Hlubinné úložiště radioaktivního odpadu

Soňa Bajerová

Bakalářská práce
2014

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta logistiky a krizového řízení

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta logistiky a krizového řízení
Ústav krizového řízení
akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Soňa Bajerová**
Osobní číslo:	**L11017**
Studijní program:	**B2825 Ochrana obyvatelstva**
Studijní obor:	**Ochrana obyvatelstva**
Forma studia:	**prezenční**
Téma práce:	**Hlubinné úložiště radioaktivního odpadu**

Zásady pro vypracování:

1. **Charakteristika radioaktivních odpadů.**
2. **Zásady nakládání s radioaktivními odpady.**
3. **Plánované hlubinné úložiště v České republice.**
4. **Komparace vývoje výzkumu pro trvalé uložení radioaktivních odpadů se zahraničím.**
5. **Scénáře možných rizik a jejich analýza.**
6. **Doporučení pro vyhledávání a výběr vhodné lokality pro hlubinné úložiště v České republice.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] DLOUHÝ, Zdeněk. Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2009, 219 s. ISBN 978-80-214-3629-9.

[2] Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě: Průvodní zpráva. ÚJV Řež a.s. – divize ENERGOPROJEKT PRAHA, 2012.

[3] SKŘEHOT, Petr. Prevence nehod a havárií. Vyd. 1. Česko: PINK PIG, 2009, 341 s. ISBN 978-80-86973-70-8.

Další odborná literatura dle doporučení vedoucího bakalářské práce

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Dušan Vičar, CSc.**
Ústav ochrany obyvatelstva

Datum zadání bakalářské práce: **21. února 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. května 2014**

V Uherském Hradišti dne 21. února 2014

L.S.

UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ
Fakulta logistiky a krizového řízení

proř. PhDr. Ivo Barteček, CSc.
děkan

prof. Ing. Dušan Vičar, CSc.
ředitel ústavu

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v archivu Fakulty logistiky a krizového řízení Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval/a samostatně a použitou literaturu jsem citoval/a. V případě publikace výsledků budu uveden/a jako spoluautor/ka
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

V Uherském Hradišti dne 23. 4. 2014

.....

podpis studenta/ky

ABSTRAKT

Bakalářská práce s názvem „Hlubinné úložiště radioaktivního odpadu“ je zaměřena na konečnou likvidaci odpadů, vznikajících při využívání jaderné energie. Člení se na část teoretickou, která se zabývá základní charakteristikou radioaktivních odpadů a způsoby nakládání s nimi. Zahrnuje také současná povrchová úložiště v České republice a obecný popis hlubinného úložiště, zejména jeho bezpečnostních prvků.

Praktická část pojednává o realizaci projektu hlubinného úložiště v zahraničí. Obsahuje scénáře možných rizik a jejich bezpečnostní analýzu. Popisuje výběr vhodné lokality pro vybudování hlubinného úložiště se zaměřením na lokalitu Kraví hora. Závěr práce je věnován zhodnocení procesu výběru lokality a doporučením pro změny v přístupu k dané problematice.

Klíčová slova: radioaktivní odpad, vyhořelé jaderné palivo, hlubinné úložiště, Kraví hora

ABSTRACT

The Bachelor's thesis titled „Deep Geological Repository of Radioactive Waste" is focused on the final disposal of waste arising from the use of nuclear energy. It is divided into a theoretical part, which deals with the basic characteristics of radioactive waste and the ways of dealing with them. It also includes the current surfaces repository in the Czech Republic and a general description of the deep geological repository, including security features.

The practical part discusses the realization of the project, deep geological repository, abroad. It contains scenarios of potential risks and safety analysis. It describes the selection of a suitable location for the construction of a deep geological repository, the primary focus being the area around Kraví hora. The conclusion is devoted to the evaluation process of choosing a location and recommendations for changing the approach to some issues.

Keywords: radioactive waste, spent nuclear fuel, deep geological repository, Kraví hora

Poděkování

Zejména bych ráda poděkovala prof. Ing. Dušanu Vičarovi, LUOO za vedení při psaní bakalářské práce, za jeho ochotu a věnovaný čas. Dále děkuji Mgr. Tereze Bečvaříkové, vedoucí oddělení komunikace Správy úložišť radioaktivních odpadů za poskytnutí podkladů a zodpovězení všech mých dotazů.

Velký význam pro mě měly i přednášky Edvarda Sequense, energetického experta sdružení Calla a Jana Beránka, vedoucího týmu globální energetické kampaně. Dále děkuji Martinu Schenkovi, mluvčímu občanského sdružení Nechceme úložiště Kraví hora, který mi poskytl pohled na problematiku z jiného úhlu a velký dík patří přátelům a rodině, kteří mě stále podporovali.

Motto

„Non schoale sed vitae discimus. - Neučíme se pro školu, ale pro život.“

Seneca Lucius Annaeus

OBSAH

ÚVOD **1**

I TEORETICKÁ ČÁST **2**

1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE **3**

2 LEGISLATIVNÍ RÁMEC **4**

3 CHARAKTERISTIKA RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ **5**

3.1 HISTORIE VZNIKU RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ 5

3.2 PRODUCENTI RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ V ČESKÉ REPUBLICE 6

3.3 ČLENĚNÍ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ 6

3.4 ÚPRAVA RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ 8

3.4.1 Pevné radioaktivní odpady (v případě nízko a středně RAO) 8

3.4.2 Kapalné radioaktivní odpady (v případě nízko a středně RAO) 8

3.4.3 Plynné radioaktivní odpady 8

3.4.4 Vysoce aktivní odpady 8

3.5 PŘEPRACOVÁNÍ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA 9

4 ZÁSADY NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY V ČESKÉ REPUBLICE **10**

4.1 SOUČASNÁ ÚLOŽIŠTĚ V ČESKÉ REPUBLICE 10

4.1.1 Dukovany 11

4.1.2 Richard – Litoměřice 11

4.1.3 Bratrství – Jáchymov 11

4.1.4 Hostim – Beroun 11

4.2 MEZISKLADY VYHOŘELÉHO PALIVA 12

5 KONEČNÉ ŘEŠENÍ ULOŽENÍ ODPADŮ **13**

5.1 HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ 13

5.1.1 Technické řešení hlubinného úložiště 14

5.1.2 Obalové soubory pro vyhořelé jaderné palivo a vysoce aktivní odpady 15

5.1.3 Multibariérový systém hlubinného úložiště 15

5.1.3.1 Přírodní bariéra 16

5.1.3.2 Inženýrská bariéra 16

5.1.4 Utěsnění nebo neutěsnění úložiště? 16

6 CÍL A METODIKA PRÁCE **17**

II PRAKTICKÁ ČÁST **18**

7 KOMPARACE VÝVOJE VÝZKUMU PRO TRVALÉ ULOŽENÍ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ SE ZAHRANIČÍM **19**

7.1 SPOJENÉ STÁTY AMERICKÉ 19

7.2 NĚMECKO 20

7.3 ŠVÝCARSKO 22

7.4 FINSKO 26

7.5 RUSKO 27

8 SCÉNÁŘE A BEZPEČNOSTNÍ ANALÝZY **28**

8.1 SCÉNÁŘE A BEZPEČNOSTNÍ ANALÝZY PŘI PROVOZU 28

8.1.1 Scénář nehody při přepravě uvnitř areálu 28

8.1.2 Scénář nehody v horké komoře 29
8.1.3 Scénář nehody při přepravě ukládacího obalového souboru nebo superkontejneru do místa uložení. 31
8.1.4 Vyhodnocení 31
8.2 SCÉNÁŘE DLOUHODOBÉHO VÝVOJE ÚLOŽIŠTĚ 32
8.2.1 Screeningový model pro standardní scénář vývoje úložiště 33
8.2.2 Výpočet dlouhodobé bezpečnosti úložiště pomocí kódu GoldSim 34
8.2.3 Vliv zemětřesení na bezpečnost hlubinného úložiště 34
8.2.4 Vliv zemětřesení na bezpečnost hlubinného úložiště při použití nevhodných inženýrských bariér 35
8.2.5 Vyhodnocení 36
8.3 DÍLČÍ ZÁVĚR 37
9 VYHLEDÁVÁNÍ VHODNÉ LOKALITY PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ 38
10 LOKALITA KRAVÍ HORA 41
10.1 ZÁKLADNÍ ÚDAJE 42
10.2 POVRCHOVÉ AREÁLY HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ 42
10.3 PODZEMNÍ STAVBA HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ 43
10.4 SYSTÉM FYZICKÉ OCHRANY 43
11 PŘÍSTUP SPRÁVY ÚLOŽIŠŤ K DOTČENÝM OBCÍM V LOKALITĚ KRAVÍ HORA 44
11.1 PRŮBĚH ZÍSKÁVÁNÍ SOUHLASU OD OBCÍ 44
11.2 ZAPOJENÍ STÁTNÍHO PODNIKU GEAM 45
11.3 ZMĚNY PODMÍNEK SPRÁVY ÚLOŽIŠŤ 45
12 ZHODNOCENÍ VÝBĚRU LOKALIT A DOPORUČENÍ PRO ZLEPŠENÍ 47
12.1 VÝBĚR GEOLOGICKÉHO PROSTŘEDÍ A POUŽITÝCH MATERIÁLŮ 47
12.2 VLIV VEŘEJNOSTI 47
12.3 DOPAD NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ 48
12.3.1 Vliv na obyvatelstvo 48
12.3.2 Vliv na ovzduší a klima 49
12.3.3 Vliv na povrchové a podzemní vody 49
12.3.4 Vliv ionizujícího záření 49
12.3.5 Vliv na krajinu 49
ZÁVĚR 50
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 51
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 55
SEZNAM OBRÁZKŮ 56
SEZNAM GRAFŮ 57
SEZNAM TABULEK 58
SEZNAM PŘÍLOH 59

ÚVOD

Jaderná energie má své nezastupitelné místo v celé řadě lidských činností. Její využívání je však spojeno se vznikem radioaktivních odpadů, které mohou způsobit ohrožení obyvatel nebo životního prostředí. Jak bezpečně nakládat s radioaktivními odpady je předmětem mnoha výzkumů. Neustále se vyvíjející technologie umožňují problematiku likvidace radioaktivních odpadů řešit, nebo alespoň redukovat jejich množství.

Radioaktivní odpady nelze zbavit jejich nebezpečných vlastností, proto musí být na dostatečnou dobu odděleny od biosféry. To umožňují úložiště radioaktivního odpadu. Pro odpady nízko a středně aktivní již v České republice existují povrchová úložiště, avšak pro vysoce aktivní odpady jsou k dispozici pouze dočasné mezisklady. Tento problém by měl vyřešit projekt hlubinného úložiště, který byl zvolen za nejvhodnější konečné řešení likvidace radioaktivních odpadů.

Teoretická část bakalářské práce bude zaměřena na právní rámec vztahující se k problematice nakládání s radioaktivními odpady, budou charakterizovány vlastnosti, členění, úprava a přepracování radioaktivních odpadů a současná povrchová úložiště v České republice. Další podstatnou součást bude tvořit popis hlubinného úložiště a jeho bezpečnostní bariéry.

V druhé části práce, praktické, bude provedena komparace vývoje výzkumu hlubinného úložiště se zahraničím, zejména se státy, kde proběhl významný pokrok v dané oblasti, nebo kde naopak nastala událost ohrožující okolní prostředí. Následovat budou scénáře modelových situací, které by mohly nastat při provozu hlubinného úložiště nebo v průběhu statisíců let, kdy v něm budou radioaktivní odpady uloženy. Bezpečnostní analýzy daných scénářů poukážou na typy ohrožení v případě nehody a na jaké bezpečnostní prvky je nutné se zaměřit. Další část práce se zabývá výběrem vhodné lokality pro hlubinné úložiště se zaměřením na lokalitu Kraví hora. Závěrečná část je věnována posuzování přístupu státních organizací k výběru lokality a jsou zhodnoceny jednotlivé komponenty důležité pro zvolení vhodné lokality.

Téma bakalářské práce jsem si vybrala z prostého důvodu. Jde o projekt, který by mohl být realizovaný v lokalitě Kraví hora, kde mám v jedné z dotčených obcí bydliště. Proto je pro mě důležité znát a vědět o této oblasti co nejvíce informací a umět je aplikovat pro proces rozhodování o vhodnosti dané lokality.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE

Aby bylo možné se v problematice dobře orientovat, je potřeba objasnění některých základních pojmů a definic. Ty poslouží k porozumění a pochopení daného tématu.

Radioaktivita - je samovolný rozpad (přeměna) jader nestabilních nuklidů na jiná jádra. Vzniká přitom radioaktivní záření alfa, beta, gama nebo neutronové, které můžeme označit také za ionizující záření vznikající při radioaktivním rozpadu. Existují dva druhy radioaktivity – přirozená (samovolný rozpad jádra) a umělá (způsobena vnějším vlivem – transmutací, řetězovou reakcí nebo urychlením částic).

Nuklid – skupina atomů se stejným protonovým i nukleonovým číslem. Radionuklid je pak nuklid s nestabilním jádrem procházející radioaktivním rozpadem.

Poločas rozpadu – doba, za kterou se přemění polovina jader v daném množství radionuklidu.

Dekontaminace – je postup, při kterém se odstraňují nežádoucí látky z povrchu těla osob, výzbroje, jiného materiálu, objektů a terénu. [1]

Institucionální radioaktivní odpady – pocházejí z aplikací radionuklidů v nejrůznějších oblastech lidské činnosti. Patří sem odpady vznikající ve výzkumných jaderných střediscích, při výrobě radionuklidů pro lékařské účely, v průmyslu nebo zemědělství.

Radioaktivní odpady – látky, předměty nebo zařízení obsahující radionuklidy, pro něž se nepředpokládá další využití a které jejich vlastník označil za odpad.

Vyhořelé jaderné palivo – jaderné palivo, které již není možné vzhledem k malému množství štěpitelného radionuklidu ^{235}U používat pro výrobu elektrické energie v jaderném reaktoru.

Hlubinné úložiště – komplex prostorů pro ukládání a manipulaci s kontejnery s vyhořelým palivem a vysoce-aktivními odpady. Součástí hlubinného úložiště jsou přístupové šachty, tunely a také nadzemní areál s technickým zázemím. [2]

S radionuklidy, ať už v podobě přírodních prvků, jaderného paliva či radioaktivního odpadu se lidé setkávají často. Využívání vlastností atomového jádra má nezastupitelné místo v mnoha odvětvích. Mít základní znalosti z této oblasti je proto žádoucí jak pro zaměstnance v nejrůznějších firmách, tak pro studenty nebo obyvatelstvo.

2 LEGISLATIVNÍ RÁMEC

Činnosti spojené s výrobou, manipulací, shromažďováním, úpravou, zpracováním, skladováním nebo ukládáním radioaktivních materiálů se musí řídit dle platného právního řádu. Ten upravuje podmínky a požadavky, jak lze nakládat s vyhořelým jaderným palivem (dále VJP) a radioaktivními odpady (dále RAO).

Usnesení vlády č. 487/2002 Sb. Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR je základním dokumentem, který formuluje strategii státu a státních orgánů na období do roku 2025, s výhledy až do konce 21. století. Zohledňuje přitom organizace, které RAO produkují. Koncepce navrhuje možné bezpečné řešení zneškodnění RAO. [3]

Zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) vznikl roku 1997 a jde o vůbec první zákon, který se přímo zabývá jadernou energií, jadernou bezpečností i nakládáním s RAO. Upravuje zejména způsob a podmínky využívání jaderné energie a ionizujícího záření, systém ochrany osob a životního prostředí před nežádoucími účinky záření a podmínky zajištění bezpečného nakládání s RAO. Vyhlášky provádějící atomový zákon jsou uvedeny v příloze P I. [4]

Rozhodnutím ministra průmyslu a obchodu č. 107/1997 Sb. ze dne 20. května 1997 byla zřízena státní organizace Správa úložišť radioaktivních odpadů (dále SÚRAO). Jejím cílem je zajistit na území České republiky (dále ČR) bezpečné nakládání s RAO. [6]

Nařízení vlády č. 416/2002 Sb. ze dne 28. srpna 2002, kterým se stanoví výše odvodu a způsob jeho placení původci RAO na jaderný účet a roční výše příspěvků obcím a pravidla jeho poskytování, novelizováno nařízením vlády č. 46/2005 Sb. [5]

Zásadní vliv na formování jaderné bezpečnosti v ČR mají státní instituce, jako Státní úřad pro jadernou bezpečnost (dále SÚJB), SÚRAO nebo Český báňský úřad. Prosazují bezpečnostní kulturu, zpracovávají bezpečností dokumentaci pro všechny situace, kdy by mohlo dojít k ohrožení osob, zvířat nebo životního prostředí v důsledku radiačního ohrožení.

3 CHARAKTERISTIKA RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ

Prakticky při veškeré lidské činnosti jsou produkovány odpady. Radioaktivní odpady vznikají stejně. V odvětvích, kde se pracuje s radioaktivními látkami, vznikají RAO. Jedná se o všechny nevyužitelné materiály v pevném, kapalném nebo plynném skupenství, které obsahují takové množství radionuklidů, že je běžnými způsoby nelze likvidovat a musí být zneškodněny nebo uloženy zcela jinými způsoby. RAO postupně ztrácí svoji nebezpečnou vlastnost – radioaktivitu na základě poločasu rozpadu. Pak se postupně přemění až na prvky neaktivní. To je zásadní rozdíl mezi odpady chemickými nebo průmyslovými a RAO.

3.1 Historie vzniku radioaktivních odpadů

V době první světové války 1914 - 1918 došlo k masovému zavedení chemických zbraní, které měly za následek usmrcení desítek tisíc vojáků. Nedlouho poté však byla snaha o vytvoření ještě ničivější zbraně, a to s využitím síly atomového jádra. V průběhu druhé světové války 1939 - 1945 se tak naplno ukázala síla jaderných zbraní.

V meziválečném období byly využívány radioaktivní látky především pro výzkumné a medicínské účely a jednalo se zejména o radium (^{226}Ra). Odpadům, které přitom vznikaly, nebyla věnována pozornost. Dostávaly se do okolního prostředí nemocnic, a tím významně znečišťovaly životní prostředí. Až v poválečné etapě se významně zvýšilo množství zdrojů ionizujícího záření v souvislosti s vývojem jaderné energetiky a rozvojem jaderného výzkumu – především ve zdravotnictví, průmyslu, zemědělství, geologii a v dalších oborech. [8]

Všechny tyto činnosti způsobují vznik odpadních materiálů, které jsou kontaminované různým množstvím radioaktivních látek. Z toho důvodu se rozvinula otázka, jak bezpečně likvidovat RAO. Od konce čtyřicátých let se uplatňovalo několik možných řešení, které se však zanedlouho ukázaly jako velice nevhodné a nepřijatelné pro společnost, která se začala více zajímat o životní prostředí. Například ukládání barelů s RAO do oceánu a moří nebo vystřelování RAO do vesmíru. Pak ale vznikl nápad, uložit tento materiál hluboko do země a oddělit ho tak od okolního prostředí.

