

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Hodnocení bezpečnosti přípovrchových a povrchových
úložišť**

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jan POKORNÝ**
Osobní číslo: **E12N0173P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Jaderná elektroenergetika**
Název tématu: **Hodnocení bezpečnosti přípovrchových a povrchových uložišť**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište problematiku a specifika uložišť radioaktivního odpadu.
2. Proveďte syntézu a analýzu národních a mezinárodních uložišť na povrchová a přípovrchová uložišť RO (česká legislativa, legislativa EU, IAEA, NEA).
3. Zhodnoňte bezpečnost přípovrchových a povrchových uložišť RO.
4. Proveďte studii pro dané uložišť.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 12.5.2014

Jan Pokorný

Anotace:

Předmětem diplomové práce je hodnocení bezpečnosti povrchových a přípovrchových úložišť radioaktivního odpadu. V práci je popsáno rozdělení jednotlivých tříd odpadů podle jejich aktivity, je uvedena koncepce úložišť a jejich rozdělení podle přijímaného odpadu. Jsou uvedeny základní bezpečnostní požadavky na nakládání s odpady podle české legislativy a podle legislativy Mezinárodní agentury pro atomovou energii. Práce se dále zabývá normami podle IAEA a metodikou ISAM pro hodnocení bezpečnosti. Tato metodika je v závěrečné kapitole srovnána s hodnocením bezpečnosti u reálného úložiště.

Klíčová slova:

Bezpečnost, úložiště, radioaktivní odpady, legislativa, jaderná energie, radiační rizika, regulační orgán, radionuklidy, aktivita, klasifikace odpadů, bezpečnostní požadavky, normy a zásady.

Annotation:

The subject of this thesis is the safety assessment of surface and near-surface disposal facilities for radioactive waste. The work describes the classification of the waste to classes by their activity, the concept of the disposal facilities and the distribution by received waste is specified. Fundamental safety requirements for waste management are described according to Czech legislation and legislation of the International Atomic Energy Agency. The paper focuses on the standards by IAEA and the ISAM methodology for safety assessment. In final chapter, the ISAM methodology is compared with the safety assessment for real storage.

Key words:

Safety, disposal facility, radioactive waste, legislation, nuclear energy, radiation risks, regulatory body, radionuclides, activity, waste classification, safety requirements, standards and principles.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. a konzultantce Ing. Janě Rajzrové za jejich vstřícnou a profesionální spolupráci při psaní této práce. Za podporu a shovívavost během mého studia děkuji celé své rodině.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK:	9
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK:	9
ÚVOD	11
1 RADIOAKTIVNÍ ODPADY	12
1.1 KLASIFIKACE ODPADŮ PODLE ČESKÉ LEGISLATIVY.....	12
1.2 KLASIFIKACE ODPADŮ PODLE MEZINÁRODNÍ AGENTURY PRO ATOMOVOU ENERGIÍ.....	13
1.2.1 <i>Odpad k uvolnění do životního prostředí (EW)</i>	13
1.2.2 <i>Krátkodobé odpady (VSLW)</i>	13
1.2.3 <i>Velmi nízkoaktivní odpady (VLLW)</i>	13
1.2.4 <i>Nízkoaktivní odpady (LLW)</i>	14
1.2.5 <i>Středněaktivní odpady (ILW)</i>	14
1.2.6 <i>Vysoceaktivní odpady (HLW)</i>	14
1.2.7 <i>Třídy odpadů</i>	14
1.3 BEZPEČNOSTNÍ POŽADAVKY PRO NAKLÁDÁNÍ S RADIOAKTIVNÍMI ODPADY.....	16
1.3.1 <i>Legislativa pro jadernou energii na území ČR</i>	16
1.3.2 <i>Mezinárodní agentura pro atomovou energii</i>	18
1.3.3 <i>Euratom</i>	18
1.3.4 <i>Bezpečnost při nakládání s odpady</i>	20
1.3.5 <i>Radioaktivní odpady na území ČR</i>	20
2 KONCEPTY ÚLOŽIŠŤ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU	21
2.1 TYPY ÚLOŽIŠŤ PODLE MEZINÁRODNÍ AGENTURY PRO ATOMOVOU ENERGIÍ.....	21
2.1.1 <i>Povrchové úložiště</i>	22
2.1.2 <i>Přípovrchové úložiště</i>	22
2.1.3 <i>Úložiště středněaktivního odpadu</i>	22
2.1.4 <i>Geologická úložiště</i>	22
2.1.5 <i>Úložiště ve vrtu</i>	23
2.1.6 <i>Úložiště odpadu vzniklé báňskou činností</i>	23
2.2 TYPY ÚLOŽIŠŤ V ČESKÉ REPUBLICE.....	23
2.2.1 <i>Provozované úložiště</i>	23
2.2.2 <i>Plánované hlubinné úložiště</i>	24
3 BEZPEČNOSTNÍ NORMY IAEA	26
3.1 ZÁKLADNÍ BEZPEČNOSTNÍ ZÁSADY.....	27
3.1.1 <i>Odpovědnost za bezpečnost</i>	28
3.1.2 <i>Úloha vlády</i>	28
3.1.3 <i>Vedení a správa pro bezpečnost</i>	29
3.1.4 <i>Odůvodnění vzniku zařízení a jeho činnosti</i>	29
3.1.5 <i>Optimalizace ochrany</i>	29
3.1.6 <i>Omezení rizik na jednotlivce</i>	30
3.1.7 <i>Ochrana současných a budoucích generací</i>	30
3.1.8 <i>Prevence před nehodami</i>	30
3.1.9 <i>Havarijní připravenost a odezva</i>	31
3.1.10 <i>Ochranná opatření k omezení již existujících radiačních rizik</i>	31
3.2 SPECIFICKÉ BEZPEČNOSTNÍ POŽADAVKY NA ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU.....	31
3.2.1 <i>Požadavky na vládní, právní a regulační rámec</i>	32
3.2.2 <i>Požadavky na bezpečnostní přístup</i>	33
3.2.3 <i>Konstrukční koncepty pro bezpečnost</i>	33
3.2.4 <i>Rámec pro nakládání s radioaktivním odpadem</i>	34
3.2.5 <i>Bezpečnostní dokumentace a hodnocení bezpečnosti</i>	34

3.2.6	<i>Postup ve vývoji, provozu a ukončení úložiště</i>	35
3.3	HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI PRO PŘÍPOVRCHOVÁ ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU.....	35
3.3.1	<i>Posuzování bezpečnosti v provozní fázi</i>	36
3.3.2	<i>Posuzování bezpečnosti ve fázi po uzavření</i>	36
3.3.3	<i>Proces posuzování bezpečnosti</i>	37
4	METODIKA HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI PRO PŘÍPOVRCHOVÁ ÚLOŽIŠTĚ (ISAM)	38
4.1	METODIKA PROJEKTU ISAM	39
4.2	VÝVOJ SCÉNÁŘŮ A JEJICH ZDŮVODNĚNÍ.....	40
4.3	FORMULACE A IMPLEMENTACE MODELŮ	43
4.3.1	<i>Koncepční modely</i>	43
4.3.2	<i>Matematické modely</i>	46
4.3.3	<i>Využití modelových výsledků</i>	47
5	PRAKTICKÉ VYUŽITÍ METODIKY HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI.....	49
5.1	ISAM VAULT TEST CASE	49
5.2	SROVNÁNÍ SCÉNÁŘŮ PRO LIDSKÝ ZÁSAH.....	49
5.2.1	<i>Srovnání vlastností, událostí a procesů pro scénáře lidského vniknutí</i>	49
5.2.2	<i>Scénáře pro stavební a pozemní práce</i>	49
5.2.3	<i>Scénáře pro vrty studní</i>	53
5.3	SROVNÁNÍ POSTUPŮ MEZI REÁLNÝM ÚLOŽIŠTĚM A PROJEKTEM ISAM	56
	ZÁVĚR.....	57
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	58
	SEZNAM PŘÍLOH.....	59

Seznam symbolů a zkratk:

EW.....	Exempt waste / Odpad k uvolnění do životního prostředí
VSLW.....	Very short lived waste / Krátkodobé odpady
VLLW	Very low level waste / Velmi nízkoaktivní odpady
LLW	Low level waste / Nízkoaktivní odpady
ILW	Intermediate level waste / Středně aktivní odpady
HLW.....	High level waste / Vysoceaktivní odpady
IAEA / MAAE.....	International atomic energy agency / Mezinárodní agentura pro atomovou energii
ČSKAE.....	Československá komise pro atomovou energii
SÚJB.....	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
OSN.....	Organizace spojených národů
Bq	Becquerel - intenzita radioaktivního záření
Sv.....	Sievert - ekvivalentní dávka ionizujícího záření
Bq/kg	Objemová aktivita
Bq/m ³	Úroveň koncentrace aktivity
T _{1/2}	Poločas rozpadu
CO ₂	Oxid uhličitý
CH ₄	Methan
ISAM	Improvement of long term safety assessment methodologies for near-surface waste disposal facilities / Zkvalitnění metodiky pro dlouhodobé hodnocení bezpečnosti pro přípovrchová úložiště

Seznam obrázků a tabulek:

Obr. 1 Schéma klasifikace jaderného odpadu (IAEA)

Obr. 2 Koncept přípovrchového úložiště v krytu

Obr. 3 Uložené sudy v úložišti Richard

Obr. 4 Koncept hlubinného úložiště (SÚRAO)

Obr. 5 Rozdělení bezpečnostních norem IAEA

Obr. 6 Metodika projektu ISAM

Obr. 7 Koncepční zastoupení jednotlivých složek procesního systému a jejich propojení

Obr. 8 Klasifikační schéma ze seznamu ISAM pro vlastnosti, události a procesy

Obr. 9 Proces formulace a implementace modelů

Obr. 10 Příklad koncepčního modelu pro únik, přepravu a expozici radionuklidů

Obr. 11 Koncepční model biosférických cest

Obr. 12 Koncepční model pro scénář průsaku

Obr. 13 Faktory ovlivňující složitost modelu

Tab. 1 Předpokládané cesty expozice pro stavební a pozemní práce

Tab. 2 Klíčové parametry pro výpočet dávek při vdechnutí

Tab. 3 Předpokládané cesty expozice u studní

Tab. 4 Klíčové parametry pro výpočet dávky při požití

Tab. 5 Klíčové parametry pro výpočet dávky z požití kontaminované pitné vody

Úvod

Radioaktivita je přírodní jev a přírodní zdroje záření jsou rysy životního prostředí. Záření a radioaktivní látky mají mnoho prospěšných aplikací, a to od výroby elektrické energie, která je v dnešní době prakticky nepostradatelná, až po využití v lékařství, průmyslu a zemědělství. Radiační rizika pro lidi a životní prostředí, které mohou vzniknout z těchto aplikací, musí být hodnoceny a pokud je to nutné, musejí být pod kontrolou. Proto činnosti, jako je lékařské využití, provoz jaderných zařízení, výroba, doprava a využívání radioaktivního materiálu, a nakládání s radioaktivním odpadem, musí podléhat bezpečnostním normám.

Regulace bezpečnosti je národní odpovědností. Nicméně radiační rizika mohou přesahovat hranice jednotlivých států, a proto je velmi důležitá mezinárodní spolupráce. Ta slouží k podpoře a ke zvýšení bezpečnosti na celém světě. Důležitá je tedy výměna zkušeností a jejich shromažďování prostřednictvím norem a předpisů, které zlepšují schopnosti řídit rizika, aby se předešlo nehodám a případně správně reagovat na mimořádné události a zmírňovat následky.

Hodnocení bezpečnosti je potřeba provádět nejenom v průběhu provozu jaderného zařízení, kdy jsou rizika největší, ale také před samotným spuštěním a zároveň po uzavření zařízení. Návrhy systémů pro bezpečnost před spuštěním jsou důležité z toho důvodu, že na nich bude stát bezpečnost celého budoucího provozu zařízení.

Bezpečnost na jaderném zařízení je to nejdůležitější, a pokud jde o bezpečnost, nejvíce se diskutuje o jaderných elektrárnách, kde při mimořádných radiačních událostech mohou být následky na obyvatelstvo a životní prostředí největší. Bezpečnost je ale třeba dodržovat i na ostatních jaderných zařízeních.

Úložiště jaderného odpadu jsou zařízení, do kterých se umisťují radioaktivní látky o různé aktivitě, s různou hodnotou poločasu rozpadu radionuklidů, a které pocházejí z různých jaderných zařízení. V podstatě veškeré radioaktivní látky, které se již nehodí k dalšímu využití, skončí zde. Úložiště jsou konstruována tak, aby byla schopna uchovat bezpečně oddělené tyto nebezpečné odpady od životního prostředí po stovky až tisíce let. Proto je bezpečnost úložišť důležitá nejenom pro nás, ale i pro bezpečí budoucích generací.

1 Radioaktivní odpady

Jedná se o odpadní látky, předměty nebo zařízení, které jsou jejich vlastníkem již nevyužitelné a obsahují radionuklidy nebo povrchové znečištění překračující hodnoty umožňující uvedení do životního prostředí.

1.1 Klasifikace odpadů podle české legislativy

Radioaktivní odpady nebo jejich směsi se v místě jejich vzniku sbírají a třídí podle použitých způsobů zpracování a úpravy. Toto třídění se provádí podle fyzikálních a chemických vlastností. Radioaktivní odpady se umísťují do sběrných obalových souborů, které musí být označeny, aby bylo jasné, který odpad je sbírán a jakým způsobem je tříděn.

Podle vyhlášky SÚJB 307/2002 Sb. se radioaktivní odpady rozlišují na plynné, kapalně a pevné. Pevné radioaktivní odpady se dále dělí na tři typy:

- Přechodné odpady - doba života $T_{1/2} < 1$ rok
- Nízko aktivní - obsah radionuklidů $< 10^9$ Bq/m³ a středně aktivní odpady - obsah radionuklidů $< 10^{14}$ Bq/m³
- Vysokoaktivní odpady - obsah radionuklidů $> 10^{14}$ Bq/m³

Do přechodných radioaktivních odpadů spadají ty odpady, které při dlouhodobém skladování vykazují radioaktivitu nižší, než jsou uvolňovací úrovně. Touto úrovní se rozumí hodnota hmotnostní nebo celkové aktivity. Když nedojde k překročení této úrovně, mohou být radioaktivní odpady ukládány do životního prostředí bez povolení Státního úřadu pro jadernou bezpečnost. Při ukládání a skladování vysokoaktivních odpadů se musí brát v potaz teplo, které se uvolňuje při rozpadu radionuklidů obsažených právě v těchto odpadech.

Zbylé radioaktivní odpady spadají do nízko a středně aktivních odpadů. Tento odpad se dělí do dvou skupin:

- Krátkodobé odpady - doba života $T_{1/2} < 30$ let
- Dlohodobé odpady - doba života $T_{1/2} > 30$ let

Krátkodobé odpady jsou ty, u kterých je poločas obsažených radionuklidů menší jak 30 let a hmotnostní aktivita dlouhodobých alfa zářičů je omezena pro jeden obalový soubor nanejvýš na 4000 kBq/kg a střední hodnota pro celkový množství vyprodukovaného objemu

odpadu 400 kBq/kg za rok. Druhou skupinou jsou dlouhodobé odpady, což jsou odpady, které se neřadí ke krátkodobým.

1.2 Klasifikace odpadů podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii

IAEA rozlišuje jaderný odpad celkem do šesti tříd:

- **EW** - Odpad k uvolnění do životního prostředí
- **VSLW** - Krátkodobý odpad
- **VLLW** - Velmi nízkoaktivní odpad
- **LLW** - Nízkoaktivní odpad
- **ILW** - Středněaktivní odpad
- **HLW** - Vysoceaktivní odpad

1.2.1 Odpad k uvolnění do životního prostředí (EW)

Odpady obsahují tak malé koncentrace radionuklidů, že nevyžadují opatření pro radiační ochranu, bez ohledu na to, zda je odpad likvidován na běžných skládkách nebo je recyklován. Takový materiál lze odstranit z regulativní kontroly a nevyžaduje žádné další zvážení z hlediska právního řízení.

1.2.2 Krátkodobé odpady (VSLW)

Odpady, které mohou být skladovány po rozpadu omezenou dobu až několika let a následně vymazány z regulativní kontroly podle ujednání schválených regulačním orgánem, nekontrolované likvidaci, použití nebo vypouštění. Tato třída zahrnuje odpady obsahující především radionuklidy s velmi krátkým poločasem rozpadu. Je často používán pro výzkumné a lékařské účely.

1.2.3 Velmi nízkoaktivní odpady (VLLW)

Odpady, které nemusí nutně splňovat kritéria daná pro odpady k uvolnění do životního prostředí (EW), ale nepotřebují vysokou úroveň zadržení a izolace, a proto jsou vhodné k uložení do přípovrchových úložišť s omezenou regulační kontrolou. Taková typy úložišť mohou také obsahovat jiné nebezpečné odpady. Typické odpady zařazené do této třídy jsou

půdy a sutě s nízkou úrovní koncentrace radionuklidů.

1.2.4 Nízkoaktivní odpady (LLW)

Odpad, který je vyšší než uvolňovací úrovně, ale má omezené množství dlouhých radionuklidů. Tyto odpady vyžadují robustní izolace a uložení po dobu až několika set let a jsou vhodné k uložení do upravených přípovrchových zařízení. Tato třída zahrnuje velmi širokou škálu odpadu. Nízkoaktivní odpady mohou zahrnovat radionuklidy s krátkým poločasem rozpadu na vyšších úrovních koncentrace aktivity, a také radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu, ale pouze na relativně nízkých úrovních koncentrace aktivity.

1.2.5 Středněaktivní odpady (ILW)

Odpady obsahující zejména radionuklidy s dlouhým poločasem rozpadu, a tak vyžadují vyšší stupeň zadržení a izolace, než je tomu u přípovrchových úložišť. Tyto odpady nepotřebují ustanovení, nebo jen v omezené povolení, pro odvádění tepla během jeho skladování a likvidace. Proto odpady v této třídě se vyžadují likvidace ve větších hloubkách, v řádu desítek metrů do několika set metrů.

1.2.6 Vysoceaktivní odpady (HLW)

Odpady s úrovní činnosti koncentrace dostatečně vysokou aby mohly generovat značné množství tepla radioaktivním rozkladem. Dále odpady s velkým množstvím radionuklidů s dlouhým poločasem rozpadu, které je třeba brát v úvahu při návrhu zařízení na likvidaci takového odpadu. Likvidace těchto odpadů se provádí v hlubokých stabilních geologických strukturách obvykle několik set metrů nebo více pod povrchem. HLW vytváří značné množství tepla z radioaktivního rozpadu, a normálně pokračuje k výrobě tepla po několik století.

