

Rešeršní studie pro
zmapování přístupu
k ukládání vysokoaktivních
odpadů a ostatních odpadů
obsahujících dlouhodobé
radionuklidy

Autoři: Pospíšková I. a kolektiv

Praha, 2022

Tato zpráva byla zpracována v projektu financovaném SÚRAO. Presentovaná stanoviska a dosažené závěry jsou názory autora (autorů) a nemusí nutně představovat názory SÚRAO.

NÁZEV ZPRÁVY:

Rešeršní studie pro zmapování přístupu k ukládání vysokoaktivních odpadů a ostatních odpadů obsahujících dlouhodobé radionuklidy

NÁZEV PROJEKTU:

Výzkum a vývoj obalového souboru pro vysoko a středně aktivní odpady

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:

Dílčí zpráva

ČÍSLO SMLOUVY: SO 2021-082

BIBLIOGRAFICKÝ ZÁPIS:

POSPÍŠKOVÁ I., KRAJŇÁK M., VOZÁR M. (2022): Rešeršní studie pro zmapování přístupu k ukládání vysokoaktivních odpadů a ostatních odpadů obsahujících dlouhodobé radionuklidy – MS SURAO TZ 610/2022, Praha.

ŘEŠITELÉ:

AFRY CZ s.r.o.¹

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Pospíšková I.¹, Krajňák M.¹, Vozár M.¹

Horní Indexy u jmen autorů odkazují na výčet institucí výše.

Markéta Dohnálková

Manažer projektu (SÚRAO)

17.6.2022

Martin Vozár

Manažer projektu (AFRY CZ s.r.o.)

17.6.2022

Obsah

1	Úvod	10
2	Země sdružené pod IAEA a jejich přístup ukládání odpadů typu HLW a LILW – LL	11
3	Podrobná rešerše vybraných zemí	18
3.1	Belgie	18
3.2	Finsko	21
3.3	Francie	24
3.4	Holandsko	30
3.5	Japonsko	35
3.6	Kanada	39
3.7	Maďarsko	41
3.8	Německo	45
3.9	Rusko	47
3.10	Slovensko	48
3.11	Spojené státy americké	51
3.12	Švédsko	54
3.13	Švýcarsko	58
3.14	Velká Británie	62
4	Závěr	68

Seznam příloh:

-

Seznam tabulek:

Tab. 1: Přehled zemí s provozem a výstavbou energetických reaktorů a nakládání s VJP a RAO (zdroj: IAEA 2022)	17
Tab. 2: Způsob uzavírání ukládacích a přístupových prostor. (Zdroj: RWM2016a, Kumpulainen et al. 2022)	65
Tab. 3: Obalové soubory pro LHGW (Zdroj: RWM2020)	65

Seznam obrázků:

Obr. 1: Schéma nakládání s odpady kategorií B a C (Zdroj: ONDRAF/NIRAS 2013)	19
--	----