3.2 Producenti radioaktivních odpadů v České republice

V České republice je vedeno několik set původců RAO. Někteří vyprodukují jen zanedbatelné množství nízkoaktivních odpadů, jiné naopak větší množství vysoce-aktivních odpadů. Proto musíme věnovat pozornost i tomu, jak nebezpečný odpad v daném odvětví vzniká, nejen tedy jeho množství. Se spuštěním jaderných elektráren došlo k velkému vzrůstu objemu a stupni radioaktivity RAO a bylo tedy nutné se zaměřit na jeho likvidaci, nebo alespoň bezpečné uložení. Mezi největší původce řadíme:

- jaderná elektrárna Dukovany;
- jaderná elektrárna Temelín;
- Ústav jaderného výzkumu Řež, a. s.;
- zdravotnictví;
- průmysl;
- vzdělávací instituce. [21]

3.3 Členění radioaktivních odpadů

Klasifikace RAO slouží pro usnadnění orientace v oblasti bezpečného nakládání s RAO. Umožňuje rychleji a snadněji zařadit RAO do příslušné kategorie a určit tak nejlepší způsob, jak jej zneškodnit. Existuje několik způsobů, jak lze RAO třídit. Podle fyzikálních vlastností na pevné, kapalné nebo plynné, odpady lisovatelné nebo nelisovatelné, spalitelné a nespalitelné. Podle chemických vlastností jsou anorganické a organické nebo kyselé, neutrální a podobně. Jeden z nejdůležitějších způsobů dělení je dle místa vzniku:

- **RAO vznikající v jaderné energetice** – odpady z těžby a zpracování radioaktivních surovin, reaktorové odpady, odpady z vyřazování jaderných zařízení nebo odpady z přepracování vyhořelého paliva (např. různé kapaliny, kaly, materiály a předměty, které byly v kontaktu s radionuklidy nebo vyhořelé jaderné palivo).
- **Institucionální odpady** – vznikají v průmyslových či medicínských zařízeních nebo výzkumných střediscích. Největší množství produkuje ÚJV Řež, a.s., který je zároveň největším zpracovatelem (např. znečištěné pracovní oděvy a látky, staré měřicí přístroje). [6]

Dle Mezinárodní agentury pro atomovou energii (dále MAAE) je v platnosti třídění RAO z roku 1994, které je uvedeno v příloze P II.

V roce 2008 byl MAAE vydán dokument, který upravuje některé principy hodnocení na novější, modifikované, neboť výzkum přináší stále nové poznatky, a proto je potřeba se jim přizpůsobovat. Třídy je možné definovat takto:

Odpady o radioaktivitě nižší než uvolňovací úrovně - obsah radionuklidů je zanedbatelný, lze je uvolnit bez omezení do životního prostředí nebo k recyklaci.

Přechodné (velmi krátkodobé) odpady – mohou být uvedeny do životního prostředí po určité době skladování. Jsou to především odpady s krátkým poločasem rozpadu do 100 dnů, vzniklé ve výzkumných zařízeních.

Velmi nízko aktivní odpady – nevyžadují vysoký stupeň kontroly a izolace a jde je ukládat formou řízených skládek. Řadíme sem slabě radioaktivní odpady, typickým příkladem je hlušina po těžbě.

Nízko aktivní odpady – mají omezené množství dlouhodobých radionuklidů, avšak obsahují radionuklidy o vyšších aktivitách. Vyžadují kontrolování a izolaci na dobu několika set let. Ukládají se do přípovrchových úložišť.

Středně aktivní odpady – obsahují dlouhodobé radionuklidy, a proto je vyžadován vyšší stupeň kontroly a izolace. Musí se ukládat do podzemních úložišť ve větších hloubkách, ale není třeba zajišťovat odvod tepla.

Vysoce aktivní odpady – uvolňují velké množství tepla vlivem radioaktivní přeměny nebo obsahují velké množství dlouhodobých radionuklidů. Jde zejména o vyhořelé jaderné palivo, které je třeba ukládat do hlubinného úložiště, které bude ve stabilní geologické formaci v hloubce několik set metrů.

Nová klasifikace RAO je složitá, ale zahrnuje mnoho nových poznatků. Kategorizace závisí nejen na radioaktivitě a poločase přeměny, ale i na mnohých dalších faktorech, jako jsou radiotoxicita, uvolňovací úrovně, množství uvolňovaného tepla nebo emitované záření. V ČR ještě některé kategorie nejsou legislativně upraveny, ale do budoucna se s nimi počítá. MAAE i Evropská komise usilují o sjednocení přístupu ke klasifikačnímu systému v různých zemích, protože v současné době jsou mezi nimi velké rozdíly. [2, 10]

3.4 Úprava radioaktivních odpadů

Radioaktivní odpady jsou před přijetím k uložení zpracovány tak, aby splnily podmínky pro ukládání. Cílem úpravy je co nejvíce snížit objem a radioaktivitu RAO nebo změnit složení tak, aby bezpečnost skladování a transportu byla zaručena a potřebné prostory pro uložení mohly být co nejmenší. Jakým způsobem lze upravit RAO závisí zejména na skupenství, ve kterém byly vyprodukovány a úrovni radioaktivity, kterou jsou kontaminované. [11]

3.4.1 **Pevné radioaktivní odpady** (v případě nízko a středně RAO)

Úprava RAO v pevném skupenství je založena na zmenšení objemu a následnému vložení do vhodných obalů, které se zalijí betonem. Mezi nejčastější metody patří lisování, spalování, fragmentace nebo filtrace.

3.4.2 **Kapalné radioaktivní odpady** (v případě nízko a středně RAO)

Kapalné RAO musí být převedeny do pevného stavu pomocí ztužidel a teprve pak je lze ukládat. Využívá se několik technologií zpevnění v závislosti na druhu RAO – bituminace, cementace nebo polymerace.

3.4.3 Plynné radioaktivní odpady

Většinou obsahují jen malé množství radionuklidů a lze je kontrolovaně vypouštět do atmosféry. Jestliže vznikají plyny ve větším množství, jsou plněny do tlakových lahví a skladují se do doby, než se rozpadne příslušný radioaktivní izotop na přípustné množství.

3.4.4 Vysoce aktivní odpady

Zvláštní skupinu tvoří úprava vysoce aktivního RAO. Je nutné využívat speciální materiály pro zahuštění kapalných RAO, aby vydržely vysokou úroveň radiace. Proto se využívá metoda zvaná vitrifikace.

Vitrifikace – je metoda, která se využívá pro zpevnění kapalných vysoce aktivních odpadů, zejména vyhořelého paliva za pomoci skelného nebo keramického systému. Ty odolávají vysokému radiačnímu namáhání. Po odstranění vody z odpadu se přidají sklovotvorné přísady a při 1200 °C se vytaví běžnou sklářskou technikou křemičitanové nebo boro-křemičitanové sklo. To se pak vypustí do nádob z oceli a je připraveno pro další uskladnění a převezení. [2]

3.5 Přepracování vyhořelého jaderného paliva

Při použití jaderného paliva v jaderných elektrárnách vzniká jaderný odpad. 95 % z něj je tvořeno izotopem ^{238}U uranu, 1 % tvoří nově vzniklé plutonium a pouze 4 % lze považovat za vyhořelé palivo, které již nelze využít. Ostatní složky mohou být přepracovány a znovu použity. Technologie pro zmíněné přepracování se stále vyvíjí, ale v současné době jsou velice nákladné, a proto se využívají jen v několika státech.

Při přepracování se separuje uran a plutonium. Jde však o velice složitý proces, při kterém vzniká mnoho dalších druhotných odpadů, které mají sice radioaktivitu nižší, ale jejich izolace je náročnější. Metoda, která je využívána se nazývá Purex a jde o mokrý způsob přepracování. V současné době se však ustupuje od přepracování, pouze některé státy používají recyklovaný materiál v palivu MOX (Mixed oxide fuel). Naproti tomu se usilovně pracuje na výzkumu projektů transmutačních technologií a reaktorech čtvrté generace. V případě zavedení těchto technologií by sice potřeba hlubinného úložiště neodpadla, ale potřebné kapacity by mohly být mnohem menší. [21]

Transmutační technologie

Jde o technologie, které by využily potenciál jaderné energie, který současné reaktory nejsou schopné uvolnit z paliva. Spočívají v jaderné přeměně radionuklidů s dlouhým poločasem přeměny a umožňují tak významné zkrácení doby, po kterou jsou RAO vysoce nebezpečné pro okolní prostředí. Problém hlubinného úložiště by ale zůstal zachován, protože stále bude produkován zbytkový odpad. Zatím tento projekt není realizovatelný.

Reaktory čtvrté generace

Kdyby byly zavedeny nové typy reaktorů s uzavřeným palivovým cyklem, byl by mnohem efektivněji využit štěpný materiál. K tomu by se mělo docílit díky intenzivní recyklaci. Využil by se veškerý potenciál v palivu a do hlubinného úložiště by se ukládalo minimum RAO. Náklady na uzavřený palivový cyklus jsou však stále vyšší než v případě otevřeného cyklu s hlubinným úložištěm. Proto nelze očekávat brzkou realizaci. [12]

4 ZÁSADY NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY V ČESKÉ REPUBLICE

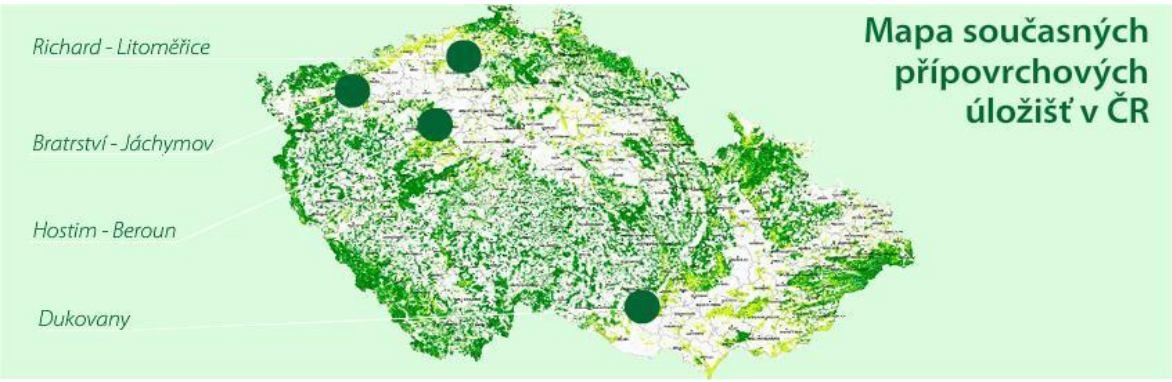
Původci RAO se musí řídit zákonem č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon). Provozovatelé jaderných zařízení jsou také povinni odvádět finanční částky na jaderný účet. Tyto příspěvky pak slouží na všechny činnosti, spojené se zneškodněním a likvidací RAO. Kontrolu nad dodržováním daných předpisů a podmínek provádí SÚJB.

Za bezpečné ukládání radioaktivních odpadů odpovídá SÚRAO. Tato státní organizace byla zřízena, nejen aby garantovala bezpečnost úložišť, ale také pro vzájemnou komunikaci s veřejností a řešení otázky konečného uložení odpadů. [13]

Základní podmínkou bezpečného nakládání s RAO je izolace od biosféry na dobu, po kterou by mohly ohrozit zdraví či životy osob, zvířat nebo životního prostředí. Tato doba se odvíjí od druhu radioaktivního odpadu a jeho poločasu rozpadu. Takto se zamezí úniku nebezpečných látek do životního prostředí, následnému nebezpečí a případnému riziku onemocnění.

4.1 Současná úložiště v České republice

Význam ukládání RAO spočívá v bezpečnosti vhodně zvoleného prostoru pro uložení. V současné době existují v ČR 4 úložiště, z toho jedno již není v provozu. Všechny jsou neustále monitorovány. Každé úložiště musí splňovat podmínky dané SÚJB, aby mohlo provozovat činnost. Stále se uvnitř i v okolí provádí měření dozimetry, které určují dávku ionizujícího záření. Důležitá je také neustálá kontrola množství radioaktivního plynu radonu, který se zde uvolňuje. [6]



Obr. 1 – Mapa současných povrchových úložišť v ČR [7]

4.1.1 Dukovany

Úložiště Dukovany je vybudováno jako součást jaderné elektrárny Dukovany. Je rozlohou největším úložištěm v ČR. Funguje od roku 1995. Celkový objem úložných prostor je 55 000 m³ (asi 180 000 sudů o objemu 200 l). Jde o dostatečné území k přijetí radioaktivních odpadů z jaderné elektrárny Dukovany i Temelínu. Od roku 2005 přijímá i určité množství institucionálních odpadů, které vznikly v Ústavu pro jaderný výzkum v Řeži (dále ÚJV Řež, a.s.). V úložišti Dukovany je možné ukládat nízkoaktivní a středněaktivní odpady. V současné době je zaplněno asi z 6 % celkové kapacity.

4.1.2 Richard – Litoměřice

Od roku 1964 funguje úložiště Richard k ukládání institucionálních odpadů. Úložiště bylo zbudováno v bývalém vápencovém dole a tvoří jen malou část celého komplexu. Celková kapacita pro ukládání radioaktivních odpadů je 8 400 m³, ale celkový objem úložiště je asi 17 000 m³. Jedná se však zejména o chodby pro dopravu radioaktivního materiálu. [16]

4.1.3 Bratrství – Jáchymov

Úložiště Bratrství je v činnosti od roku 1964. Vzniklo na místě bývalého uranového dolu a pro ukládání radioaktivního materiálu zde slouží 5 komor, které dosahují objemu asi 2 700 m³. Mohou se zde ukládat pouze materiály obsahující přírodní radionuklidy. V úložišti je vytvořen drenážní systém na odvod vody, protože lokalita je tvořena zvodněným krystalinikem. Všechny odváděné vody jsou pod přísným dozorem. [17]

4.1.4 Hostim – Beroun

Bylo v provozu od roku 1959 do roku 1965. Úložiště Hostim je situováno do vápencového lomu, kde k ukládání radioaktivního odpadu sloužily 2 štoly o objemu 1 600 m³. Jsou zde zapečetěny nízkoaktivní a středněaktivní odpady,[1] které vznikly v bývalém Ústavu pro výzkum, výrobu a využití radioizotopů (ÚVVVR) a odpady z ÚJV Řež, a. s. [16]

[1] V případě celkového naplnění jednoho prostoru v úložišti sudy s radioaktivním materiálem nastává jeho uzavření. To probíhá zalitím celého prostoru betonem, a tím jeho izolováním od okolního prostředí. [16]

4.2 Mezisklady vyhořelého paliva

Do povrchových úložišť lze ukládat pouze nízko a středně radioaktivní odpady. Vysoce aktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo však musí být uskladněny zcela odlišným a mnohem složitějším způsobem.

Mokré skladování:

Vyhořelé palivo se skladuje blízko reaktoru jaderné elektrárny v chladících bazénech s vodou. Po vytažení z reaktoru totiž vykazuje obrovské teploty a vysokou míru radioaktivního záření. Voda je proto velice vhodným prostředkem pro chlazení a alespoň určitou ochranou před ionizujícím zářením. Je však nutné počítat s vysokými provozními náklady na provádění dekontaminace použité vody. Tento způsob je nejrozšířenější v jaderných elektrárnách v zahraničí, avšak finančně mnohem náročnější než suchý způsob skladování.

Suché skladování:

Tato technika se využívá v mnoha jaderných elektrárnách - ani ČR není výjimkou. Vyhořelé palivo se nejprve několik let skladuje v chladících bazénech a pak je přesunuto do meziskladu, kde je uloženo v ostíněných kontejnerech na desítky let. Kontejnery jsou chlazeny vzduchem a je zde jen malé nebo žádné množství druhotných radioaktivních produktů. [18]

Mezisklady v České republice

Vysoce aktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo jsou v meziskladech uloženy na dobu, dokud nebude k dispozici jiné – trvalé uložení. Mezisklady jsou v ČR součástí komplexu jaderných elektráren Dukovany a Temelín. V jaderné elektrárně (dále JE) Dukovany funguje od roku 1995 a v JE Temelín byl uveden do provozu v roce 2010. [13]

Uvažovalo se i o vybudování centrálního meziskladu, kam by bylo soustředěno veškeré vyhořelé jaderné palivo. Předností by byla nižší nákladnost, ale naopak by vznikl velký problém transportu těchto nebezpečných materiálů a s tím spojené riziko havárie. Projekt byl nakonec ukončen a v současné době je podzemní stavba nevyužita. Jedná se o stavbu Skalka, která se nachází mezi obcemi Nedvědice a Věžná na Vysočině. Fotografie stavby se nachází v příloze P III.

5 KONEČNÉ ŘEŠENÍ ULOŽENÍ ODPADŮ

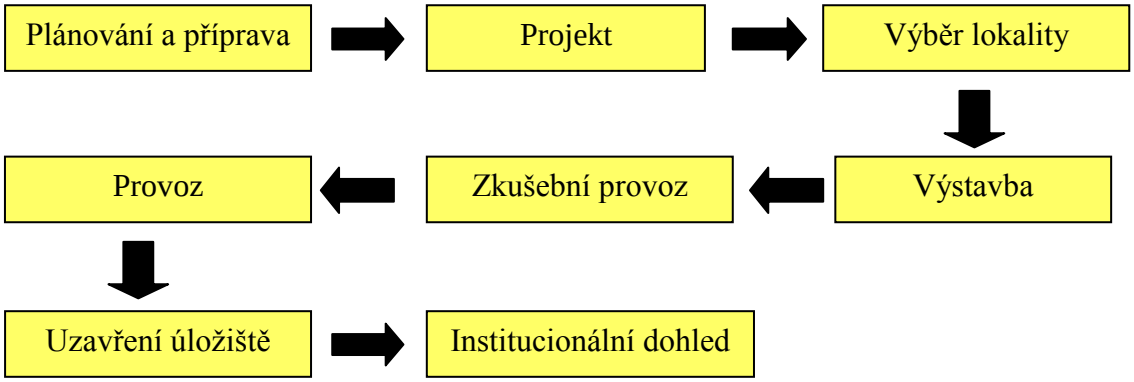
České jaderné elektrárny (Dukovany a Temelín) vyprodukují několik tisíc tun vyhořelého jaderného paliva během svého provozu. V případě vystavění nových reaktorů by se množství odpadů ještě navýšilo. V současné době je otázka dočasného uložení těchto odpadů vyřešena formou meziskladů přímo v areálu JE. Je možno si však poradit s RAO na trvalo? Na tuto otázku lze odpovědět několika způsoby. Možné řešení je hlubinné úložiště. To však ještě není realizované ani v ČR, ani jinde ve světě. Proto nelze zaručit, že právě tento způsob likvidace RAO zajistí bezpečnost a vyřeší problém trvalého uložení odpadů. V následující kapitole je problematika hlubinného úložiště objasněna.