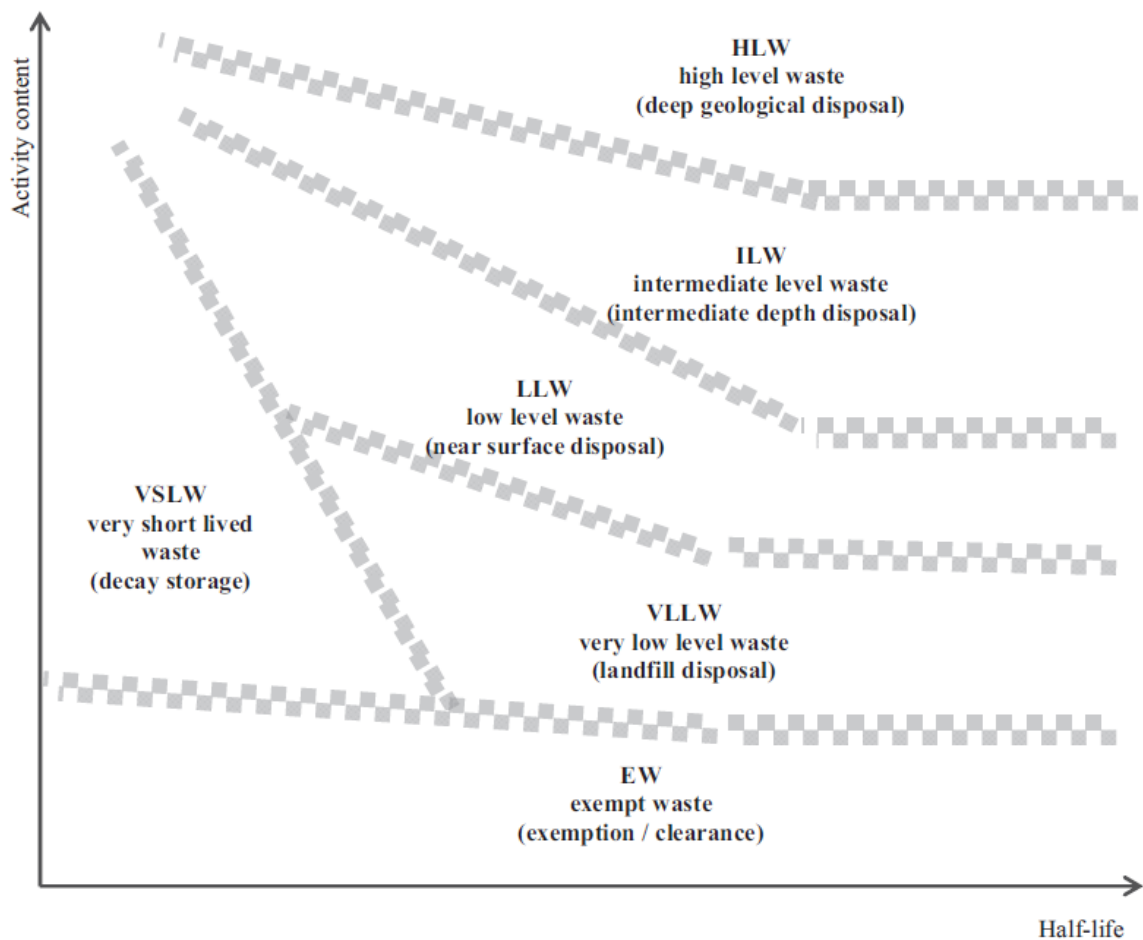
Odvod tepla je důležitým faktorem, který je třeba vzít v úvahu při navrhování geologických úložišť. Vysoceaktivní odpady mají obvykle úroveň koncentrace aktivity v rozsahu 10⁴-10⁶ TBq/m³.

1.2.7 Třídy odpadů

Klasifikace radioaktivních odpadů je vyobrazena na schématu. Svislá osa představuje aktivitu obsahu odpadu a vodorovná osa poločas rozpadu radionuklidů obsažených v odpadu. Úroveň aktivity obsahu se může pohybovat od zanedbatelné až po velmi vysokou. Tím je míněna velmi vysoká koncentrace radionuklidů nebo velmi vysoká specifická aktivita. Čím

vyšří je úroveň aktivity obsahu, tím větří je potřeba uložení odpadu a jeho oddělení od biosféry. V dolní části od svislé osy, pod uvolňovací úrovní, se nakládání s odpady provádí bez ohledu na jejich radiologické vlastnosti a bez vyžadování opatření pro radiační ochranu.

Poločas rozpadu radionuklidů se na vodorovné ose pohybují řádově od sekund až po miliony let. Z hlediska bezpečnosti nakládání s radioaktivním odpadem se radionuklidy s poločasem rozpadu kratřím než 30 let považují za krátkodobé.



Obr. 1 Schéma klasifikace jaderného odpadu (IAEA) [1]

1.3 Bezpečnostní požadavky pro nakládání s radioaktivními odpady

1.3.1 Legislativa pro jadernou energii na území ČR

Legislativní rámec upravující průmyslové využívání jaderné energie byl na území České republiky zahájen v roce 1976 novelou zákona č. 50/1976 Sb. o územním plánování a stavebním řádu. Pro realizaci staveb, která obsahovala jaderná zařízení, byl vyžadován zvláštní souhlas Československé komise pro atomovou energii ČSKAE. Tato komise vydala v letech 1977-1980 základní právní předpisy. Předpisy se týkaly:

- Evidence a kontroly jaderných materiálů, zajištění jaderné bezpečnosti při navrhování, povolování a provádění staveb s jaderným zařízením.
- Zajištění jakosti vybraných zařízení v jaderné energetice z hlediska bezpečnosti.
- Zajištění bezpečnosti při spouštění a provozu těchto jaderných zařízení.

Nástupcem ČSKAE se v roce 1993 stal Státní úřad pro jadernou bezpečnost. Úřad vykonává státní správu a dozor nad využíváním jaderné energie a ionizujícího záření, stanovuje podmínky pro zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany, havarijní připravenosti a fyzické ochrany. V roce 1996 bylo zřízeno krizové koordinační centrum, které plní funkci pracoviště havarijní připravenosti a krizového řízení SÚJB. Kromě jaderných zařízení vykonává státní správa také kontrolu v oblasti zákazu chemických, biologických a toxinových zbraní. Mezi hlavní působnosti SÚJB patří:

- Státní dozor nad jadernou bezpečností, fyzickou ochranou jaderných zařízení, radiační ochranou a havarijní připraveností.
- Kontroly v prostorách jaderných zařízení nebo v místech s výskytem zdrojů ionizujícího záření.
- Udělování povolení k výstavbě a provozu jaderných zařízení.
- Definování pravidel pro nakládání s radioaktivními odpady.
- Kontroly činností při přepravě jaderných materiálů.
- Schvalování bezpečnostních dokumentací, limitů a podmínek provozu jaderných zařízení.

- Stanovení podmínek a požadavků radiační ochrany obyvatel a lidí pracujících se zdroji ionizujícího záření.
- Stanovení zóny havarijního plánování a požadavků havarijní připravenosti.

1.3.1.1 Atomový zákon

Jedná se o zákon č. 18/1997 Sb., který jedná o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření. Svěřuje SÚJB výkon státní správy a dozoru v oblasti jaderné bezpečnosti a při činnostech vedoucích k ozáření a definuje jeho působnost a kompetence. Zákon pokrývá problematiku havarijní připravenosti nebo nakládání s radioaktivním odpadem.

Jednotlivé vyhlášky atomového zákona se týkají fyzické ochrany jaderných materiálů a jaderných zařízení, jsou stanoveny činnosti, které mají bezprostřední vliv na jadernou bezpečnost nebo jsou důležité z hlediska radiační ochrany. Dále jsou zde popsány požadavky na kvalifikaci a odbornou přípravu, způsob ověřování odborné způsobilosti a udělování oprávnění pracovníkům. Vyhlášky pojednávají o zabezpečení jakosti při činnostech souvisejících s využíváním jaderné energie a činnostech vedoucích k ozáření, dále o kritériích na umístování jaderných zařízení a bezpečnosti při uvádění do provozu a v samotném provozu. Jsou kladeny požadavky na jaderná zařízení k zajištění jaderné bezpečnosti, radiační ochrany a havarijní připravenosti, a požadavky na přepravu, skladování a ukládání jaderných materiálů.

1.3.1.2 Bezpečnostní požadavky v legislativě ČR

Při nakládání s radioaktivními odpady musí být v první řadě zajištěna ochrana jednotlivců, společnosti a životního prostředí. Proto byla sepsána bezpečnostní opatření. Zajišťují, aby vznik radioaktivních odpadů byl co nejnižší, a aby byla zajištěna bezpečnost při odvodu zbytkového tepla v průběhu nakládání s těmito odpady. Dále zaručují použití vhodných obranných metod schválených národní legislativou pro poskytnutí ochrany občanů a životního prostředí. Také se berou v potaz chemická a biologická rizika, která by mohla vzniknout při nakládání s radioaktivními odpady.

Každý, kdo nakládá s radioaktivním odpadem, by se měl řídit zákonem č. 18/1997 Sb. (Atomový zákon) a vyhláškou SÚJB č. 307/2002 Sb. Podle nich se spolu s radioaktivitou musí brát v úvahu i vlastnosti odpadů, které jsou nebezpečné a je u nich pravděpodobné, že by nakládání s odpady nějakým způsobem ovlivnily. Mezi tyto vlastnosti se počítá toxicita, hořlavost, výbušnost, samovolná štěpitelnost nebo vznik zbytkového tepla.

U skladování radioaktivních látek musí být zajištěna podkritičnost a odvod tepla, jak u normálních podmínek provozu, tak za havarijních podmínek. Skladovací zařízení musí být tedy správně navržena a radioaktivní odpad řádně izolován a rozmístěn tak, aby se zabránilo dosažení kritičnosti a překročení hodnoty 0,95 efektivního koeficientu násobení neutronů za havarijních podmínek.

1.3.2 Mezinárodní agentura pro atomovou energii

Jedná se o nezávislou mezivládní organizaci v systému OSN založenou v roce 1957, která dohlíží a stanovuje pravidla pro mírové využívání jaderné energie a zajišťuje, aby jaderná energie nesloužila jakýmkoliv vojenským cílům. Hlavní sídlo agentury se nachází v Rakousku ve Vídni. Agentura v současné době má 152 členských států. Mezi orgány agentury patří rada guvernérů, generální konference a generální ředitel. Rada guvernérů je politickým orgánem, jenž se skládá z 35 členských států. Rada schvaluje bezpečnostní standardy a publikace. Generální konference je vrcholným řídicím orgánem a je tvořena všemi členskými státy. Schvaluje program a rozpočet Mezinárodní agentury. Generálním ředitelem je v současné době Yukiya Amano z Japonska.

Výsledky práce Mezinárodní agentury jsou odborné knihy, normy, předpisy, výukové a tréninkové programy. Dále inspekce a kontroly na jaderných zařízeních, kontroly jaderných materiálů a jeho transportu a technická spolupráce s organizacemi.

Standardy požadavků pro nakládání s jadernými odpady ve světě fungují jako základní stavební kámen pro nakládání s odpady a řídí se jimi státy a mezinárodní seskupení po celém světě. Sice není tyto požadavky nutné dodržovat, ale je doporučováno se jimi řídit. Stejně tak se jimi řídí legislativa Evropské Unie a Česká republika jako člen EU je musí dodržovat.

1.3.3 Euratom

Jedná se Evropské společenství pro atomovou energii, jež působí v oblasti nevojenského využívání jaderné energetiky s cílem přispět k rychlému růstu jaderného průmyslu v členských státech. Mezi činnostmi Euratomu patří rozvoj společného výzkumu, ochrana zdraví a jaderná bezpečnost, provádění bezpečnostních kontrol jaderných zařízení a zajištění zásobování surovinami a palivem, včetně kontroly jeho použití. Štěpné materiály jsou ve vlastnictví Euratomu a členské státy a jejich fyzické a právnické osoby k nim mají pouze právo užívací.

1.3.3.1 Evropská legislativa pro nakládání s odpady

Podle evropské legislativy jsou za nakládání s radioaktivními odpady zodpovědné členské státy, ve kterých byl odpad vyprodukován a to i v případě převozu do jiné země. Stát musí zvolit úřad, který se bude starat o nakládání s odpadem a bude dodržovat tyto podmínky:

- Udržení produkce radioaktivního odpadu na nejnižší možné úrovni.
- Provázání kroků mezi produkcí vyhořelého paliva a radioaktivního odpadu s jejich nakládáním.
- Zabezpečit správu vyhořelého paliva a radioaktivního odpadu v dlouhodobém horizontu.
- Přijmout opatření pro odstupňovaný přístup.
- Řízení všech fází nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem.

Členské státy mají povinnost nakládat s radioaktivními odpady na svém území, pokud se však nedohodly s jiným členským státem o využívání jejich zařízení. V takovém případě musí stát dodržet tyto podmínky:

- Země, do které se bude odpad vyvážet k uložení, musí mít uzavřenou smlouvu s Euratomem, která se týká nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem, nebo smluvně přijímá Společnou úmluvu o bezpečnosti při nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem.
- Země určení má jaderné programy pro nakládání s odpady.
- Úložiště v dané zemi je schváleno pro ukládání odpadu a je v provozu.

Členské státy musí vytvořit, zavést a udržovat aktualizované jaderné programy pro nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivními odpady, které pokrývají všechny fáze od jeho vzniku až po likvidaci. Tyto programy musí být pravidelně přezkoumávány a aktualizovány.

V rámci Euratomu byla v roce 2011 vydána direktiva Evropské Unie, která stanovuje rámec odpovědnosti a bezpečnosti při nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem.

1.3.4 Bezpečnost při nakládání s odpady

Při ukládání radioaktivních odpadů do úložišť musí být zajištěno, aby při provozu těchto zařízení byla zajištěna bezpečnost pro okolí. Proto se provádějí bezpečnostní rozborů daného úložiště, ve kterých se získávají data o uložených odpadech, konstrukčním provedení úložiště, klimatických, hydrologických a hydrogeologických podmínkách v okolí zařízení. Vypracovává se seznam událostí, ke kterým může dojít a které by ohrozily správnou funkčnost zařízení a došlo by tak k uvolnění radioaktivních látek do životního prostředí.

Aby radioaktivní látky v odpadech zůstaly odděleny od biosféry, zajišťuje několikanásobný systém umělých a přírodních bariér. Do bariéry 0 spadá samotná konstrukce palivových článků, které jsou pokryty odolnou slitinou zirkonia a vydrží tak extrémní podmínky v reaktoru. Kovové kontejnery patří do bariéry 1. Kontejnery jsou z chemicky stabilních sloučenin a procházejí testy odolnosti proti tlaku a korozi. Do bariéry 2 se řadí jílový obal, který vyplňuje prostor mezi kontejnerem a okolní horninou. Nejstabilnějším prvkem bezpečnosti je přírodní bariéra, spadající do bariéry 3, kdy je odpad ukládán do utěsněných komor půl kilometru pod povrchem.

1.3.5 Radioaktivní odpady na území ČR

Radioaktivní odpady v České republice pocházejí z průmyslové výroby, zdravotnictví a výzkumu. V porovnání s jinými odpady lidské činnosti je podíl radioaktivních odpadů malý. Tento podíl se řádově pohybuje v setinách procent celkové produkce odpadů. Ročně se u nás vytváří přibližně 450 tun nízkou a středněaktivních odpadů. Vyhořelé palivo z jaderných elektráren se řadí mezi vysoceaktivní odpady a jejich produkce se pohybuje kolem 100 tun ročně.

Radioaktivní odpady se střední a nízkou aktivitou se před umístěním do úložiště musí nejprve vhodným způsobem zpracovat a upravit. U pevných odpadů se tato úprava provádí lisováním. Kapalné odpady se zahušťují a poté se zpevňují ztužidlem. Odpady se plní do sudů, které se umísťují do větších sudů, natřených antikoročním nátěrem. Prostor mezi sudy je vyplněn betonem. Každý sud musí před přijetím do úložiště splňovat podmínky schválené Státním úřadem pro jadernou bezpečnost.

V České republice za ukládání radioaktivních odpadů odpovídá podle atomového zákona Správa úložišť radioaktivních odpadů. Správa ale odpady nezpracovává, přejímá již podmínkám vyhovující sudy k ukládání nebo skladování za přísných kontrolních podmínek od firem, které mají ke zpracování radioaktivních odpadů povolení.

2 Koncepty úložišť radioaktivního odpadu

2.1 Typy úložišť podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii

Ve světě byly vyvinuty různé druhy konstrukčních možností pro zařízení na odstraňování radioaktivních odpadů. Tyto zařízení mají různé stupně uložení a izolace vhodné pro radioaktivní odpad, který obdrží.

Specifické cíle pro likvidaci odpadů:

- Uložení odpadu.
- Izolace odpadu od přístupné biosféry a snížení pravděpodobnosti a všech možných důsledku vniknutí člověka k radioaktivnímu odpadu.
- Zamezit, snížit a oddálit přenesení radionuklidů z odpadu v jakékoliv době do přístupné biosféry.
- Zajistit, aby vniknutí radionuklidů do biosféry, v důsledku jakéhokoliv přechodu z úložiště, bylo s přijatelně nízkými radiologickými důsledky po celou dobu.

Na různé typy úložišť je kladen požadavek k využití úložiště pro různé druhy radioaktivního odpadu. Klasifikace radioaktivního odpadu je vytvořena Mezinárodní agenturou pro jadernou energii. Podle této klasifikace odpadů jsou vytvořeny i koncepty úložišť:

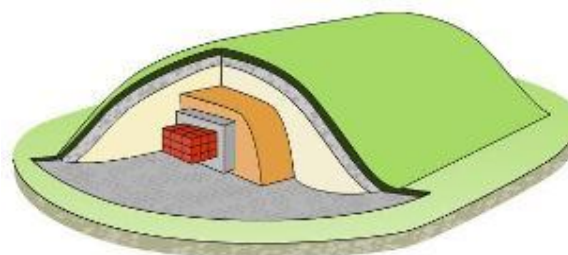
- Povrchové úložiště
- Přípovrchové úložiště
- Úložiště středněaktivního odpadu
- Geologické úložiště
- Úložiště ve vrtu
- Úložiště odpadu vzniklé báňskou činností

2.1.1 Povrchové úložiště

Ukládání probíhá v zařízeních, která jsou podobná jako u klasických skládek průmyslového odpadu, ale zahrnují opatření pro možnost ukládání radioaktivních odpadů. Tyto zařízení jsou určeny pro ukládání velmi nízkoaktivního odpadu (VLLW) s nízkými koncentracemi nebo množstvím radioaktivního obsahu. Typickými odpady ukládanými v těchto zařízeních jsou zeminy a sutě pocházejících z vyřazených radioaktivních látek.