Obr. 2: Konceptní řešení uložení odpadů kategorií B a C v hlubinném úložišti (Zdroj: ONDRAF/NIRAS 2013)	19
Obr. 3: Podélný řez ukládacího prostoru (Zdroj: ONDRAF/NIRAS 2013).....	20
Obr. 4: Superkontejner pro uložení odpadu kategorie C. Vlevo: Vitrifikovaný vysokoaktivní odpad z přepracování VJP. Vpravo: Nepřepracované VJP. (Zdroj: ONDRAF/NIRAS 2013).	20
Obr. 5: Monolit pro odpad kategorie B s různými typy primárních obalových souborů. (Zdroj: ONDRAF/NIRAS 2013)	21
Obr. 6: Kategorie radioaktivních odpadů a způsob jejich uložení (Zdroj: MOEE 2015)	21
Obr. 7 Technické řešení úložišť Olkiluoto a Loviisa (Zdroj: Finnish Energy Industries, 2007)	22
Obr. 8: Schematické zobrazení umístění částí úložiště pro VJP a ostatní RAO (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022).....	22
Obr. 9: Příčný řez ukládací komorou nízko a středně aktivních odpadů v Olkiluoto (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022).....	23
Obr. 10: Systém uzavírání úložiště (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022).....	24
Obr. 11: Francouzský systém klasifikace a nakládání s RAO (Zdroj: ANDRA 2020a).....	25
Obr. 12: Francouzský koncept hlubinného úložiště (Zdroj: ANDRA 2020b)	25
Obr. 13: HLW a ILW-LL obalové soubory (Zdroj: Espivent et al., 2016).....	26
Obr. 14: Ukládací obalové soubory pro odpad typu ILW-LL. (Zdroj: Launeau 2016).....	27
Obr. 15: Ukládací obalové soubory pro odpad typu HLW. (Zdroj: Launeau 2016)	28
Obr. 16: Zavážení primárních obalových souborů do ukládacích obalových souborů. Nahoře: odpad typu HLW. Dole: odpad typu ILW-LL. (Zdroj: Launeau 2016).....	29
Obr. 17: Zavážení ukládacích obalových souborů do úložných prostor. Vlevo: odpad typu HLW. Vpravo: odpad typu ILW-LL. (Zdroj: ANDRA 2020b).....	29
Obr. 18: Holandský systém klasifikace RAO (Zdroj: Verhoef et al. 2016)	30
Obr. 19: Konceptní řešení hlubinného úložiště ((Zdroj: Verhoef et al. 2017).	31
Obr. 20: Rozměry podzemních prostor úložiště. ¹ rozměr komory vyražený / využitelný. (Zdroj: Verhoef et al. 2017).....	31
Obr. 21: Systém inženýrských bariér. Nahoře vlevo: superkontejner CSD-v (vitrifikovaný odpad) a CSD-c (kovový aktivovaný materiál). Nahoře vpravo: superkontejner ECN pro VJP a ostatní HLW. Dole vlevo: 1000 l betonové nebo magnetitové kontejnery s 200 l sudy LILW odpadů. Vpravo dole: dva typy kontejnerů Konrad pro ochuzený uran. (Zdroj: Verhoef et al. 2017).....	32
Obr. 22: OPERA superkontejner pro odpad typu HLW. (Zdroj: Verhoef et al. 2017)	33
Obr. 23: Základní charakteristiky OPERA superkontejneru. (Zdroj: Verhoef et al. 2017)	33
Obr. 24: Obalový soubor pro ostatní HLW (Zdroj: Verhoef et al. 2017).....	33
Obr. 25: Obalový soubor pro ochuzený uran (Zdroj: Verhoef et al. 2017)	34
Obr. 26: Obalový soubor pro provozní a institucionální odpad (Zdroj: Verhoef et al. 2017)....	34