5.1 Hlubinné úložiště

Výstavba hlubinného úložiště (dále HÚ) je velice nákladná, dlouhodobá činnost a vyžaduje splnění velmi přísných podmínek radiační ochrany. Proto je nezbytné nejprve uložení v meziskladech, kde postupně dochází ke snížení radioaktivity a klesá tepelný výkon vyhořelého paliva. Snižují se tím i nutná opatření, nároky a objem podzemních úložných prostor. Navíc se stále vyvíjí nové technologie a je možné, že v období skladování dojde k významnému pokroku.

Odborníci z celého světa se shodli, že hlubinné geologické formace jsou nejvhodnějším místem pro uložení RAO. Jde o systém, který by měl být schopen zajistit bezpečné uložení vysoce radioaktivního odpadu a vyhořelého paliva na dobu, po kterou je vysoce nebezpečný. Nutnost jeho oddělení od biosféry přesahuje stovky tisíc let až milion, než se dostane na úroveň srovnatelnou s přírodním uranem.

Proces realizace HÚ je závislý na mnoha aspektech, které musí být naplněny. Jde o nalezení vhodné lokality, vhodné geologické formace, vypracování projektu, výstavba a uvedení do provozu. Neméně důležité je získání souhlasu od veřejnosti, vlád a státních správ. Musí být prokázána nejen bezpečnost projektu, ale i finanční zajištění jeho provedení. [2, 6]



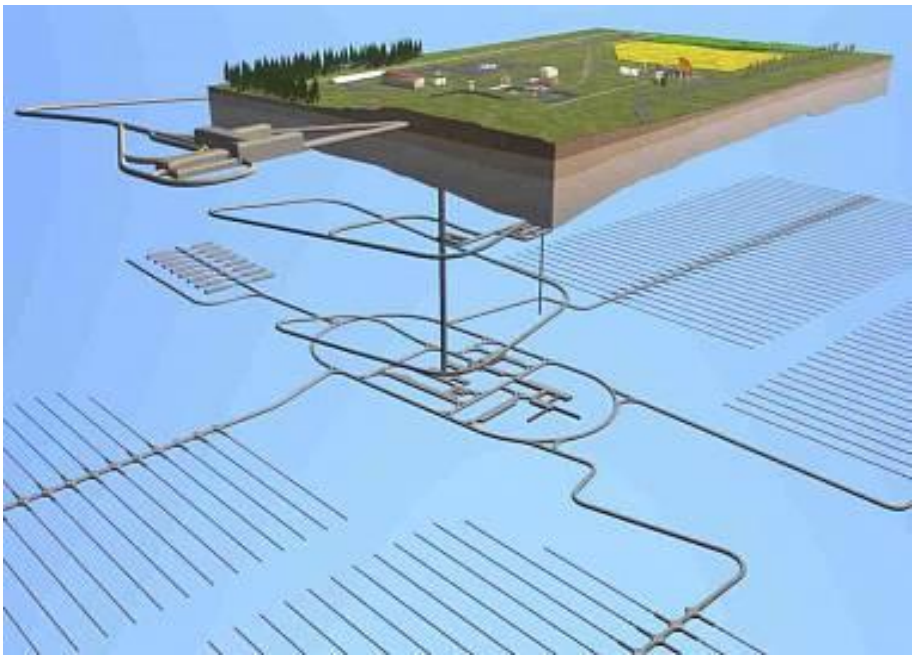
Obr. 2 - Životní cyklus úložiště radioaktivních odpadů. [vlastní]

5.1.1 Technické řešení hlubinného úložiště

Hlubinné úložiště se bude skládat ze 3 hlavních částí:

- podzemní prostory pro ukládání a manipulaci s kontejnery;
- přístupové šachty a tunely;
- nadzemní - povrchový areál.

Povrchový areál bude sloužit pro provozy zařízení zabezpečující větrání úložiště, dodávky elektrické energie, servis a budou zde fungovat také správní budovy, sklady a informační středisko. Ukládací prostory budou spojeny šachtami a tunelem ve tvaru šroubovice s nadzemním areálem. [6]



Obr. 3 - Vizualizace možného hlubinného úložiště [14]

Ukládací komory budou v hloubce asi 500 m a budou určeny pro speciální kontejnery s dlouhodobou životností. Podzemní chodby by se mohly rozprostírat v několika km^2 - horizontálně nebo vertikálně, případně i v patrech.[2] Záleží na množství ukládaného materiálů a typu horniny. Stavba úložiště musí brát ohled na ochranu přírody a krajiny ve vybrané lokalitě a také zohledňovat požadavky obcí. Především řešit sociologicko-ekonomicky dopad na obyvatelstvo. [6]

5.1.2 Obalové soubory pro vyhořelé jaderné palivo a vysoce aktivní odpady

Úkolem obalových souborů je odvod tepla a zamezení úniku radioaktivních látek. Cílem je zabezpečit těsnost nejen v provozní fázi, ale také v dlouhodobém horizontu po dobu tisíců let. Kontejnery, ve kterých jsou RAO skladovány či přepravovány, musí zajistit nejen bezpečnost, ale i dlouhodobou životnost. V případě životnosti jde o to, co nejvíce oddálit a zpomalit korozi kontejneru. Bezpečnost obalových souborů je prokazována mnoha zkouškami, které zkoumají mechanickou, tepelnou a vodotěsnou odolnost.[3] V JE Dukovany a Temelín jsou využívány kontejnery typu Castor. [20] Jednotlivé vrstvy a komponenty kontejneru typu Castor jsou znázorněny v příloze P IV.

5.1.3 Multibariérový systém hlubinného úložiště

Systém je založen na principu vytvoření více ochranných bariér pro případ, že by došlo k selhání některého z prvků bezpečnosti. Tak se zamezí případu, že by selhal celý systém ochrany najednou. Multibariérový systém se skládá ze 2 základních částí:

- **přírodní bariéra** – geologické prostředí, které je voleno podle místních podmínek jednotlivých států;
- **inženýrská bariéra** - kontejner s odpadem a zejména vícevrstvá bariéra na bázi bentonitu.

---

[2] Podzemní prostory se budou rozprostírat v několika km^2 - pro lepší představu jde až o stovky fotbalových hřišť. [29]

[3] Zkoušky obalových souborů probíhají v areálu úložiště Richard u Litoměřic. Simulují se zde podmínky, které by mohly nastat při přepravě, ukládání nebo skladování RAO. Náročnost těchto zkoušek, které simulují případné nehody při přepravě, závisí na druhu a aktivitě radioaktivního obsahu, pro který byl obalový soubor vyroben a na jeho typu. [22]

5.1.3.1 Přírodní bariéra

Základem pro realizaci HÚ je nalezení stabilní geologické formace, tedy masivní neporušené horniny, ve které by bylo HÚ vybudováno. Možné jsou jíly, krystalické horniny nebo solné formace. Zvolený prostor nesmí být ohrožen tektonickým pohybem desek (zemětřesením), musí odolávat vysokým teplotám a musí být zamezeno přístupu vody. Ta je jedním z největších ohrožení, protože kdyby došlo k zaplavení prostoru, radioaktivní látky by se mohly uvolnit vlivem koroze kontejnerů do podzemních vod, a tím kontaminovat zdroje pitné vody nebo vynést vlivem proudění znečištěnou vodu na povrch. Přírodní vlivy mohou způsobit mnohé komplikace – HÚ však musí zůstat bezpečné po dobu minimálně 300 tisíc let. [9]

Zvolení vhodné přírodní bariéry je založeno na dobrém průzkumu. Ten však nesmí být destruktivní, aby nenarušil vrstvy, ve kterých se HÚ předpokládá. Provádí se tedy geofyzikální a radiogeologické průzkumy pro získání podrobnějších informací o horninovém masivu.

5.1.3.2 Inženýrská bariéra

První stupeň inženýrské bariéry je tvořen skleněnými matricemi, do kterých je vložen vysoce radioaktivní odpad již při vitrifikaci. Díky tomu lze RAO umístit do kontejneru. Cílem prvních bariér je zamezit úniku radioaktivních látek do ovzduší a umožnit, aby nedošlo k porušení při manipulaci.

Dalším stupněm ochrany je geotechnická bariéra na bázi bentonitu. Tato hornina byla zvolena z důvodu jejích stálých vlastností. Nemění své chování po dobu tisíců let. Základními funkcemi geotechnické bariéry je tlumit a těsnit. Neméně důležité jsou funkce výplňové a konstrukční. Úkolem je zabránit přístupu vody ke kontejneru a zajistit odvod tepla do okolního prostředí. [19]

5.1.4 Utěsnění nebo neutěsnění úložiště?

V případě trvalého utěsnění (např. zalití bentonitem) by se mohlo eliminovat nebezpečí úniku radioaktivity tím, že by vznikla další bariéra. Avšak v případě neočekávané nehody by již nebylo možné s uloženým odpadem nějak manipulovat a dalším generacím by se také uzavřela možnost naložit s odpadem lepším způsobem. Naproti tomu trvalé neutěsnění umožní případné opravy a úpravy nebo opětovné využití již uloženého RAO. V ČR se zatím počítá s uskutečněním projektu s trvalým uzavřením úložiště – tedy s utěsněním. [9]

6 CÍL A METODIKA PRÁCE

Práce je zaměřena na komplexní přehled o problematice nakládání s RAO. Cílem je zhodnotit systém výběru lokality pro projekt HÚ a doporučení případných změn pro vylepšení daných principů projektu HÚ v ČR. Je nutné posuzovat selekci nejen z technického a geologického hlediska, ale také ze sociologicko-ekonomického. K tomu přispívají přednášky předních českých ekologických aktivistů a zástupců Hnutí DUHA a Greenpeace. Poskytují tak širší rozhled nad danou problematikou. Další významné konzultace a poskytování interních dokumentů SÚRAO vedou k postupnému plnění stanovených cílů práce. Neméně důležité jsou osobní zkušenosti z přístupu SÚRAO (státu) vůči občanům v lokalitě Kraví hora, které umožňují aplikaci vlastních poznatků do praktické části práce.

Pro zpracování jsou využívány vlastní exkurze v jaderných zařízeních, které přináší řadu poznatků z oblasti jaderné energetiky. Umožňují tak lépe provést komparaci vývoje výzkumu HÚ se zahraničím a posoudit tak rozdíly v projektové fázi s různými státy.

Praktická část práce zahrnuje modelování situací, tedy vytváření scénářů možných rizik, které by mohly vést ke vzniku nehody. Tyto scénáře jsou analyzovány a hodnoceny podle různých kritérií. Jsou rozlišovány scénáře situací, které by mohly nastat při provozu HÚ a scénáře pro analýzu událostí, které by měly vliv na dlouhodobý vývoj bezpečnosti HÚ. Pro stanovení hodnot jsou využívány screeningové výpočty a výpočetní kód GoldSim. Výsledkem je zjištění případných rizik, které je nutné eliminovat a zjistit stav bezpečnostních prvků v HÚ.

Cíle práce jsou tedy:

- objasnění podmínek nakládaní s RAO;
- komparace vývoje výzkumu HÚ se zahraničím;
- rozbor scénářů možných rizik a jejich analýza;
- zhodnocení výběru lokality pro HÚ;
- navržení opatření vedoucích ke zlepšení procesu realizace HÚ.

Bakalářská práce je zpracována v přehledné návaznosti tak, aby zaručila snadnou orientaci a poskytla komplexní přehled o dané problematice.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 KOMPARACE VÝVOJE VÝZKUMU PRO TRVALÉ ULOŽENÍ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ SE ZAHRANIČÍM

Všechny země, které využívají jadernou energetiku, musí zvažovat, jak naložit s vyprodukovaným odpadem. Některé státy, které mají vhodné geologické podmínky, se již rozhodly, jak RAO zneškodní, jiné hledají stále nová řešení. Předmětem této kapitoly je srovnání, jak postupuje výzkum pro HÚ ve vybraných zahraničních státech. Byl zvolen reprezentativní vzorek několika zemí, kde došlo k významnému pokroku vedoucímu k realizaci HÚ, nebo naopak země, které se vypořádaly s RAO nevhodným způsobem a vyvolaly tak nehody s únikem nebezpečných látek do životního prostředí.

7.1 Spojené státy americké

Spojené státy americké (dále USA) disponují největším množství jaderných reaktorů na světě.[4] Problém s RAO začalo USA řešit v 70. letech. Nejvhodnější lokalitou byla zvolena oblast Yucca Mountain ve státě Nevada. Lokalita se zdála velice vhodná pro svoje přirozené vlastnosti – zaplavení ani narušení vodou nemělo přijít v úvahu a seismicita zde také nebyla předpokládána. Hostitelským prostředím je hornina tuf.[5] Úložiště mělo přejít do provozu už v roce 1998.

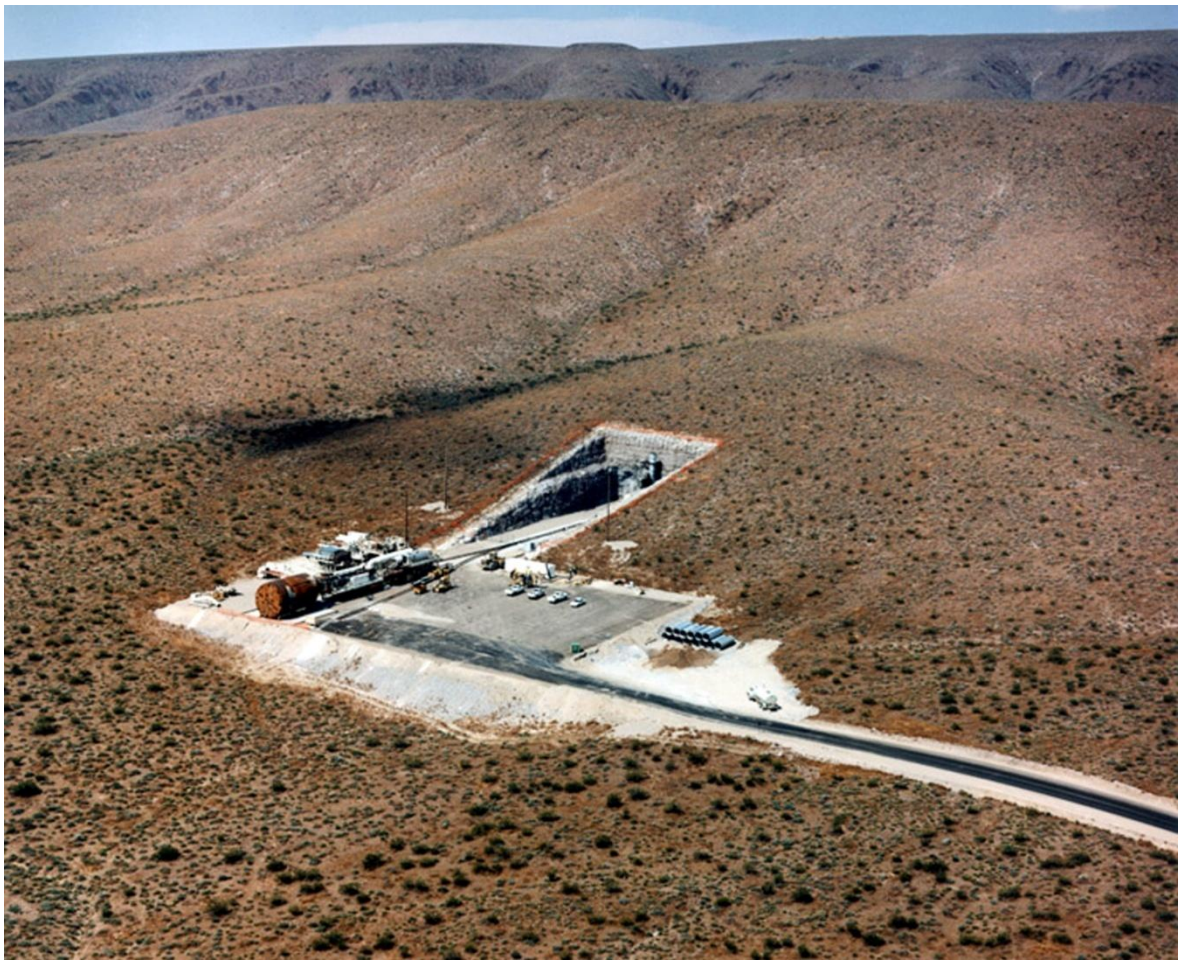
Monitoring podzemí však v roce 1995 zjistil, že v podzemních vodách, nacházejících se pod úrovní HÚ, byla detekována přítomnost radioaktivního chloru. Ten se mohl dostat do podzemních vod pouze z testů jaderných zbraní v 50. letech. Podle původních matematických modelů urazila kontaminovaná voda za 50 let cestu, která měla trvat několik tisíciletí.

Nové poznatky vyvolaly celou řadu dalších zkoumání a realizace projektu byla odložena. Ani z hlediska zemětřesení nejde o zcela bezpečnou lokalitu. Tektonická aktivita a nečekaně rychlé proudění podzemních vod však americkou vládu nepřesvědčila o nevhodnosti lokality a stále se s ní počítá. V současné době jsou RAO uloženy v areálech jaderných elektráren. [6, 9]

---

[4] V USA je přes 100 jaderných reaktorů. Vedle vyhořelého jaderného paliva tvoří RAO také velké množství odpadů z výzkumných a vojenských jaderných reaktorů. [6]

[5] Tuf je druh horniny ze sopečného popelu, který vznikl při sopečné erupci. Její stáří je 11 - 14 milionů let. [2]



Obr. 4 – Vstup do úložiště Yucca Mountain z jižní strany [6]

7.2 Německo

V Německu je 17 jaderných reaktorů. Po havárii JE Fukušima v roce 2011, však ustupuje Německo od jaderné energetiky a postupně bude ukončovat provoz i ve zbylých jaderných elektrárnách. Poslední reaktor by měl být zastaven do roku 2022. [23]

Vyhořelé jaderné palivo bylo do roku 2005 posíláno na přepracování do Francie a Velké Británie – to se bude ve formě vysoce aktivního odpadu vracet do roku 2020. Také vyřazování jaderného zařízení z provozu zahrnuje specifické činnosti, jako je dekontaminace, demontáž, demolice a zneškodňování vzniklých RAO. Nejméně do roku 2080 potrvá likvidace jaderných elektráren v Německu. [2]

Jako vhodné úložiště RAO v Německu byl zvolen solný důl Asse u Gorlebenu v Dolním Sasku. V provozu byl v letech 1967 – 1978. V roce 2008 se pozornost široké veřejnosti zaměřila na únik nebezpečných látek do okolního prostředí úložiště. Do solného dolu se dostala voda a narušila izolaci asi 126 000 sudů s nízko a středně aktivními RAO.