2.1.2 Přípovrchové úložiště

Přípovrchová úložiště jsou určena pro likvidaci nízkoaktivních odpadů obsahujících radionuklidy s krátkou životností, které se rozpadají na radiologicky zanedbatelné koncentrace v časovém rozmezí od několika desetiletí



Obr. 2 Koncept přípovrchového úložiště v krytu [2]

až po století. Přípovrchová úložiště se dělí do dvou kategorií. Jsou to zařízení umístěná v uměle vytvořeném přírodním prostředí, jako jsou valy, příkopy nebo jámy. Dále to jsou zařízení využívající původní povrch, jako jsou skalní dutiny.

2.1.3 Úložiště středněaktivního odpadu

Středněaktivní odpady mohou být ukládány v různých typech úložišť v závislosti na svých vlastnostech. Ukládání může být prováděno v krytech nebo silech umístěných od několika desítek metrů pod zemí až po několik set metrů. Může se jednat o zařízení zvlášť vystavěná k účelu ukládání odpadu nebo zařízení vystavěná ve stávajících dolech. To může rovněž zahrnovat zařízení vyvinuté driftem těžby do úbočí hor nebo do svahu. V takových případech by nadložní kryt mohl být více jak sto metrů hluboký.

2.1.4 Geologická úložiště

Úložiště vybudované v tunelech, v krytech nebo v silech v určité geologické formaci (jedná-li se o dlouhodobý horizont stability a hydrogeologické vlastnosti) umístěné alespoň pár set metrů pod úrovní terénu. Tyto úložná zařízení jsou navržena tak, aby mohla přijímat vysoceaktivní odpady a to i vyhořelé palivo, pokud se považuje za odpad. Nicméně při správně provedeném návrhu zařízení, mohou geologická úložiště přijímat všechny druhy radioaktivního odpadu.

2.1.5 Úložiště ve vrtu

Úložná zařízení ve vrtu jsou tvořena buď jedním vrtem, nebo řadou vrtů. Vrty se nacházejí v hloubce od několika desítek po několik stovek metrů. Úložiště jsou navrženy na ukládání poměrně malých objemů odpadu, především nepoužívané zapečetěné radioaktivní zdroje. Byla také prozkoumána možnost provedení velmi hlubokých vrtů, až několik kilometrů hlubokých, pro ukládání pevných vysoceaktivních odpadů, ale nebyla přijata.

2.1.6 Úložiště odpadu vzniklé báňskou činností

Ukládání se provádí na povrchu nebo v jeho blízkosti. Odpady ukládané v tomto typu úložišť se od jiných radioaktivních odpadů odlišují způsobem vzniku ve velkých objemech, fyzikálně-chemickou formou a obsahem radionuklidů přírodního původu s dlouhým poločasem rozpadu. Odpad je obvykle stabilizován na místě a je zahrnut různými vrstvami hornin a půdy.

2.2 Typy úložišť v České republice

2.2.1 Provozované úložiště

V České republice se v současné době provozují tři přípovrchová úložiště. Úložiště v areálu jaderné elektrárny Dukovany je z nich největší a svou konstrukcí a bezpečností je srovnatelné s úložnými zařízeními v západních zemích. Dochází zde k ukládání nízkoaktivních a středněaktivních odpadů z provozu jaderných elektráren Temelín a Dukovany. Mezi zde ukládané odpady se řadí pevné odpady a odpadní vody. K pevným odpadům se řadí převážně kontaminované ochranné pomůcky, papír, fólie, čisticí textilie, elektroinstalační a balící materiály nebo stavební sutě. Odpady jsou vkládány do 200 litrových sudů, pro které je zde 112 ukládacích železobetonových jímek. Celkový úložný prostor činí 55 000 m³, což je prostor pro 180 tisíc sudů.

U Litoměřic se nachází úložiště Richard, které je svou rozlohou menší než dukovanské a ukládají se zde od roku 1964 institucionální odpady, které vznikají ve zdravotnictví, zemědělství, průmyslu nebo ve výzkumu, což mohou být např. staré měřicí přístroje, radioaktivní zářiče, pracovní oděvy, látky, injekční stříkačky nebo papír. Jedná se o podpovrchové úložiště, které bylo vybudováno v prostorách bývalého vápencového dolu. Odpady se ukládají do 100 litrových sudů, které se poté vloží do 200 litrových sudů. Vznikly

prostor mezi sudy je vyplněn betonem, čímž vzniká 5 cm silná ochranná vrstva. Dnes je zde



Obr. 3 Uložené sudy v úložišti Richard [5]

uloženo více jak 25 tisíc obalových souborů s aktivitou limitovaných radionuklidů na úrovni $6 \cdot 10^{14}$ Bq. Prostory pro ukládání přesahují 8 500 m³ a zaplnění úložiště se odhaduje na rok 2070, při současné rychlosti plnění.

V nejmenším úložišti Bratrství u Jáchymova jsou ukládány odpady s obsahem přirozených radionuklidů. Úložiště je vybudováno v komplexu

bývalého uranového dolu, prostor pro ukládání činí 1 200 m³ a je zde uloženo 2 100 obalových souborů s aktivitou v úrovni 1,8 TBq.

2.2.2 Plánované hlubinné úložiště

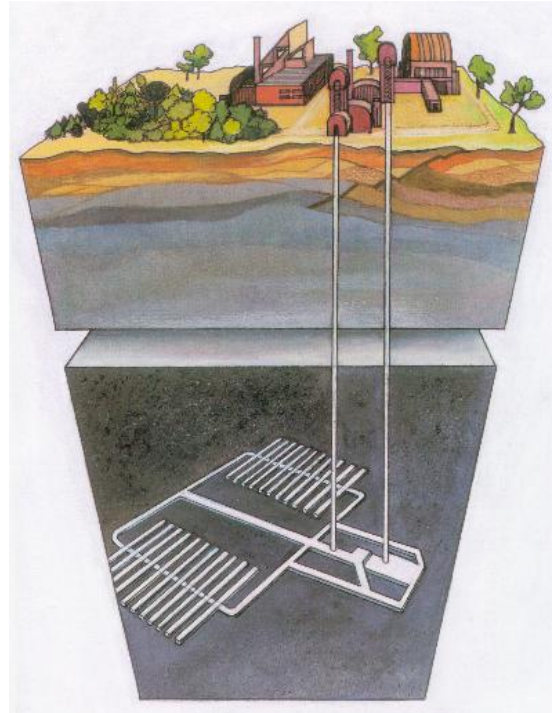
Vyhořelé jaderné palivo je nutné skladovat v hlubinných úložištích. V současné době se v České republice vyhořelé palivo skladuje v meziskladu a to v areálu jaderné elektrárny Dukovany od roku 1995 a od roku 2010 i v areálu elektrárny Temelín. S plánovanou dostavbou 3. a 4. temelínského bloku se zvýší i produkce vyhořelého paliva. Proto je nutné vybudovat hlubinné úložiště pro vyhořelé palivo a dostatečně ho tak zabezpečit.

Hlubinné úložiště bude tvořeno nadzemním areálem, který bude poskytovat technické zázemí a bude propojen přístupovými šachtami a tunely s podzemními prostory. Zde bude docházet k manipulaci a k ukládání kontejnerů s vyhořelým palivem v hloubce zhruba 500 m pod povrchem. Pouzdra s vyhořelým palivem budou ukládána v rozsáhlé síti chodeb, a to jak svisle pod ukládací chodbu, tak vodorovně do stěny chodby. Pro zvýšení izolační schopnosti jsou kontejnery obklopeny ještě izolačním materiálem bentonitem.

Důležité při budování hlubinného úložiště je výběr lokality. Ta musí obsahovat správné horniny se specifickými vlastnostmi na izolaci a zachycování radioaktivních látek. Žulové horniny jsou velmi stabilní a se střední teplotou 10 °C a s tlakem na ukládaný obalový soubor 20 MPa jsou brány jako nejvhodnější prostředí pro vybudování úložiště vzhledem k českým geologickým podmínkám.

Plánování výstavby hlubinného úložiště započalo již v roce 1990 výběrem vhodných geologických lokalit. V roce 2003 bylo vybráno 6 lokalit a bylo provedeno geologicko-fyzikální měření. Kvůli nesouhlasu obyvatelstva však byla měření pozastavena a geologický průzkum lokalit pokračoval v roce 2009. Tento průzkum se dělí na tři fáze. První je fáze vyhledávací. Ta je plánovaná na období mezi lety 2010 až 2015 a zahrnuje mapování lokalit na základě geofyzikálních a geochemických měření. Mapování by mělo dopomoci k návrhu úložiště z hlediska řešení povrchového a podzemního areálu a jejich propojení. K tomuto návrhu bude vybrána jedna hlavní a jedna záložní lokalita.

Druhou fází je ověřovací průzkum. Dojde k němu v letech 2015 až 2025 a budou se provádět vrtné práce a výzkum hornin v dané lokalitě. Mezi roky 2025 až 2035 dojde k fázi bezpečného průzkumu. Bude vystaven horninový komplex spolu s podzemní laboratoří, kde se bude zkoumat vhodnost horninového prostředí. Při úspěšnosti třetí fáze bude zahájena výstavba samotného úložiště a přibližně v roce 2065 by mělo být zařízení uvedeno do provozu.



Obr. 4 Koncept hlubinného úložiště (SÚRAO) [5]

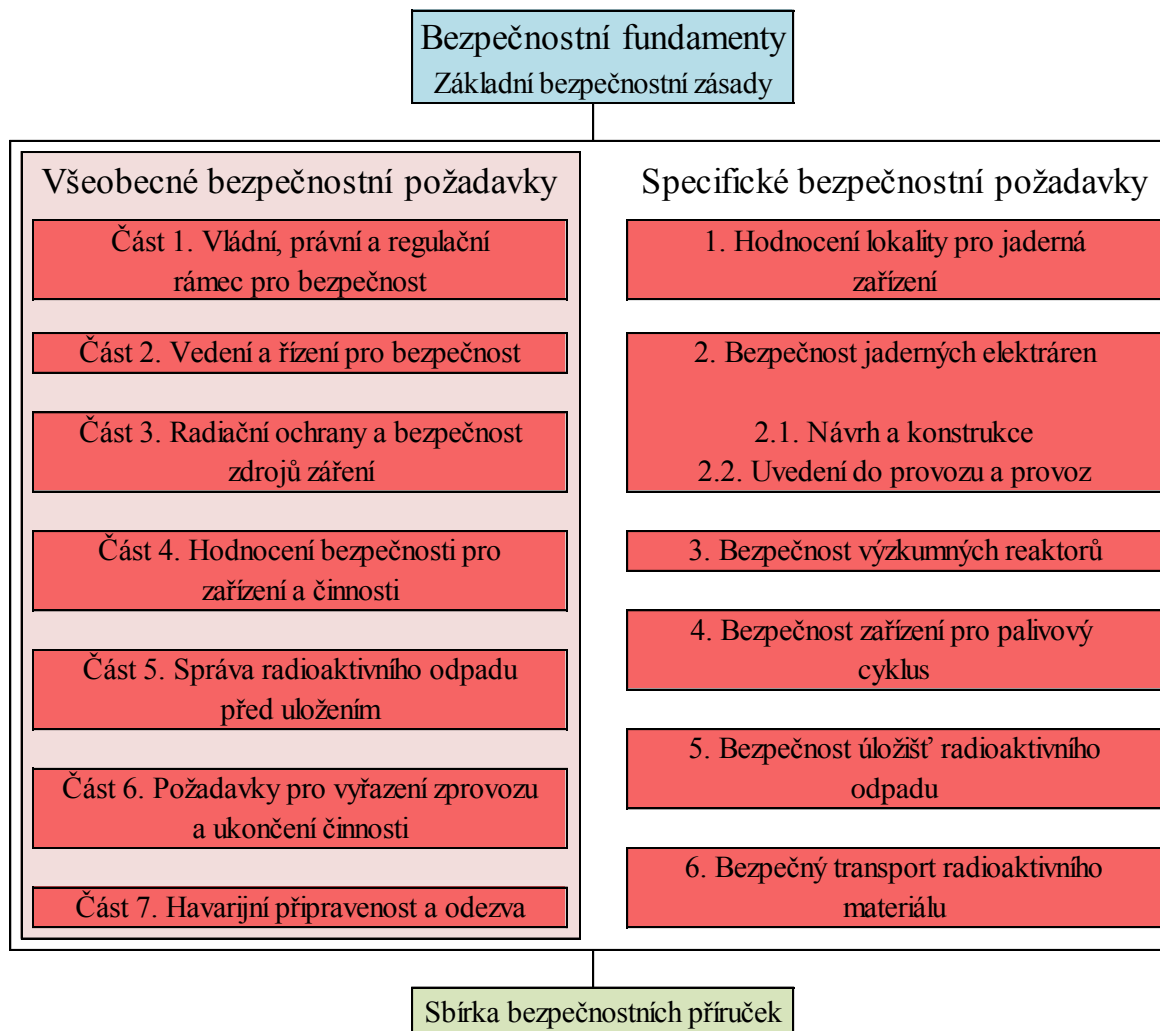
3 Bezpečnostní normy IAEA

Normy zpracované Mezinárodní agenturou pro atomovou energii poskytují celosvětové doporučení pro ochranu lidí a životního prostředí před škodlivými účinky ionizujícího záření. Radioaktivní záření a látky mají mnoho prospěšných aplikací, od využití pro výrobu energie až k použití v lékařství, průmyslu a zemědělství. Radiační rizika pro zaměstnance, veřejnost a životní prostředí, která mohou z těchto aplikací vzniknout, je nutné posuzovat a v určitých případech neustále kontrolovat.

Regulace jaderné bezpečnosti a její kontrola je národní odpovědnost, avšak IAEA požaduje mezinárodní spolupráci. Tento požadavek vychází hlavně z rizik, která mohou přesahovat hranice států. Mezinárodní spolupráce tak slouží hlavně k podpoře a zvýšení bezpečnosti na celém světě tím, že dochází k výměně zkušeností a zlepšování schopnosti kontroly rizik. Předchází se tak nehodám a mimořádným situacím a zmírňují se škodlivé následky.

Vysoká úroveň ochrany osob a životního prostředí po celém světě je založená na bezpečnostních normách Mezinárodní agentury pro atomovou energii. Normy poskytují propracovanou strukturu se základními principy, požadavky a pokyny k zajištění bezpečnosti a ujištění tak, že jaderné zařízení a technologie související s radiací jsou bezpečně používány, čímž se usnadňuje mezinárodní technická spolupráce. Normy jsou vyvíjeny v rámci otevřeného procesu shromažďování, sdílení a integrování znalostí a zkušeností získaných při využívání technologií a při uplatňování bezpečnostních norem.

Hierarchie norem je zobrazena v tabulce a skládá se ze tří hlavních částí. Bezpečnostní fundamenty figurují jako primární vyhlášení v sérii bezpečnostních standardů. Spadají sem základní bezpečnostní principy, které stanovují základní bezpečnostní cíle a principy ochrany a bezpečnosti. Bezpečnostní požadavky představují integrovaný a ucelený soubor publikací, které stanovují požadavky, jenž musí být splněny pro zajištění ochrany osob a životního prostředí. Požadavky se řídí cíli a zásadami základních bezpečnostních principů. Bezpečnostní příručky poskytují především doporučení a rady ke splnění požadavků, s uvedením mezinárodního souhlasu, který je nutný k přijmutí doporučených opatření. Příručky také prezentují již osvědčené postupy k dosažení vysoké úrovně bezpečnosti.



Obr. 5 Rozdělení bezpečnostních norem IAEA [4]

V kapitole základní bezpečnostní zásady jsou představeny dokumenty, které jsou všeobecně aplikovatelné na všechna jaderná zařízení. Následující kapitoly se pak zaměřují na nejdůležitější dokumenty, které se používají konkrétně pro bezpečnostní hodnocení úložišť radioaktivního odpadu.

3.1 Základní bezpečnostní zásady

Bezpečnostní zásady stanovují bezpečnostní cíle a principy ochrany. Zásady se dělí celkem do deseti skupin. Mezi ně patří:

- Odpovědnost za bezpečnost
- Úloha vlády
- Vedení a správa pro bezpečnost

- Odůvodnění vzniku zařízení a jeho činnosti
- Optimalizace ochrany
- Omezení rizik na jednotlivce
- Ochrana současných a budoucích generací
- Prevence před nehodami
- Havarijní připravenost a odezva
- Ochranná opatření k omezení již existujících radiačních rizik

3.1.1 Odpovědnost za bezpečnost

Primární odpovědnost za bezpečnost nesou osoby nebo organizace, jež jsou odpovědné za zařízení a činnosti, které mohou vést k radiačním rizikům. Tyto osoby nebo organizace se uvádí jako držitelé licence a jejich odpovědností je:

- Zřízení a udržování potřebných kompetencí.
- Poskytování odpovídající odborné přípravy a informací.
- Stanovení postupů a opatření k zachování bezpečnosti za všech podmínek.
- Ověřování vhodného návrhu a kvality zařízení a jejich činnosti.
- Zajištění bezpečné kontroly při výrobě, skladování a přepravě radioaktivního materiálu.
- Zajištění bezpečné kontroly vyprodukovaného radioaktivního odpadu.

Jednotlivé povinnosti musí být v souladu s platnými bezpečnostními požadavky, jež jsou stanovené a schválené regulačním orgánem.

3.1.2 Úloha vlády

Musí být stanoven efektivní právní a vládní rámec zajišťující regulaci zařízení, činností s radiačními riziky a přidělení odpovědnosti. Dále je stanoven nezávislý regulační orgán, jehož úkolem je příprava programů opatření ke snížení rizik záření, včetně činností za mimořádných událostí, monitorování úniku radioaktivních látek do životního prostředí a

likvidace radioaktivního odpadu. Vláda a regulační orgány mají tedy velkou zodpovědnost za stanovení potřebných norem a tím i ochranu lidí a životního prostředí, avšak hlavní zodpovědnost stále nese držitel licence.

3.1.3 Vedení a správa pro bezpečnost

Bezpečnosti musí být dosaženo a udrženo prostřednictvím efektivního systému řízení. Tento systém má integrovat všechny prvky řízení tak, aby byly stanoveny a aplikovány požadavky na bezpečnost soudržně s ostatními požadavky, jako výkonnost pracovníků, kvalita a bezpečnost pracovního prostředí. Řídicí systém musí brát rovněž v úvahu možnost organizační nebo lidské chyby. Proto se do systému implementují již osvědčené řídicí postupy. Systém řízení má také zajistit propagaci kultury bezpečnosti, pravidelné hodnocení bezpečnosti a uplatnění získaných zkušeností. Bezpečnostní kultura upravuje postoje a chování organizací a osob ve vztahu k bezpečnosti.

