle odstavce 4.11.2.4.

##### **4.11.4.4 Celková cena za OOPP**

V modelu bylo předpokládáno, že by všechny osoby zúčastněné odstranění půdy byly vybaveny OOPP z Tab. 4.3. Celková cena za OOPP použité v této etapě nápravy byla stanovena s ohledem na délku dekontaminace (počet dnů potřebný pro odstranění horní vrstvy půdy na celé louce) a počet pracovníků.

##### **4.11.4.5 Celková cena za pomocné nářadí**

Ve scénáři pro odstranění půdy bylo nastaveno, že by pro podpůrné manuální práce bylo použito nářadí z Tab. 4.4. Celková cena za nářadí byla odhadnuta s ohledem na současnou práci dvou skupin asistentů (tj. započtením ceny za všechna nářadí dvakrát).

#### 4.11.4.6 Opotřebení rypadla

Opotřebení rypadla během nápravy bylo vypočteno pomocí vztahu (15). Pořizovací cena rypadla byla v modelu nastavena na základě údajů z práce (Šarlejová, 2012). V roce 2012 činila pořizovací cena vybraného rypadla cca 1,5 milionů Kč. Korekce na inflaci české koruny pro roky 2012–2018 byla zavedena pomocí faktoru 1,08 dle stránek (Peníze.cz, 2018). Doba odepsání rypadla a očekávaná doba použití za rok byla nastavena na 6 let, resp. 25 týdnů rok<sup>-1</sup> (Roed et al., 1998). Celkové opotřebení rypadel bylo zjištěno jako součin počtu dnů odstranění půdy a počtu rypadel (tj. pro dva stroje).

#### 4.11.5 Náklady na dekontaminaci osob a techniky

Náklady na dekontaminaci osob a techniky byly vypočteny zvláště. Celková spotřeba vody při dekontaminaci osob byla odhadnuta jako součin spotřeby vody na SDO (25 l člověk<sup>-1</sup>), počtu osob a počtu dní potřebných pro realizaci každého scénáře nápravy. Celková spotřeba vody pro dekontaminaci velké techniky byla vypočtena jako součin délky dekontaminace vozidla, spotřeby vody na SDT (1500 l min<sup>-1</sup>) a počtu operátorů techniky/řidičů. Pomocí známé kapacity SDT (16 vozidel h<sup>-1</sup>) byla délka dekontaminace vozidla odhadnuta na 3,75 min vozidlo<sup>-1</sup>. Celková cena za vodu spotřebovanou na SDO a SDT byla zjištěna jako součin ceny za litr vody (50 Kč m<sup>-3</sup>) a sumární spotřeby vody při dekontaminaci (tj. součet spotřeby vody z SDO a SDT). Výpočet nákladů na dekontaminaci osob a techniky byl pro každý scénář nápravy implementován pomocí přepínačů scénářů (dle Tab. 4.1), logického operátoru AND a podmíněných konstrukcí IF THEN ELSE.

## 5 Výsledky a diskuse

### 5.1 Vytvořený model

Vzhledem k rozsáhlosti vytvořeného modelu, umístěného na třinácti pracovních lištách (vrstvách) v software Vensim PLE, byla do modelu přidána pomocná lišta s popisy přepínačů (a nastavením pro simulace scénářů) a odkazy na důležité části modelu. Tato lišta je uvedena v **Příloha 2 – pomocná lišta**. Na vytvořené liště jsou „tlačítka“ pro nastavení přepínačů, vypočtené efektivní dávky, kolektivní efektivní dávky, celkové ceny opatření, ceny opatření na 1 m<sup>2</sup>, doby implementace a finanční vyjádření zdravotní újmy (pro výpočet přínosů).

### 5.2 Kontrola modelu

#### 5.2.1 Dimenzionální analýza

Správnost modelu z hlediska jednotek byla ověřena testem *Units Check* (klávesy *Ctrl + U*). Po zavedení pomocných koeficientů dle odstavce 4.5.1 ukázal software Vensim zprávu „Units are OK“, tj. byl tento test splněn.

### 5.2.2 Dozimetrické výpočty

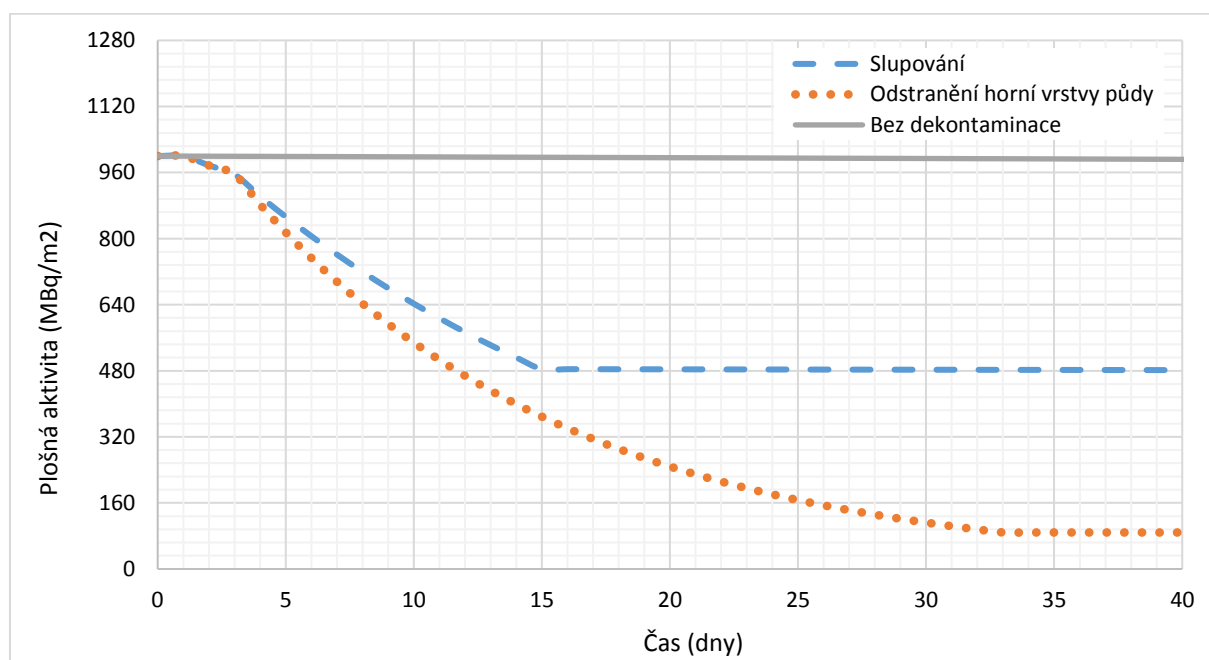
Grafické znázornění části modelu umožňující dozimetrické výpočty kvůli přehlednosti je uvedeno v **Příloha 3 – dozimetrické výpočty**. Dozimetrické výpočty vycházejí z přepočtu známých plošných aktivit na efektivní dávku (kumulovanou za určité období) a na okamžité příkony prostorového dávkového ekvivalentu. Změna aktivit (a přepočtených veličin) je ovlivněna jak přírodními procesy (radioaktivní přeměna, vliv počasí), tak i dekontaminací.

Ke kontrole přepočtu plošných aktivit na roční efektivní dávku byly v modelu upraveny počáteční aktivity  $^{137}\text{Cs}$  a  $^{134}\text{Cs}$  a stínící faktor budov podle publikace (Ahn et al., 2014). Testovací parametry použité ke kontrole modelu jsou popsány v odstavci 4.5.2. Při ověření modelu byl předpokládán scénář bez dekontaminace a v simulaci byl nastaven výpočet roční efektivní dávky pro jednotlivce z obyvatelstva. Simulovaná hodnota efektivní dávky byla potom rovná  $19,6 \text{ mSv rok}^{-1}$ , což je v dobrém souladu s hodnotou  $20 \text{ mSv}$  pro testované parametry z knihy (Ahn et al., 2014). Proto byly dozimetrické výpočty ve vytvořeném modelu považovány za validované a byl tento model (s původními parametry s ohledem na reálné prostředí) použit pro další simulace.