Sudy budou muset být vyjmuty a uloženy do nových obalových souborů, a poté převezeny do nového úložiště. S realizací však přicházejí stále další problémy, protože celý prostor úložiště se pomalu hroutí a finanční náklady jsou obrovské. Solný důl Asse se stal symbolem selhání geologicko-technického řešení, které nebylo v mnoha ohledech dořešeno. [24]

Obr. 5 - Sudy s radioaktivním odpadem v Asse [24]

V současné době je vyhořelé jaderné palivo a vysoce aktivní odpad skladován ve 3 centrálních skladech (Ahaus, Gorleben a Greifswald) a ve 12 skladech uvnitř areálu jaderných elektráren. HÚ je předmětem mnoha debat a počítá se s ním do roku 2030. Nejperspektivnější lokalitou byl zvolen bývalý důl na železnou rudu Konrad, avšak pouze pro odpady nevyvíjející teplo. Další lokality jsou předmětem zkoumání. [6, 9]

7.3 Švýcarsko

40 % elektrické energie zajišťuje 5 švýcarských jaderných reaktorů. Do roku 2005 bylo odesíláno vyhořelé palivo k přepracování do Francouzské La Hague. Jako centrální mezisklad slouží Zwilag a ten je zároveň závodem na zpracování RAO. Skladuje se zde jak vyhořelé palivo, tak vrácené vysoce aktivní odpady. [6]

Vyhledávání vhodné lokality se konkretizuje do 3 vytipovaných regionů v jílovcových horninových masivech. Konečnou likvidaci RAO má ve Švýcarsku na starosti organizace NAGRA (Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle).[6] Proces vyhledávání je rozdělen do 3 etap. V první fázi (2008 – 2011) se prováděl průzkum šesti oblastí, které mohly být vhodné pro vybudování bezpečného úložiště. Ve druhé fázi (která právě běží) dochází k podrobným výzkumům a vyjádření dotčených obcí a zástupců regionů. Na závěr dojde k výběru alespoň 2 vhodných lokalit. V poslední fázi se zvolí dle získaných poznatků nejlepší varianta. Předpokládá se, že HÚ by bylo uvedeno do provozu v roce 2040. [6, 25]

Podmínky výběru lokality pro HÚ jsou obsaženy v „sektorovém plánu“. Ten zajišťuje včasné zapojení kantonů, obcí a sousedních zemí. Veřejnost a zainteresované organizace musí být plně informováni a musí mít příležitost se účastnit při pojednávání HÚ.

Hlavní principy sektorového plánu:

- prioritou je bezpečnost lidí a životního prostředí;
- intenzivní spolupráce s dotřenými obcemi je zaručena;
- proces musí být transparentní. [25]

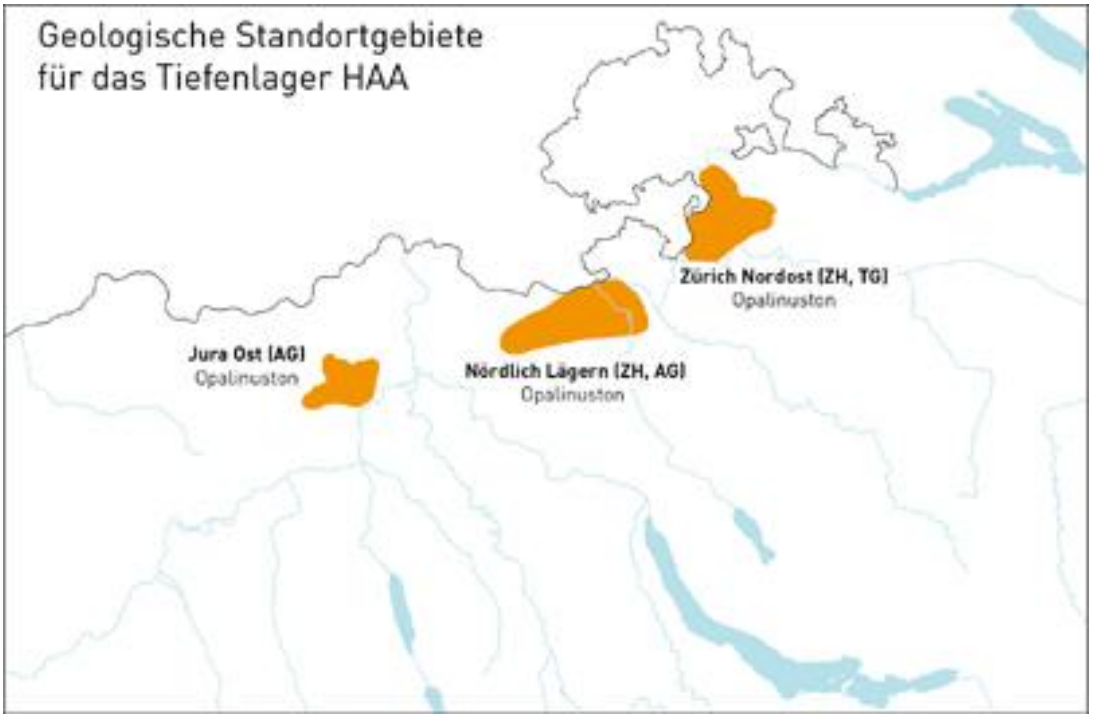
Návrhy pro HÚ od NAGRA:

- Südranden;
- Zürich Nordost;
- Nördlich Lägern;
- Jura Ost;
- Jura-Südfuss;
- Wellenberg.

[6]Nagra je úřad pro hospodaření s odpady – jde o obdobu organizace SÚRAO v České republice.

Švýcarsko se také potýká s negativními ohlasy ze strany veřejnosti. Vědomosti lidí hrají velkou roli při jednání i přístupu. Zástupci obcí, politických organizací i zástupci sousedního státu jsou členy „regionální konference“, která je pracovní a odbornou skupinou pro řešení otázek týkajících se HÚ. NAGRA pravidelně pořádá semináře a prohlídky jaderných zařízení, aby občané ztratili obavy.

Lokalita Jura Ost je zatím nejpravděpodobnější pro vybudování HÚ. Místní občané nejsou proti – v jejich okolí již funguje JE Beznau a centrální mezisklad Zwilag. [26]



Obr. 6 - Lokality pro umisťování vysoce aktivního odpadu [26]

Podzemní laboratoř Grimsel

Způsob jak dokázat, že HÚ bude bezpečné (nebo naopak nebezpečné), lze prokázat zkouškami v podzemních laboratořích. Zkoumají se vlastnosti přírodní bariéry, inženýrské bariéry a odolnost obalových souborů. Zkoušky probíhají v takových podmínkách, které by mohly nastat i v budoucím HÚ.

Švýcarská podzemní laboratoř Grimsel byla vybudována před 30 lety, z důvodu hledání potenciálního HÚ. To tu však nemůže být, protože zde dochází k pohybům horniny. Výzkumné experimenty probíhají v mezinárodní spolupráci (ČR je také zastoupena).

Probíhající výzkumy v laboratoři Grimsel[7]:

- transport a retardace RAO v žule;
- změny v hornině v důsledku hloubení tunelů a šachet;
- utěsňování vrtů a otvorů;
- pohyblivost plynů a vody v puklinovém systému;
- způsoby umisťování vitrifikovaných vysoce aktivních odpadů. [2, 26]

Obr. 7 - Model obalového soubor pro vysoce aktivní odpady – kontejnment v podzemní laboratoři Grimsel [vlastní]

[7] Švýcarsku se ve své práci věnuji rozsáhleji, protože jsem osobně navštívila jaderné zařízení (JE Beznau, mezisklad Zwilag). Také jsem absolvovala exkurzi do podzemní laboratoře Grimsel a debatu se zástupci možné lokality pro HÚ Jura Ost.

V následující tabulce jsou znázorněny další podzemní laboratoře, které jsou v současné době v provozu.

ZEMĚ	LOKALITA	HORNINA	DRUH EXPERIMENTU	UVEDENÍ DO PROVOZU
Belgie	Mol	Plastický jíl	T, H, C, M	1980
Kanada	LacduBonnet	Žula	T, H, C, M	1994
Finsko	Olkiluoto	Žula	H, M, D	1993
Francie	Bure	Jíl	T, H, C, M, D	1998
Japonsko	Horonobe	Jíl	T, H	2000
Švédsko	Äspö	Žula	T, H, C, M, D	1990
Švýcarsko	Grimsel	Žula	T, H, C, M, D	1983
	MontTerri	Břidlice	T, H, C, M	1995
USA	YuccaMountain	Tuf	T, H, C, M, D	2002

Tab. 1 - Některé v současnosti provozované podzemní laboratoře [2]

Vysvětlivky:

- T … Tepelné zkoušky;
- H … Hydrologické zkoušky;
- C … Chemické zkoušky;
- M … Mechanické zkoušky;
- R … Radiační zkoušky;
- D … Demonstrační zkoušky.

7.4 Finsko

Celkem 4 jaderné reaktory zajišťují 30 % veškeré elektrické energie ve Finsku. Pátý reaktor je ve výstavbě a počítá se i s dalšími. Vyhořelé jaderné palivo je skladováno v mokrých meziskladech přímo v areálech jaderných elektráren. Finsko společně se Švédskem patří mezi země, které nejvíce pokročily v oblasti HÚ.

O ukládání RAO se stará společnost POSIVA a jako vhodnou lokalitu zvolila Olkiluoto, nedaleko obce Eurajoki. HÚ už je zde ve výstavbě. Finský jaderný program je podobný českému, avšak uvedení HÚ do provozu se počítá již na rok 2022 a utěsnění úložiště by proběhlo podle současných plánu v roce 2120. Počítá se s ukládáním do granitoidního hornového masivu.

Zásadní rozdíl ve výběru vhodné lokality oproti ČR je v tom, že obce mají právo veta – tedy pokud obce nesouhlasí, nemůže je přehlasovat ani parlament. Názory obcí jsou respektovány a důvěru mezi státem a občany potvrzuje i mnoho anket o tom, zda lidé souhlasí s vybudováním HÚ. Např. v roce 2012 hlasovalo 65 % obyvatel pro, 30 % proti.

Celkové náklady na konečnou likvidaci použitého jaderného paliva z 5 reaktorů se odhadují na 3 miliardy €. [6, 30, 31]

Obr. 8 - Místo výstavby HÚ ve Finsku v lokalitě Olkiluoto [6]

7.5 Rusko

V Rusku se nachází 33 jaderných reaktorů v provozu. Rusko je průkopníkem výroby paliva MOX[8] pro rychlé reaktory a v dlouhodobých plánech má zahrnutou novou generaci rychlých reaktorů spalující MOX.

Některé země nabízejí k vybudování společného úložiště svoje území. Jednou z nich je Rusko (dále Čína nebo Kazachstán). Dle zákona však žádný stát nemůžu vyvážet RAO do jiného státu a musí jej zlikvidovat sám. Už v současné době však probíhají politické debaty, které by tuto podmínku mohly změnit.

Ruská vláda je připravena přijmout vyhořelé palivo. Zákon sice požaduje, aby byly výsledné odpady po přepracování vráceny do země původu, ale vláda chce předložit novelu zákona, který by umožnil trvalé uložení přepracovaného odpadu v Rusku. Pro mezinárodní úložiště Rusko zvažuje lokalitu Krasnojarsko a Krasnokamensko na Sibiři. [27]

Důvod, proč by Rusko chtělo zřídit společné úložiště je zřejmý. RAO mohou být v budoucnu velmi cennou surovinou a plutonium, které lze díky přepracování získat, je významné z hlediska vojenských účelů. [9]

Téměř všechny evropské i ostatní země preferují projekt HÚ. Jak bylo zmíněno, Finsko a Švédsko postoupili v realizaci nejdále – předpokladem pro to bylo nejen dobré technické a geologické zázemí, ale také důvěra obyvatelů vůči státu. Některé státy problematiku vzniklých odpadů odkládají a spoléhají na to, že bude umožněno vyvážet RAO do jiného státu, kde se o něj postarají.

[8]Mixed oxide (MOX) fuel je typ jaderného paliva, které vzniká přepracováním použitého paliva. Skládá se ze směsi UO2 a PuO2, tedy kromě dioxidu uranu také z dioxidu plutonia, které vzniká jako produkt jaderných reakcí v energetickém reaktoru. MOX palivo se vyrábí také z likvidovaných náplní nepoužitých jaderných zbraní. [28]

8 SCÉNÁŘE A BEZPEČNOSTNÍ ANALÝZY

Bezpečností bariéry v HÚ jsou navrženy podle příslušných parametrů a údajů, které se získávají prostřednictvím mnoha zkoumání, průzkumů nebo bezpečnostních analýz. Cílem je poskytnout představu o míře rizika, které by nastalo v případě úniku nebezpečných látek z HÚ. Získané informace je třeba analyzovat a zvolit vhodné opatření a bezpečnostní prvky k zamezení nehody či havárie.

8.1 Scénáře a bezpečnostní analýzy při provozu

Manipulační činnosti po trase přepravy radioaktivních materiálů v areálu HÚ představuje největší riziko úniku nebezpečných látek. Na základě toho vznikly scénáře pro bezpečností analýzy. V příloze P IV jsou uvedeny základní veličiny pro popis radioaktivních účinků.

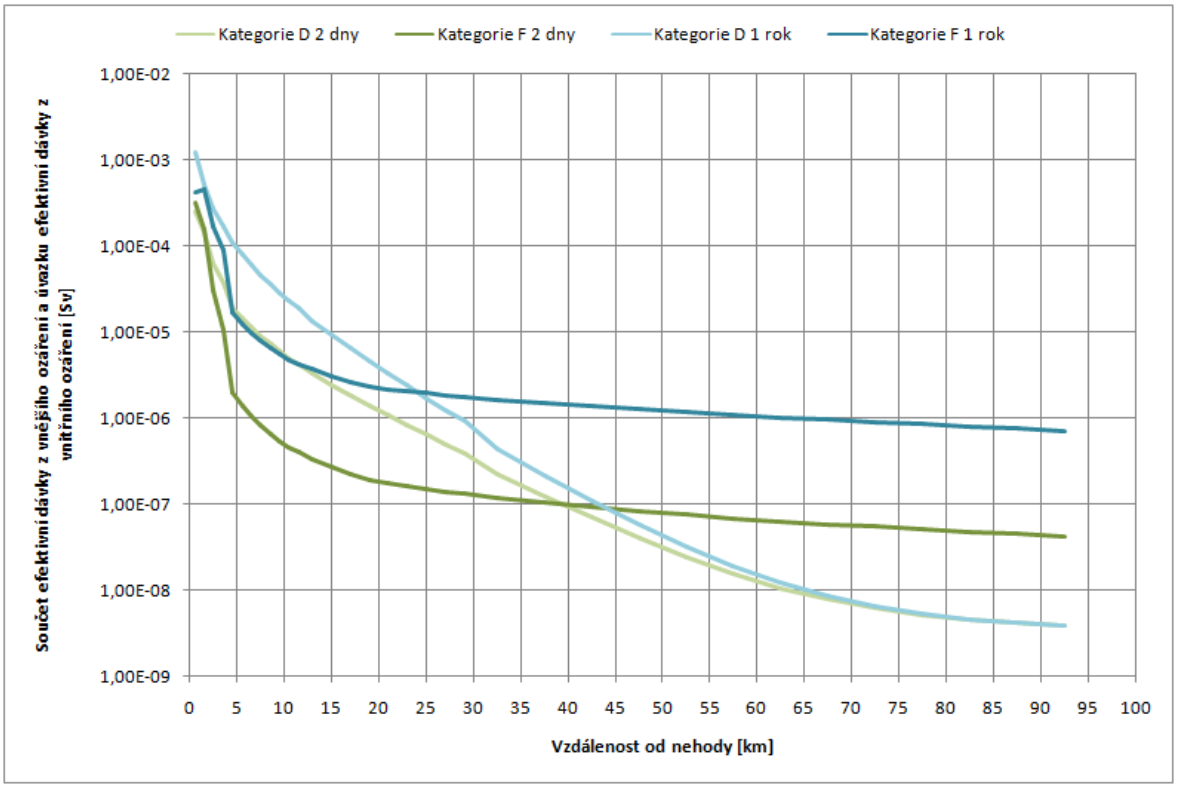
Dopravní prostředky převážejí obalové soubory ve vodorovné poloze. Až dorazí do areálu HÚ, jsou přivezeny do příjmové haly v překládacím uzlu. Zde se jeřábem dají do svislé polohy a čekají na přesun do horké komory. Tam se zkontroluje stav palivových kazet a v případě jejich poškození se přeloží do jiného ukládacího obalového souboru. V této fázi hrají nejdůležitější roli stav a typ vzduchových filtrů použitých v horké komoře. Pak následuje transport do podzemního pracoviště HÚ, kde se vytvoří superkontejner a ten je přesunut do místa trvalého uložení.

Stanoveny jsou 3 scénáře, kdy hrozí největší pravděpodobnost úniku radionuklidů do životního prostředí při provozu HÚ:

- nehoda během přepravy obalového souboru po areálu úložiště;
- nehoda v horké komoře;
- nehoda při přepravě ukládacího obalového souboru nebo superkontejneru do místa uložení. [6, 33]

8.1.1 Scénář nehody při přepravě uvnitř areálu

Tato nehoda může nastat v jakémkoliv úseku železniční či silniční trasy od odesílatele až po vnitřní areál HÚ. Konstrukční řešení obalových souborů musí splňovat předepsané podmínky tak, aby při případném porušení hermetičnosti byly minimální úniky, které nepřekročí přípustné normy dané zákonem.