3.1.4 Odůvodnění vzniku zařízení a jeho činnosti

Aby byly zařízení a jejich činnosti oprávněná, musí jejich přínos převážit radiační rizika, která tyto zařízení mohou způsobit. Pro posouzení přínosů a rizik se musí vzít v úvahu všechny významné následky, vznikající při provozování zařízení. Toto posouzení se provádí na nejvyšších místech vlády, často ale stačí posouzení od regulačního orgánu. Vládní rozhodnutí se týká i samotné účasti státu na programu jaderné energie.

Zvláštním případem využití radiačního záření je jeho výskyt v medicíně. Zde totiž vzniká prospěch pro samotného pacienta. Posouzení prospěšnosti tohoto léčebného postupu je tedy závislé na klinickém úsudku, který náleží lékařům. Z tohoto důvodu jsou lékaři vyškoleni v oblasti radiační ochrany.

3.1.5 Optimalizace ochrany

Bezpečnostní opatření u zařízení a činností, která zvyšují radiační rizika, jsou považována za optimalizovaná, pokud poskytují nejvyšší úroveň bezpečnosti, kterých lze dosáhnout po celou dobu životnosti zařízení, aniž by nepřiměřeně omezovaly jeho využití. Aby rizika byla co možná nejnížší za běžného provozu, musí se pravidelně posuzovat a přehodnocovat po celou dobu životnosti zařízení.

Optimalizace ochrany vyžaduje provedení úsudků ohledně relativního významu různých faktorů. Sem se řadí počet pracovníků, kteří mohou být vystaveni záření, velikost a

rozložení dávek, radiační rizika plynoucí z předvídatelných událostí a ekonomické, sociální a environmentální faktory.

3.1.6 Omezení rizik na jednotlivce

Odůvodnění a optimalizace ochrany sami o sobě nezaručují, že žádný jednotlivec nenese nepřijatelné riziko újmy na zdraví. Z toho důvodu jsou dávky a radiační rizika kontrolovány v rámci stanovených limitů. Kontrola limitů, spolu s optimalizací ochrany, je nezbytná pro dosažení požadované úrovně bezpečnosti.

3.1.7 Ochrana současných a budoucích generací

Radiační rizika mohou přesáhnout státní hranice a přetrvávat dlouhou dobu. Při posuzování přiměřenosti opatření proti radiačním rizikům je třeba brát v úvahu možné následky dnes i v budoucnosti. Bezpečnostní normy se tedy vztahují nejen na obyvatelstvo v okolí zařízení, ale i na vzdálenou populaci. Stejně tak musí být zajištěna dostatečná ochranná opatření v případě, že by se následky radiační nehody rozšířily na příští generace. Na příští generace se musí myslet i v souvislosti s nakládáním radioaktivního odpadu. Musí se proto volit bezpečná, proveditelná a pro životní prostředí přijatelná řešení s možností dlouhodobého řízení. Generování radioaktivního odpadu musí být na co možná nejnížší úrovni pomocí konstrukčních opatření a postupů, jako je recyklace a opětovné využití radioaktivních materiálů.

3.1.8 Prevence před nehodami

Nejvíce škodlivé následky pocházejí ze ztráty kontroly nad jaderným reaktorovým jádrem, štěpnou řetězovou reakcí nebo zdroji radioaktivního záření. Musí se proto přijmout opatření k zabránění výskytu poruch nebo neobvyklých podmínek, které by mohly vést ke ztrátě této kontroly.

Hlavním prostředkem prevence a zmírnění následků je ochrana do hloubky. Ta je realizována prostřednictvím řady po sobě jdoucích a nezávislých úrovní ochrany, které by musely selhat, aby došlo k úniku škodlivých látek do životního prostředí. Ochrany na sebe navazují, takže pokud dojde k selhání jedné, bude k dispozici další. Právě nezávislá činnost je nezbytným prvkem při ochraně do hloubky.

Ochrana do hloubky zahrnuje fyzické bariéry, mezi které patří správný návrh a provedení struktury paliva, povlaku palivových tyčí, tlakové nádoby primárního okruhu a

ochranné obálky. Ochrana do hloubky se dále dělí na pět úrovní:

- Prevence selhání provozních systémů.
- Co nejrychlejší návrat do normálního stavu.
- Zabránění rozvoji poruchy do projektových nehod.
- Udržení celistvosti ochranné obálky.
- Ochrana pracovníků a obyvatelstva.

3.1.9 Havarijní připravenost a odezva

Havarijní připravenost je schopnost rozpoznat vznik radiační nehody a při jejím vzniku plnit opatření stanovená havarijními plány. Každé zařízení pracující s radioaktivním materiálem musí vypracovány havarijní plány, které se sestavují na základě havarijních analýz. Ty se provádí způsobem, při kterém se navrhuje inicializační událost nebo porucha, které by mohly zapříčinit radiační nehodu.

3.1.10 Ochranná opatření k omezení již existujících radiačních rizik

Radiační rizika mohou vzniknout i v jiných oblastech než jsou zařízení, která jsou pod dozorem regulačního orgánu. Pokud jsou radiační rizika v takových případech poměrně vysoká, je třeba zvážit, zda je nutné učinit ochranná opatření k nápravě nepříznivých podmínek.

Mezi tyto situace patří záření přírodního původu. Ochranná opatření tak mohou být provedena na pracovištích nebo v domácnostech, kde dochází k vystavení obyvatel účinkům radonu. Avšak v mnoha situacích je málo praktických možností, jak předejít účinkům přírodního záření. Dále sem patří situace, kdy radiační záření pochází z lidských činností prováděných v minulosti, které nebyly regulovány a podrobovány kontrolám. Poskytují-li ochranná opatření dostatečný přínos převažující nad radiačními riziky, považují se v těchto případech za oprávněná.

3.2 Specifické bezpečnostní požadavky na úložiště radioaktivního odpadu

Specifické požadavky se týkají přímo jednotlivých zařízení nebo činností souvisejících s radioaktivními materiály, viz tabulka rozdělení bezpečnostních norem. Požadavky jsou kladeny jak na samotný vývoj těchto zařízení, tak na plánování výstavby a následně samotný

provoz, případně ukončování provozu.

Za bezpečnost při ukládání radioaktivního odpadu odpovídá osoba nebo organizace, která je držitelem licence umožňující jí provozování úložného zařízení. Zajištění bezpečnosti na zařízení se kontroluje příslušným regulačním orgánem. Bezpečnost úložišť po uzavření je zajištěna rozvojem úložného systému, který využívá správného rozvržení technických bariér zařízení, které co nejlépe využívají místní přírodní charakteristiky a bariéry.

Při plánování stavby úložišť radioaktivního odpadu se dodržují požadavky, které se dělí do tří okruhů. Těmito okruhy jsou:

- Vládní, právní a regulační rámec
- Bezpečnostní přístup
- Konstrukční koncepty pro bezpečnost.

Požadavky na vývoj, provoz a uzavření úložiště se dělí také do tří okruhů. Patří sem:

- Rámec pro nakládání s radioaktivním odpadem
- Bezpečnostní dokumentace a hodnocení bezpečnosti
- Postup ve vývoji, provozu a ukončení úložiště.

3.2.1 Požadavky na vládní, právní a regulační rámec

Vládní, právní a regulační rámec musí být vytvořen vládou a musí v něm být jasně přiděleny povinnosti pro navrhovaná úložiště. Mezi povinnosti se řadí nutnost vlastnit potvrzení na národní úrovni, které říká, že je potřeba vystavět úložiště pro ukládání různých typů odpadů. Musí být specifikovány jednotlivé kroky vývoje a licencování zařízení, jasné rozdělení odpovědností, zajištění finančních zdrojů a ustanovení nezávislého regulačního orgánu pro dané úložiště.

Mezi povinnosti regulačního orgánu patří zřízení regulačních požadavků pro rozvoj různých typů úložišť a stanovení požadavků na udělování licencí. Provozovatel, který tuto licenci získá, je odpovědný za bezpečnost zařízení a musí vykonávat nezbytné činnosti jako výběr a hodnocení lokality, výstavbu, provoz, uzavření spolu s dohledem po uzavření. Jednotlivé činnosti musí být v souladu s regulačními požadavky a v rámci právní a regulační infrastruktury.

3.2.2 Požadavky na bezpečnostní přístup

Bezpečnostní přístup musí být provozovatelem zachován po celou dobu vývoje a provozu úložiště. Provozovatel posoudí místo vzniku zařízení a návrh, konstrukce, provoz a uzavření zařízení musí být provedena takovým způsobem, aby byla zajištěna bezpečnost díky pasivním prostředkům. Ty umožní minimalizovat potřebná opatření právě po uzavření zařízení. Pasivní prvky umožňují zajištění bezpečnosti díky stínění obalového materiálu. V provozní fázi jsou však zapotřebí i jistá aktivní opatření jako monitorování nebo údržbové práce. Po uzavření zařízení nejsou tyto aktivní opatření nutná za předpokladu, že radiační rizika jsou již pod kontrolou a na zajištění bezpečnosti vystačí přírodní a umělé překážky. V některých případech je však nutné provádět program monitorování i po uzavření zařízení. Zde se ale spíše jedná o poskytnutí jistoty o bezpečnosti, i když jsou pasivní prvky plně dostačující.

Aby byla dosažena dostatečná úroveň bezpečnosti, musí mít provozovatel odpovídající znalosti ohledně zařízení a jeho hostitelského životního prostředí a faktorů, které ovlivňují bezpečnost zařízení po uzavření na dlouhé časové období.

3.2.3 Konstrukční koncepty pro bezpečnost

Úložiště jsou navrhovány tak, aby izolovaly radionuklidy ve spojení s radioaktivními odpady, izolovaly je od přístupné biosféry a zpomalovaly jejich rozptýlení v geosféře. Odpovídající ochrana do hloubky musí být zajištěna prokázáním existence několika bezpečnostních funkcí, které jsou jednotlivě velmi robustní. Dále musí být prokázáno, že na různé fyzikální složky úložného systému a jejich funkcí musí být spolehnutí z hlediska jejich bezpečnosti.

Uzavření a izolace odpadu musí být poskytnuty prostřednictvím řady fyzických bariér. Mezi fyzické bariéry patří například forma ukládaného odpadu, způsob jeho balení, zásyp, samotné hostitelské životní prostředí a geologické formace. Účinnosti těchto bariér je dosaženo různými fyzikálními a chemickými procesy, spolu s provozními kontrolami. Fyzické a chemické procesy jsou například voděodolnost a nepropustnost, zamezení korozi, uchování radionuklidů a zpomalení jejich úniku. Schopnost jednotlivých bariér a ovládacích prvků musí správně spolupracovat se systémem ukládání odpadu. Tento systém pak nesmí být nepřiměřeně závislý pouze na jedné bezpečnostní funkci.

Radioaktivní odpad musí být bezpečně uzavřen až do doby, kdy se odpad radioaktivním rozpadem dostane se stavu, kdy se výrazně sníží nebezpečí, který odpad představuje. Pro

nízkoaktivní odpady je tato doba řádově několik set let, pro vysoceaktivní odpady jsou to tisíce let. Po tuto dobu musí zajištěna izolace radioaktivních látek před přístupem do biosféry.

3.2.4 Rámec pro nakládání s radioaktivním odpadem

Pro úložiště radioaktivního odpadu musí být naplánovány série kroků pro jejich vývoj, provoz a uzavírání. Tyto jednotlivé kroky jsou podporovány opakujícími se hodnoceními na jednotlivé části při projektování. Tento přístup krok po kroku pro vývoj úložiště odkazuje na kroky, které jsou uloženy regulačním orgánem. Postupný přístup vývoje umožňuje příležitosti k nezávislému technickému posouzení, přezkoumání od regulačního orgánu nebo možnost zapojení veřejnosti. Technická hodnocení musí být provedena ještě před výběrem samotného způsobu likvidace radioaktivního odpadu, před výběrem lokality, před výstavbou a samotným provozem. Jednotlivá hodnocení se musí pravidelně opakovat během provozu zařízení, a to až do ukončení platnosti licence pro zařízení.

3.2.5 Bezpečnostní dokumentace a hodnocení bezpečnosti

Vývoj bezpečnostní dokumentace a podpůrného hodnocení ze strany regulačního orgánu je velmi důležitý pro vývoj a provoz úložišť. Tato dokumentace odůvodňuje bezpečnost zařízení a přispívá tak k celkové důvěře v její bezpečnost. Je velmi zásadní pro veškerá důležitá rozhodnutí, která se týkají úložišť radioaktivního odpadu, poskytuje základ pro pochopení systému ukládání odpadu a zobrazuje jeho chování v průběhu času.

Hodnocení bezpečnosti je proces systematického analyzování všech rizik, která jsou spojená s úložištěm, se schopnostmi dané lokality a s návrhem zařízení, což umožňuje plnit bezpečnostní funkce a technické požadavky. Posuzování bezpečnosti musí být specifické, protože například hostitelské prostředí není normalizováno na rozdíl od navržených technických systémů.

Bezpečnostní dokumentace i hodnocení bezpečnosti musí být velmi podrobně zpracovány a průběžně aktualizovány provozovatelem za pomoci monitorování na každém kroku při vývoji a provozu úložiště, a v době po uzavření úložiště. Následně se předávají regulačnímu orgánu ke schválení. Ten si může vyžádat novou aktualizovanou verzi. Provozovatel regulačnímu orgánu těmito dokumenty dokládá, že je zajištěna dostatečná úroveň ochrany lidí a životního prostředí, a že jsou splněny veškeré požadavky na bezpečnost.

3.2.6 Postup ve vývoji, provozu a ukončení úložiště

Při vývoji úložiště se musí na detailní úrovni charakterizovat hostitelská lokalita a to včetně jejího přirozeného vývoje v průběhu času. Charakteristika zahrnuje její současný stav, tedy geologické, morfologické a topografické vlastnosti půdy, ale i možné ovlivnění volně rostoucími rostlinami nebo žijící zvěří. Dále zahrnuje vývoj lokality v čase s možnými přírodní události, jako je seismická, změny klimatu, vulkanismus nebo proudění podzemních vod. Musí se počítat i s různými činnostmi obyvatel z okolí lokality, které by mohli ovlivnit bezpečnost zařízení, například průmyslovými nebo zemědělskými činnostmi. Počítá se i s ovlivněním lokality samotným zařízením, které je v ní vystavěno.

Úložiště a jeho bariéry musí být navrženy tak, aby zadržely odpad i s jeho nebezpečím a byly při tom fyzicky i chemicky kompatibilní s hostitelským prostředím, ať už z hlediska geologické formace půdy, tak životního prostředí na povrchu. V důsledku existence různých typů odpadů se musí volit takové prostředí, které je svými vlastnostmi optimální pro daný typ odpadu z hlediska bezpečnostních funkcí.

Konstruování úložiště musí být v souladu s projektem, který je popsán ve schválené bezpečnostní dokumentaci a podpůrné bezpečnostní analýze, a při tom se musí zachovat bezpečnostní funkce hostitelského prostředí. Samotný provoz pak musí být v souladu s podmínkami uvedenými v licenci od příslušného regulačního orgánu. Následné uzavření zařízení je pak možné v případě, že se prokáže zajištění bezpečnostních funkcí, které jsou důležité i po uzavření, podle bezpečnostní dokumentace. Bezpečnost zařízení po uzavření je závislá na celé řadě činností a konstrukčních prvků, mezi které řadíme například zasypávání nebo těsnění. Tyto činnosti musí být naplánovány už v počátečním návrhu zařízení a následně jsou aktualizovány podle postupného vývoje konstrukčního provedení úložiště.

Během výstavby úložiště a jeho provozu je potřeba provádět monitorování, které shromažďuje informace nezbytné pro ochranu a bezpečnost. Monitorování se provádí i po uzavření pokud je to nezbytné podle bezpečnostní dokumentace. Údaje z monitorování musí být získány pro potvrzení bezpečnostních podmínek pro pracovníky, obyvatele a životní prostředí.

3.3 Hodnocení bezpečnosti pro přípovrchová úložiště radioaktivního odpadu

Přípovrchová úložiště byla praktikována v mnoha zemích už od roku 1940. Lišily se v návrhu hostitelského prostředí, samotného zařízení a v množství a typech odpadů. Při správném postupu při projektování a výstavbě jsou tyto úložiště nákladově velmi efektivní a

bezpečné při izolaci odpadů. Bezpečnost úložiště a důvěru veřejnosti zvyšují institucionální kontroly po uzavření zařízení. Mezi kontroly patří aktivní (monitorování, dozor a sanační práce) a pasivní (pravidelné kontroly využívané půdy) ovládací prvky. Doba trvání těchto kontrol je závislá na typech uložených odpadů a na typu konstrukce daného zařízení.

Hlavním cílem posuzování bezpečnosti je zjistit potenciální radiační dopad na lidské zdraví a na životní prostředí. Hodnocení zahrnuje zvážení dopadů jak během provozu, tak po uzavření zařízení. Po uzavření zařízení mohou vzniknout radiologické dopady z postupných procesů, jako je degradace bariér. Technická přijatelnost úložiště je závislá na inventáři odpadů, konstrukčních funkcích zařízení a na vhodnosti lokality.

3.3.1 Posuzování bezpečnosti v provozní fázi

Během provozní fáze přípovrchového úložiště může nastat ozáření lidí buď přímým stykem, nebo nepřímo v důsledku úniku plynů a kapalin ze zařízení. Jakékoliv vypouštění do životního prostředí musí být kontrolováno, aby expozice pracovníků a veřejnosti tak nízké, jak je rozumně a ekonomicky dosažitelné. Kromě běžné expozice je třeba věnovat pozornost také nestandardním nebo havarijním situacím, jako je možnost poškození obalu odpadů při manipulaci, požáru nebo zaplavení.

3.3.2 Posuzování bezpečnosti ve fázi po uzavření

Hlavním bezpečnostním problémem po uzavření zařízení je možnost ozáření životního prostředí až po velmi dlouhé době. Časem může docházet k postupnému vyplavování radionuklidů do podzemních vod a následnému přenosu na člověka. K posuzování bezpečnosti je tak třeba promítnout chování zařízení a hostitelského prostředí řádově na stovky až tisíce let dopředu. Cílem hodnocení bezpečnosti po uzavření je tedy získání přiměřené jistoty, že úložné zařízení bude poskytovat dostatečnou úroveň bezpečnosti, spíše než předpovídat jeho budoucí vývoj za různých okolností.