Obr. 27: Obalový soubor pro radioizotopy používané k lékařským účelům (Zdroj: Verhoef et al. 2017).....	35
Obr. 28: Japonský přístup k ukládání RAO (Zdroj. https://www.jnfl.co.jp/en/business/llw/) ...	36
Obr. 29: Konceptní řešení společného úložiště pro odpady typu HLW a TRU (Zdroj: NUMO 2021).....	36
Obr. 30: Způsob uložení vitrifikovaného odpadu typu HLW. Nahoře: metoda zavážení H12. Dole: metoda PEM. (Zdroj: NUMO 2021)	37
Obr. 31: Způsob uložení odpadu typu TRU. (Zdroj: NUMO 2008, NUMO 2021).....	38
Obr. 32: Kontejner pro odpad typu TRU pro manipulaci vysokozdvížným vozíkem (Zdroj: NUMO 2021)	38
Obr. 33: Kontejner pro odpad typu TRU pro manipulaci jeřábem (Zdroj: NUMO 2021).....	39
Obr. 34: Kanadský koncept uložení nízko a středněaktivních odpadů. (Zdroj: OPG 2011) ...	40
Obr. 35: Předpokládané typy ukládacích obalových souborů. (Zdroj: OPG 2010).....	40
Obr. 36: Zavážení RAO. Nahoře: Komora s odpady typu LLW. Dole: Komora s odpady typu ILW. (Zdroj: NWMO 2011).....	41
Obr. 37: Princip nakládání s RAO v Maďarsku (Zdroj: Molnár a Lázár 2018).....	42
Obr. 38: Maďarský koncept hlubinného úložiště (Zdroj: Molnár a Lázár 2018)	42
Obr. 39: Způsob uložení RAO v Bátaapáti (Zdroj: Baksay 2015).	43
Obr. 40: Obalový soubor pro uložení odpadů v Bátaapáti. (Zdroj: PURAM 2016).....	43
Obr. 41: systém klasifikace radioaktivních odpadů v Německu (Zdroj: Wealer 2018).	45
Obr. 42: Dispozice úložiště KONRAD (Zdroj: Warnecke 2009).....	45
Obr. 43: Zavážení RAO na ukládacím horizontu v úložišti KONRAD (Zdroj: Warnecke 2009)	46
Obr. 44: Obalové soubory MOSAIK (vlevo), UBA (vpravo). (Zdroj: GNS 2022)	46
Obr. 45: Obalové soubory Yellow Box (vlevo), SBox (vpravo). (Zdroj: GNS 2022)	47
Obr. 46: Hlubinné úložiště v Rusku; (A) vybraná lokalita (Jenisejskij), (B) model hlubinného úložiště, červenou barvou je vyznačeno umístění podzemní laboratoře, (C) ilustrativní ukázka ukládání RAO (Zdroj: Laverov et al. 2016).....	48
Obr. 47: Způsob uložení RAO a VJP ve Slovenské republice (Zdroj: ÚJD 2021).....	49
Obr. 48: Vlákobetonový kontejner (Zdroj: JAVYS 2022)	50
Obr. 49: Dispoziční řešení ukládacího horizontu WIPP (Zdroj: Hedden 2021)	52
Obr. 50: Způsob uložení odpadů ve WIPP. (Zdroj: Nelson and White 2009).....	52
Obr. 51 – Obalový soubor SWB (Zdroj: WIPP SWB 2022)	53
Obr. 52 Obalový soubor TDOP (Zdroj: WIPP TDOP 2022).....	54
Obr. 53: Švédský systém klasifikace a nakládání s RAO (Zdroj: SKB 2019).....	55
Obr. 54: Konceptní řešení úložiště pro RAO obsahující dlouhodobé radionuklidy (Zdroj: SKB 2019).....	55
Obr. 55: Umístění zátek v úložišti (Zdroj: SKB 2019).....	56

Obr. 56: Schéma uzavírací zátky. 1- zásyp z drcené horniny, 2 – betonová opěrná zeď, 3 – litý beton, 4 – bentonit, 5 - směr zásypu. (Zdroj: SKB 2019)	56
Obr. 57: Obalový soubor pro odpad typu BHK (Zdroj: SKB 2019)	57
Obr. 58: Obalový soubor pro odpady typu BHA, a) standardní bedny, b) 200 l sudy, c) speciální 280 l sudy (Zdroj: SKB 2019).....	58
Obr. 59: Sumární informace o uložených obalových souborech a RAO (Zdroj: SKB 2019) ..	58
Obr. 60: Nakládání s RAO podle švýcarského národního programu (Zdroj: Churakov 2020)	59
Obr. 61: Švýcarský koncept hlubinného úložiště. 5) část úložiště pro odpad s dlouhodobými nuklidy, 9) část úložiště pro VJP. (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022).....	60
Obr. 62: Uložené obalové soubory (Zdroj: Weber 2014).....	60
Obr. 63: Podélná řez zátkou ukládací komory RAO. Černá barva – hostitelská hornina. Šedá barva – konstrukční prvky. Zelená barva – výplňový materiál kaverny. Fialová barva – přechodová vrstva. Oranžová barva – těsnicí bariéra. Modrá barva – cementová zátka. (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022).....	61
Obr. 64: Ukládací obalový soubor pro RAO. (Zdroj: NAGRA 2022)	61
Obr. 65: Předpokládaný koncept technického řešení hlubinného úložiště v různých typech horninového masivu. (Zdroj: Faybishenko et al. 2017).....	62
Obr. 66: Dispozice ukládacího horizontu v krystalinických horninách (nahore), a sedimentárních horninách (uprostřed), v evaporitech (dole). (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022).	64
Obr. 67: Koncept ukládání odpadů typu HHGW (nahore) a LHGW (dole). (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022)	64
Obr. 68: Nestíněné obalové soubory (Zdroj: RWM2020)	67
Obr. 69: Stíněné obalové soubory (Zdroj: RW M2020)	67
Obr. 70: Robustní stíněné obalové soubory (Zdroj: RWM2020).....	67