Graf 1 - *Nehoda při přepravě uvnitř areálů [33]*

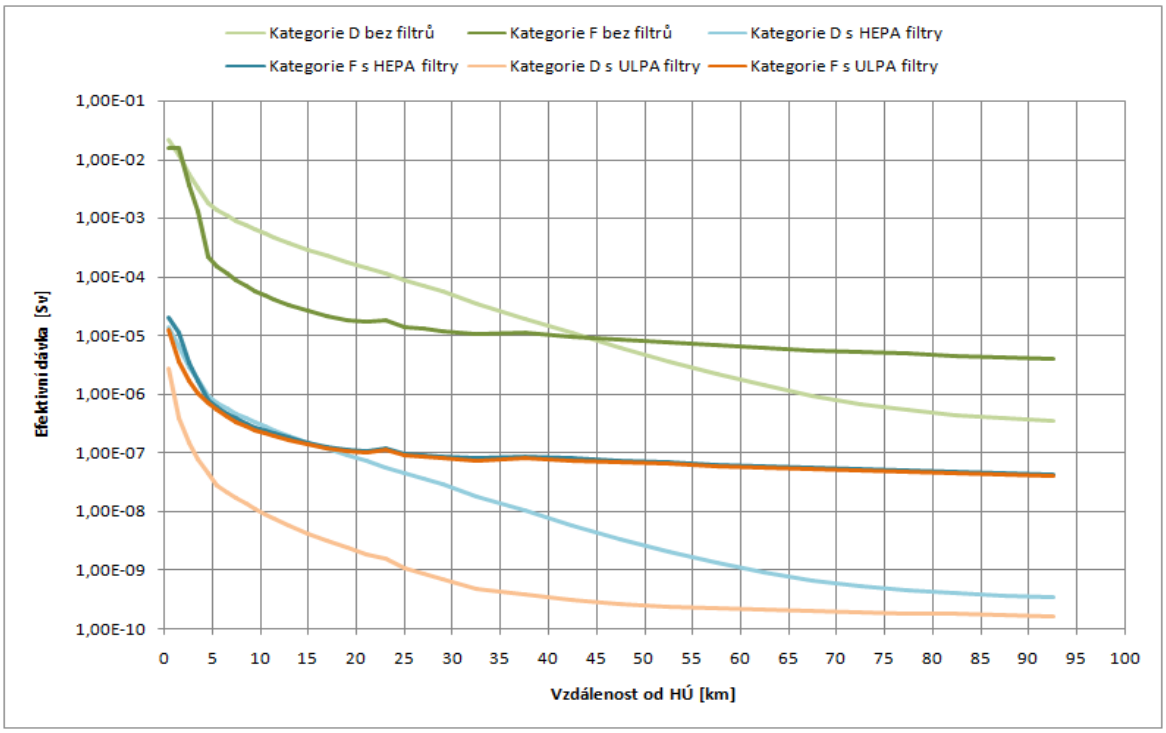
Z grafu, který byl vypracován pro výpočet radiačních důsledků vyplývá, že v případě nehody při transportu obalového souboru nebudou překročeny přípustné hodnoty ozáření osob, nacházejících se v blízkosti úložiště. Výpočet zohledňuje vzdálenost od místa nehody a meteorologické podmínky, které mohou únik radionuklidů ovlivnit (kategorie F – rychlost větru 2 m/s, srážky 0 mm/h; kategorie D – rychlost větru 5 m/s, srážky 10 mm/h). Největší efektivní dávka, která v případě nehody hrozí, je bezpečně pod hranicí hodnot pro zavedení opatření dle vyhlášky SÚJB 307/2002 Sb.[9]

8.1.2 Scénář nehody v horké komoře

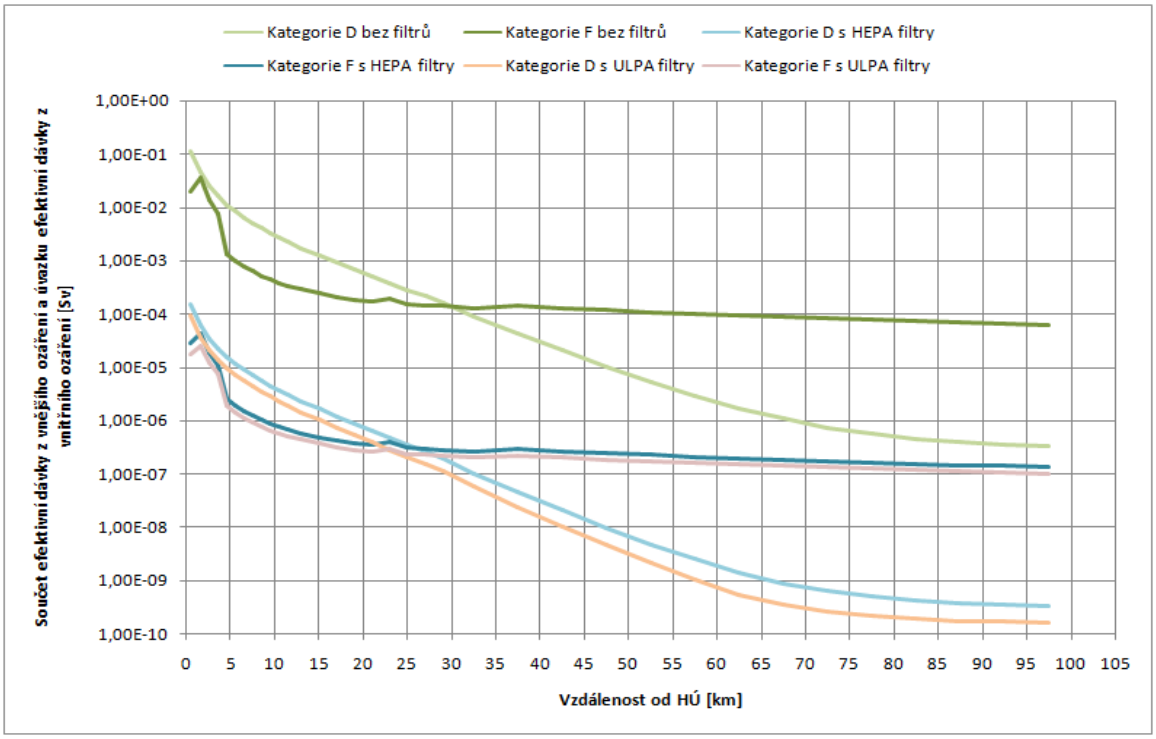
Jde o operace, které probíhají v horké komoře při manipulování s palivovými soubory. Pro případ situace, kdy dojde k uvolnění radionuklidů z prostoru poškozených palivových

[9] Obecné limity jsou pro součet efektivních dávek ze zevního ozáření a úvazků efektivních dávek z vnitřního ozáření hodnota 1 mSv za kalendářní rok nebo za podmínek stanovených v povolení k provozu pracoviště III. nebo IV. kategorie výjimečně hodnota 5 mSv za dobu 5 za sebou jdoucích kalendářních roků.
Pro pracovníky se zářením platí jiné limity: 50 mSv za kalendářní rok pro součet všech efektivních dávek a 100 mSv za 5 za sebou jdoucí kalendářních roků. [34]

tyčí, je horká komora vybavena systémem speciální vzduchotechniky, která udržuje podtlak a zajišťuje filtraci. K radiační nehodě by mohlo dojít souběhem několika vlivů, jako je selhání lidského faktoru, závady na zařízení a nedostatečného bezpečnostního řešení.



Graf 2 - Nehoda v horké komoře – integrační doba 2 dny [33]



Graf 3 - Nehoda v horké komoře – integrační doba 1 rok [33]

Analýza rozlišuje použité vzduchové filtry v horké komoře, které mají zásadní vliv na únik radionuklidů do životního prostředí. Dále zohledňuje meteorologické podmínky (kategorie F – rychlost větru 2 m/s, srážky 0 mm/h; kategorie D – rychlost větru 5 m/s, srážky 10 mm/h) a vzdálenost od HÚ. Graf 2 popisuje integrační dobu 2 dny a graf 3 integrační dobu 1 rok.

Výpočet ukázal potřebu použití účinných vzduchových filtrů. Při užití HEPA (high efficiency particulate air) nebo ULPA (ultra-low penetration air) filtrů ozáření osob v blízkosti HÚ nepřesáhne stanovené limity. Dávka ozáření by představovala maximálně 10 μSv.

8.1.3 Scénář nehody při přepravě ukládacího obalového souboru nebo superkontejneru do místa uložení.

Chyba obsluhy nebo porucha užívaných mechanismů a zařízení může vést k poškození ukládacího obalového souboru nebo superkontejneru na trase od horké komory do místa konečného uložení. Ukládací obalový soubor je navržen takovým způsobem, aby i při nevhodné manipulaci nebo nehody zachoval naprostou těsnost.

Kdyby tedy k takové nehodě došlo, nepředpokládá se, že by byla narušena těsnost vlivem deformace. Z toho plyne, že radiační důsledky na okolí nemohou v tomto případě nastat. Dávku ozáření přípustnou dle profesních dávek by mohl obdržet pouze pracovník při odstraňování vzniklé závady, a to z důvodu delšího pobytu v kontrolovaném pásmu.

8.1.4 Vyhodnocení

Z provedených analýz vyplývá několik oblastí, kde lze technologické zázemí zlepšit zavedením vhodných prostředků a opatření a snížit tak dopad na okolní prostředí případné radiační nehody. Je dokázána potřeba vzduchových filtrů, které jsou schopny zachytit velké množství radioaktivních látek. Minimalizování možnosti selhání lidského činitele je jedno ze základních opatření k redukci ohrožení z ozáření osob. K tomu by mělo sloužit zavedení dálkového řízení veškerých činností, spojených s manipulací s obalovými soubory. Z uvedených analýz lze odvodit, že ve vzdálenosti okolo 5 km od HÚ může být obdržená dávka několik desítek μSv, což nepředstavuje ohrožení osob. Při vzniku nehody by však byly důležité další aspekty, které mohou vzniknout a nelze je zcela předpokládat.

8.2 Scénáře dlouhodobého vývoje úložiště

Hlubinné úložiště bude muset zůstat bezpečné po dobu statisíců až milionu let. Je nutné počítat s mnoha vlivy, které ovlivní budoucí vývoj okolního prostředí a tedy i celého prostoru úložiště. Při analýze se musí porozumět všem událostem a procesům, které mohou nastat a ovlivnit bezpečnost ukládaných souborů. Nejdůležitější je znát geologický vývoj po dobu tisíců až statisíce let, protože v tu dobu bude mít uložený materiál nejvyšší podíl radioaktivity, která však postupně bude na základě poločasu rozpadu zanikat.

Po zaplnění úložiště se předpokládá, že s uloženým materiálem se již nebude manipulovat a úložiště bude uzavřeno. Pouze v případě poškození by musely nastat opravy. Obalové soubory na bázi mědi by měly zůstat neporušené po dobu statisíců až milionu let. Obalové soubory z oceli mohou zůstat bez poškození na dobu tisíců až statisíců let. V případě narušení obalu brání rychlému úniku nebezpečných látek další ochranné bariéry. Při celkovém poškození by se začaly radionuklidy pomalu uvolňovat do okolního horninového prostředí a puklinami až do podzemních a povrchových vod. Tam by se po dlouhé migraci zředily na zanedbatelnou úroveň - dle předpokladu.

Screeningové výpočty

Popisují pouze základní procesy, které vedou k uvolnění radionuklidů do životního prostředí. Umožňují vytvářet scénáře na základě posouzení znaků, událostí a procesů, které jsou hlavním podkladem pro hodnocení chování systému. Každý scénář je následkem iniciující události a to, jak probíhá je důsledek souboru znaků, událostí a procesů, které přímo či nepřímo ovlivňují únik nebezpečných látek. Popis je však velice zjednodušený a lze ho využít spíše pro srovnání než pro kritické hodnocení. [6]

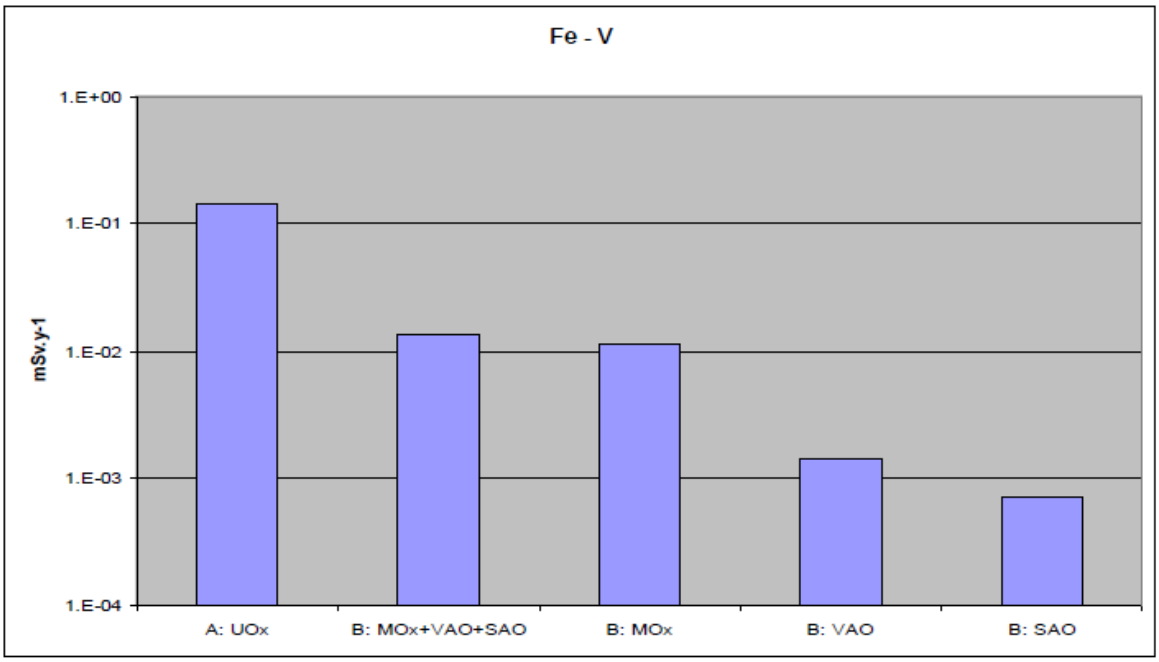
Výpočetní kód GoldSim

Komerční, numerický výpočetní kód GoldSim byl vyvinut v USA. Jde o flexibilní a účinný nástroj, který slouží pro vytváření bezpečnostních rozborů a rizikových analýz. Využívá se pro modelování HÚ v Yucca Mountain i v dalších zemích. GoldSim umožňuje modelování i velice složitých systému se zachováním přehlednosti. Výsledky získané tímto kódem však nejsou o moc přesnější než screeningové výpočty. Pro problematiku HÚ nejsou k dispozici přesné informace, protože ještě nebylo provedeno dostatečné množství průzkumů, a tudíž je problém přesně analyzovat možná rizika. [33]

Následující část je zaměřená na alternativní scénáře, které by mohly v budoucnu nastat a ovlivnit životní prostředí i obyvatelstvo. Pravděpodobnost jejich výskytu je však pro současnou dobu zanedbatelná.

8.2.1 Screeningový model pro standardní scénář vývoje úložiště

Výpočet byl proveden pro základní vývoj úložiště, při kterém se nepředpokládá žádná mimořádná událost (např. zemětřesení). Pro posuzování byly stanoveny stejné podmínky inženýrské i přírodní bariéry. Graf popisuje srovnání efektivní dávky pro různé varianty ukládání VJP (A: UOx – otevřený cyklus, přímé uložení paliva, B: MOX, VAO, SAO – uzavřený cyklus s přímým uložením paliva typu MOX, vitrifikovaného odpadu (VAO) a středně aktivních odpadů (SAO).

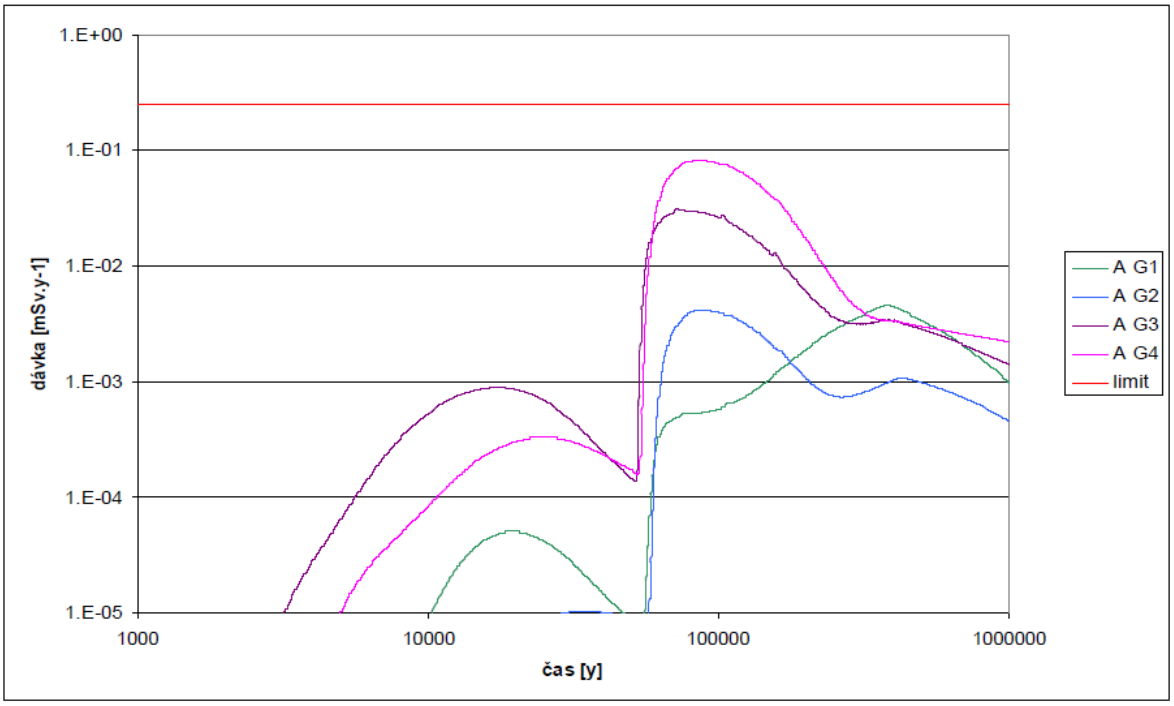


Graf 4 - Srovnání maximální efektivní dávky různých variant ukládání VJP. [33]

Výsledek analýzy ukazuje, že ani v případě přímého uložení VJP nebo uložení jeho zbytků po přepracování nebude překročena mez pro bezpečné ukládání RAO. Po přepracování paliva se však bezpečnost zvýší až o 2 díly oproti původnímu VJP.

8.2.2 Výpočet dlouhodobé bezpečnosti úložiště pomocí kódu GoldSim

Hypotetická lokalita byla charakterizována 4 preferenčními cestami podle variant geosféry (G1 – G4), které se liší délkou, dobou toku, přítokem do geosféry a odtokem z geosféry. Výpočet určuje možný únik radionuklidů v závislosti na čase a hydrogeologických podmínkách ve zvoleném horninovém masivu.