K úniku radioaktivních látek může také dojít v souvislosti s lidským zásahem, který je ale obtížné předpovědět. Proto se provádí opatření jako je omezení koncentrace radionuklidů, uskutečňování kontrol po uzavření, nebo nastavení konstrukčních kritérií, jako je minimální hloubka pro úložiště.

3.3.3 Proces posuzování bezpečnosti

První krok tohoto procesu by měl spočívat v provádění prověřovacích výpočtů, aby bylo možné vyhodnotit navrhovaný koncepční model a zaměřit se na významné radionuklidy, cesty a mechanismy uvolňování, ke kterým jsou potřeba další poznatky. Prověřovací výpočty potřebují údaje o vlastnostech odpadů, bariér a možných cestách pro únik radioaktivních látek. Konkrétně se jedná o tyto údaje:

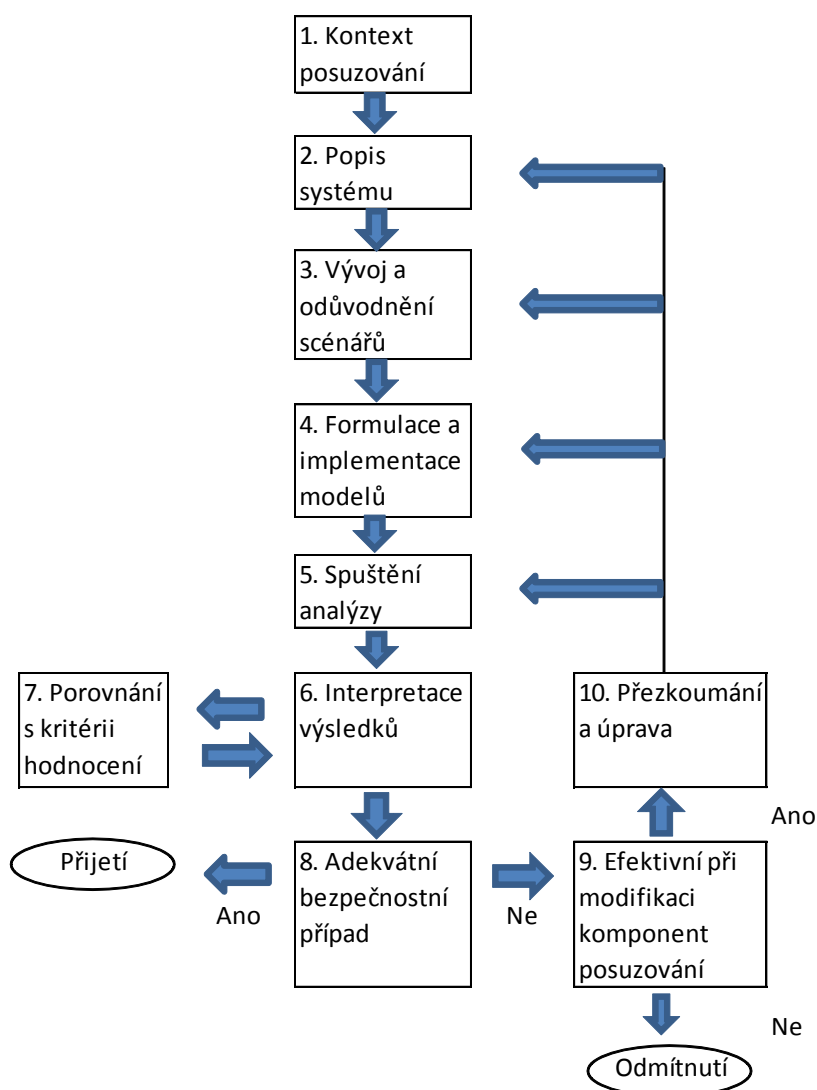
- Vlastnosti odpadu - složení radionuklidů z hlediska rozložení rozpadu v čase, celkový inventář, fyzikální a chemické vlastnosti, míra generace plynů.
- Charakteristiky kontejneru - mechanická a chemická výkonnost v podmínkách likvidace.
- Vlastnosti úložiště - rozměry, vyrovnávací a zásypový materiál, konstrukční materiál, navržené funkce.
- Vlastnosti lokality - geologie, hydrogeologie, geochemické vlastnosti, klimatické podmínky.
- Charakteristika biosféry - atmosférické a vodní podmínky.
- Demografické a socioekonomické charakteristiky - využití půdy, rozložení obyvatelstva.

Proces získávání údajů v terénu, laboratorním vyšetřováním nebo vhodným modelováním zařízení pokračuje do doby, kdy je dosaženo požadované bezpečnosti a úložiště je přijato.

V průběhu procesu se určují příslušné scénáře, jejichž význam na hodnocení bezpečnosti úložišť a hostitelského prostředí může potřebovat podporu studií, další sběr dat a další iterace procesu posuzování bezpečnosti. Tyto studie pak mohou být užitečné při snižování nejistoty při pokusu o vyčíslení událostí a jevů, které vedou k uvolnění a přenosu radionuklidů. I když je posouzení bezpečnosti robustní a je schváleno regulačním orgánem, tak větší nejistota je spojená k dlouhodobým předpovědím. Proto může být zapotřebí, aby se srovnávaly výsledky z jednotlivých období pro monitorování s hodnotami parametrů použitých při analýze. I v době po uzavření zařízení se doporučuje používat rozšířený program na monitorování, který zaznamená údaje pro kontrolu se zjištěnými údaji v procesu posouzení bezpečnosti.

4 Metodika hodnocení bezpečnosti pro přívodová úložiště (ISAM)

Projekt ISAM zahrnuje hodnocení a posílení metodik a nástrojů pro posuzování bezpečnosti přívodových úložišť, jak pro stávající, tak i pro navrhovaná zařízení. Práce se soustředí především na vývoj scénářů a formulaci a implementaci modelových událostí. Hlavním cílem projektu je zajištění kritického zhodnocení přístupů a nástrojů používaných pro vyhodnocování bezpečnosti. Dále vylepšení již používaných přístupů a nástrojů a budování důvěry v tyto metody.



Obr. 6 Metodika projektu ISAM [6]

4.1 Metodika projektu ISAM

Na hodnocení bezpečnosti pro dlouhodobé ukládání odpadů byly vyvíjeny různé metody, které se mohou lišit v detailech používaných přístupů. Většina z nich, společně s projektem ISAM, má následující klíčové komponenty:

- Specifikace kontextu posuzování.
- Popis úložiště a jeho systémů.
- Vývoj a odůvodnění scénářů.
- Formulace a implementace modelů.
- Analýza výsledků a budování důvěry.

Kontext hodnocení definuje, k čemu se hodnocení vztahuje a proč se hodnocení vypracovává. Bráno z kvantitativního hlediska, co se počítá a proč. Z geosférického hlediska jsou odpovědi takové, že se počítá únik radionuklidů z geosféry pro zajištění, že nedojde ke vstupu těchto látek do biosféry.

K popisu úložiště se uvažuje, že se skládá z následujících komponent:

- Blízké bariéry - patří sem samotný odpad, prostory úložiště a technické bariéry.
- Geosféra - skála, kamení a nekonsolidovaný materiál, který leží mezi navrženou konstrukcí úložiště a mezi biosférou.
- Biosféra - fyzická média (atmosféra, půda, sedimenty a povrchové vody) a živé organismy.

Popis úložného zařízení by měl obsahovat popis odpadů (jejich původ, povahu, množství a vlastnosti) a technických bariér. Dále popis geosféry. Měly by tedy být určeny geologické, hydrogeologické a geochemické podmínky. Pro biosféru se určují klimatické a atmosférické podmínky, vodní plochy, lidská činnost, zeměpisný rozsah a umístění.

Scénáře jsou důležité z hlediska hodnocení výkonnosti úložišť v současných i budoucích podmínkách, včetně předpokladů méně pravděpodobných událostí. Je tedy nutné počítat s faktory, jako jsou dlouhé časové periody, lidské chování a změny klimatu. Scénáře popisují alternativní, ale vnitřně konzistentní, budoucí vývoj a podmínky.

Po vyvinutí scénáře se podle jeho povahy analyzují jejich následky na vhodném modelu. Nejprve je vytvořen koncepční model, který dále tvoří základ pro model matematický. Koncepční modely pro každý scénář jsou vyjádřeny v matematické podobě jako skupina algebraických a diferenciálních rovnic s vhodnými okrajovými a počátečními podmínkami. Tyto rovnice a jejich přidružené parametry tvoří základ matematických modelů. Řešení matematických modelů je dosaženo zavedením počítačových nástrojů pomocí analytické nebo numerické metody. Tyto nástroje jsou speciálně vyvinuté pro realizaci vybraných matematických modelů. Do těchto modelů se zavedou nashromážděné údaje o úložišti a jeho okolí a provedou se výpočty.

Za účelem posouzení dopadů úložiště se následně zjištěné výsledky shromažďují, analyzují a prezentují. Interpretace výsledků představuje první příležitost pro analytiku zkoumat kvantitativní výsledky z modelování scénářů. Výsledky by měly být porovnány s platnými kritérii z kontextu hodnocení. Výsledky mohou být také porovnány s výsledky z jiných hodnocení na pomoc při budování důvěry.

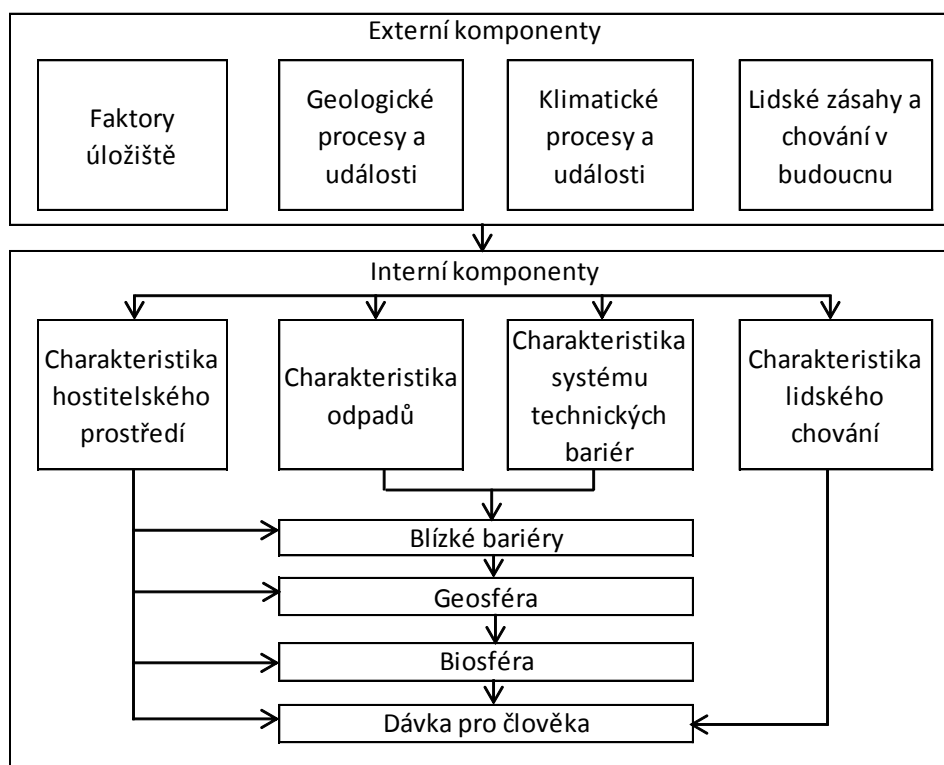
4.2 Vývoj scénářů a jejich zdůvodnění

Bezpečnostní scénáře jsou důležité z několika důvodů. Scénáře poskytují kontext, ve kterém se provádí hodnocení bezpečnosti, ovlivňují vývoje modelů, určují důležitost sběru dat a jsou důležitým aspektem budování důvěry v zařízení po uzavření.

Většina scénářů se před příchodem projektu ISAM věnovala spíše geologickým úložištím. Z bezpečnostního hlediska nebyly tyto scénáře požadovány, i když Mezinárodní agentura pro atomovou energii vyvinula seznam důležitých bezpečnostních posouzení pro povrchová a přípovrchová zařízení a jeho okolí. Mezi programy, které se společně věnují těmto úložištím, v dnešní době patří, kromě ISAM, francouzský program ANDRA a kanadský AECL.

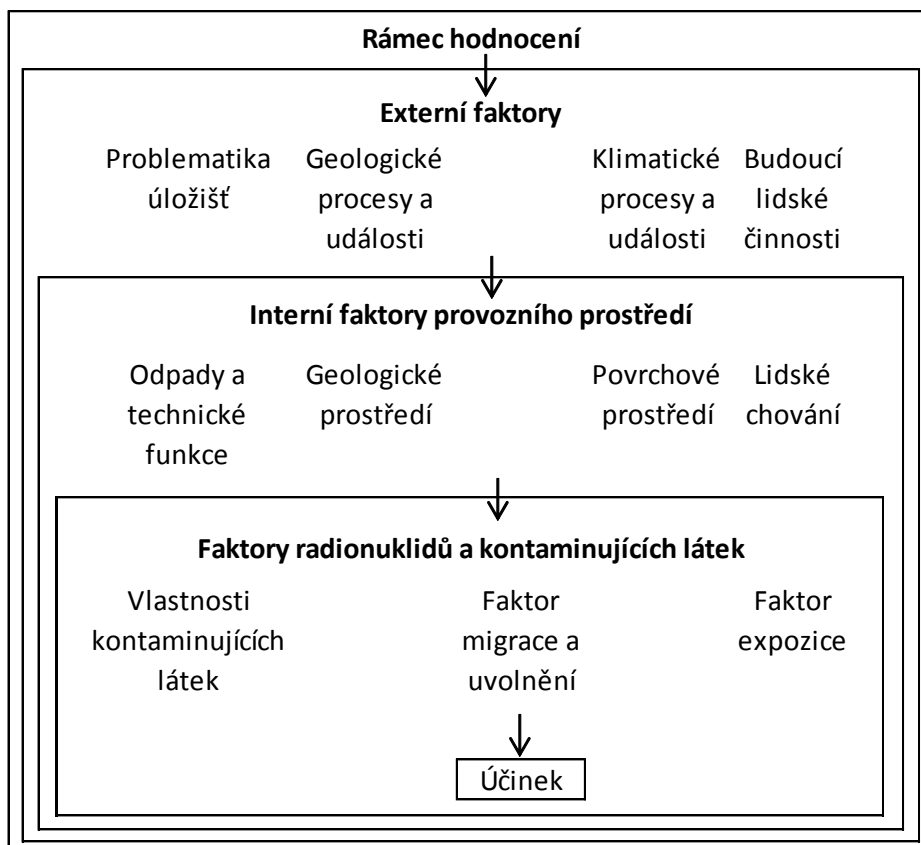
Pro tvorbu scénářů se používá systematický přístup. Ten poskytuje záruku, že v posouzení bezpečnosti se řeší všechny potencionální vlastnosti, události a procesy, a že se zároveň řeší odlišnosti ve výsledcích při kombinaci těchto definujících stavů. Pro více formální přístupy k tvorbě scénáře se vytvářejí obecné scénáře. Pro jejich tvorbu se používá postup, kdy se sestaví seznam scénářů použitých v aktuálních analýzách hodnocení bezpečnosti a podle určitých podmínek daného úložiště se vybere vhodný scénář.

Obečným cílem posouzení bezpečnosti je zjistit, jaký dopad bude mít uložení odpadů na jednotlivce a jejich životního prostředí ve funkci času. To vyžaduje úvahu o tom, jakým způsobem se mohou radionuklidy dostat z úložného zařízení, a po jakých cestách mohou migrovat, aby měli dopad na člověka. Aby se toho dosáhlo, je možné vytvořit systém procesu. Komponenty systému zpracování mohou být snadno rozděleny na vnitřní a vnější části. Vnitřní komponenty jsou ty části, které se nacházejí v rámci prostorových hranic systému úložiště, zatímco vnější součásti jsou umístěny mimo tyto hranice. Rozdělení je uvedeno na obr. 7.



Obr. 7 Konceptní zastoupení jednotlivých složek procesního systému a jejich propojení [6]

Oproti tomu na obr. 8 je zobrazeno schéma klasifikace ze seznamu ISAM pro vlastnosti, události a procesy. Schéma zahrnuje procesy týkající se uniklých kontaminujících látek, jejich migraci a expozici.



Obr. 8 Klasifikační schéma ze seznamu ISAM pro vlastnosti, události a procesy [6]

Rámeček hodnocení definuje faktory, které analytici berou v úvahu při určení rozsahu analýzy. Zahrnují faktory související s regulačními požadavky, faktory definující požadované výpočty a různé fáze hodnocení bezpečnosti.

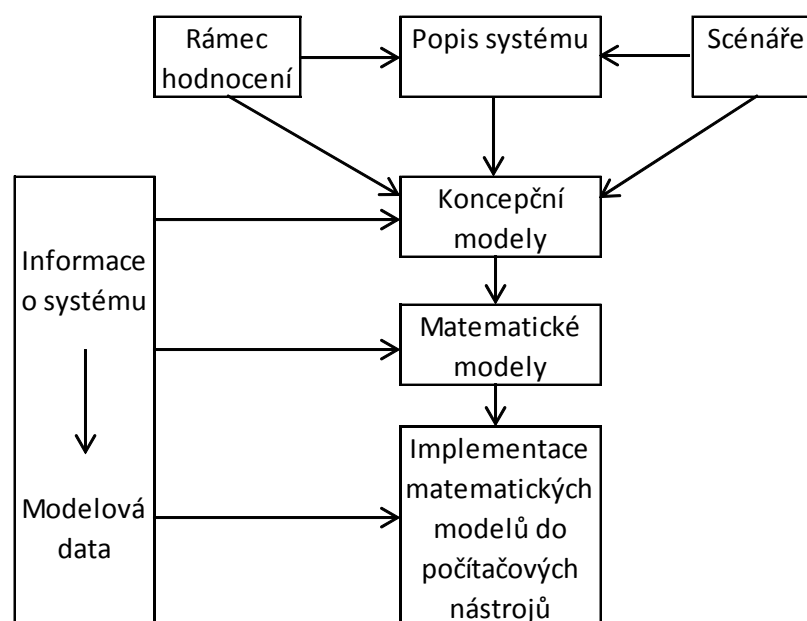
Externí faktory jsou události s příčinami nebo původem mimo úložiště. Jsou to přírodní nebo lidské faktory a jejich bezprostřední účinky. Také sem patří rozhodnutí týkající se konstrukce zařízení, jeho provozu a uzavření, ale také činnosti související s přezkoumáním lokality.

Mezi interní faktory provozního prostředí patří funkce a procesy vyskytující se v tomto prostředí. Patří se určení vývoje fyzikálních, chemických, biologických a lidských podmínek, které jsou důležité pro odhad uvolnění a migraci radionuklidů.