Seznam použitých zkratk:

HHGW	high heat generating waste
HLW	high level waste
HÚ	hlubinné úložiště
IAEA	International Atomic Energy Agency
ILW	intermediate level waste
ILW-LL	intermediate level waste-long lived
JAVYS	Jadrová a vyraďovacia spoločnosť (SR)
JE	jaderná elektrárna
LAW	lower activity waste
LHGW	low heat generating waste
LILW-LL	low, intermediate level waste-long lived
LLW	low level waste
NRC	Nuclear Regulatory Commission (USA)
NRTM	Nová rakouská tunelovací metoda
RAO	radioaktivní odpady
RAW	radioactive waste
SAO	středně aktivní odpady
TRU	transuranic waste (Japonsko)
UOS	ukládací obalový soubor
ÚJD	Úrad jadrového dozoru (SR)
VAO	vysokoaktivní odpady
VJP	vyhořelé jaderné palivo
VLLW	very low level waste
VSLW	very short lived waste
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant

Vysvětlení pojmů:

Jaderná bezpečnost

Stav a schopnost jaderného zařízení a fyzických osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo úniku radioaktivních látek anebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezit následky nehod.

Hlubinné úložiště

Úložiště radioaktivního odpadu umístěné stovky metrů pod zemským povrchem a určené pro ukládání vysokoaktivního odpadu (vyhl. 378/2016 Sb., § 2).

Radioaktivní odpad

Věc, která je radioaktivní látkou nebo předmětem nebo zařízením ji obsahujícím nebo jí kontaminovaným, pro kterou se nepředpokládá další využití a která nesplňuje podmínky stanovené zákonem č. 263/2016 Sb. pro uvolňování radioaktivní látky z pracoviště.

Ukládání RAO

Trvalé umístění RAO do prostorů, objektů nebo zařízení bez úmyslu jejich dalšího přemístění.

Abstrakt

Dokument je rešerší přístupu jednotlivých zemí k ukládání vysokoaktivních odpadů a dalších odpadů obsahujících dlouhodobé radionuklidy.

Nejprve byla provedena předběžná rešerše zemí, které jsou sdruženy pod IAEA. Na základě této prvotní rešerše byly vybrány země, které mají obdobný koncept jako Česká republika, tedy uložení do společného úložiště s vyhořelým jaderným palivem.

Byly nalezeny informace o technickém konceptu úložiště a způsobu ukládání těchto RAO, materiálech inženýrských bariér a o použitých obalových souborech.

V několika případech byly provedeny rešerše zemí, které neplánují společné úložiště, nicméně koncept ukládání odpadů s obsahem dlouhodobých radionuklidů je již rozpracován v relativně podrobné technické úrovni a pro návrh českého obalového souboru jsou tyto informace přínosné.

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, obalový soubor, RAO, VAO, SAO, rešerše, obalový soubor

Abstract

The state-of-the-art is focused on the approach of individual countries to the disposal of high-level waste and other waste containing long-lived radionuclides.

First, a preliminary search was carried out on the countries associated with the IAEA. On the basis of this initial search, countries were selected that have a similar concept as the Czech Republic, i.e. storage in a common repository with spent nuclear fuel.

Information was found on the technical concept of the repository and the method of disposal of these RAW, the materials of engineering barriers and the waste packages used.

In several cases, information has been found for countries that do not plan to build a common repository, however, the concept of disposing of long-lived radionuclide waste is already being developed at a relatively detailed technical level and this information is useful for design of the Czech waste package.