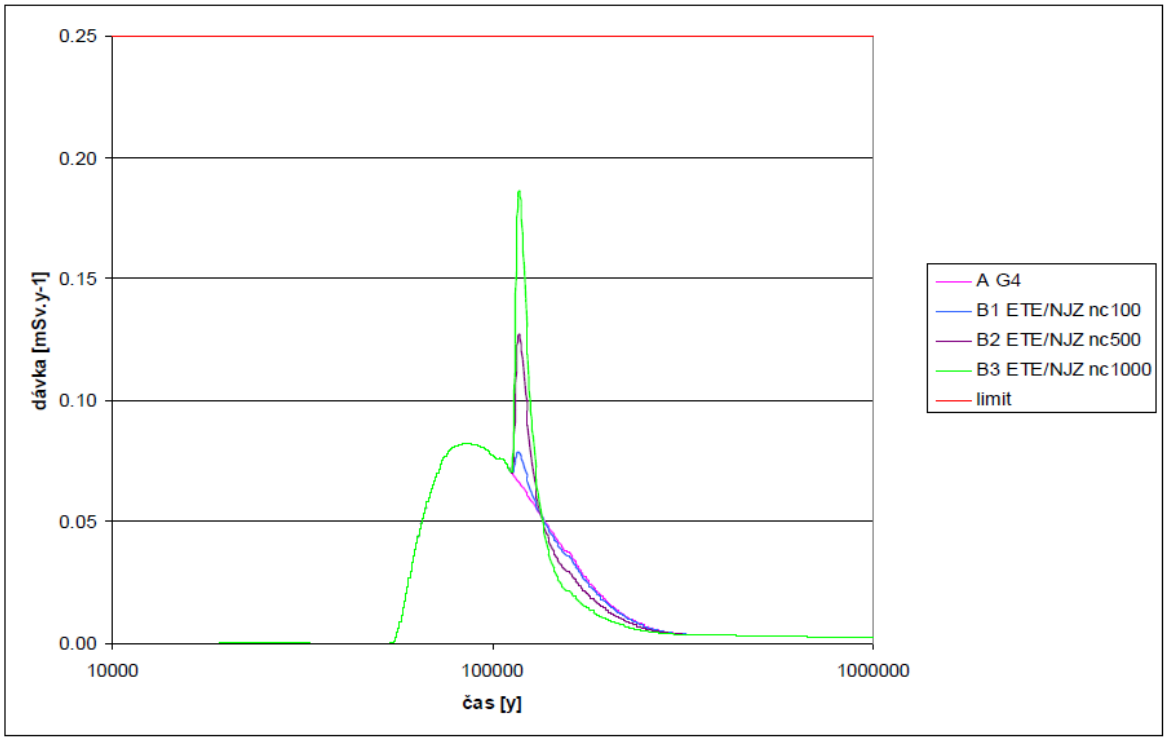


Graf 5 - Výpočty dlouhodobé bezpečnosti úložiště s VJP. [33]

Z grafu lze vyčíst, že podmínky pro ukládání nepřekročí optimalizační mez 0,25 mSv/rok při normálním vývoji HÚ. Musí být však zachována životnost obalových souborů, s důrazem na těsnící vlastnosti systému po celou dobu uložení. Nejkritičtějším obdobím bude uplynutí asi sto tisíc let pro zachování bezpečnosti úložiště.

8.2.3 Vliv zemětřesení na bezpečnost hlubinného úložiště

Seismicita má zásadní vliv na stabilitu prostředí. HÚ musí být vystavěno jen v lokalitě, která není zemětřesením ohrožena. Pravděpodobnost výskytu zemětřesení v ČR je nízká. Avšak za dobu statisíců let může být situace jiná. Nejhorší doba, kdy by zemětřesení způsobilo největší ohrožení je kolem doby uložení 100 tis. let, kdy se předpokládá poškození značného množství obalových souborů z důvodu životnosti.

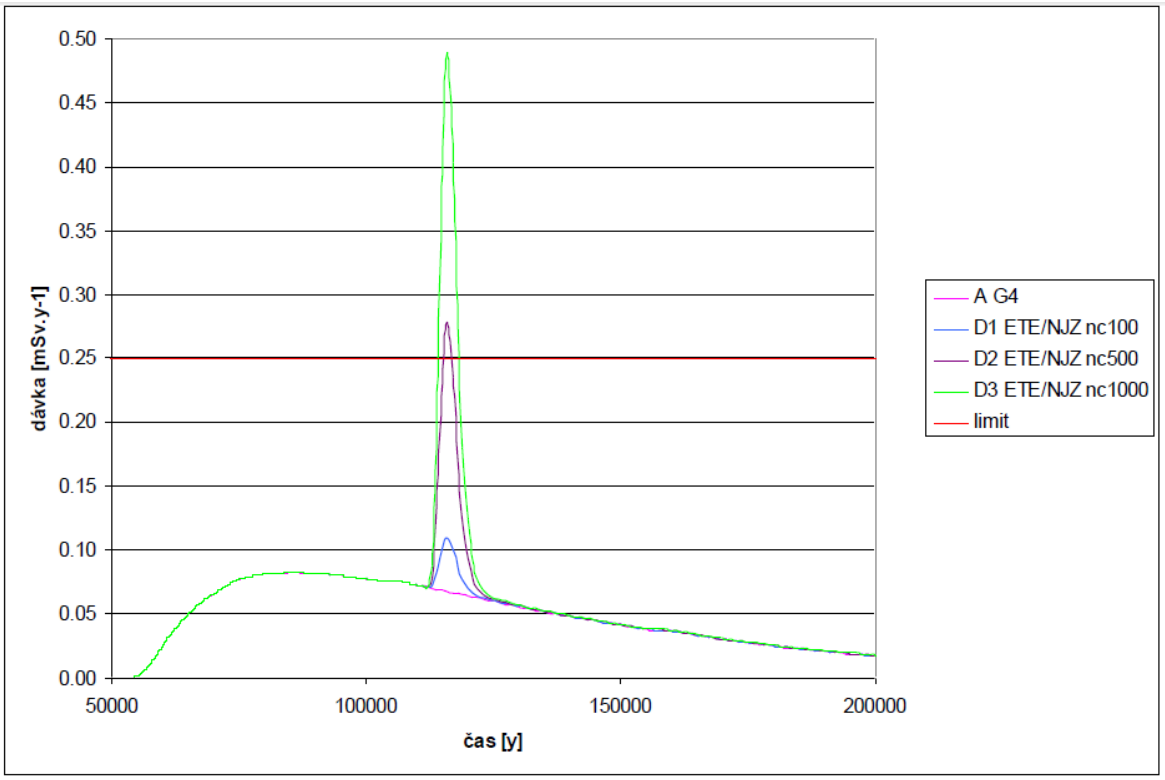


Graf 6 - Vliv zemětřesení na bezpečnost HÚ. [33]

V grafu jsou prezentovány účinky zemětřesení vedoucí k okamžitému poškození ukládacích obalových souborů v HÚ. Osy znázorňují poškození 100 až 1000 obalových souborů v jednom roce. Při výpočtech se zvažuje nejhorší preferenční cesta proudění podzemní vody (G4). Výsledky ukazují nepřekročení optimalizační meze pro bezpečné uložení RAO 0,25 mSv/rok.

8.2.4 Vliv zemětřesení na bezpečnost hlubinného úložiště při použití nevhodných inženýrských bariér

Nejhorší dopad na bezpečnost HÚ může mít použití nevhodných inženýrských bariér, které nebudou zajišťovat svoje bezpečnostní funkce. Špatně provedený nebo nedostatečný výzkum může mít za následek nesplnění podmínek pro dlouhodobé ukládání.



Graf 7 - *Vliv zemětřesení na bezpečnost HÚ při nefunkčnosti těsnícího systému. [33]*

Při simulované situaci zemětřesení se poškodí obalové soubory i bentonitový systém. Poškození způsobí průnik radionuklidů přes poškozený bentonit do okolního prostředí a tím bude překročena optimalizační mez už při selhání 500 obalových souborů. Graf znázorňuje dávku při porušení 100 – 1000 souborů. Tento scénář by však mohl nastat pouze v důsledku souběhu několika příčin, jako je nevhodný typ bentonitu, nevhodně zvolený úložný prostor apod.

8.2.5 Vyhodnocení

Další scénáře je velice obtížné vyhodnocovat z důvodu ne zcela známých podmínek pro ukládání. Existuje celá řada nejistot a v současné době nejsou k dispozici konkrétní údaje a parametry HÚ, protože lokalita ještě nebyla vybrána a ani neproběhl geologický průzkum. Pro scénáře byla zvolena pouze hypotetická lokalita. Analýzy však ukazují, že životní prostředí ani obyvatelstvo nebude ohroženo, budou-li splněny funkce inženýrských a přírodních bariér. Avšak v případě vzniku mimořádných událostí je bezpečnost značně ohrožena.

8.3 Dílčí závěr

Bezpečnostní rozbory musí být provedeny nejen pro provozní dobu, ale i na dobu po uzavření úložiště. Cílem je zjistit, jaké množství radioaktivních látek by mohlo uniknout v případě nehody do biosféry a ohrozit tak obyvatelstvo nebo životní prostředí.

Při vytváření scénářů se nejprve shromáždí dostupná data a následně vyberou vhodné výpočetní modely. Identifikují se kritické cesty, kterými by se radionuklidy mohly dostat k člověku a způsobit tak ozáření. Na základě toho se určí, zda je systém bezpečný či nikoliv. V případě negativního výsledku je nutnost zavést další bezpečnostní bariéry a prvky, a také zpřesnit vstupní data výpočetních modelů.

V případě HÚ se vyskytuje mnoho nejistot zejména v dlouhodobých časových horizontech, o kterých v současnosti existují pouze nedokonalé představy. Jde o nedostatečné geologické znalosti o vývoji lokality, nedostatečně popsané procesy apod. Při realizaci HÚ se tedy musí brát ohled i na možný vznik mimořádných událostí, které ohrožují bezpečnost HÚ ve velké míře.

9 VYHLEDÁVÁNÍ VHODNÉ LOKALITY PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ

Projekt hlubinné úložiště existoval již v 80. letech minulého století. Prakticky nedlouho poté, co byly uvedeny do provozu JE v ČR. Od té doby došlo k mnoha pokrokům díky provedeným studiím, které se zaměřovaly na zkoumání lokalit z několika hledisek.

- **geologický výzkum** – výběr vhodné hostitelské horniny pomocí nejrůznějších disciplín, jako geologie, geotechnika, geofyzika, geochemie nebo hydrogeologie;
- **výzkum inženýrské bariéry** – zaměřený na vlastnosti výplňových matriálů;
- **výzkum bezpečnostních aspektů** – rozbory, modelování, testování;
- **projekční práce** – konstrukční řešení úložného systému;
- **přijatelnost lokality veřejností.** [2]

1. FÁZE - GEOLOGICKÝ VÝZKUM	
1990 – 1993	Český geologický ústav navrhuje 27 oblastí doporučených k dalšímu výzkumu.
1990 – 1998	ÚJV Řež vybírá 13 nejvhodnějších oblastí a provádí shromažďování a analýzu archivovaných geologických informací. Zužuje výběr na 5 oblastí, ve kterých je vytipováno 8 lokalit.
2002 – 2003	SÚRAO navazuje na předešlé práce a provádí regionální výzkum dle doporučení MAAE. Dle nových kritérií navrhuje 11 lokalit.
2003 – 2005	SÚRAO uzavírá etapu výzkumu a vybírá 6 nejvhodnějších lokalit, na kterých vymezuje potenciálně vhodné horninové prostředí. Zpracovány jsou i studie o proveditelnosti povrchového areálu.
2005 – 2009	Vláda ČR rozhoduje o přerušení prací v 6 zkoumaných lokalitách v důsledku negativních postojů dotčených obcí. Zahájen geologický výzkum v 5 vojenských újezdech – účel méně konfliktní území.

Tab. 2 - Výběr lokalit - geologický výzkum [6, 29]

2. FÁZE – GEOLOGICKÝ PRŮZKUM	
2010 – 2015	Zahrnuje podrobné geochemické a geofyzikální mapování. Cílem vytvořit geologickou mapu lokality a navrhnout místo pro hluboký vrt. Především však určit prostor pro budoucí ukládání RAO v hloubce 500 – 600 m a o ploše 3 – 5 km². Souběžně se zpracuje technické řešení povrchového areálu, podzemního areálu a jejich propojení. Lokalita bude potvrzena technickým řešením a bezpečnostním hodnocením.
2016 - 2020	Ověření vhodnosti pro projektové umístění HÚ, zpracování studie proveditelnosti HÚ, zpracování studie zadávací bezpečnostní zprávy HÚ. Zpracování dokumentace pro zvláštní zásah do zemské kůry pro HÚ.
2020 – 2025	Potvrzení vhodnosti lokality na základě vrtných prací, výzkumu hornin a dalších výzkumných prací. V případě, že hlavní lokalita nebude splňovat předpoklady, bude zkoumána záložní lokalita.
2025 – 2050	Počátek fáze podrobného průzkumu a výstavba podzemní laboratoře. Cílem je prokázat bezpečnost lokality dle získaných dat, aby mohlo být požádáno o povolení k výstavě hlubinného úložiště.
2050 – 2065	Zahájení výstavby podzemního komplexu, povrchového areálu a uvedení do provozu.

Tab. 3 - Výběr lokalit - geologický průzkum [6, 29]

Výběr vhodné lokality je dle koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem rozdělen do několika časových období, které jsou znázorněny v předchozích tabulkách. Některé fáze se mohou zpožďovat v závislosti na probíhajících průzkumech.

Základní rámec výběru vhodné lokality:

- průzkum i případná výstavba hlubinného úložiště musí znamenat pro obce přínos;
- obce se dobrovolně účastní výběru vhodné lokality;
- obce musí mít dostatek nástrojů i pravomocí účinně hájit své zájmy;
- proces musí být transparentní a demokratický.

Zvažované lokality

V současné době probíhají výzkumy na 7 lokalitách, které by mohly vyhovovat podmínkám pro výstavbu hlubinného úložiště. SÚRAO, která má za úkol výběr vhodné lokality realizovat se však potýká s odporem veřejnosti, tedy obyvateli dotčených obcí.

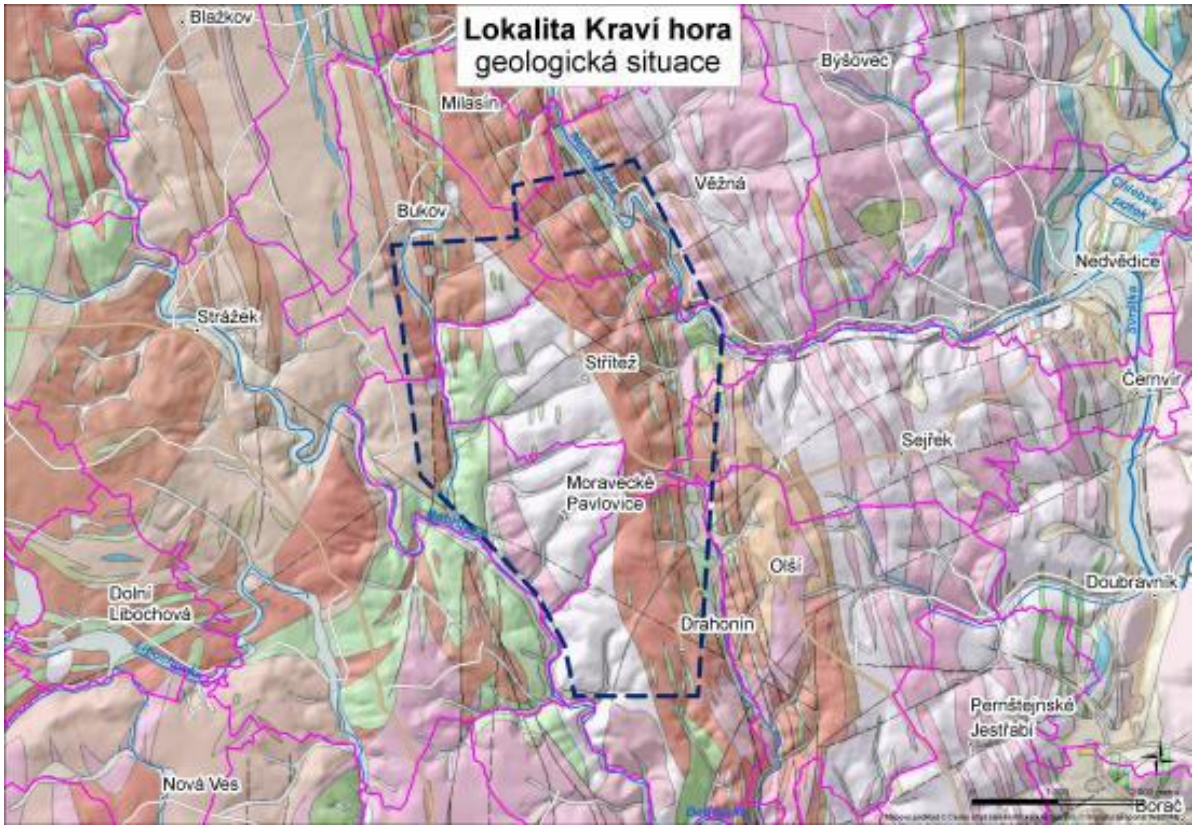
Kraví hora	Čihadlo	Březový potok	Hrádek	Magdaléna	Čertovka	Horka

Tab. 4 - Lokality pro hlubinné úložiště [vlastní]

Ve své práci se dále zaměřím na lokalitu Kraví hora, které se budu věnovat podrobněji. Kraví hora byla přidána na seznam vhodných lokalit jako poslední a to v roce 2011. Zároveň je to oblast, ve které sice výzkum postoupil nejdále, ale projevily se zde důsledky pochyb a nedůvěry občanů vůči státu, které pro realizaci HÚ mohou být fatální.

10 LOKALITA KRAVÍ HORA

Území Kraví hora je jednou z navrhovaných lokalit pro vybudování HÚ. Nachází se na Českomoravské vrchovině, v kraji Vysočina. Zasahuje na území obcí Bukov, Věžná, Střítež, Moravecké Pavlovice, Drahonín, Olší a Sejřek.



Obrázek č. 10 – Lokalita Kraví hora [6]

Masiv tvořený moldanubickými horninami byl na základě vyhodnocení geologických, geografických, morfologických, dopravních a technických podmínek zvolen jako vhodná oblast. Umístění areálu je provozně a technicky vyřešeno tak, aby navazovalo na podzemní sklad vyhořelého jaderného paliva Skalka. Odtud by byl vytvořen spojovací tunel pro přesun kontejnerů do HÚ. [32]

V případě uskutečnění projektu by šlo o oblast, kde se bude nacházet nejen komplex HÚ, ale také plánovaný zásobník plynu, uranové doly, chemická úpravna uranu a skládka odpadu v Bukově.