V poslední vrstvě klasifikačního schématu jsou faktory radionuklidů a kontaminujících látek. Tyto faktory jsou procesy, které mají přímý vliv na uvolnění a migraci radionuklidů v systému úložiště. Jsou zde uvažovány radio-toxické a chemicko-toxické druhy látek, které by se mohly v zařízení po jeho uzavření vyvinout.

4.3 Formulace a implementace modelů

Modely jsou důležité pro obranyschopnost a srozumitelnost posouzení bezpečnosti, a jsou často středem pozornosti pro nezávislé recenzenty. Proto je nutné s dalšími kroky v přístupu k hodnocení bezpečnosti, aby proces vytváření a rozvíjení modelů byl formální, obhajitelný a srozumitelný nezávislému přezkumu. Zejména je důležitá identifikace jednotlivých procesů, které mají vliv na uvolnění a migraci radionuklidů. Dále je důležitý výběr a zdůvodnění vhodných nástrojů a dat představující procesy, prostřednictvím podrobných analýz nebo odborných posudků.



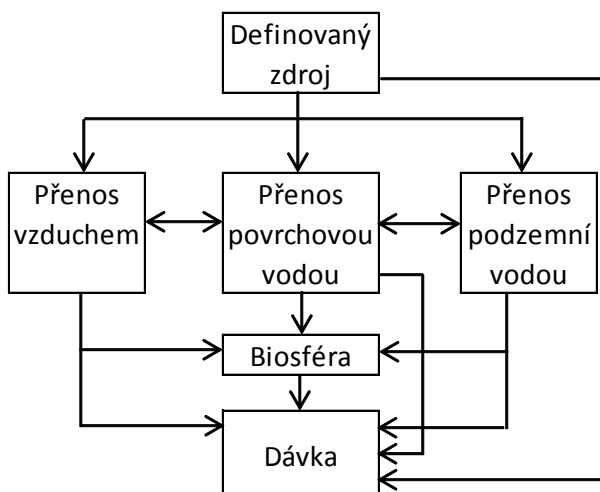
Obr. 9 Proces formulace a implementace modelů [6]

4.3.1 Koncepční modely

Vývoj koncepčních modelů je rozhodující fází procesu hodnocení bezpečnosti, ve které jsou použity různé hypotetické scénáře hodnotící výkonnost úložišť. Posouzení bezpečnosti má za cíl prokázat přiměřenou jistotu, že budoucí obyvatelé a životní prostředí jsou chráněny od potenciálních úniků nebezpečných látek ze zařízení.

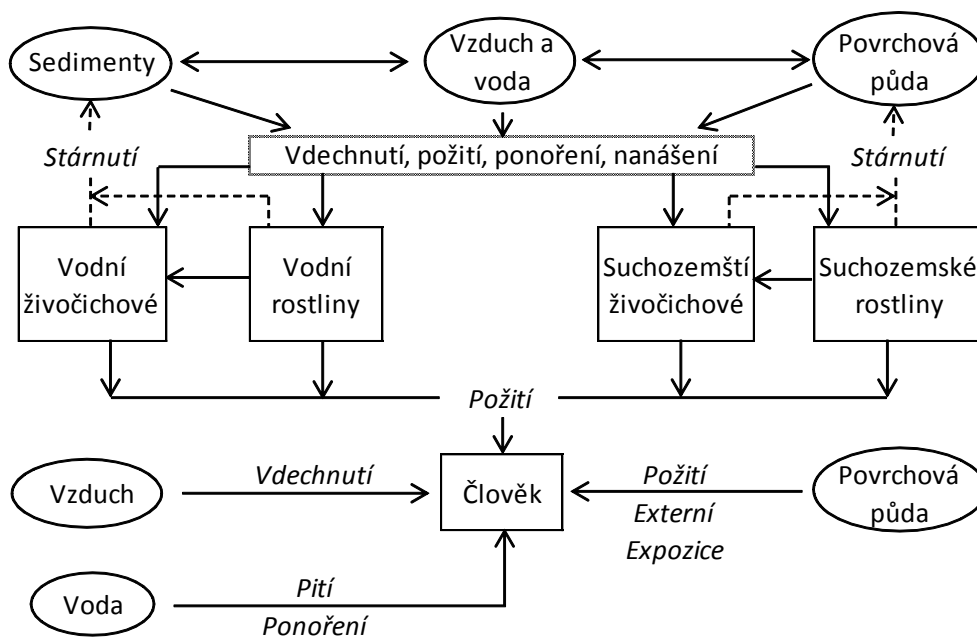
Kvantitativní analýzy důsledků pro scénáře jsou prováděny pomocí matematických modelů, které jsou odvozeny z modelů koncepčních. Koncepční model je definován jako soubor kvalitativních předpokladů používaných k popisu systému nebo subsystému daného účelu. Tyto předpoklady se týkají geometrie a rozměrů systému, počátečních a okrajových

podmínek, časové závislosti, a jsou závislé na povaze příslušných fyzikálních a chemických procesů.



Obr. 10 Příklad koncepčního modelu pro únik, přepravu a expozici radionuklidů [6]

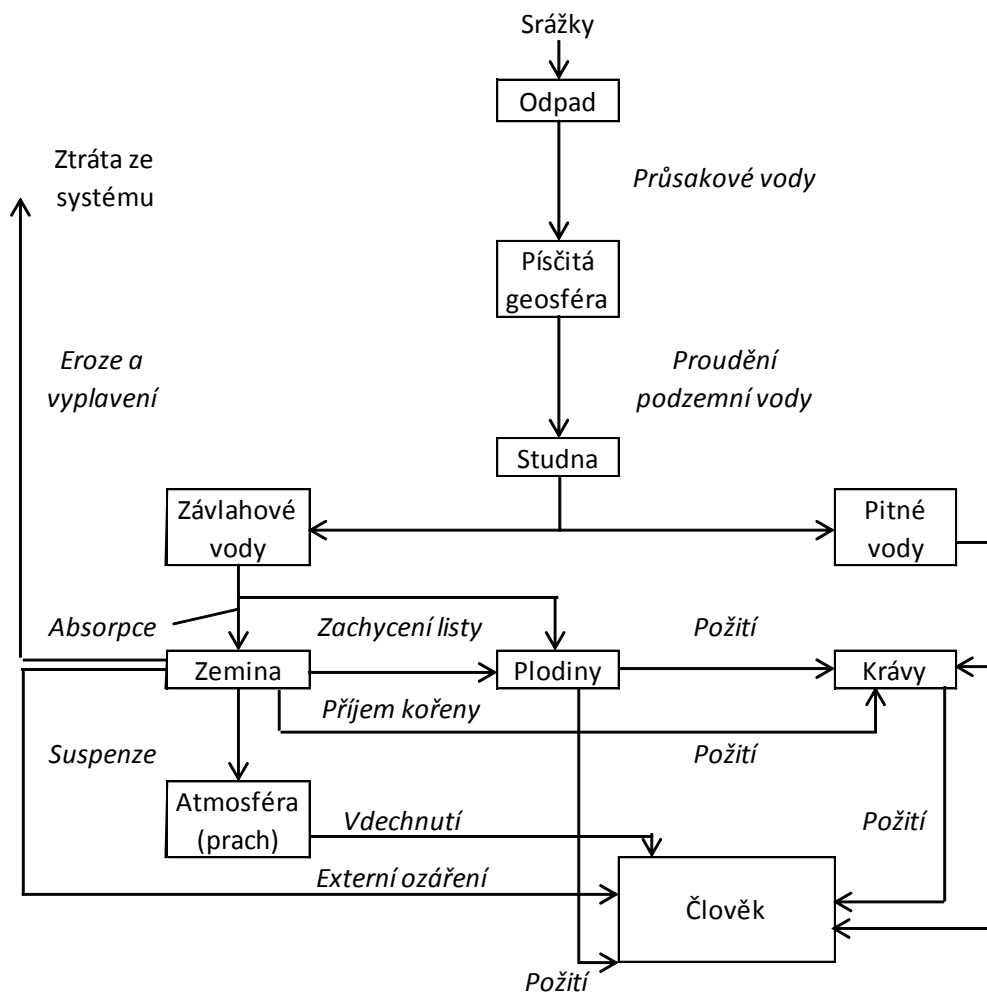
Koncepční modely popisují, jakými způsoby mohou být radionuklidy propuštěny z úložiště do přístupného prostředí (biosféry), jakými způsoby mohou migrovat v geosféře až po cesty, kterými se dostanou k člověku.



Obr. 11 Koncepční model biosférických cest [6]

Biosféra je heterogenní prostředí a při tvorbě koncepčních modelů je často vhodné ji rozdělit do dílčích systémů, v nichž se nacházejí nespojitosti ve vlastnostech (např. ovzduší, voda, půda a sedimenty, rostliny, zvířata a člověk). Jakmile se radionuklidy uvolní do ovzduší, vody, půdy a sedimentů, jsou převzaty rostlinami, zvířaty a člověkem. Na obrázku 11 je zobrazen celkový biosférický koncepční model, ve kterém jsou identifikovány interakce rostlin, živočichů a člověka s médii životního prostředí. Rostliny a zvířata představují potravinový řetězec pro člověka a radionuklidy se tak mohou dostat na člověka požitím.

U modelu je důležitý popis jeho působnosti ve vztahu k předpokladům, na jejichž základě byly modelové situace vyvinuty. Tím se zajistí vhodnost modelu pro daný účel a zabrání se nechtěnému použití modelu mimo svou zamýšlenou oblast použitelnosti. Koncepční modely musí být předmětem matematického vyjádření a musí být dostatečně detailní, aby umožnil matematickému modelu vyvinout popis chování systému a jeho složek.



Obr. 12 Koncepční model pro scénář průsaku [6]

4.3.2 Matematické modely

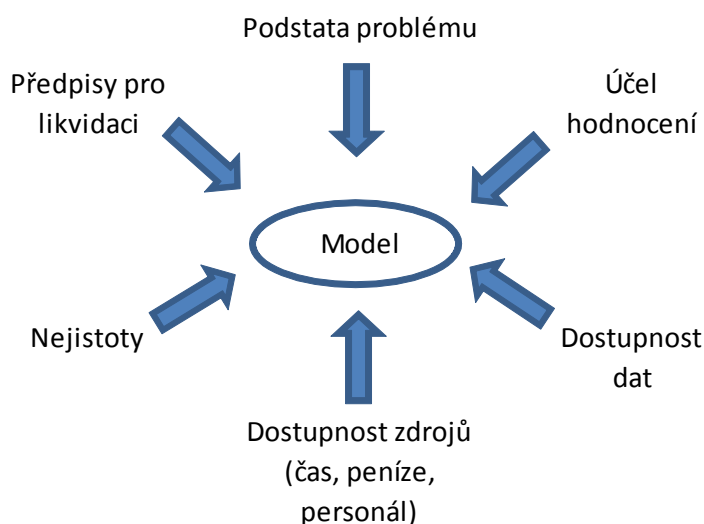
Matematické modely přenášejí předpoklady koncepčních modelů do matematiky. Obvykle bývají reprezentovány soubory algebraických, diferenciálních nebo integrálních rovnic s příslušnými počátečními a okrajovými podmínkami.

Matematické modely jsou důležité ze dvou hlavních důvodů:

- Popisují vývoj úložiště (např. chemický vývoj blízkých bariér, dopady na úložné zařízení při změnách klimatu).
- Popisují přenos radionuklidů v úložišti v čase.

Matematické vyjádření koncepčního modelu je velmi důležité pro hodnocení a pochopení způsobů, jakými jsou potenciálně nebezpečné vlastnosti, události a procesy interpretovány v modelových podmínkách.

Z matematických modelů je sestavena hierarchie podle různého stupně zjednodušení. Nejpodrobnější úroveň zahrnuje výzkumné modely, které jsou sestavovány k pochopení určitých procesů a struktur, jako je průnik radionuklidů v technických a přírodních bariérách. Tyto modely se utváří za pomoci výsledků z experimentů, ve kterých se zkoumají účinky interakcí mezi různými procesy a strukturami. Na druhé straně spektra se nacházejí modely hodnocení, které mohou posloužit k reprezentaci jednotlivých součástí úložiště nebo celého zařízení. Tyto modely mají zjednodušenou geometrii a strukturu ve vztahu k výpočtům a datovým informacím.



Obr. 13 Faktory ovlivňující složitost modelu [6]

Na složitost modelů může mít vliv několik faktorů, jak je uvedeno na obrázku 13. Pro převedení koncepčního modelu do matematického je zapotřebí určité zjednodušení, a to i pro výzkumné modely. Zjednodušení se tak týká například procesů, jako jsou kinetické podmínky v chemických reakcích, které se úplně zanedbávají. Dále dochází ke zjednodušení geometrie nebo struktury různých médií, se kterými se dále počítá jako s homogenními a izotropními. Takovéto zjednodušení ale vytváří jisté nejistoty, protože se při něm mohou ztratit důležité aspekty. Proto je nutné veškeré zjednodušování detailně dokumentovat a zaznamenávat jejich dopady na matematický model.

K popisu vývoje systému v průběhu času se využívají diferenciální rovnice. Pro vyřešení rovnic je nutné znát informace o vnějších vlivech na systém a stav tohoto systému v počátečním okamžiku. Tyto informace se nazývají počáteční nebo okrajové podmínky.

K řešení rovnic se používají různé metody. První z nich jsou analytické metody, které poskytují přesné řešení diferenciálních rovnic popisujících proudění a transport tekutin. Tato metoda se používá pro jednoduché případy, kdy jsou média homogenní a izotropní, a dostupné údaje k systému nejsou příliš přesné. Přesnější řešení rovnic nabízí semi-analytické modely, které se zaměřují především na řešení problematiky proudění tepla. K řešení rovnic tyto metody využívají Laplaceovy transformace.

Mezi analytickými a numerickými metodami se nachází integrální transformační metoda. Tato metoda je velmi přesná a efektivní v případě nelineárních formulací proudění tepla a tekutin. Metoda je vhodná hlavně ke kontrole chyb a k srovnávání výsledků. Při znalosti komplexních okrajových podmínek, kdy vlastnosti materiálů jsou heterogenní a anizotropní, je vhodné provést přísnější analýzu numerickými modely. Tyto modely zahrnují překlad diferenciálních rovnic do systému rovnic, které mohou být řešeny počítačovými programy.

4.3.3 Využití modelových výsledků

Po vytvoření koncepčních a matematických modelů, ze kterých se získají výsledky použité v softwarových nástrojích, se provádějí výpočty k hodnocení dopadů na úložiště. K posouzení bezpečnosti se používají čtyři typy výpočtů.

Výpočty pro stanovení rozsahu jsou založeny na jednoduchých vzorcích, které mohou být počítány na kalkulačkách. Nejsou datově náročné jako podrobnější výpočty a hrají důležitou roli při vývoji scénářů, kdy je třeba vyřadit různé procesy, které mají zanedbatelný vliv na výkon zařízení. Dalším typem výpočtu jsou výpočty pro nejhorší případy, kdy se pro

řešení vybírají scénáře, koncepční a matematické modely, které přeceňují dopady. Naproti tomu deterministické výpočty pracují s hodnotami z podrobných modelů. Výsledky poskytují dostatečné informace k podrobnému zhodnocení možných dopadů na zařízení a používají se k prezentování pro veřejnost. Poslední jsou pravděpodobnostní výpočty, které se využívají u experimentálních programů a studií konstrukce zařízení.

Z výsledků zpracované modely jsou také závislé na vývoji úložiště. V počátečních fázích, například při výběru lokality, jsou modely zjednodušené. V pozdějších fázích, zejména při licencování zařízení, jsou už ale modely velmi komplexní a obsahují mnohem podrobnější údaje. Je ale důležité, aby se proces vývoje a implementace modelu opakoval. Veškeré získané zkušenosti při uplatňování modelu a interpretaci výsledků by měly být použity k přehodnocení předpokladů a rozhodnutí, které byly učiněny v průběhu vývoje modelu. Tímto se dosáhne zpřesnění informací a důležitých parametrů, které v době vývoje modelu nebyly známy. Nově získaná data se u modelů použijí ke zvýšení přesnosti a důvěryhodnosti.

5 Praktické využití metodiky hodnocení bezpečnosti

Kapitola je zaměřena na praktické porovnání metodiky vyvinuté projektem ISAM (Vault test case - testovací případ pro úložiště v krytu) s bezpečnostním hodnocením, které bylo vypracováno pro reálné povrchové úložiště nízko a středně aktivního odpadu s krátkým poločasem rozpadu nacházející se v Evropě. Toto porovnání demonstruje aplikovatelnost metodiky ISAM na reálné úložiště daného typu, pro které byl ISAM vypracován. Porovnání u diskutovaných úložišť je provedeno na jejich koncepčních modelech, vyvinutých v rámci scénáře lidského zásahu.

5.1 ISAM Vault Test Case

Tento případ byl vyvinut v projektu ISAM pro návrh hypotetického přípovrchového úložiště. Konstrukce zařízení byla vypracována na základě dokumentů pro navrhované úložiště ve Spojených státech amerických. Informace získané z dokumentu byly upraveny pro účely případu pro testování úložiště v krytu.

Design zařízení vychází z předpokládaného nízkoaktivního odpadu vzniklého v jaderných elektrárnách, v lékařských a výzkumných institucích, a v průmyslových aplikacích za více jak 30 let dlouhé období provozu. Hypotetické umístění místa úložiště byla vybrána severozápadní část Jižní Afriky.

Hodnocení bezpečnosti je založeno na současném lidském chování, zvykům a činnostech, na lokalitě a na analogových stránkách, které zahrnují změny v oblasti životního prostředí, jako jsou změny klimatu. Modelový případ je uvažován pro neúmyslný lidský zásah, kdy lidé nevědí, že se jedná o úložiště.

5.2 Srovnání scénářů pro lidský zásah

5.2.1 Srovnání vlastností, událostí a procesů pro scénáře lidského vniknutí

Metodika ISAM využívá kompletní seznam vlastností, událostí a procesů, které by mohly přímo nebo nepřímo ovlivnit úložné zařízení a únik radionuklidů. Tyto parametry jsou známy z popisu zařízení. V příloze 1 je uvedeno srovnání vlastností, událostí a procesů použitých pro scénáře lidského zásahu v projektu ISAM a reálného úložiště.

5.2.2 Scénáře pro stavební a pozemní práce

Pro budoucí lidské činnosti existují dvě potenciální reprezentativní kategorie. Jsou to

pozemní / výkopové práce a vrty. ISAM pro tyto činnosti vyvinul scénář pro lidský zásah. V uvažovaném reálném úložišti byly vyvinuty celkem tři scénáře.