### 5.3 Pokles plošné aktivity

Na Obr. 5.1 je graf znázorňující pokles plošné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  pro tři uvažované scénáře – bez dekontaminace, slupování trávního drnu a odstranění horní vrstvy půdy. Vzhledem k obdobnému průběhu, graf aktivity  $^{134}\text{Cs}$  je v **Příloha 4 – pokles plošné aktivity  $^{134}\text{Cs}$** .

Na grafu na Obr. 5.1 pro vodorovnou osu (čas) je nastaven rozsah 0–40 dní pro lepší přehlednost jednotlivých etap nápravy.



Obr. 5.1 Pokles plošné aktivity  $^{137}\text{Cs}$  v důsledku realizace vybraných scénářů nápravy

### 5.3.1 Vytyčení louky

Pro první den (vytyčení louky) je pokles aktivity stejný pro všechny scénáře (úbytek aktivity dekontaminací je nulový). Plošná aktivita tedy klesá pouze radioaktivní přeměnou a působením počasí/procesů v životním prostředí.

### 5.3.2 Sekání trávy

Pro druhý a třetí den u scénářů slupování drnu a odstranění půdy lze pozorovat větší pokles aktivity v důsledku sekání trávy oproti scénáři bez dekontaminace. Úřad MČ P17 (MČ Praha 17) po dotazování prostřednictvím mailu poskytl informace, že doba standardní údržby (sekání) vybrané louky činí 1–2 dny, což dobře koresponduje s matematickým modelem a simulacemi.

### 5.3.3 Slupování drnu

Etapa samotného slupování drnu a odpovídající snížení aktivity leží v intervalu 4.–15. dne pro scénář slupování, což dobře koresponduje s cca 12 dny podle odstavce 4.7.3.4. Celková doba nápravy slupováním potom činí přibližně 15 dní.

### 5.3.4 Odstranění půdy

Pro scénář odstranění horní vrstvy půdy pohybuje se etapa bezprostřední dekontaminace v intervalu 4.–33. den a trvá tedy zhruba 30 dní, což odpovídá údajům z odstavce 4.7.4.4. Celková délka trvání nápravy pomocí odstranění půdy potom je rovná cca 33 dnům.

### 5.3.5 Porovnání scénářů

Při porovnání obou dekontaminačních scénářů je patrné, že slupování drnu je zhruba dvakrát rychlejší oproti odstranění půdy, ovšem z hlediska účinnosti je horší cca šestkrát: plošná aktivita  $^{137}\text{Cs}$  činí na konci dekontaminace přibližně  $480 \text{ MBq m}^{-2}$  oproti zhruba  $80 \text{ MBq m}^{-2}$ . Ve srovnání s oběma scénáři dekontaminace pro scénář bez dekontaminace poklesla aktivita  $^{137}\text{Cs}$  o cca 1 % za zhruba 40 dní působením pouze přírodních faktorů, což je skoro zanedbatelná změna oproti poklesům aktivity v důsledku fyzického odstranění kontaminované vrstvy půdy.

## 5.4 Pokles příkonu prostorového dávkového ekvivalentu

Graf poklesu *PPDE* ze simulací vybraných scénářů nápravy je obdobný grafu pro pokles aktivity na Obr. 5.1. Z tohoto důvodu byl tento obrázek posunut do **Příloha 5 – pokles *PPDE***.

### 5.4.1 Porovnání simulací a analytických výpočtů

V Tab. 5.1 jsou uvedeny hodnoty *PPDE* v různých etapách nápravy. V tabulce jsou shrnuty jak výsledky simulací, tak i očekávané *PPDE* stanovené analyticky s ohledem na parametry *DRR*, tj. snížení dávkového příkonu dekontaminací. Při výpočtu očekávaných hodnot *PPDE* byl použit součin parametrů *DRR* pro jednotlivé etapy nápravy – kvůli návaznosti sekání a slupování, resp. sekání s odstraněním půdy. Při porovnání simulovaných a analyticky

stanovených hodnot *PPDE* je patrné, že rozdíly mezi simulací a očekáváním nepřevyšují 1 %. Zjištěný rozdíl < 1 % lze nejspíše vysvětlit zaokrouhlovacími chybami v simulacích scénářů a lze považovat za akceptovatelný.

Tab. 5.1 Změny *PPDE* v různých etapách – simulované a očekávané hodnoty

Etapa	<i>PPDE</i> (μSv/h)	Pokles <i>PPDE</i> (%)	Očekávaný <i>PPDE</i> (μSv/h)	Očekávaný pokles <i>PPDE</i> (%)
Před sekáním	7,1	-	-	-
Konec sekání	6,8	95,5	6,8	96,0
Konec slupování	3,4	48,4	3,4	48,0
Konec odstranění půdy	0,6	8,8	0,7	9,6

## 5.4.2 Porovnání simulací a skutečné dekontaminace

V publikaci (Miyahara et al., 2013) jsou uvedeny dávkové příkony pro různé objekty (hřiště, les, silnice atd.) před dekontaminací a po jejím ukončení. Například pro hřiště (Yonomori Park) činily příkony 11 μSv/h před nápravou a 2 μSv/h po dekontaminaci, s poklesem dávkového příkonu o 80 %. Při porovnání těchto hodnot s výsledky simulací shrnutými v Tab. 5.1 je vidět, že simulace s původním příkonem cca 7 μSv/h řádově korespondují s realitou: pro scénáře slupování a odstranění půdy činí příkony na konci nápravy přibližně 3 μSv/h, resp. 1 μSv/h. Pokles příkonů v simulacích je zhruba o 52 %, resp. 91 % pro slupování, resp. odstranění půdy a je řádově srovnatelný s údaji od (Miyahara et al., 2013). Simulované scénáře demonstrují tedy výsledky blízké skutečnosti.

## 5.5 Efektivní dávky

### 5.5.1 Efektivní dávky obyvatelstva

Při simulacích vybraných scénářů činily roční efektivní dávky<sup>10</sup> pro osobu ze skupiny nejvíce ozářených obyvatel 20 mSv pro případ bez dekontaminace, 10 mSv pro scénář slupování trávniho drnu a 3 mSv pro scénář odstranění horní vrstvy půdy. Graf znázorňující kumulaci roční efektivní dávky je uveden v **Příloha 6 – časový průběh dávek pro jednotlivce z obyvatelstva**. V reportu (Miyahara et al., 2013) je uvedeno, že v oblastech, v nichž lze obdržet roční efektivní dávky 20–30 mSv před nápravou, je možné snížit efektivní dávky pod 20 mSv za rok v důsledku dekontaminace. Z toho plyne, že simulace dobře korespondují s daty v odborné literatuře.

<sup>10</sup> Hodnoty byly zaokrouhleny na celá čísla

## 5.5.2 Efektivní dávky pracovníků podílejících se na nápravě

V Tab. 5.2 jsou shrnuty efektivní dávky pracovníků získané ze simulací, kteří by pracovali na louce v jednotlivých etapách nápravy. Vypočtené efektivní dávky leží v intervalu od 0,06 mSv do 0,66 mSv. Nejméně by byly ozářeny osoby vytyčující louku, maximální hodnoty náležejí pracovníkům realizujícím odstranění horní vrstvy půdy. Rozdíl dávek cca desetkrát plyne z délky jednotlivých etap – při vytyčení louky by pracovníci strávili 1 pracovní den na louce, zatímco odstranění půdy by trvalo zhruba měsíc dle podkapitoly 5.3. Při porovnání vypočtených dávek pro pracovníky s limity ozáření ve vyhlášce č. 422/2016 Sb. je vidět, že limit profesního ozáření 20 mSv rok<sup>-1</sup> pro nebyl překročen (SÚJB, 2016). Očekávané dávky pracovníků se pohybují několik řádů pod limitem. Další snížení dávek pracovníků by bylo možné realizovat zvýšením počtu pracovníků a současným snížením počtu pracovních hodin – např. zavedením 4-hodinových směn a střídáním pracovních skupin.