10.1 Základní údaje

Hloubka umístění úložných prostor	500 m
Horninový masiv	Krystalinické horniny
Střední teplota zemského povrchu	10°C
Předpokládaný tlak okolního materiálu na ukládací pouzdro	20 MPa
Přeprava obalových souborů	Železniční a silniční doprava

Tab. 5 - Základní údaje HÚ Kraví hora [vlastní]

Ukládaný inventář v HÚ:

- nepřepracované VJP provozovaných JE;
- nepřepracované VJP z nových jaderných zdrojů;
- vysoko aktivní odpad z přepracování VJP z výzkumných reaktorů;
- RAO nesložitelné v povrchových úložištích;
- odpady vzniklé vlastním provozem HÚ. [32, 33]

10.2 Povrchové areály hlubinného úložiště

Nadzemní část HÚ musí obsahovat objekty, které zajistí přípravu a ukládání VJP a RAO (včetně jejich technického zázemí), těžební činnost (včetně technického zázemí), zajištění pobytu pracovníků, administrativu, informační služby a provoz nadzemního i podzemního areálu (komunikace, inženýrské sítě, fyzickou ochranu areálů apod.). Geomorfologie terénu a projektované využití již dříve provozovaných průmyslových areálů rozděluje nadzemní areály do následujících částí.

Areál Střítež - zaměří se na přípravu VJP k ukládání v přímé závislosti na centrální sklad VJP Skalka. Zajistí přívod energie a čistý vzduch, dopravu obsluhy a odvádění vyčištěné vody. Dále bude provozovat informační středisko.

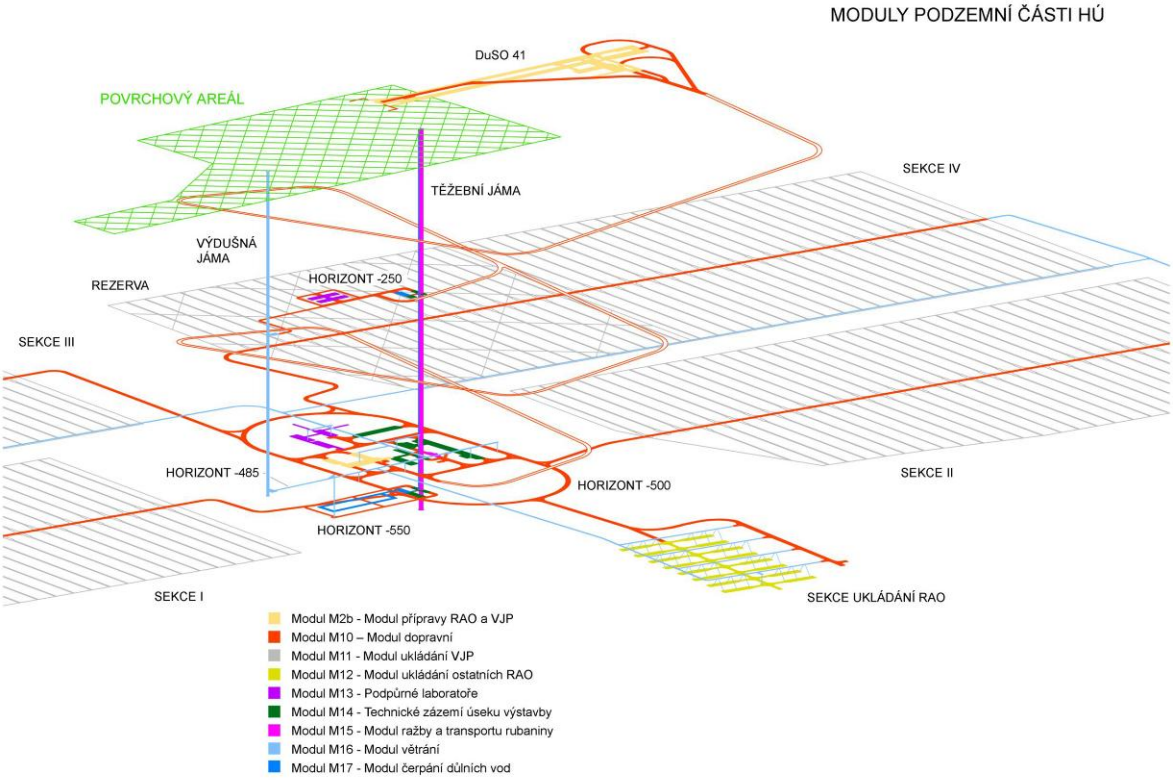
Areál Kraví hora – Olší – bude sloužit pro hornické práce, které mají souvislost s výstavbou HÚ Kraví hora a výrobu bentonitových prvků těsnění.

Areál větracího komína VK – Teplá – jeho úkol bude odvětrávání podzemního areálu.

Centrální sklad vyhořelého jaderného paliva – Skalka – umožní transport kontejnerů s využitím zavážecího tunelu. [32]

10.3 Podzemní stavba hlubinného úložiště

Podzemní prostory tvoří víceúrovňové důlní dílo, které se skládá z několika částí. Jde o prostory přípravy RAO a VJP pro uložení, včetně překládacího uzlu a horké komory. Další částí v hloubce 250 m jsou objekty pro přečerpávání důlních vod na povrch a podzemní laboratoř. Sekce pro ukládání VJP, komory pro ostatní RAO, centrum přípravy superkontejnerů, úsek výstavby HÚ i úsek uklání je situován v hloubce 500 m. Poslední část v hloubce 550 m tvoří čerpací stanice důlních vod a žumpovních chodeb.



Obr. 9 - Moduly podzemní části HÚ [33]

10.4 Systém fyzické ochrany

Dle vyhlášky č. 144/1997 Sb., o fyzické ochraně je areál rozdělen do menších částí, aby mohla být lépe zajištěna radiační bezpečnost. Celý areál je soustředěn do 4 základních území, ze kterých jsou vedeny důlní stavby. Střežené prostory budou Areál Střítež a areál větracího komína VK – Teplá. [32, 33]

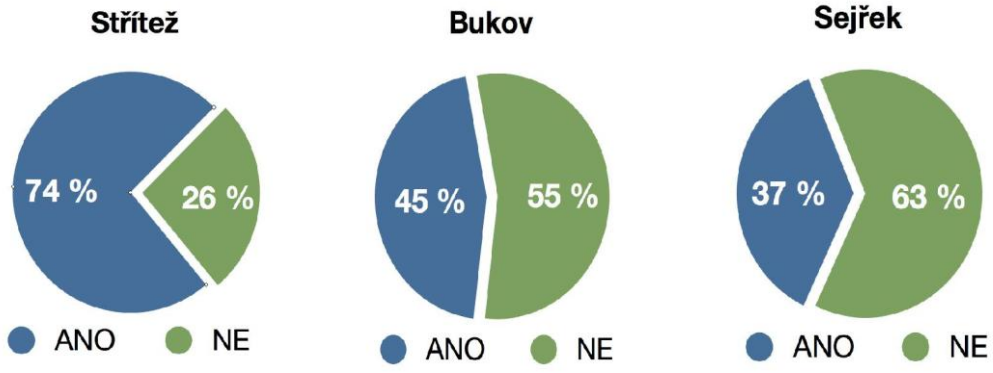
11 PŘÍSTUP SPRÁVY ÚLOŽIŠŤ K DOTČENÝM OBCÍM V LOKALITĚ KRAVÍ HORA

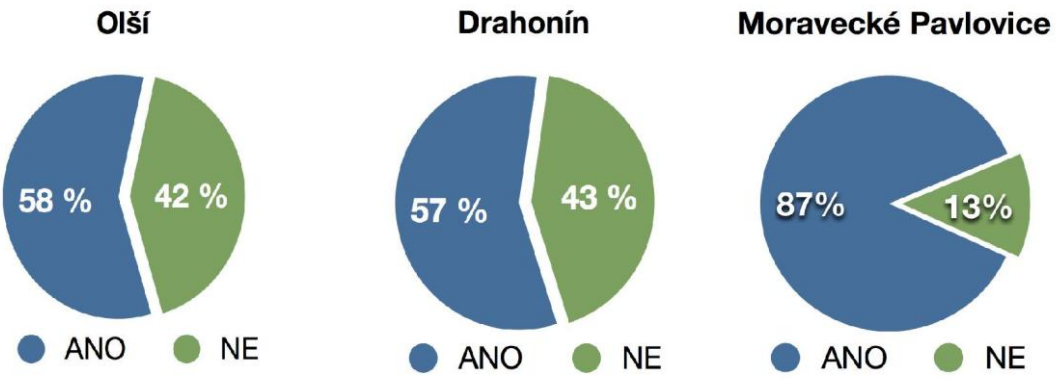
Kraví hora se stala součástí vhodných lokalit pro HÚ jako poslední v roce 2011. V dotčených obcích probíhalo mnoho debat a školení o problematice konečné likvidace RAO. Obyvatelé měli také možnost navštívit jaderné zařízení v ČR (povrchová úložiště i jaderné elektrárny) a zástupci obcí mohli vycestovat i do zahraničí a seznámit se s podmínkami nakládáním s RAO ve Švýcarsku, Finsku, Maďarsku a dalších státech Evropské unie. Všechny tyto exkurze a podávání informací zajišťuje SÚRAO a usiluje tím o přiblížení problematiky HÚ zastupitelstvu obcí i občanům.

Na druhé straně bylo založeno občanské sdružení Nechceme úložiště Kraví hora, které usiluje o zastavení všech prací, které by vedly k vybudování HÚ v lokalitě Kraví hora. Dále usiluje o transparentnost ze strany SÚRAO, aby informovanost obyvatel byla úplná, ne pouze částečná.

11.1 Průběh získávání souhlasu od obcí

Zpočátku se SÚRAO nepotýkala s problémy při provádění výzkumu. Lidé o tuto záležitost nejevili zájem. Až při vyslovení, zda souhlasí s provedením průzkumu, nastal problém. Zejména obavy z toho, že vyslovení souhlasu pro průzkum znamená vyslovení souhlasu pro vybudování HÚ. SÚRAO tedy dotčeným obcím přislíbila finanční kompenzaci za provedení průzkumných prací. Tato záležitost ovlivnila celý proces výběru lokality. Avšak stále byla nutnost provést referendum nebo ankety o vyjádření souhlasu občanů. Výsledky jsou uvedeny v následujících grafech.





Graf 8 – Výsledky anket a referend v dotčených obcích lokality Kraví hora [29]

V Bukově proběhlo referendum s výsledkem zamítnutí smlouvy. V obci Věžná referendum nebylo platné z důvodu nízké volební účasti a zastupitelstvo tedy odhlasovalo, že smlouvu se SÚRAO nepodepíše. V ostatních obcích proběhly ankety, které ukazují na všeobecný souhlas se stanovením průzkumného území a s geologickými pracemi vedoucími k nalezení lokality pro vybudování HÚ, ale velká část obyvatelstva je stále zásadně proti.

11.2 Zapojení státního podniku GEAM

SÚRAO slíbila, že nepodá žádost o provedení průzkumu bez souhlasu dotčených obcí. Po prohraném referendu v Bukově tedy státní podnik GEAM (odštěpný závod státního podniku DIAMO) podal žádost o provedení průzkumu namísto SÚRAO, a tím došlo k porušení všech základních slibů a podmínek dané SÚRAO. Občané ztratili důvěru a i možnost se vyjadřovat. Jednání o průzkumu lokality probíhá nyní pouze mezi starosty a podnikem GEAM. [22, 29]

Tímto jednáním byly porušeny základní principy výběru lokality - transparentnost, demokracie a účast obcí na výběru lokality.

11.3 Změny podmínek Správy úložišť

Základní problém v přístupu SÚRAO (tedy státu) k obyvatelstvu je v tom, že občané ztratili důvěru vůči státu a nevěří, že by byl projekt realizován tak, jak je předkládán v projektové verzi. Dochází k ovlivňování veřejného mínění a stále se mění podmínky pro provedení průzkumu a realizace. Když se uzavře jedna cesta, provede se změna a vytvoří se cesta nová. Změna pravidel probíhá neustále a občané o nich často ani nevědí.

Kraví hora je první lokalitou, ve které se naskytl někdo, kdo argumentuje proti SÚRAO – tedy sdružení Nechceme úložiště Kraví hora. To také vydalo petici k transparentnímu a demokratickému výběru lokality pro hlubinné úložiště RAO.

V současné době se čeká na vyjádření Ministerstva životního prostředí o provedení průzkumu lokality Kraví hora, kterou podal podnik GEAM. V ostatních lokalitách je zatím fáze připomínek a debat.

12 ZHODNOCENÍ VÝBĚRU LOKALIT A DOPORUČENÍ PRO ZLEPŠENÍ

Projekt HÚ je v současné době plný nejistot a neurčitostí. Je nutné provést podrobné zkoumání a průzkumy všech dostupných lokalit, kde by HÚ mělo vyhovující podmínky pro udržení bezpečnostních bariér a získat tak konkrétní data, které jsou pro posouzení nezbytná. Postupné upřesňování podmínek a jejich aplikace do projektu může vést k optimálnímu řešení konečného uložení RAO (z bezpečnostního, technického i ekonomického hlediska).

12.1 Výběr geologického prostředí a použitých materiálů

Při posuzování vlivu HÚ na okolní prostředí je nutné hodnotit události, které mohou nastat v průběhu statisíců let, což je téměř nemožné s určitostí odhadnout. Je nutná spolupráce mnoha odborníků z různých vědeckých odvětví, aby posoudili bezpečnost nejen horninového masivu, kde se HÚ vybuduje (např. trhliny), ale také vést výzkumy zabývající se výběrem vhodných materiálů využívaných v HÚ.

V projektu se vychází z využívání tuzemských surovin. V případě bentonitu probíhají výzkumy zabývající se jeho podrobnými vlastnosti, ale ne jeho působením na ostatní prvky systému. Tedy vzájemné působení jednotlivých prvků ochrany (např. působení korozí). Důležité je využívání spolupráce s dalšími státy, které mohou mít více poznatků a případně prostředků pro zkoumání. [33]

12.2 Vliv veřejnosti

Jeden z nejdůležitějších prvků, pro výběr lokality je souhlas veřejnosti a transparentnost celého výběru. Tento princip je dán přímo v závazcích SÚRAO, avšak není dodržován (popsáno v kapitole 10). Dochází k cílenému ovlivňování veřejného mínění.

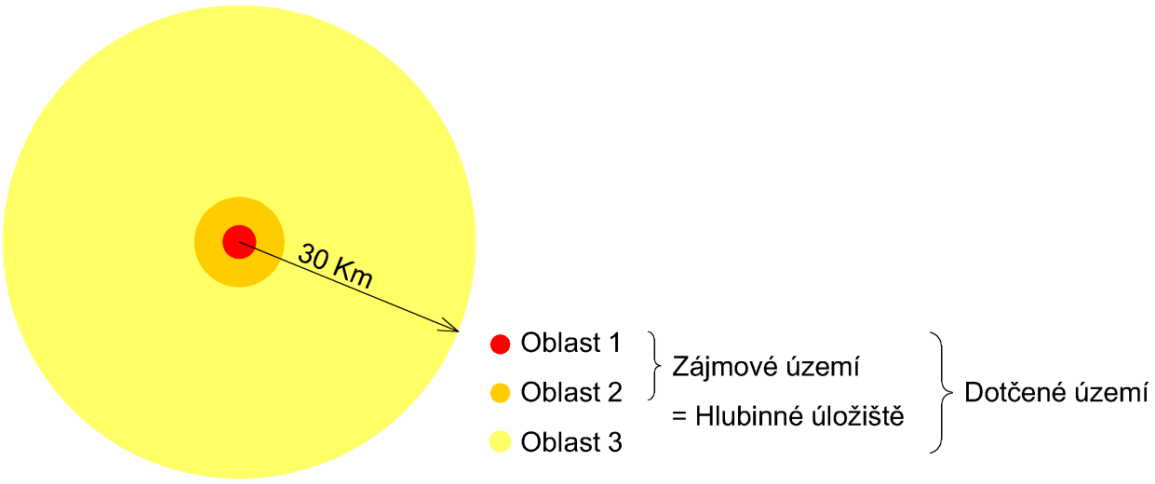
Zásadní problém je rozdíl mezi možností se vyjádřit a účastníkem řízení. V legislativě je přesně stanoveno, kdo je účastník řízení – ostatní se mohou pouze vyjádřit, ale jejich názor nemusí nic znamenat (viz jednání firmy GEAM). Některé obce nemají ani právo se vyjádřit, natož mít nějaké nároky. Přitom jsou k území HÚ mnohem blíže než samotné dotčené obce. To by se mělo zásadně změnit. Otázka uložení RAO je podstatná pro celou ČR, protože na celém území se nachází původci těchto odpadů. Proto by měla být větší možnost zásahu do výběru lokality veřejností (např. referendum nebo právo veta). Ankety a refe-

renda v jednotlivých obcích sice proběhly, ale v době, kdy obyvatelstvo nemělo prakticky žádné znalosti z této oblasti a bylo pouze ovlivněno informacemi poskytnutými SÚRAO. [29]

Před předáním projektu podniku GEAM byla komunikace mezi SÚRAO a obyvatelstvem na slušné úrovni, avšak po této události byly ztraceny veškeré naděje na čestné jednání. Obyvatelstvo dotčených obcí nemá důvěru vůči státu a obavy z toho, jakým způsobem bude realizována zakázka a jakou firmou je dle mého názoru opodstatněná.

12.3 Dopad na životní prostředí

Velká nevýhoda ČR je v tom, že je hustě osídlená a prakticky se nenajde potřebné území, které by nezasahovalo do katastrálních území obcí. Příprava HÚ bude spojena s řadou průzkumných prací (např. vrty) a výstavba areálu bude dlouhodobý proces, při kterém se bude těžit zemina i hornina – široké okolí bude ovlivněno prachem, hustou dopravou a průmyslovou činností. Dlouhodobý dopad na životní prostředí je otázkou.



Obr. 10 - *Schéma rozdělení dotčeného území do oblastí intenzity vlivu HÚ na životní prostředí [33]*

12.3.1 Vliv na obyvatelstvo

Hrozí zvýšené riziko znečištění ovzduší nebo psychologické vlivy na obyvatelstvo. Může dojít k poklesu cen pozemků a nemovitostí nebo rekreační přitažlivosti v širokém okolí HÚ.

12.3.2 Vliv na ovzduší a klima

Při výstavbě HÚ lze očekávat velkou prašnost, emise z dopravy a strojů. Nesmí být však překročeny emisní limity dané zákonem.

12.3.3 Vliv na povrchové a podzemní vody

Vodohospodářské rozhodnutí stanovuje podmínky pro vypouštění odpadních vod. Proto by nemělo hrozit zatížení povrchových vod nad stanovenou míru únosnosti.