- Scénář pro uvažování pracovníků budujících silniční cesty, které se křížují s úložištěm.
- Obytný scénář hodnotící obyvatele žijící trvale v dané lokalitě.
- Scénář pro děti žijící a hrající si v místě lokality zařízení.

Scénář lidského vniknutí ISAM předpokládá lidské vniknutí až po ukončení institucionální kontrolní fáze, tedy za 300 let. Po tomto období se uvažuje, že struktura úložiště (kontejnery, základní deska, stěny) neodradí člověka od vniku a využití vytěženého materiálu pro zemědělské účely. Uvažuje se, že radioaktivní materiál může být pohlcen konstrukcí a vmíchán do půdy a následně může být zpracován zemědělskou činností. Scénář bere v úvahu dopravu radionuklidů na lidi buď přímo při požití zemědělských produktů, jako je zelenina, nebo nepřímo přes maso zvířat nebo vejce.

U scénáře pro reálné úložiště se počítá s tím, že budování obyvatelných čtvrtí započne až po ukončení monitorovací fáze. Uvažuje se budování domů a zahrad, což vyžaduje odstranění trosk z úložiště a jeho výměnu za nové materiály, jako písek nebo štěrk.

Rozdíl mezi těmito scénáři je takový, že reálné úložiště nebere v úvahu zemědělské činnosti. Proto se jako expoziční cesta nepředpokládá požití kontaminovaných produktů, ale vdechnutí.

Předpokládané cesty expozice při stavebních a pozemních pracích			
		Reálné úložiště	ISAM
Vdechnutí	Vdechování prachu nahromaděného ve vnějším prostředí	ANO	ANO
	Vdechování prachu nahromaděného ve vnitřním prostředí	ANO	NE
Expozice	Vnější expozice ve venkovním prostředí	ANO	ANO
	Vnější expozice ve vnitřním prostředí	ANO	NE
Požití	Požítí produktů	NE	ANO
	Neúmyslné požití půdy	NE	ANO

Tab. 1 Předpokládané cesty expozice pro stavební a pozemní práce [6] [8]

5.2.2.1 Porovnání klíčových parametrů pro výpočet dávky

Jsou zvolena data pro výpočet dávky obdržené inhalací. Výpočet dávky v ISAM nebere v úvahu možnost kontaminace vnitřního vzduchu, ale na druhou stranu zahrnuje možnou kontaminaci při zahradničení. V obou případech je výpočet založen na následujících parametrech:

- Úroveň prachu ve vzduchu nad povrchem půdy.
- Obsazení jednotlivci na kontaminované půdě.
- Míra dýchání člověka na kontaminované půdě.
- Koeficient dávky pro inhalaci.

Parametry použité při výpočtu (viz tabulka 2) jsou označeny jako závislé / nezávislé na lokalitě a závislé / nezávislé na designu. Takto může být provedeno přímé porovnání nezávislých parametrů.

U prvního nezávislého parametru pro lokalitu a design je vypočtena úroveň prachu ve vzduchu nad povrchem půdy. Tento parametr je sice nezávislý na designu a lokalitě, ale je ovlivněn scénáři, protože ISAM bere v úvahu hodnotu hladiny prachu $2\text{mg}/\text{m}^3$, protože uvažuje i zemědělské činnosti. U reálného zařízení je prach nižší, protože se nepočítá se zemědělstvím.

Další nezávislý parametr, který je srovnáván, je doba expozice venku. Použité hodnoty jsou závislé především na klimatu lokality. U reálného úložiště se odhaduje čas, který jedinec stráví venku, na 10% dne. Zbýlých 90% dne je čas strávený v interiéru. U scénáře ISAM je čas strávený venku vyšší, vzhledem k odlišným klimatickým podmínkám lokality (severozápad Jižní Afriky).

Klíčové parametry pro výpočet dávek - vdechnutí					
Reálné úložiště			ISAM- Vault Test Case		
Míra akumulace prachu ve vnitřním ovzduší	0.08 mg/m ³	Lokalita/Design Nezávislé	-	-	Lokalita/Design Nezávislé
Míra akumulace prachu ve vnějším ovzduší	0.1 mg/m ³	Lokalita/Design Nezávislé	Prach ve vzduchu nad povrchem půdy	2mg/m ³	Lokalita/Design Nezávislé
Doba expozice uvnitř	328 d/r	Lokalita/Design Nezávislé	-	-	-
Doba expozice venku	36.5 d/r	Lokalita/Design Nezávislé	Čas strávený venku	91.25 d/r	Lokalita/Design Nezávislé
Faktory dávky pro vdechnutí	(Sv/Bq)	Lokalita/Design Nezávislé	Koeficient dávky pro inhalaci	(Sv/Bq)	Lokalita/Design Nezávislé
Specifické aktivity obalů (zcela degradovány v homogenní směsi)	(Bq/g)	Závislé na designu	Koncentrace radionuklidů v suchém povrchu půdy	(Bq/kg)	Závislé na designu
Množství vdechnutého vzduchu uvnitř	26.7 m ³ /d	Lokalita/Design Nezávislé	-	-	-
Množství vdechnutého vzduchu venku	36m ³ /d	Lokalita/Design Nezávislé	Míra dýchání na kontaminované půdě	43.2 m ³ /d	Lokalita/Design Nezávislé
Faktor zvýšení	1	Závislé na scénáři			
Koncentrace prachu z obalů	0.04	Nezávislé na designu			
			Hustota zrna půdy	kg/m ³	Závislé na lokalitě
			Celková pórovitost půdy	0.25	Závislé na lokalitě
			Sorpční koeficient půdy	m ³ /kg	Závislé na lokalitě
			Pórovitost půdy naplněné vodou	0.2	Závislé na lokalitě

Tab. 2 Klíčové parametry pro výpočet dávek při vdechnutí [6] [8]

5.2.3 Scénáře pro vrty studní

Budování studní pro zásobování se vodou je považováno za běžný lidský zvyk. Projekt ISAM zvažuje jejich používání ve scénáři Liquid release. Pro reálné úložiště byly vypracovány scénáře, které počítají s využíváním studní jako zdroje pitné a užitkové vody.

ISAM ve svém scénáři zvažuje radiační dopad v důsledku znečištění zdroje vody. Zařízení je vystaveno proudící podzemní vodě, která může vyplavit radionuklidy a znečistit tak zdroj vody. Počítá se, že betonové bariéry se budou postupně fyzicky degradovat po dobu 500 let a chemicky přes 1000 let. Podzemní voda, vystavená radionuklidům, je získávána ze studní. Uvažuje se její umístění ve vzdálenosti 200m od úložiště. Předpokládá se využití podzemní vody pro farmu o pěti lidech a pěstované plodiny jsou využity pouze pro zvířata. Voda je využita jako pitná pro obyvatele a zvířata, a pro zavlažování. Zvířata přijdou do styku s vodou i při konzumaci vypěstovaných plodin. K obyvatelům lokality se kontaminace dostane přes zvířecí produkty (mléko, maso, vejce), vdechováním prachu z půdy při zavlažování a při použití vody k hygieně.

U reálného úložiště se hodnotí situace po monitorovací fázi a scénář hodnotí důsledky radiačních a chemických dopadů na vodu při uvažování prvků, které jsou na úložišti přítomny na konci monitorovací fáze. Uvažuje se, že studna se nachází na místě s nejvyšší koncentrací radionuklidů a chemických prvků, na ploše 100 ha, která je využívána pro pěstování plodin a pro chov přibližně 50 kusů dobytka. Uvažují se cesty kontaminace požitím, vdechnutím nebo zevním ozářením. Voda se používá jako pitná, pro zavlažování a zapájení.

Pro oba scénáře se uvažují přenosové cesty do biosféry pitnou vodou, zavlažováním, přenesením do plodin a zvířat, a přenesením na člověka vdechováním částic půdy, požitím plodin nebo zvířecími produkty. Rozdíl mezi scénáři je, že reálné úložiště uvažuje i radionuklidy suspendované ve vzduchu. Proti tomu ISAM uvažuje používání vody na hygienu.

Předpokládané cesty expozice pro scénáře studní			
		Reálné úložiště	ISAM
Vdechnutí	Vdechnutí prachu nahromaděného ve vnějším ovzduší při zavlažování	ANO	ANO
Vnější expozice	Vnější ozáření z půdy v důsledku zavlažování	ANO	ANO
	Vnější ozáření radionuklidů suspendovanými v ovzduší	ANO	NE
	Vnější ozáření z vody určené k hygieně	NE	ANO
Požítí	Požítí produktů ze zvířet	ANO	ANO
	Neúmyslné požití půdy	ANO (pro děti)	ANO
	Požítí plodin	ANO	NE
	Požítí vody	ANO	ANO

Tab. 3 Předpokládané cesty expozice u studní [6] [8]

5.2.3.1 Porovnání klíčových parametrů pro výpočet dávky

Srovnání je provedeno na výpočtu dávky, která pochází z příjmu kontaminovaných potravin a pitné vody. Výpočet dávky je konzistentní pro oba typy scénářů. Dávka se počítá z míry spotřeby živočišných produktů (kg/rok).

ISAM používá vzorce na výpočet koncentrace radionuklidů, které zohledňují u ovcí požití kontaminované pastviny, vody ze studny a kontaminované vlhké půdy. U krav a kuřat se uvažuje pouze požití kontaminované vody, protože krmivo se dováží a je tedy nekontaminované. Vzorce koncentrace radionuklidů pro krávy a kuřata se tedy liší od vzorců pro ovce. U reálného úložiště se u zvířat uvažuje pouze jeden vzorec, a to pro příjem kontaminované vody ze zavlažování.

Klíčové parametry pro výpočet dávek - požití					
Požití zvířecích produktů					
ISAM Vault Test Case			Reálné úložiště		
Individuální míra spotřeby zvířecích produktů			Individuální míra spotřeby zvířecích produktů		
Spotřeba hovězího masa	180 kg/r	Lokalita/Design Nezávislé	Spotřeba hovězího masa	18 kg/r	Lokalita/Design Nezávislé
Spotřeba vajec	20 kg/r	Lokalita/Design Nezávislé	Spotřeba vajec	11 kg/r	Lokalita/Design Nezávislé
Spotřeba skopového masa	140 kg/r	Lokalita/Design Nezávislé	Spotřeba skopového masa	2 kg/r	Lokalita/Design Nezávislé
Spotřeba mléka	255kg/r	Lokalita/Design Nezávislé	Spotřeba mléka	101 l/r (104 kg/r)	Lokalita/Design Nezávislé
			Zelenina	24 kg/r	Lokalita/Design Nezávislé
			Ovoce	62 kg/r	Lokalita/Design Nezávislé
			Brambory	47 kg/r	Lokalita/Design Nezávislé
			Kořenová zelenina	11 kg/r	Lokalita/Design Nezávislé
Koncentrace radionuklidů ve zvířecích produktech	Bq/kg	Lokalita/Design Závislé	Koncentrace radionuklidů ve zvířecích produktech	Bq/kg	Lokalita/Design Závislé
Koeficient dávky pro požití	Sv/Bq	Lokalita/Design Nezávislé	Koeficient dávky pro požití	Sv/Bq	Lokalita/Design Nezávislé

Tab. 4 Klíčové parametry pro výpočet dávky při požití [6] [8]

Výpočet dávky z požití kontaminované vody je stejný v obou případech. Dávka se počítá z koeficientu dávky při požití (Sv/Bq), z individuální míry požití vody (kg/rok) a z koncentrace radionuklidů v pitné vodě (Bq/kg). Hodnoty z individuální míry požití vody se liší v závislosti na klimatu lokality úložiště.

Klíčové parametry pro výpočet dávek - požití					
Pitná voda					
ISAM			Reálné úložiště		
Koncentrace radionuklidů ve studni	Bq/m ³	Lokalita/Design Závislé	Koncentrace radionuklidů ve vodě	Bq/m ³	Lokalita/Design Závislé
Individuální míry požití sladké vody	0.8 m ³ /r	Lokalita/Design Nezávislé	Individuální míry požití sladké vody	0.44 m ³ /r	Lokalita/Design Nezávislé
Koeficient dávky pro požití	Sv/Bq	Lokalita/Design Nezávislé	Koeficient dávky pro požití	Sv/Bq	Lokalita/Design Nezávislé

Tab. 5 Klíčové parametry pro výpočet dávky z požití kontaminované pitné vody [6] [8]

5.3 Srovnání postupů mezi reálným úložištěm a projektem ISAM

Ze srovnání obou scénářů vyplývá, že projekt ISAM lze dobře aplikovat na reálná úložiště. Srovnání koncentrace radionuklidů se neprovádí, jelikož se pro jejich výpočet použily rozdílné předpoklady. Výsledná data pro dávkový koeficient jsou ve velké většině identická. Pro hodnocení bezpečnosti je ale důležité brát v úvahu, že ve scénářích musí být použita data, která jsou specifikovaná pro konkrétní lokalitu a její klima, specifika úložiště a zvyky obyvatel v dané lokalitě úložiště.

Závěr

Pro hodnocení bezpečnosti úložišť jaderného odpadu jsou velmi důležité vydávané normy a příručky od Mezinárodní agentury pro atomovou energii. Podle těchto požadavků pro jadernou bezpečnost se následně řídí i národní regulační orgány, jejichž vypracovaná legislativa by měla být založena právě na požadavcích IAEA. České legislativa ovšem nezahrnuje veškeré normy týkající se jaderné bezpečnosti, a proto je nutné, aby se podle mezinárodních požadavků řídily i samotní provozovatelé jaderných zařízení. Pro provozovatele jsou pak velmi důležité příručky, které sice neobsahují žádné požadavky, ale naopak poskytují provozovatelům návod, jak dosáhnout požadavků, které jsou definované na vyšších úrovních ve struktuře IAEA dokumentů.

Veškeré normy a předpisy, které IAEA vydává, jsou orientovány pro různé stupně jaderné bezpečnosti a pro různé typy zařízení pracujících s radioaktivními materiály. Orientace mezi dokumenty není vždy jednoduchá, proto je v diplomové práci uveden seznam se všemi normami a příručkami, které lze aplikovat na přípovrchová a povrchová úložiště radioaktivních odpadů. U všech požadavků je vždy uveden popis daného dokumentu, který udává, čeho se dokumenty týkají a jaké je jejich použití.

Provádění bezpečnostního hodnocení přípovrchových úložišť je velmi důležité, z hlediska dlouhodobých rizik, která se časem mohou vyvinout. Tyto rizika mohou mít nebezpečný dopad na obyvatelstvo a životní prostředí nejen dnes, ale i za několik generací. Hodnocení bezpečnosti tak musí být velice podrobně zpracováno a průběžně aktualizováno provozovatelem na každém kroku při vývoji, provozu a po uzavření úložiště.

Pro hodnocení bezpečnosti přípovrchových úložišť je vhodné využívat projekt ISAM, který poskytuje podrobné návody pro vypracování hodnocení. Projekt se věnuje hodnocení bezpečnosti za použití vypracování scénářů a modelů, díky kterým se předvídají různé situace, které na zařízení mohou nastat. Při průběžném aktualizování parametrů pro odpady, technické a geologické bariéry, které se získávají při monitorování, mohou být úložiště bezpečně zajištěny proti vývoji různých nebezpečných situací.

V diplomové práci byl projekt ISAM srovnán se scénářem pro reálné úložiště a ze srovnání vyplývá, že ISAM je dobře aplikovatelný. Musejí se ale brát v úvahu specifika konkrétních úložišť, vlastnosti lokality s jejím klimatem a zvyky obyvatel v dané lokalitě. S tímto závěrečným bodem splnila diplomová práce všechny body zadání.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] IAEA, *Classification of radioactive waste*. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419_web.pdf
- [2] *Koncept přípovrchového úložiště v krytu*. Dostupné z: <http://www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=14472>
- [3] IAEA, *Disposal of radioactive waste*. Dostupné z: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1449web.pdf>
- [4] IAEA, *Bezpečnostní normy IAEA*. Dostupné z: <http://www-ns.iaea.org/standards/>
- [5] SÚRAO, *Úložiště radioaktivních odpadů*. Dostupné z: <http://www.surao.cz/cze/Uloziste-radioaktivnich-odpadu>
- [6] IAEA, *ISAM*. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/ISAM/IAEA-ISAM-Vol1_web.pdf
- [7] SÚJB, *Vyhláška státního úřadu pro jadernou bezpečnost ze dne 13. června 2002 o radiační ochraně*. Dostupné z: http://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasiky/307_po_novele.pdf
- [8] Safety Assessment of Near Surface Disposal Facilities, Jana Rajzrova, Internship Report Universite Paris Sud XXI, 2012

Seznam příloh

Příloha 1: Publikace bezpečnostních norem IAEA

Příloha 2: Srovnání scénářů reálného úložiště a ISAM Test Case pro různé situace

Úroveň	Rok vydání	Název En/Cz	Obsah	Klíčové téma	Jazyk
Safety fundamentals / Bezpečnostní fundamenty					
SF-1	2006	Fundamental Safety Principles / Základní bezpečnostní zásady	Bezpečnostní fundamenty figurují jako primární vyhlášení v sérii bezpečnostních standardů. Spadají sem základní bezpečnostní principy, které stanovují základní bezpečnostní cíle a principy ochrany a bezpečnosti.	Bezpečnostní zásady	En, Fr
General safety requirements / Všeobecné bezpečnostní požadavky					
GS-R-2	2002	Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency / Havarijní připravenost a odezva při mimořádných havarijních situacích	Publikace stanovuje bezpečnostní požadavky potřebné pro dosažení odpovídající úrovně havarijní připravenosti a odezvy na jaderné nebo radiační mimořádné situace. Jejich implementace je určena k minimalizaci následků těchto situací pro lidi, majetek a životní prostředí.	Havarijní připravenost a odezva	En, Fr
GS-R-3	2006	The Management System for Facilities and Activities Safety Requirements / Bezpečnostní požadavky na řídicí systém pro zařízení a činnosti	Publikace definuje požadavky pro zřízení, implementaci, hodnocení a neustálého zlepšování řídicího systému, který zahrnuje bezpečnost, zdraví, bezpečnost, kvalitu a ekonomické požadavky zajišťující řádné zohlednění bezpečnosti ve všech činnostech organizace.	Řídicí systém	En, Fr
GSR Part 1	2010	Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety General Safety Requirements / Požadavky na vládní, právní a regulační rámec pro bezpečnost	Publikace je zacílena na stanovení bezpečnostních požadavků ve vládním, právním a regulačním rámci pro bezpečnost. Bezpečnost je třeba stanovit pro celou řadu zařízení a činností, od využívání omezeného počtu radiačních zdrojů až po jaderný program. Ne všechny požadavky jsou relevantní pro všechny státy, je třeba vzít v úvahu podmínky v daném státě a radiační rizika spojená se zde provozovaným jaderným zařízením.	Vládní, právní a regulační rámec	En, Fr
GSR Part 3	2011	Radiation Protection and Safety of Radiation Sources / Radiační ochrana a bezpečnost zdrojů záření	Publikace norem, které stanovují požadavky na bezpečnost zdrojů záření a na ochranu lidí a životního prostředí před škodlivými účinky ionizujícího záření. Požadavky těchto norem se dělí do tří skupin podle expoziční situace. Patří sem plánovaná, havarijní a existující expoziční situace.	Zdroje záření	En
GSR Part 4	2009	Safety Assessment for Facilities and Activities / Hodnocení bezpečnosti pro zařízení a činnosti	Publikace stanovuje obecně platné požadavky, které je třeba splnit při posuzování bezpečnosti zařízení a činností, se zvláštním zřetelem na ochranu do hloubky, kvantitativní analýzy a použití odstupňovaného přístupu k zařízení a provozovaným činnostem. Publikace poskytuje konzistentní a soudržný základ pro posuzování bezpečnosti v rámci zařízení, a usnadňuje tak přenos osvědčených postupů mezi organizacemi provádějícími posuzování bezpečnosti.	Hodnocení bezpečnosti	En, Fr