Tab. 5.2 Efektivní dávky pracovníků podílejících se na vytyčení louky/dekontaminaci

Etapa	Efektivní dávka (mSv)
Vytyčení louky	0,06
Sekání louky	0,11
Slupování trávniho drnu	0,50
Odstranění půdy	0,66

## 5.6 Přínosy

### 5.6.1 Výpočet zdravotní újmy

V Tab. 5.3 jsou shrnuta finanční vyjádření zdravotní újmy u vybrané skupiny osob z obyvatelstva pro různé scénáře implementované do simulačního modelu. Z výsledků v tabulce je vidět, že oba uvažované scénáře nápravy vedou ke snížení finančního vyjádření zdravotní újmy. Pro scénář slupování drnu činí snížení zdravotní újmy cca dvakrát, zatímco scénář odstranění horní vrstvy půdy vede k výrazně vyššímu poklesu zdravotní újmy – zhruba osmkrát oproti scénáři bez dekontaminace a čtyřkrát oproti scénáři slupování drnu.

Tab. 5.3 Finanční hodnocení zdravotní újmy vybrané skupiny obyvatelstva

Scénář	Finanční vyjádření zdravotní újmy (mil. Kč)
Bez dekontaminace	31
Slupování drnu	16
Odstranění půdy	4

## 5.6.2 Výpočet přínosů

Dále jsou v Tab. 5.4 uvedeny přínosy zvolených scénářů dekontaminace<sup>11</sup>, které činí cca 16 mil. Kč a 27 mil. Kč pro variantu slupování drnu, resp. odstranění horní vrstvy půdy. Je patrné, že má scénář odstranění půdy přínosy přibližně 1,7-krát vyšší než pro scénář slupování drnu.

Tab. 5.4 Přínosy vybraných opatření

Scénář	Přínos opatření (mil. Kč)
Slupování drnů	16
Odstranění půdy	27

## 5.7 Náklady

### 5.7.1 Celkové náklady

V Tab. 5.5 je souhrn celkových nákladů na realizaci jednotlivých scénářů nápravy louky. Celkové náklady leží v intervalu od 0,4 mil. Kč do 6,6 mil. Kč, což odpovídá vytyčení louky (bez dekontaminace louky), resp. scénáři odstranění horní vrstvy půdy. Dále je vidět, že náklady na scénář slupování drnu jsou srovnatelné s náklady na odstranění půdy a činí cca 6 mil. Kč. Rozdíl celkových nákladů mezi dvěma uvažovanými scénáři dekontaminace činí 10 % a lze říct, že jsou celkové náklady na dekontaminaci oběma způsoby řádově stejné.

Tab. 5.5 Celkové náklady na realizaci vybraných scénářů nápravy

Scénář	Náklady (mil. Kč)
Bez dekontaminace (pouze vytyčení)	0,4
Slupování drnů	6,0
Odstranění půdy	6,6

### 5.7.2 Náklady na nápravu jednoho metru čtverečního

Náklady vztažené na jeden metr čtverečný louky jsou uvedeny v Tab. 5.6. Nejlevnější variantou je scénář bez dekontaminace, při němž náklady na vytyčení jsou přibližně 7 Kč m<sup>-2</sup>. Nejdražší variantou je scénář odstranění půdy, kdy činí náklady cca 109 Kč m<sup>-2</sup>. Cena za jeden metr čtverečný pro slupování travního drnu je srovnatelná s cenou odstranění horní vrstvy půdy, je ale levnější o 10 Kč m<sup>-2</sup>.

<sup>11</sup> Přínos pro variantu bez dekontaminace není uveden v tabulce, protože matematicky je nulový



Tab. 5.6 Náklady na realizaci vybraných scénářů na jeden metr čtverečný louky

Scénář	Náklady (Kč m <sup>-2</sup> )
Bez dekontaminace (pouze vytyčení)	7
Slupování drnů	99
Odstranění půdy	109

### 5.7.3 Porovnání s náklady na dekontaminaci ve Fukušimě

#### 5.7.3.1 Slupování drnu

V publikaci o dekontaminaci okolí po havárii na JE Fukušima I (U.S. EPA, 2016) se uvádí, že náklady na slupování drnu u ploch nad 1 000 m<sup>2</sup> činí cca 470 Yen m<sup>-2</sup>, což je v přepočtu na českou korunu<sup>12</sup> zhruba 96 Kč m<sup>-2</sup>, dle serveru (Kurzy.cz, 2019) pro konec roku 2018. Výsledek simulovaného scénáře slupování (99 Kč m<sup>-2</sup>) tedy dobře koresponduje s údaji v literatuře.

#### 5.7.3.2 Odstranění horní vrstvy půdy

Dále v reportu (U.S. EPA, 2016) je uvedeno, že při odstranění horní vrstvy půdy na území s rozlohou nad 1 000 m<sup>2</sup> náklady se pohybují v intervalu 290–710 Yen m<sup>-2</sup>, čemuž přibližně odpovídá rozmezí 59–145 Kč m<sup>-2</sup> (dle webu (Kurzy.cz, 2019)). Náklady na dekontaminaci velké rekreační louky odstraněním půdy ze simulace (109 Kč m<sup>-2</sup>) také demonstrují dobrou shodu s náklady popsány v odborných publikacích.

## 5.8 Porovnání nákladů a přínosů

Nejnižší náklady (cca 0,4 mil. Kč) odpovídají scénáři bez dekontaminace, který má nulové přínosy. Náklady na slupování a odstranění půdy jsou cca 6, resp. 7 mil. Kč, zatímco přínosy činí 16 mil. Kč, resp. 27 mil. Kč. Dekontaminace oběma vybranými způsoby má tedy přínosy vyšší než náklady – cca 2,7-krát a 4-krát pro slupování, resp. odstranění půdy. Výrazně vyšší přínosy lze očekávat pro scénář s odstraněním půdy, jehož náklady na realizaci jsou srovnatelné s alternativní variantou – slupováním.

<sup>12</sup> Bez započtení inflace

## 6 Závěr

V řešeršní části byly popsány základy systémové dynamiky – obecná charakteristika, druhy diagramů a vybrané archetypy chování komplexních systémů. Dále byly stručně shrnuty principy nákladově-přínosové analýzy podle doporučení Mezinárodní komise radiologické ochrany a vyhlášky č. 422/2016 Sb. Státního úřadu pro jadernou bezpečnost.

Vzhledem ke složitosti řešeného úkolu a propojení metod systémové dynamiky, ekonomických nástrojů, atomové legislativy, zemědělských postupů, radioekologie s aplikovanou dozimetrií a dekontaminačními metodami, byla v teoretické části práce věnována velká pozornost možným způsobům nápravy území a dozimetrickým výpočtům, na které jsou vázány ekonomické kalkulace (např. výpočet přínosů).

V praktické části byly popsány jednotlivé části navrženého matematického modelu, včetně pomocných výpočtů. Dále byly realizovány validace simulačního modelu. Po validaci byl vytvořený model akceptován pro následující výpočty a implementaci vybraných scénářů nápravy. S ohledem na reálný objekt a očekávané zamoření vybranými radionuklidy byly do výpočtů zabudovány tři scénáře nápravy – scénář bez dekontaminace, scénář slupování travního drnu a scénář odstranění horní vrstvy půdy.