12.3.4 Vliv ionizujícího záření

Množství radioaktivních látek uváděných do životního prostředí nesmí překročit stanovené limity. Radiační pracovníci mohou být vystaveni působení ionizujícího záření pouze v mezích příslušných limitů.

12.3.5 Vliv na krajinu

Vliv na krajinu bude mít pouze nadzemní areál a ten by měl být umístěn tak, aby co nejméně narušoval přirozený stav krajiny. [6, 33]

Celkové i konkrétní účinky a dopady výstavby komplexu HÚ se zhodnotí až po provedení průzkumných prací v konkrétních lokalitách. Veškerý zásah do přírodního prostředí způsobí změny krajiny. Aby však nedošlo k ohrožení obyvatelstva nebo životního prostředí, musí být dodrženy všechny normy a limity, dané zákonem.

ZÁVĚR

Problematika konečné likvidace radioaktivních odpadů je předmětem zkoumání téměř ve všech zemích, kde se pracuje s jadernou energií. Některé státy již pokročily ve výzkumu a nastává proces realizace, jiné zkoumají alternativní možnosti. ČR není žádnou výjimkou.

V současné době jsou vyhledávány vhodné lokality, které by připadaly v úvahu pro vybudování HÚ. Je však nutné tento problém vyřešit v tak blízkém čase, jak je projekt HÚ naplánován? Dle mého názoru se na realizaci až příliš spěchá a může dojít k opomenutí některých základních skutečností, které mohou být pro budoucnost okolí HÚ podstatné. Ať už z hlediska dopadu na životní prostředí, tak i na obyvatelstvo. Kapacity současných meziskladů pro VJP a ostatní RAO jsou dostatečné a k jejich zaplnění v blízké době nemůže dojít. Proč tedy uspěchat výzkumy? Možný důvod je prosazování politických cílů.

Nedůvěra, kterou stát vytvořil vůči občanům je základní překážkou pro vybudování HÚ. Po posledních krocích SÚRAO bude těžké získat si důvěru zpět a obyvatelé se obávají, že uskutečnění HÚ již nebude záležet na nich, ale pouze na rozhodnutích státních organizací, jako je DIAMO a SÚRAO. Původní podmínky sice zaručují účast dotčených obcí, ale podmínky se mohou změnit.

Z provedených analýz scénářů vyplývá, že technický stav HÚ je vyřešen dobře, avšak při vzniku neočekávané mimořádné události mohou nastat ohrožení obyvatelstva i životního prostředí. Nebezpečné materiály budou uloženy na stovky tisíc až milion let a po tuto dobu se nedají předvídat přesné podmínky a rizika.

Technologie se neustále vyvíjí a není-li nutné zanechat tento odkaz dalším generacím, je vhodné počkat na lepší řešení problému konečné likvidace RAO. K tomu mohou pomoci transmutační technologie nebo reaktory IV. generace, které mohou významně redukovat množství RAO a tím snížit potřebné prostory pro uložení. RAO mohou také v budoucnu sloužit jako cenná surovina, pokud budeme schopni využít jejich potenciál.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] SKŘEHOT, Petr. *Prevence nehod a havárií*. Vyd. 1. Česko: PINK PIG, 2009. ISBN 978-80-86973-70-8.

[2] DLOUHÝ, Zdeněk. *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem.* Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2009, 341 s. ISBN 978-80-214-3629-9.

[3] ČESKO. Usnesení vlády č. 487/2002 Sb. Koncepce nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem v ČR. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2002. Dostupné z: http://www.surao.cz/cze/Informacni-koutek/Legislativni-okenko/Koncepce-nakladani-s-RaO-a-VJP-v-CR.

[4] ČESKO. Zákon č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 1997. Dostupný z: http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=18/1997%20&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy.

[5] ČESKO. Nařízení vlády č. 416/2002 Sb., kterým se stanoví výše odvodu a způsob jeho placení původci radioaktivních odpadů na jaderný účet a roční výše příspěvku obcím a pravidla jeho poskytování. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2002. Dostupný z: http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/SearchResult.aspx?q=416/2002&typeLaw=zakon&what=Cislo_zakona_smlouvy.

[6] Správa úložišť radioaktivních odpadů [online]. 2001-2013 [cit. 2014-02-04]. Dostupné z: http://www.surao.cz/.

[7] Mapa současných povrchových úložišť. [online]. [cit. 2013-12-06]. Dostupné z: http://pokornypavel.files.wordpress.com/2011/12/mapa-pripovrchovych-ulozist.jpg.

[8] PITSCHMANN, Vladimír. *Jaderné zbraně*: *nejvyšší forma zabíjení.* 1. vyd. Praha: Naše vojsko, 2005, 390 s. ISBN 80-206-0784-6.

[9] Nakládání s vyhořelým palivem ve světě. In: *Hnutí duha* [online]. 2003 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: http://www.hnutiduha.cz/sites/default/files/publikace/typo3/Vyhorele_jaderne_palivo_svet.pdf.

[10] IAEA Safety Standards: Classification of Radioactive Waste. In: *International atomic energy agency* [online]. 2009 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419_web.pdf.

[11] Radioaktivní odpad. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. © 2006 - 2014 [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/842-radioaktivni-odpad.

[12] WAGNER, Vladimír. Reaktory IV. generace. In: *OSEL* [online]. 2008 [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: http://www.osel.cz/index.php?clanek=356.

[13] Bezpečné uložení odpadů. *Skupina ČEZ* [online]. 2013 [cit. 2013-12-06]. Dostupné z: http://www.cez.cz/cs/o-spolecnosti/bezpecnost/bezpecne-ulozeni-odpadu.html.

[14] FOLTÁNKOVÁ, Kateřina. Olší odsouhlasilo průzkum pro jaderné úložiště. In: *Deník.cz* [online]. 2012 [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: http://brnensky.denik.cz/zpravy_region/olsi-odsouhlasilo-pruzkum-pro-jaderne-uloziste-ted-obratilo-chce-svoleni-lidi-20.html.

[15] Radioaktivní odpady a skupina ČEZ. *Skupina ČEZ* [online]. 2014 [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/micrositesutf/odpovednost/content/pdf/cez_a_radioaktivni_odpady_-_nahled.pdf.

[16] Úložiště radioaktivních odpadů. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2013 [cit. 2013-12-06]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/uloziste-radioaktivnich-odpadu/.

[17] Plán činnosti a rozpočet Správy úložišť radioaktivních odpadů na rok 2012, tříletý plán a dlouhodobý plán. In: *Hospodářská komora České republiky* [online]. 2011 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: http://www.komora.cz/hledani/?allwords=Pl%C3%A1n+%C4%8Dinnosti+a+rozpo%C4%8Det+Spr%C3%A1vy%E2%80%8E&catid=3458.

[18] Sklady použitého jaderného paliva. *Jaderný odpad* [online]. © 2013 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: http://www.jaderny-odpad.cz/mezisklady-vyhoreleho-paliva.htm.

[19] Ukládání odpadů v ČR. *Centrum experimentální geotechniky* [online]. ©2000-2014 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/radioaktivni-odpady/problematikaodpaducr.

[20] Castory. *Central Europe Eingineering and Investment* [online]. 2005-2009 [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: http://www.ceei.sk/cz/castory.php.

[21] BERÁNEK, JAN. *Problematika radioaktivního odpadu.* (přednáška) Tišnov: sdružení Calla, 19. 9. 2013.

[22] Typové schvalování. *SÚJB* [online]. 2013 [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/prepravy-radioaktivnich-materialu/typove-schvalovani/.

[23] Atomová energetika v reálném světě. *Temelín.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: http://www.temelin.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=315&Itemid=94.

[24] Bundestag: Atommüll soll zügig aus Asse geborgen werden. In: *Spiegel online* [online]. 2012 [cit. 2014-04-03]. Dostupné z: http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/bundestag-atommuell-soll-zuegig-aus-asse-geborgen-werden-a-872504.html.

[25] Standortsuche für geologische Tiefenlager. *Energieschweiz* [online]. 2011 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z: http://www.bfe.admin.ch/radioaktiveabfaelle/01277/index.html?lang=de.

[26] Wo entsorgen?. *NAGRA* [online]. 2013 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z: http://www.nagra.ch/de/woentsorgen.htm.

[27] Nuclear Power in Russia. *World Nuclear Association* [online]. 2014 [cit. 2014-04-08]. Dostupné z: http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-O-S/Russia--Nuclear-Power/.

[28] DUFKOVÁ, Marie. Co je to MOX. In: *3 Pól* [online]. 2011 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: http://3pol.cz/1035-co-je-to-mox.

[29] SCHENK, Martin. *Ústní sdělení*. (Mluvčí občanského sdružení NECHCEME ÚLOŽIŠTĚ KRAVÍ HORA), 5. 4. 2014.

[30] Nuclear Power in Finland. *Word Nuclea Association* [online]. 2014 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/Finland/.

[31] Hlubinné ukládání jaderného odpadu. *EU a energetika* [online]. 2014 [cit. 2014-04-11]. Dostupné z:http://www.energetika-eu.cz/ukladani-jaderneho-odpadu.htm.

[32] EGP INVEST, spol. s r. o., DIAMO. *Kraví hora*: Průvodní technická zpráva. Uherský Brod, 2011.

[33] *Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě:* Průvodní zpráva. ÚJV Řež a.s. – divize ENERGOPROJEKT PRAHA, 2012.

[34] ČESKO. Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně. In: *Sbírka zákonů*. 2002. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/307_po_novele.pdf.

[35] Dozimetrické jednotky a jejich použití. *Atom info* [online]. 2012 [cit. 2014-04-21]. Dostupné z:http://atominfo.cz/2012/05/sievert-becquerel-rentgen-jak-merime-radioaktivitu/.

[36] Vyhlášky SÚJB. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. 2014 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: http://www.sujb.cz/legislativa/provadeci-pravni-predpisy/vyhlasky-sujb/.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČR	Česká republika.
HEPA	High efficiency particulate air filter (Vysoce účinný filtr vzduchových částic).
HÚ	Hlubinné úložiště.
JE	Jaderná elektrárna.
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii.
MOX	Mixed oxide fuel (Směs oxidů uranu a plutonia).
NAGRA	Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle.
Ra	Radium.
RAO	Radioaktivní odpad.
SAO	Středně aktivní odpad.
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost.
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů.
Sv	Sievert.
U	Uran.
ULPA	Ultra low particulate air filter (Ultra účinný filtr vzduchových částic).
USA	United States of America (Spojené státy americké).
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu Řež, a.s.
ÚVVVR	Ústav pro výzkum, výrobu a využití radioizotopů.
VAO	Vitrifikovaný odpad.
VJP	Vyhořelé jaderné palivo.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Mapa současných povrchových úložišť v ČR 10
Obr. 3 - Vizualizace možného hlubinného úložiště 14
Obr. 2 - Životní cyklus úložiště radioaktivních odpad 14
Obr. 4 – Vstup do úložiště Yucca Mountain z jižní strany 20
Obr. 5 - Sudy s radioaktivním odpadem v Asse 21
Obr. 6 - Lokality pro umisťování vysoce aktivního odpadu 23
Obr. 7 - Model obalového souboru v podzemní laboratoři Grimsel 24
Obr. 8 - Místo výstavby HÚ ve Finsku v lokalitě Olkiluoto 26
Obr. 9 - Moduly podzemní části HÚ 43
Obr. 10 - Rozdělení dotčeného území dlle intenzity vlivu HÚ na životní prostředí 48

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 - Nehoda při přepravě uvnitř areálů 29
Graf 2 - Nehoda v horké komoře – integrační doba 2 dny 30
Graf 3 - Nehoda v horké komoře – integrační doba 1 rok 30
Graf 4 - Srovnání maximální efektivní dávky různých variant ukládání VJP 33
Graf 5 - Výpočty dlouhodobé bezpečnosti úložiště s VJP 34
Graf 6 - Vliv zemětřesení na bezpečnost HÚ 35
Graf 7 - Vliv zemětřesení na bezpečnost HÚ při nefunkčnosti těsnícího systému 36
Graf 8 – Výsledky anket a referend v dotčených obcích lokality Kraví hora 45

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Některé v současnosti provozované podzemní laboratoře 25
Tab. 2 - Výběr lokalit - geologický výzkum 38
Tab. 3 - Výběr lokalit - geologický průzkum 39
Tab. 4 - Lokality pro hlubinné úložiště 40
Tab. 5 - Základní údaje HÚ Kraví hora 42

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Některé vyhlášky SÚJB související s ukládáním RAO.

Příloha P II: Klasifikace RAO podle doporučení MAAE.

Příloha P III: Centrální sklad vyhořelého jaderného paliva Skalka.

Příloha P IV: Obalový soubor typu CASTOR.

Příloha P V: Nejpoužívanější jednotky a veličiny pro měření radioaktivity.

PŘÍLOHA P I: *NĚKTERÉ VYHLÁŠKY SÚJB SOUVISEJÍCÍ S UKLÁDÁNÍM RAO [36]*

Vyhlášky provádějící zákon č. 18/1997 Sb.	Název vyhlášky
Vyhláška č. 144/1997 Sb.,	o fyzické ochraně jaderných materiálů a jaderných zařízení a o jejich zařazování do jednotlivých kategorií.
Vyhláška č. 146/1997 Sb.,	stanovující činnosti, které mají bezprostřední vliv na jadernou bezpečnost, a činnosti zvláště důležité z hlediska radiační ochrany, požadavky na kvalifikaci a odbornou přípravu, způsob ověřování zvláštní odborné způsobilosti a udělování oprávnění vybraným pracovníkům a způsob provedení schvalované dokumentace pro povolení k přípravě vybraných pracovníků.
Vyhláška č. 215/1997 Sb.,	o kritériích na umísťování jaderných zařízení a velmi významných zdrojů ionizujícího záření.
Vyhláška č. 106/1998 Sb.,	o zajištění jaderné bezpečnosti a radiační ochrany jaderných zařízení při jejich uvádění do provozu a při jejich provozu.
Vyhláška č. 195/1999 Sb.,	o požadavcích na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti.
Vyhláška č. 307/2002 Sb.,	o radiační ochraně.
Vyhláška č. 317/2002 Sb.,	o typovém schvalování obalových souborů pro přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů a radioaktivních látek, o typovém schvalování zdrojů ionizujícího záření a o přepravě jaderných materiálů a určených radioaktivních látek (o typovém schvalování a přepravě).
Vyhláška č. 318/2002 Sb.,	o podrobnostech k zajištění havarijní připravenosti jaderných zařízení a pracovišť se zdroji ionizujícího záření a o požadavcích na obsah vnitřního havarijního plánu a havarijního řádu.

Vyhláška č. 319/2002 Sb.,	o funkci a organizaci celostátní radiační monitorovací sítě.
Vyhláška č. 185/2003 Sb.,	o vyřazování jaderného zařízení nebo pracoviště III. nebo IV. kategorie z provozu.
Vyhláška č. 309/2005 Sb.,	o zajišťování technické bezpečnosti vybraných zařízení.
Vyhláška č. 132/2008 Sb.,	o systému jakosti při provádění a zajišťování činností souvisejících s využíváním jaderné energie a radiačních činností a o zabezpečování jakosti vybraných zařízení s ohledem na jejich zařazení do bezpečnostních tříd.
Vyhláška č. 165/2009 Sb.,	o stanovení seznamu vybraných položek v jaderné oblasti.
Vyhláška č. 213/2010 Sb.,	o evidenci a kontrole jaderných materiálů a oznamování údajů požadovaných předpisy Evropských společenství.

PŘÍLOHA P II: *KLASIFIKACE RAO PODLE DOPORUČENÍ MAAE [2]*

KATEGORIE	CHARAKTERISTIKA	DOPORUČENÝ TYP ÚLOŽIŠTĚ
1. Odpady potenciálně uváděné do životního prostředí	Roční dávka připadající na vrub ozáření jednotlivce z obyvatelstva musí být nižší nebo rovna efektivní dávce 0,01 mSv.	Žádné omezení
2. Nízko a středně aktivní odpad	Aktivita radionuklidů je natolik nízká, že při jejich ukládání není nutno brát v úvahu vznik rozpadového tepla.	Povrchové
2a. nízko a středně aktivní odpady krát-kodobé	Obsahují radionuklidy o poločasu přeměny menším než 30 let a měrná aktivita dlouhodobých nuklidů nepřesahuje 4, 000 Bq/g v jednotlivé obalové jednotce, resp. 400 Bq/g jako průměr pro celé úložiště.	Povrchové
2b. nízko a středně aktivní odpady dlouhodobé	Měrná aktivita dlouhodobých radionuklidů přesahuje limity uvedené v 2a.	Hlubinné
3. vysoce aktivní odpad	Aktivita radionuklidů je tak vysoká, že při jejich ukládání je potřeba brát v úvahu vznik přeměnného tepla. Hranicí je hodnota tepelného výkonu 2kW/m³.	Hlubinné

PŘÍLOHA P III: ***CENTÁLNÍ SKLAD VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA SKLAKA [VLASTNÍ]***

PŘÍLOHA P IV: ***OBALOVÝ SOUBOR TYPU CASTOR [20]***

PŘÍLOHA P V: *NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ JEDNOTKY A VELIČINY PRO MĚŘENÍ RADIOAKTIVITY [35]*

Veličina	Definice	Jednotka	Rozměr jednotky
Aktivita	Očekávaná hodnota počtu jaderných přeměn uskutečňujících se v daném množství látky za jednotku času. $A = \left\| \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t} \right\|$	becquerel [Bq]	$[s^{-1}]$
Kerma	Poměr součtu kinetických energií dE_{tr} všech nabitých částic uvolněných nenabitými částicemi ve hmotě dm látky a hmotnosti dm tohoto materiálu $K = \frac{dE_{tr}}{dm}$	Gray [Gy]	$[J\ kg^{-1}]$
Absorbovaná dávka	Základní veličina dávky daná poměrem $D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$ kde dε je střední energie sdělená látce o hmotnosti dm ionizujícím zářením.	Gray [Gy]	$[J\ kg^{-1}]$
Ekvivalentní dávka	Dávka ve tkáni nebo orgánu T daná vztahem $H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$ kde $D_{T,R}$ je střední absorbovaná dávka ze záření R ve tkáni nebo orgánu T, a w_R je radiační váhový faktor.	Sievert [Sv]	$[J\ kg^{-1}]$
Efektivní dávka	Součet ekvivalentních dávek ve všech výslovně uvedených tkáních a orgánech těla, vážený ve vztahu k radiosenzitivitě tkání, a daný výrazem $E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$ kde H_T je ekvivalentní dávka ve tkáni nebo orgánu T a w_T je tkáňový váhový faktor.	Sievert [Sv]	$[J\ kg^{-1}]$