GSR Part 5	2009	Predisposal Management of Radioactive Waste / Správa radioaktivního odpadu před uložením	Publikace bezpečnostních požadavků stanovující požadavky, které musí být splněny před uložením odpadu. Spadají sem cíle, kritéria a požadavky na ochranu lidského zdraví a životního prostředí, které se vztahují k umístění, konstrukci, výstavbě, uvedení do provozu a odstavení zařízení.	Nakládání s odpady před uložením	En, Fr
WS-R-5	2006	Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material Safety Requirements / Požadavky na ukončení provozu zařízení pracující s radioaktivním materiálem	Publikace stanovuje základní požadavky na bezpečnost, které musí být splněny při plánování a realizaci ukončování provozu úložného zařízení a požadavky na propuštění zařízení z regulativní kontroly.	Zařízení pracující s radioaktivním materiálem	En, Fr
Specific safety requirements / Specifické bezpečnostní požadavky					
NS-R-3	2003	Site evaluation for nuclear installations / Hodnocení hostitelského prostředí pro jaderná zařízení	Publikace stanovuje požadavky na hodnocení prostředí, ve kterém je umístěno jaderné zařízení. Jsou charakterizovány specifické podmínky tohoto prostředí v jeho vztahu k zařízení. Jsou stanoveny požadavky na kritéria, která jsou použita podle potřeby na prostředí nebo prostředí ve vztahu k zařízení v provozním stavu nebo za havarijních podmínek.	Hodnocení prostředí	En, Fr
SSR-2/1	2012	Safety of nuclear power plants: Design / Bezpečnost jaderných elektráren: Návrh a konstrukce	Publikace stanovuje požadavky na konstrukci, systémy a komponenty jaderné elektrárny. Dále postupy a organizační procesy důležité pro bezpečnost, které musí být splněny pro bezpečný provoz a k prevenci událostí, které by mohly ohrozit bezpečnost.	Konstrukční bezpečnost	En, Fr
SSR-2/2	2011	Safety of nuclear power plants: Commissioning and operation / Bezpečnost jaderných elektráren: Uvedení do provozu a provoz	Publikace stanovuje požadavky, které na základě zkušeností a současného stavu techniky, musí být splněny pro zajištění bezpečného provozu jaderných elektráren. Tyto požadavky jsou řízeny bezpečnostními cíly a zásadami, které jsou ustanoveny v základních bezpečnostních principech.	Podmínky pro provoz	En, Fr
NS-R-4	2005	Safety of research reactors / Bezpečnost výzkumných reaktorů	Publikace poskytuje základ pro bezpečnost a posuzování bezpečnosti všech fází doby života výzkumného reaktoru. Dále stanovuje požadavky na aspekty týkající se regulační kontroly, řízení bezpečnosti, hodnocení prostředí, konstrukci, provozu a vyřazení z provozu.	Bezpečnost výzkumného reaktoru	En, Fr
NS-R-5	2008	Safety of nuclear fuel cycle facilities / Bezpečnost zařízení pro palivový cyklus	Publikace stanovuje požadavky, které musí být splněny, aby byla zajištěna bezpečnost na všech fázích doby života zařízení pro palivový cyklus. Patří sem výběr lokace pro umístění, návrh, výstavba, uvedení do provozu, samotný provoz a vyřazení z provozu.	Bezpečnost zařízení pro palivový cyklus	En
SSR-5	2011	Disposal of radioactive waste / Bezpečnost úložišť radioaktivního odpadu	Publikace stanovuje bezpečnostní cíle a kritéria pro likvidaci všech druhů radioaktivního odpadu a stanovuje požadavky, které musí být splněny při ukládání radioaktivního odpadu. Požadavky se týkají nakládání s odpadem a rozhodování ve vztahu k vývoji, provozu a uzavření úložišť.	Bezpečnost úložišť	En, Fr

SSR-6	2012	Regulations for the safe transport of radioactive material / Bezpečný transport radioaktivního materiálu	Publikace stanovuje požadavky na zajištění bezpečnosti a ochrany osob, majetku a životního prostředí před účinky záření při přepravě radioaktivního materiálu. Jsou zde kladeny požadavky na kontejnment s radioaktivním obsahem, na kontrolu vnější úrovně záření, na ochranu před kritičností a před vyvíjeným teplem.	Bezpečnost při přepravě radioaktivního materiálu	En, Fr
Collection of safety guides / Sbírka bezpečnostních příruček - Obecné					
GSG-1	2009	Classification of Radioactive Waste / Klasifikace nakládání s radioaktivními odpady	Příručka stanovuje obecné schéma pro klasifikaci radioaktivního odpadu, které se zaměřuje především na dlouhodobou bezpečnost. Pomáhá tak rozvíjet a zavádět vhodné strategie pro nakládání s odpady a usnadňuje komunikaci a výměnu informací mezi státy.	Klasifikace odpadů	En
GSG-2	2011	Criteria for use in preparedness and response for a nuclear or radiological emergency / Kritéria pro radiační připravenost a odezvu při mimořádné situaci	Příručka prezentuje soubor obecných kritérií, které tvoří základ pro rozvoj provozní úrovně potřebné pro rozhodování o ochranných opatřeních za mimořádných situací.	Radiační připravenost a odezva	En, Fr
SSG-12	2010	Licensing process for nuclear installations / Licenční proces pro jaderná zařízení	Příručka popisuje proces licencování jaderného zařízení v jednotlivých fázích života tohoto zařízení (výběr prostředí, design, konstrukce, uvedení do provozu, vyřazení a propuštění z regulativní kontroly).	Licenční proces	En
GS-G-3.2	2008	Management system for technical services in radiation safety / Řídicí systém pro technické služby v radiační ochraně	Příručka poskytuje návod na splnění požadavků pro vývoj a zavádění systémů řízení pro poskytovatele technických služeb v radiační bezpečnosti.	Řídicí systém pro technické služby	En, Fr
GS-G-3.3	2008	Management system for the processing, handling and storage of radioactive waste / Řídicí systém pro zpracování, manipulaci a skladování radioaktivního odpadu	Příručka poskytuje doporučení týkající se rozvoje a zavádění systémů řízení pro předběžnou úpravu, zpracování, úpravu a skladování radioaktivního odpadu.	Řídicí systém pro nakládání s odpady	En
GS-G-3.4	2008	Management system for the disposal of radioactive waste / Řídicí systém pro úložiště radioaktivního odpadu	Příručka poskytuje doporučení týkající se rozvoje a zavádění systémů řízení pro všechny druhy zařízení pro nakládání s radioaktivním odpadem a souvisejících činností. Řídicí systémy se vztahují na různé typy úložišť s různými odpady.	Řídicí systém pro úložiště	En
GS-G-2.1	2007	Arrangements for preparedness for a nuclear or radiological emergency / Opatření pro havarijní připravenost	Příručka popisuje vhodné reakce na různé rozsahy mimořádných událostí a poskytuje základní informace o zkušenostech z předešlých událostí, které poskytly základ pro tyto požadavky.	Havarijní připravenost a odezva	En
WS-G-6.1	2006	Storage of radioactive waste / Skladování radioaktivního odpadu	Příručka poskytuje informace o regulačních orgánech a subjektech, které vytvářejí a spravují radioaktivní odpady s doporučeními, jak splnit bezpečnostní požadavky pro skladování radioaktivního odpadu.	Skladování radioaktivního odpadu	En
WS-G-5.1	2006	Release of sites from regulatory control on termination of practices / Uvolnění hostitelského prostředí z regulační kontroly	Příručka poskytuje návod pro regulační orgán a provozovatele o uvolnění prostředí nebo jeho části od regulační kontroly po ukončení provozu.	Odproštění od regulační kontroly	En

WS-G-2.5	2003	Predisposal management of low and intermediate level radioactive waste safety / Řízení bezpečnosti nízko a středně radioaktivního odpadu před uložením	Příručka poskytuje regulačnímu orgánu a subjektu, jenž spravuje radioaktivní odpady, doporučení, jak plnit zásady a požadavky pro řízení nízko a středně aktivních odpadů před uložením.	Řízení před uložením	En
WS-G-2.6	2003	Predisposal management of high level radioactive waste / Řízení bezpečností vysoce radioaktivního odpadu před uložením	Příručka poskytuje regulačnímu orgánu a subjektu, jenž spravuje radioaktivní odpady, doporučení, jak plnit zásady a požadavky pro řízení vysoce aktivních odpadů před uložením.	Řízení před uložením	En
GS-G-1.1	2002	Organization and staffing of the regulatory body for nuclear facilities / Organizace a personální zajištění regulačního orgánu pro jaderná zařízení	Příručka poskytuje doporučení pro vnitrostátní orgány o vhodném systému řízení, organizaci a personálním zajištění pro regulační orgán odpovědný za regulaci jaderných zařízení, aby bylo dosaženo souladu s příslušnými požadavky na bezpečnost.	Organizace regulačního orgánu	En, Fr
GS-G-1.2	2002	Review and assessment of nuclear facilities by the regulatory body / Recenze a hodnocení jaderných zařízení podle regulačního orgánu	Příručka poskytuje doporučení pro regulační orgán týkající se přezkoumání a posuzování různých vyjádření souvisejících s bezpečností ze strany provozovatele jaderného zařízení v různých fázích života zařízení (umístování, projektování, výstavby, uvedení do provozu, provozu a vyřazení z provozu nebo uzavření) a zjištění, zda zařízení splňuje příslušné bezpečnostní cíle a ožadavky.	Recenze a hodnocení regulačním orgánem	En, Fr
GS-G-1.3	2002	Regulatory inspection of nuclear facilities and enforcement by the regulatory body / Regulační kontrola jaderných zařízení regulačním orgánem	Příručka poskytuje doporučení regulačnímu orgánu o kontrole jaderných zařízení, dodržování bezpečnostních postupů a předpisů, včetně plnění cílů v oblasti bezpečnosti.	Regulační kontrola	En, Fr
GS-G-1.4	2002	Documentation for use in regulating nuclear facilities / Dokumentace pro použití v regulaci jaderných zařízení	Příručka poskytuje doporučení pro regulační orgán a provozovatele jaderného zařízení o dokumentaci, která musí být připravena na regulační postupy. Dále musí být zajištěna její dostatečná kvalita a musí obsahovat správné informace.	Dokumentace pro regulaci	En, Fr
RS-G-1.1	1999	Occupational radiation protection / Pracovní radiační ochrana	Příručka poskytuje návod na kontrolu pracovníků a zařízení na vystavení záření při pracovních činnostech. Příručka je určena regulačnímu orgánu, ale také provozovateli jaderného zařízení a jeho specialistům zabývajících se radiační ochranou.	Radiační ochrana	En, Fr
Collection of safety guides / Sbíрка bezpečnostních příruček - Specifické					
SSG-14	2011	Geological disposal facilities for radioactive waste / Geologická úložiště pro radioaktivní odpady	Příručka poskytuje informace a doporučení týkající se vývoje a regulační kontroly zařízení pro geologické ukládání radioaktivního odpadu, aby byly splněny stanovené požadavky na bezpečnost.	Geologické úložiště	En
SSG-1	2009	Borehole disposal facilities for radioactive waste / Úložiště radioaktivního odpadu ve vrtu	Příručka poskytuje návod na projektování, výstavbu, provoz a uzavření vrtů na zneškodňování radioaktivních odpadů v souladu s příslušnými bezpečnostními požadavky na likvidaci.	Úložiště ve vrtu	En

WS-G-1.1	1999	Safety assessment for near surface disposal of radioactive waste / Hodnocení bezpečnosti pro přípovrchová úložiště radioaktivního odpadu	Příručka poskytuje doporučení ke splnění požadavků na posuzování bezpečnosti přípovrchových úložišť. Příručka shrnuje nejdůležitější aspekty při posuzování bezpečnosti těchto úložišť a doporučuje kroky, které je třeba dodržovat při provádění takových hodnocení.	Přípovrchová úložiště	En, Fr
111-G-3.1	1994	Siting of near surface disposal facilities / Umístování přípovrchových úložišť	Příručka poskytuje návod na proces výběru lokality a pokyny pro určení vhodných lokalit přípovrchového úložiště. Zde obsažené informace by měly pomoci personálu zapojených do umístování zařízení s výběrem správného místa pomocí metody, která by nejlépe vyhovovala specifickým podmínkám dané země, požadavkům na daný typ odpadu určenému k odstranění a požadavkům regulačního orgánu.	Umístování úložiště	En
SSG-15	2012	Storage of spent fuel / Skladování vyhořelého paliva	Příručka poskytuje rady a doporučení týkající se konstrukce, bezpečného provozu a posouzení bezpečnosti pro různé druhy skladování vyhořelého jaderného paliva (mokrý a suchý), tím, že zvažuje různé druhy vyhořelého jaderného paliva z jaderných reaktorů, včetně výzkumných reaktorů, a různých období skladování, včetně skladování mimo původní plánované životnosti skladu.	Vyhořelé palivo	En

Příloha 1: Publikace bezpečnostních norem IAEA [4]

Budoucí lidská činnost	Popis vlastností, událostí a procesů z ISAM	Klíčové pomy, příklady a související parametry	ISAM Test Case	Reálné úložiště
	Lidská činnost a regionální postupy v období po uzavření, které mohou potenciálně ovlivnit výkon technických nebo			
1.4.01 Lidský vliv na klima	Parametry vyplývající z úmyslné nebo neúmyslné lidské činnosti, které by mohly mít vliv na změny klimatu, a to globálně nebo v rámci regionu.	Vykácení lesů, emise skleníkových plynů jako CO ₂ a CH ₄	Není použito, nepředpokládají se změny.	V nejnovější bezpečnostní zprávě se neuvažuje, může být zahrnuto v opakovaném přezkoumání.
1.4.02 Motivační a znalostní problematika (úmyslné a neúmyslné lidské jednání)	Parametry se týkají stupně znalosti existence, umístění a povahy úložiště.	Lidská zásah, úmyslné a neúmyslné jednání	Narušení se předpokládá, ale pouze při ukončení institucionální kontroly, a když je úložiště zapomenuto. Neuvažují se úmyslná vniknutí.	Jsou použity dva scénáře: narušení během monitorovací fáze a v období po monitorovací fázi.
1.4.03 Vrtné práce (lidské vniknutí)	Parametry týkající se vrtných aktivit v blízkosti úložiště.	Průzkumné nebo těžební vrty pro získání přírodních zdrojů a surovin, vrty pro studie dané lokality, vrty pro studně a odpady.	Počítá se s vrty pro zisk vody, ale průnik do úložiště je nepravděpodobný.	Uvažuje se se stavbou studní v blízkosti úložiště.
1.4.04 Těžba a jiné pozemní činnosti	Parametry týkající se různých druhů těžby nebo výkopových prací v blízkosti zařízení.	Těžební průmysl, zisk geotermální energie, důlní vrty, tunelování, obnovení úložiště k opětovnému zisku odpadů.	Neuvažuje cenné zdroje v dané oblasti, kromě vody.	Jsou uvedeny dodatečné požadavky pro omezení tohoto typu vniknutí
1.4.06 Lidské činnosti na povrchovém prostředí	Parametry týkající se lidských činností při pracích na povrchu, které mohou ovlivnit geologické bariéry, a tedy i cesty expozice.	Orba, výkopové práce, zisk zeminy a její převoz, výkopy pro vojenské účely.	Uvažuje se použití lokality pro výstavbu bytových a zemědělských staveb.	Uvažuje se výstavba obytných domů, ale zemědělské aktivity nejsou brány v úvahu. Scénář zahrnuje radiologický vliv na dospělé obyvatele.
1.4.07 Znečišťující látky	Lidské činnosti související se znečištěním, které mohou ovlivnit technické a přírodní bariéry. Popisuje se chemické složení povrchu a jeho změny.	Kyselá deště, chemické odpady, hnojení půdy, znečištění podzemních vod.	Na základě umístění lokality a prováděných činností se neuvažuje.	Znečištění se monitoruje a při odhalení se budou vykonávat příslušná opatření.
1.4.08 Vývoj lokality	Lidské činnosti ovlivňující technické a přírodní bariéry při vývoji lokality, a když je úložiště zapomenuto.	Obydlenost lokality, vyrovnávání kopců, průmyslové a dopravní stavby.	Kombinuje se s 1.4.06.	Uvažují se obytné a silniční stavby.
1.4.09 Archeologie	Lidské činnosti související s archeologií, které ovlivňují technické nebo přírodní bariéry.	Neúmyslné lidské vniknutí v souvislosti a s archeologií.	Nízká pravděpodobnost, neuvažuje se.	Při výstavbě byly zavedeny podmínky k omezení budoucího výskytu archeologických činností.
1.4.11 Sociální a průmyslový vývoj	Parametry týkající se změn v sociální struktuře, vlády a regulace. Může mít vliv na úložiště například při změnách zákonů o využívání půdy.	Změny v regulačních a právních legislativách v oblasti životního prostředí, využívání půdy a institucionálních kontrol.	Uvažuje se, že společnost zůstane zachována spolu se záznamy po dobu 300 let. Možnost vniknutí se uvažuje až po ztrátě institucionální kontroly.	Záznamy jsou uchovávány po dobu 300 let.
1.4.14 Exploze a havárie	Parametry o úmyslných nebo náhodných explozích a haváriích, např. pozemní jaderné testy, havárie letadel.	Válka, sabotáže, terorismus, havárie.	Vyloučeno z důvodu nízké pravděpodobnosti.	Jsou studovány možnosti leteckých havárií a patřičné opatření budou provedeny.

Příloha 2: Srovnání scénářů reálného úložiště a ISAM Test Case pro různé situace [6] [8]