Ze simulací scénářů bylo zjištěno, že náklady na oba scénáře dekontaminace jsou srovnatelné a činí přibližně 6 mil. Kč. Dále bylo stanoveno, že jednotkové náklady jsou srovnatelné s údaji v odborných publikacích o nápravě území. Nejvyšší přínosy lze očekávat při realizaci scénáře odstranění horní vrstvy půdy.

Vytvořený model a simulované scénáře jsou uvedeny jako elektronická příloha k této práci. Model je možné upravit pro další simulace, případně aplikovat na jiné objekty.

## 7 Seznam použitých zdrojů

### 7.1 Tištěné dokumenty

AHN, Joonhong, Cathryn CARSON, Mikael JENSEN, Kohta JURAKU, Shinya NAGASAKI a Satoru TANAKA, 2014. *Reflections on the Fukushima Daiichi nuclear accident: toward social-scientific literacy and engineering resilience*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-319-12089-8.

DOSTÁL, Pavel, 2014. *Technicko-ekonomické srovnání postupů při zakládání trávníků*. Lednice. Diplomová práce. Zahradnická fakulta v Lednici, Mendelova univerzita v Brně.

FOLTÝN, Pavel, 2008. *Optimalizace radiační ochrany s použitím metody "cost-benefit"*. Výpočet pro pracoviště ETE ČEZ a.s. České Budějovice. Diplomová práce. Zdravotně sociální fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.

KREJČÍ, Igor a Roman KVASNIČKA, 2014. *Systémová dynamika I*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Provozně ekonomická fakulta. ISBN 978-80-213-2478-7.

MEADOWS, Donella H. a Diana WRIGHT, 2008. *Thinking in systems: a primer*. White River Junction, Vt.: Chelsea Green Pub. ISBN 9781603580557.

MILDEOVÁ, Stanislava a Viktor VOJTKO, 2008. *Systémová dynamika*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Oeconomica. ISBN 978-80-245-1448-2.

NCRP, 2014. *Decision making for late-phase recovery from major nuclear or radiological incidents (NCRP Report 175)*. Bethesda, MD: National Council on Radiation Protection and Measurements. ISBN 978-0-9835450-5-7.

POJETA, Antonín, 2014. *Technické vybavení jednotek požární ochrany pro provádění dekontaminace osob a techniky*. České Budějovice. Bakalářská práce. Zdravotně sociální fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.

ŠARLEJOVÁ, Petra, 2012. *Kalkulace nákladů na provoz stavebního stroje*. Brno. Bakalářská práce. Fakulta stavební, Ústav stavební ekonomiky a řízení, Vysoké učení technické v Brně.

ŠUSTA, Marek, 2013. *Referenční příručka k Vensim DSS*. Proverbs, a.s.

## 7.2 Elektronické dokumenty

ALBIN, Stephanie, 2001. *Generic Structures: First-Order Negative Feedback* [online]. Massachusetts Institute of Technology [cit. 2019-03-04]. Dostupné z:

<http://static.clexchange.org/ftp/documents/roadmaps/RM4/D-4475-2.pdf>.

ANDERSSON, Kasper G., Aino RANTAVAARA, Jørn ROED, Klas ROSÉN, Brit SALBU a Lindis SKIPPERUD, 2000. *A guide to countermeasures for implementation in the event of a nuclear accident affecting Nordic food-producing areas (NKS-16)* [online]. Roskilde: Nordic nuclear safety research [cit. 2018-11-02]. ISBN 87-7893-066-9. Dostupné z:

<http://www.nks.org/download/pdf/NKS-Pub/NKS-16.pdf>.

AYSCUE, P., C. LANZAS, R. IVANEK a Y.T. GRÖHN, 2009. Modeling On-Farm Escherichia coli O157: H7 Population Dynamics. *Foodborne Pathogens and Disease* [online]. 6(4), 461-470 [cit. 2019-03-08]. DOI: 10.1089/fpd.2008.0235. ISSN 1535-3141. Dostupné z:

<http://www.liebertpub.com/doi/10.1089/fpd.2008.0235>.

ČSÚ, 2012. Základní výsledky sčítání lidu, domů a bytů – Česká republika – 2011: Tab. 15 Domy podle obydlenosti a druhu a osoby v obydlených domech. *Český statistický úřad* [online]. [cit. 2018-10-30]. Dostupné z:

<https://www.czso.cz/documents/10180/20534544/zvcr015.pdf/a591687b-7a78-4233-ba12-e37739f0d7dc?version=1.0>.

ČSÚ, 2001. Úroveň bydlení. *Český statistický úřad* [online]. [cit. 2018-10-30]. Dostupné z:

[https://www.czso.cz/csu/czso/13-2130-03--6\\_5\\_uroven\\_bydleni](https://www.czso.cz/csu/czso/13-2130-03--6_5_uroven_bydleni).

DRACE, Zoran, 2012. *Lessons learned in post-accident management of contaminated material and radioactive waste* [online]. Tokyo: The Institute of Applied Energy, 2012

[cit. 2018-11-01]. Dostupné z:

[http://www.iaea.or.jp/great\\_east\\_japan\\_earthquake/jyosen/pdf/Tokyo\(Feb\\_3rd\)/03\\_Zoran\\_Drace\(IAEA\)/IAEA\\_Drace\\_English\(80p\)\\_r.pdf](http://www.iaea.or.jp/great_east_japan_earthquake/jyosen/pdf/Tokyo(Feb_3rd)/03_Zoran_Drace(IAEA)/IAEA_Drace_English(80p)_r.pdf).

IAEA, 2000. *Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency (IAEA-TECDOC-1162)* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency, [cit. 2018-07-16]. ISBN 92-0-100501-6. ISSN 1011-4289. Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te\\_1162\\_prn.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1162_prn.pdf)

IAEA, 2001. *Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment (Safety Reports Standards No. 19)* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2018-08-28]. ISBN 92-0-100501-6. Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1103\\_scr.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1103_scr.pdf).

IAEA, 2006. *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment'* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2018-11-01]. ISBN 92-0-114705-8. Dostupné z: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1239_web.pdf).

IAEA, 2012. *Environmental Modelling of Remediation of Urban Contaminated Areas* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2018-11-01]. ISBN 978-92-0-129810-2. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/43/127/43127285.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/127/43127285.pdf).

ICRP, 2010. *Stanovení dávky reprezentativní osobě pro účely radiační ochrany obyvatelstva a optimalizace radiologické ochrany: rozšíření procesu (Publikace 101)* [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/ICRP101\\_CZ.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/ICRP101_CZ.pdf).

ISHIDA, Junichiro, 2012. *Response to TEPCO's Fukushima-Daiichi NPS Accident and decontamination in off-limits zones* [online]. Nuclear Energy Agency (NEA) [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: [https://www.oecd-nea.org/rp/meetings/ISTC-STCU/docs/5-feb-fukushima/03%20ISHIDA\(JAEA\)\\_English.pdf](https://www.oecd-nea.org/rp/meetings/ISTC-STCU/docs/5-feb-fukushima/03%20ISHIDA(JAEA)_English.pdf).

MASAYUKI, Ito, 2012. *Report of the results of the decontamination model projects: analysis and evaluation of the results of the decontamination model projects – decontamination technologies* [online]. Fukushima: Japan Atomic Energy Agency [cit. 2018-10-11]. Dostupné z: <https://fukushima.jaea.go.jp/english/decontamination/pdf/2-2-2%20Decontamination%20Technologies.pdf>.

LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA, MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ, 2015. *Laboratorní postupy při zjišťování půdních vlastností – analýzy prováděné v rámci pedologického praktika* [online]. Brno: Mendelova univerzita v Brně [cit. 2019-03-05]. Dostupné z:

[http://ldf.mendelu.cz/ugp/wp-content/uploads/2015/02/laborator\\_postupy.pdf](http://ldf.mendelu.cz/ugp/wp-content/uploads/2015/02/laborator_postupy.pdf).

MEXT, 2011. *Results of airborne monitoring by the MEXT and the U.S. Department of Energy (May 6, 2011)* [online]. Japan: Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) and the U.S. Department of Energy (U.S. DOE) [cit. 2018-08-01]. Dostupné z:

[https://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/4000/3180/24/1304797\\_0506.pdf](https://radioactivity.nsr.go.jp/en/contents/4000/3180/24/1304797_0506.pdf).

MIYAHARA, Kaname, Takayuki TOKIZAWA a Shinichi NAKAYAMA, 2013. *Overview of the Results of Fukushima Decontamination Pilot Projects (Japan)* [online]. Vienna: International Atomic Energy Agency [cit. 2018-10-25]. Dostupné z:

<https://www-pub.iaea.org/iaeameetings/IEM4/30Jan/Miyahara.pdf>.

MOE, 2013. *Decontamination Guidelines (Tentative Translation)* [online]. 2nd Ed. Japan: Ministry of the Environment, Government of Japan [cit. 2018-08-01]. Dostupné z:

[http://josen.env.go.jp/en/policy\\_document/pdf/decontamination\\_guidelines\\_2nd.pdf](http://josen.env.go.jp/en/policy_document/pdf/decontamination_guidelines_2nd.pdf).

NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2014. *Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety of U.S. Nuclear Plants* [online]. Washington, D.C.: The National Academies Press [cit. 2019-03-06]. ISBN 978-0-309-27253-7. Dostupné z:

[https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK253939/pdf/Bookshelf\\_NBK253939.pdf](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK253939/pdf/Bookshelf_NBK253939.pdf).

ROED, J., K.G. ANDERSSON, A.N. BARKOVSKY, et al., 1998. *Mechanical decontamination tests in areas affected by the Chernobyl accident* [online]. Roskilde: Risø National Laboratory [cit. 2018-11-06]. ISBN 87-550-2361-4. Dostupné z:

[http://orbit.dtu.dk/files/7751126/ris\\_r\\_1029.pdf](http://orbit.dtu.dk/files/7751126/ris_r_1029.pdf).

ROED, J., K.G. ANDERSSON a H. PRIP, 1995. *Practical means for decontamination 9 years after a nuclear accident* [online]. Roskilde: Risø National Laboratory [cit. 2018-11-06]. ISBN 87-550-2080-1. Dostupné z:

<https://www.nrc.gov/docs/ML1233/ML12334A768.pdf>.

SEVERA, Jan a Jaromír BÁR, 1985. *Kontaminace radioaktivními látkami a dekontaminace* [online]. Praha: Československá komise pro atomovou energii [cit. 2018-08-02]. Dostupné z:

<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/18/023/18023042.pdf>.

SKUPINA ČEZ, 2011. Zátěžové testy JE – ČEZ, a.s. Ocenění bezpečnosti a bezpečnostních rezerv JE Dukovany: závěrečná zpráva. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/dukovany/zaverecna-zprava-zt-edu.pdf>.

SKUPINA ČEZ, 2011. Zátěžové testy JE – ČEZ, a.s. Ocenění bezpečnosti a bezpečnostních rezerv JE Temelín: závěrečná zpráva. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/energie-a-zivotni-prostredi/temelin/zaverecna-zprava-zt-ete.pdf>.

SKUPINA ČEZ, 2019. Jaderné elektrárny ČEZ. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elekriny/jaderna-energetika/jaderne-elekrarny-cez.html>.

SÚJB, 2016. *Vyhláška 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje* [online]. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost [cit. 2018-11-14]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/sb0172-2016.pdf>.

SYSTEMS & US – EMBRACING COMPLEXITY, 2016. Balancing Loop. *Systems & us* [online]. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://systemsandus.com/foundations/why-you-should-think-like-a-modeler/balancing-loops/>.

U.S. EPA, 2016. *Current and Emerging Post-Fukushima Technologies, and Techniques, and Practices for Wide Area Radiological Survey, Remediation, and Waste Management* [online]. Washington, DC: Office of Research and Development, Homeland Security Research Center [cit. 2018-10-19]. Dostupné z: [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_file\\_download.cfm?p\\_download\\_id=528638&Lab=NHSRC](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=528638&Lab=NHSRC).

ULLMANN, RNDR., Vojtěch, 2019. Jaderná a radiační fyzika. 1.2. Radioaktivita. *AstroNuklFyzika* [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>.

YANG, Guosheng, Hirofumi TAZOE a Masatoshi YAMADA.  $^{135}\text{Cs}$  activity and  $^{135}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  atom ratio in environmental samples before and after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Scientific Reports* [online]. 2016, **6** [cit. 2019-03-06]. DOI: 10.1038/srep24119. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/srep24119>.

### 7.3 Ostatní internetové zdroje

ALZA.CZ A.S., 2019. M.A.T. 452073 – Stavební kolečko. *Alza* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z:

[https://www.alza.cz/hobby/m-a-t-stavebni-kolecko-80l-plne-zn-korba-nosnost-100kg-d5105256.htm?kampan=adpla-ho\\_obecna\\_stavba-a-dilna\\_c\\_9062882\\_1o3\\_MTG018&gclid=Cj0KCQiA1sriBRD-ARIsABYdwwHTDvmi98Tghizw2m0KkSIPuUUt-4OmRLkHibbJITFUJ\\_yTFnKLS3IaAolUEALw\\_wcB](https://www.alza.cz/hobby/m-a-t-stavebni-kolecko-80l-plne-zn-korba-nosnost-100kg-d5105256.htm?kampan=adpla-ho_obecna_stavba-a-dilna_c_9062882_1o3_MTG018&gclid=Cj0KCQiA1sriBRD-ARIsABYdwwHTDvmi98Tghizw2m0KkSIPuUUt-4OmRLkHibbJITFUJ_yTFnKLS3IaAolUEALw_wcB).

BROUWER TURF, 2019. 2125 Econo Slab Sod Harvester. *Brouwer Turf* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <http://brouwerturf.com/products/view/2125-econo-slab-sod-harvester>.

ČESKÝBENZÍN.CZ, 2019. Aktuální ceny benzínu a nafty. *ČeskýBenzín.cz* [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://www.ceskybenzin.cz/>.

EAGRI, 2019. Veřejný registr půdy – LPIS. *Portal eAGRI – resortní portál Ministerstva zemědělství* [online]. Ministerstvo zemědělství [cit. 2018-10-17]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny2/plpis/>.

ELEKTRINA.CZ, 2019. *Elektrina.cz: vše co potřebujete vědět v oblasti energetiky a technologií* [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/>.

IR SUPPLIES AND SERVICES, 2019. Industrial Radiography|DMC 3000 Personal Dosimeter. *Shop NDT Products/IR Supplies and Services* [online]. [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <https://irss.ca/product/dmc-3000-personal-dosimeter/?currency=USD>.

KURZY.CZ, 2019. *Kurzy měn, akcie, komodity, zákony, zaměstnání* [online]. [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/>.

LEVNÉ-OPLOCENÍ.CZ, 2019. Mobilní panel F2 3455/2000 mm ZN. *Levné-oplocení.cz: prodej plotového pletiva, drátěných plotů a oplocení* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.levne-oploceni.cz/mobilni-panel-f2-3455-2000-mm-zn.html>.

LNHB, 2018. Nucléide – Lara. *Laboratoire National Henri Becquerel* [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://www.nucleide.org/Laraweb/index.php>.

MAPY.CZ, 2018. *Základní mapa* [online]. [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>.

MČ PRAHA 17, 2019. *Městská část Praha 17 – Řepy* [online]. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://www.repy.cz/>.



OBI ČESKÁ REPUBLIKA, 2019. Lopata rovná z hliníku malá dřevěná násada 130 cm. *Obi – vše pro byt, dům, stavbu a zahradu* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://www.obi.cz/ryce-a-lopaty/lopata-rovna-z-hliniku-mala-drevena-nasada-130-cm/p/1886456>.

OBI ČESKÁ REPUBLIKA, 2019. LUX Silniční smeták 40 cm s násadou. *Obi – vše pro byt, dům, stavbu a zahradu* [online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.obi.cz/smetaky-a-kostata/lux-silnicni-smetak-40-cm-s-nasadou/p/1424233>.

PENÍZE.CZ, 2018. *Peníze.cz – půjčky, kurzy měn, akcie, hypotéky, bydlení, daně* [online]. [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: <https://www.penize.cz/>.

PÍCHA SAFETY, S.R.O., 2019. *Pracovní oděvy, pracovní obuv, ochranné pomůcky, PÍCHA Safety, s.r.o.* [online]. [cit. 2019-03-06]. Dostupné z: <https://www.oopp.cz/>.

REO AMOS, SPOL. S R.O., 2019 Velkoobjemový vak 95 x 95 x 200 cm (násypka, výsypka)|REO AMOS. *REO AMOS* [online]. [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: <https://www.reoamos.cz/velkoobjemovy-vak-95-x-95-x-200-cmnasypka-vysypka/d-1338/>.

SÚRO, V.V.I., 2019. Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. *SÚRO, v.v.i.* [online]. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/index.html>.

TRAIVA S.R.O., 2016. Vytyčovací páska s nápisem Vstup zakázán – 250 m. *Bezpečnostní tabulky|Výrobky pro BOZP – tabulky SignEU* [online]. [cit. 2018-12-01]. Dostupné z: [https://www.e-safetyshop.eu/product.asp?P\\_ID=149](https://www.e-safetyshop.eu/product.asp?P_ID=149).

VENTANA SYSTEMS, INC., 2015. Vensim. *Vensim* [online]. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://vensim.com/>.

## 8 Přílohy

### Příloha 1 – fotografie vybraného objektu

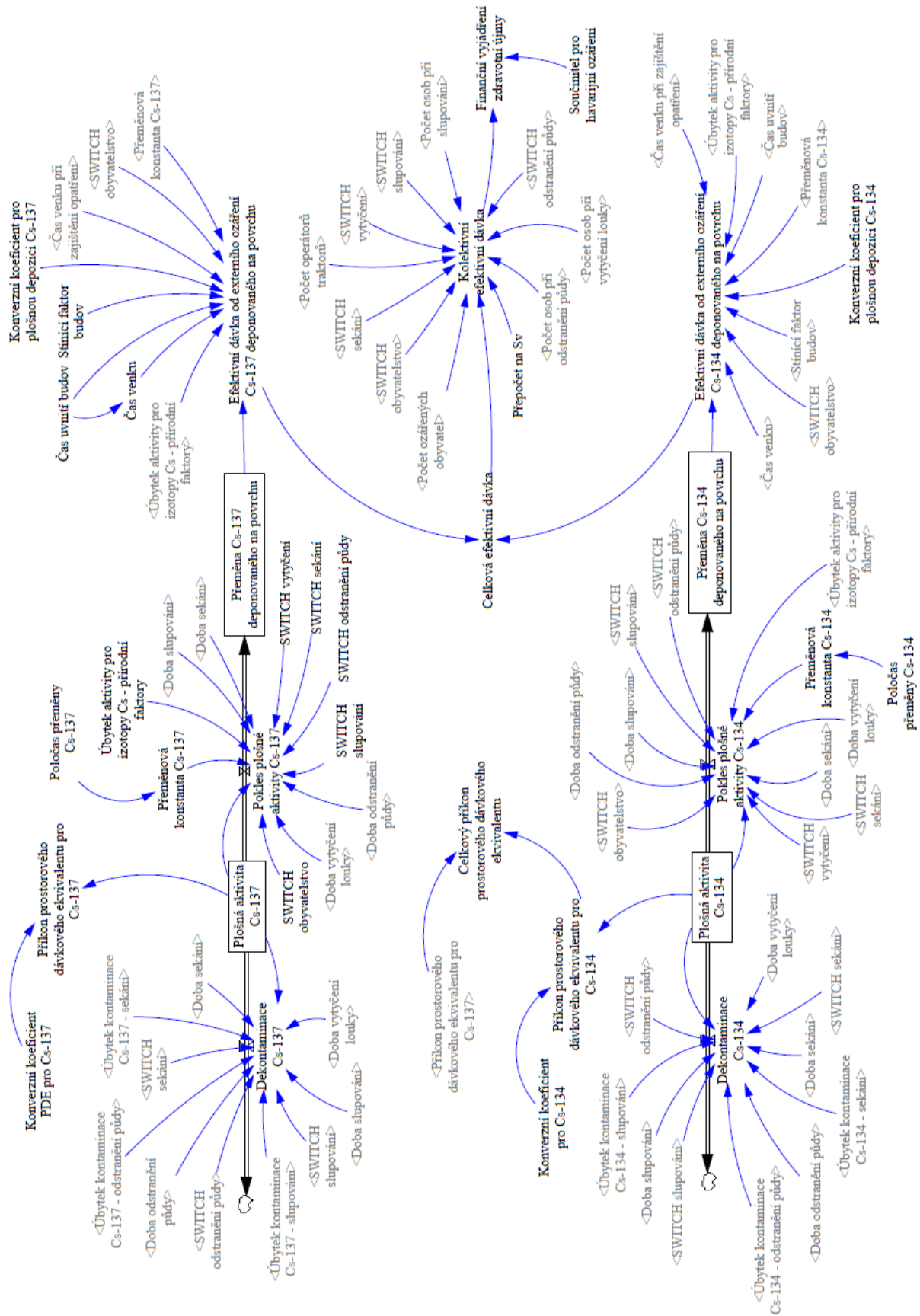




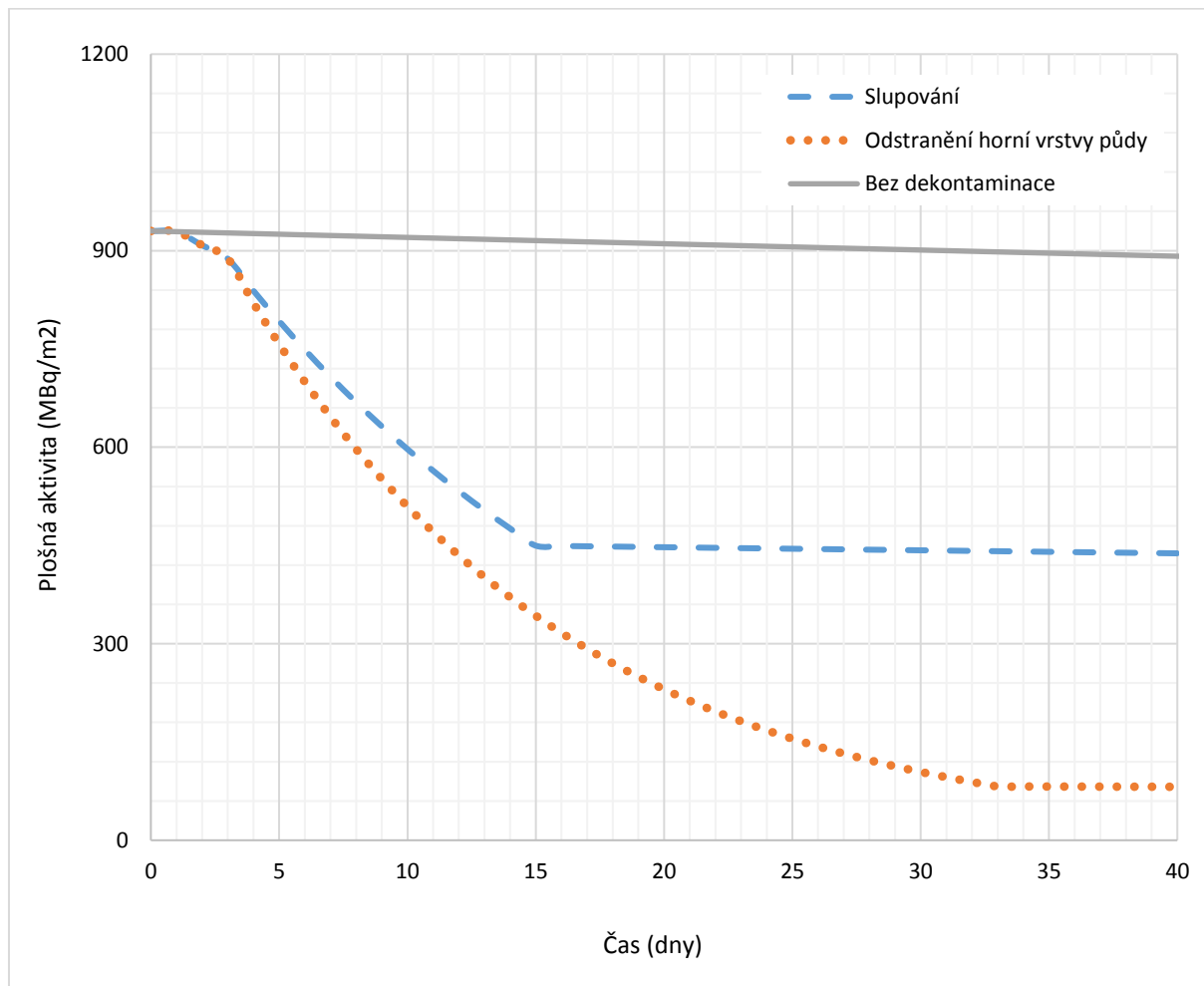
## Příloha 2 – pomocná lišta

Přepínače (switches)		Výsledky		
Výpočet pro obyvatelstvo .... SWITCH obyvatelstvo je 1. Výpočet pro pracovníky .... SWITCH obyvatelstvo je 0.	<SWITCH obyvatelstvo>	<Celková efektivní dávka>	<Celková cena opatření a dekontaminace>	<Doba implementace>
Jsou tři scénáře: 1) pouze vytyčení louky, 2) vytyčení louky, sekání trávy a odstraňování půdy, 3) vytyčení louky, sekání trávy a slupování. Pokud SWITCH obyvatelstvo je 1, potom jsou dávky obyvatelstva při různých způsobech dekontaminace: 1, 1, 1, 0 ... v důsledku odstranění půdy; 1, 1, 0, 1 ... v důsledku slupování. Pokud SWITCH obyvatelstvo je 0, potom jsou dávky pro pracovníky: 1, 0, 0, 0 ... při vytyčení louky; 1, 1, 0, 0 ... při sekání trávy; 1, 1, 1, 0 ... při odstranění půdy; 1, 1, 0, 1 ... při slupování. Celkové ceny opatření, doba implementace a celkový odpad: 1, 0, 0, 0 ... 1) scénář: 1, 1, 1, 0 ... 2) scénář: 1, 1, 0, 1 ... 3) scénář:	<SWITCH vytyčení>	<Kolektivní efektivní dávka>	<Cena opatření a dekontaminace na 1 m2>	<Finanční vyjádření zdravotní újmy>
	<SWITCH sekání>	<Celkový příkon prostorového dávkového ekvivalentu>		
	<SWITCH odstranění půdy>			
	<SWITCH slupování>			

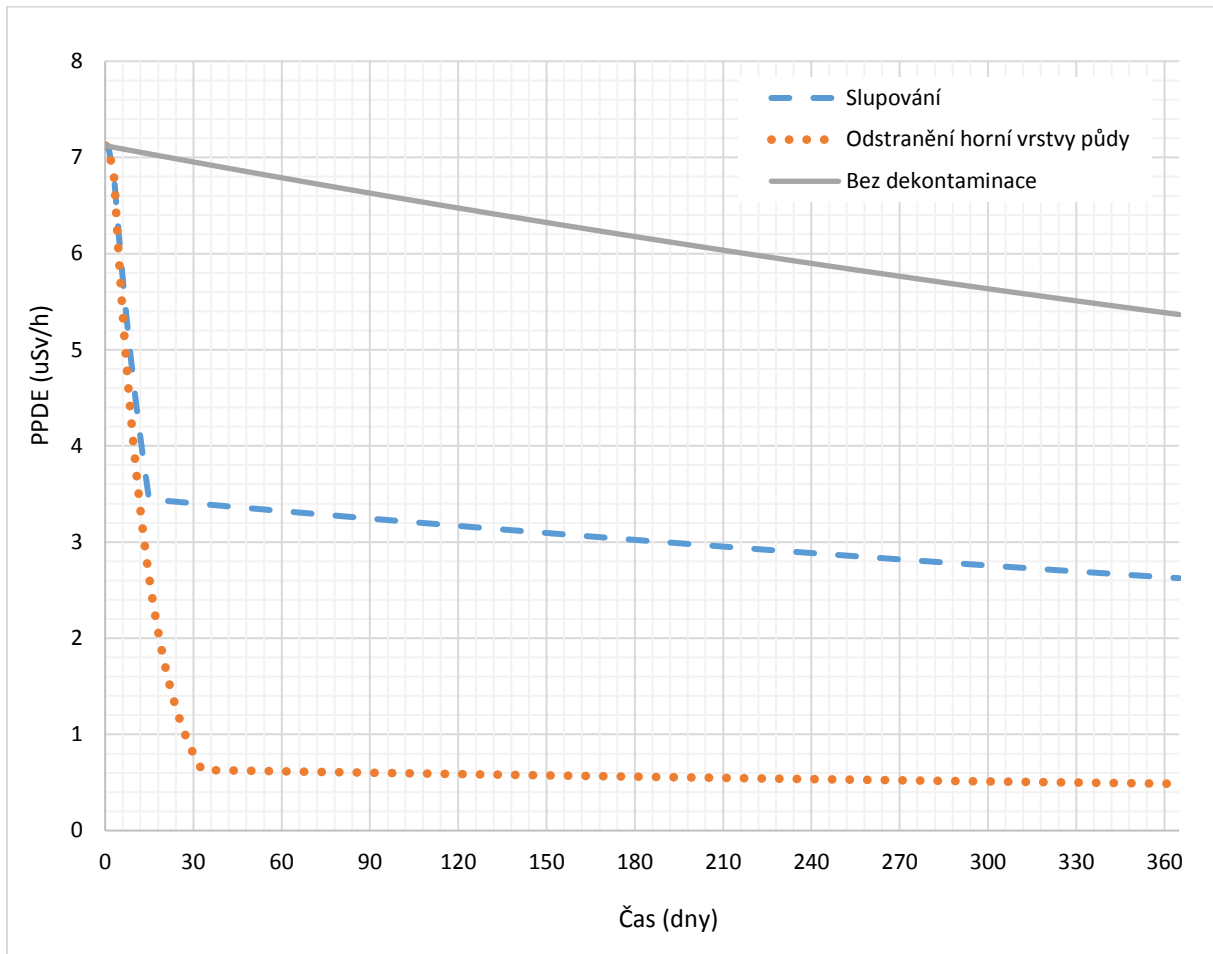
# Příloha 3 – dozimetrické výpočty



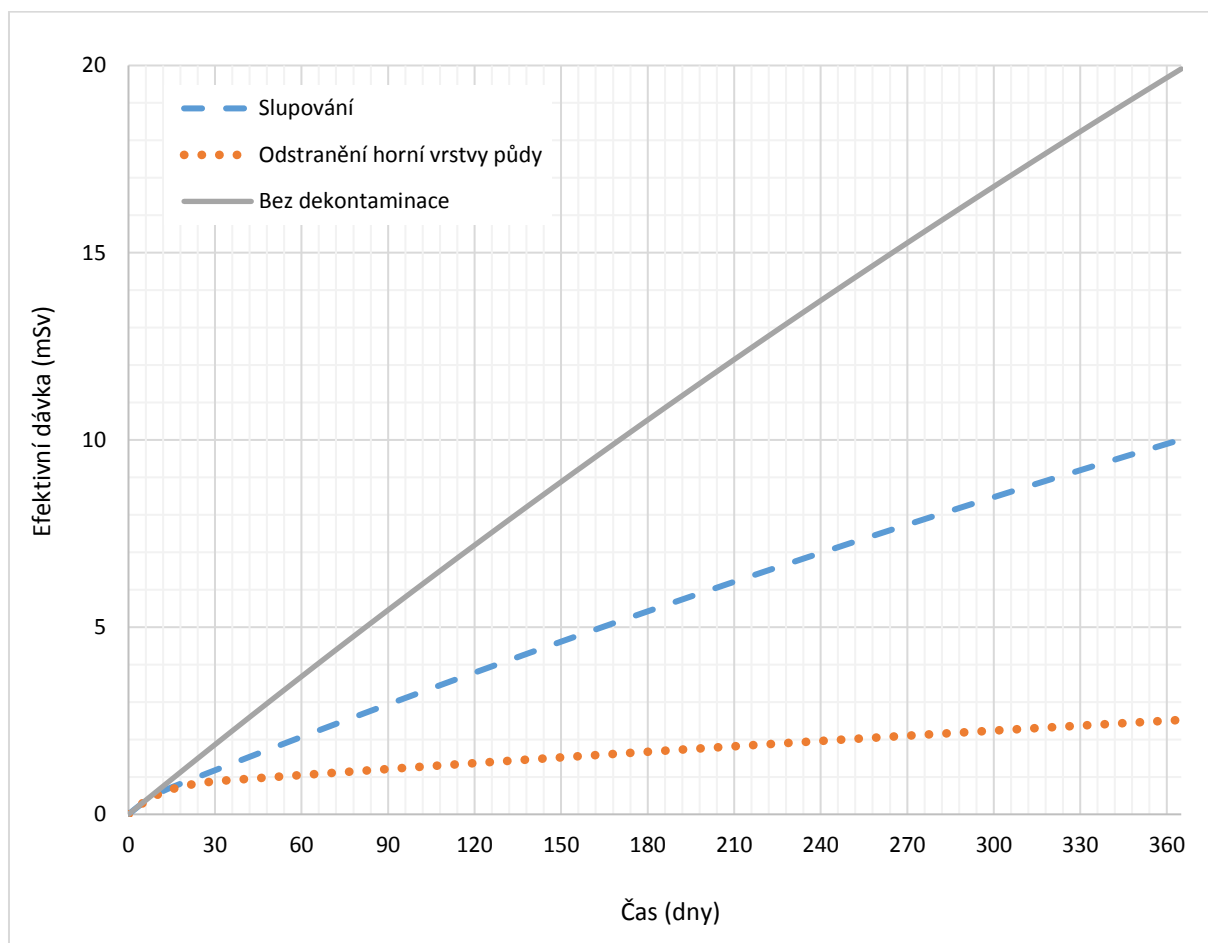
## Příloha 4 – pokles plošné aktivity $^{134}\text{Cs}$



## Příloha 5 – pokles PPDE



## Příloha 6 – časový průběh dávek pro jednotlivce z obyvatelstva





## Seznam obrázků

Obr. 3.1 Diagram stavů a toků – exponenciální růst.....	14
Obr. 3.2 Diagram stavů a toků – exponenciální pokles .....	15
Obr. 3.3 Nákladově-přínosová analýza .....	16
Obr. 3.4 Sekání trávy.....	17
Obr. 3.5 Slupování .....	18
Obr. 3.6 Orba půdy.....	19
Obr. 3.7 Scéma překopání půdy .....	19
Obr. 3.8 Překopání půdy .....	20
Obr. 3.9 Použití traktoru s kladívkovým mulčovačem.....	20
Obr. 3.10 Odstranění horní vrstvy půdy pomocí bagru.....	21
Obr. 3.11 Aplikace fixačního/solidifikačního činidla .....	21
Obr. 4.1 Celková plocha louky dle LPIS .....	24
Obr. 4.2 Výpočet zatravněné plochy .....	25
Obr. 4.3 Zájmové budovy okolo louky .....	26
Obr. 4.4 Stanovení nejvíce ozářené skupiny .....	27
Obr. 4.5 Výpočet úbytku kontaminace sekáním pro $^{137}\text{Cs}$ .....	31
Obr. 4.6 Výpočet odpadu vzniklého při sekání louky.....	32
Obr. 4.7 Výpočet odpadu vzniklého při slupování travního drnu .....	33
Obr. 5.1 Pokles plošné aktivity $^{137}\text{Cs}$ v důsledku realizace vybraných scénářů nápravy.....	44

## Seznam tabulek

Tab. 4.1 Nastavení přepínačů pro výpočet scénářů dekontaminace.....	35
Tab. 4.2 Nastavení přepínačů pro výpočet efektivních dávek pracovníků .....	36
Tab. 4.3 Ceny OOPP .....	39
Tab. 4.4 Pomocné nářadí .....	41
Tab. 5.1 Změny <i>PPDE</i> v různých etapách – simulované a očekávané hodnoty .....	46
Tab. 5.2 Efektivní dávky pracovníků podílejících se na vytyčení louky/dekontaminaci.....	47
Tab. 5.3 Finanční hodnocení zdravotní újmy vybrané skupiny obyvatelstva .....	47
Tab. 5.4 Přínosy vybraných opatření .....	48
Tab. 5.5 Celkové náklady na realizaci vybraných scénářů nápravy .....	48
Tab. 5.6 Náklady na realizaci vybraných scénářů na jeden metr čtverečný louky .....	49

## Seznam zkratek

IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
SÚRO	Státní ústav radiační ochrany
MČ P17	Městská část Praha 17
CBA	Cost-Benefit Analýza
ICRP	Mezinárodní komise radiologické ochrany
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
EPA	Agentura pro ochranu životního prostředí
<i>PDDE</i>	Příkon prostorového dávkového ekvivalentu
NEA	Nuclear Energy Agency
JE	Jaderná elektrárna
ZHP	Zóna havarijního plánování
<i>SF</i>	Koeficient stínění budov
<i>DRR</i>	Snížení dávkového příkonu
MEXT	Ministerstvo školství, kultury, sportu, vědy a technologií Japonska
ČEZ	České energetické závody
LPIS	Veřejný registr půdy
HZS	Hasičský záchranný sbor
ČSÚ	Český statistický úřad
NCRP	Národní rada pro radiační ochranu a měření
LNHB	Laboratoire National Henri Becquerel
OOPP	Osobní ochranné pracovní prostředky
PHM	Pohonné hmoty
EPD	Elektronický personální dozimetr
SDO	Stanoviště dekontaminace osob
SDT	Stanoviště dekontaminace techniky
MOE	Ministerstvo životního prostředí
DOE	Ministerstvo energetiky Spojených států amerických