Keywords

Deep geological repository, waste package, RAW, HLW, ILW.

1 Úvod

Cílem prací bylo provést rešerši přístupu jednotlivých zemí k ukládání vysokoaktivních odpadů a dalších odpadů obsahujících dlouhodobé radionuklidy, především u těch, které plánují oba typy odpadu uložit do společného úložiště s vyhořelým jaderným palivem.

Byla provedena rešerše zemí, které jsou sdruženy pod IAEA. Cílem bylo zjistit, jaký je národní koncept nakládání s těmito druhy odpadů. Podrobnější rešerše pak byla zpracována pro ty, které plánují společné úložiště, a to bez ohledu na hostitelské prostředí.

Šlo především o nalezení informací o technickém konceptu úložiště a způsobu ukládání těchto RAO, materiálech inženýrských bariér a o použitých obalových souborech.

Z tohoto důvodu byly v několika případech provedeny rešerše i u zemí, které neplánují společné úložiště, nicméně koncept ukládání odpadů s obsahem dlouhodobých radionuklidů je již rozpracován v relativně podrobné technické úrovni.

V úvodu rešerše věnované jednotlivým zemím je zpracovaná informace o systému klasifikace RAO. Systém klasifikace není jednotný, kategorizace tříd RAO používá různé názvy a zkratky. Ty jsou v textu zachovány dle země původu, neboť sjednotit tyto kategorie by bylo leckde dost obtížné. V základním třídění většina zemí aplikovala doporučení IAEA, ale každá země vychází především z národních potřeb.

Dále jsou uvedeny informace o úložišti a způsobu uložení RAO, použitých obalových souborech. Informace byly čerpány z veřejně dostupných zdrojů (webové stránky, zveřejněné články apod.), proto nebylo možné u všech zemí zjistit informace ve stejné úrovni podrobnosti.

Je to dané i tím, pro jaký druh odpadu je rešerše zpracovávána, existuje relativně dost informací pro ukládání odpadu z přepracování VJP, ale výrazně méně pro odpady obsahující dlouhodobé radionuklidy z vyřazování.

2 Země sdružené pod IAEA a jejich přístup ukládání odpadů typu HLW a LILW – LL

Pro získání komplexního přehledu byla nejprve provedena předběžná rešerše pro země, které jsou sdruženy pod IAEA. Tato předběžná rešerše se zaměřila na zjištění, zda ve svých konceptech nakládání s RAO daná země bude řešit problém uložení většího množství tohoto druhu odpadu, zda má už jasný koncept o nakládání s ním. Země, které obdobně jako Česká republika zvolily uložení do stejného úložiště s VJP, byly popsány podrobněji. Rešerše byla provedena bez ohledu na předpokládané hostitelské prostředí hlubinného úložiště.

Země	Způsob uložení HLW, LILW-LL	Relevance pro podrobnější rešerši
Argentina	Podle reportů IAEA a národního programu budou LILW-LL a VJP/HLW ukládány společně. Zvažuje se přímé ukládání VJP nebo přepracování, rozhodnuto zatím není. Z provozu JE už jistý objem HLW existuje, zatím skladováno.	NE Program ukládání LILW-LL a VJP je v začátcích, je teprve připravována koncepce nakládání.
Arménie	RAO budou upraveny a skladovány do doby, kdy bude k dispozici úložiště.	NE Program ukládání LILW-LL a VJP je v začátcích, je teprve připravována koncepce nakládání.
Bangladéš	Doposud byly generovány jen odpady z výzkumných laboratoří a výzkumného reaktoru TRIGA, v malém množství. Jaderné elektrárny jsou teprve v přípravě.	NE Prozatím se řeší pouze nakládání s nízkoaktivními odpady.
Bělorusko	Jaderné elektrárny jsou teprve v přípravě, v plánech vyřazování je pouze uvedeno, že budou skladovány. Odpady tohoto typu z výzkumu jsou skladovány v EKORES v Minsku, prozatím vzniklo malé množství.	NE Prozatím se řeší pouze nakládání s nízkoaktivními odpady.
Belgie	Odpady z přepracování VJP (HLW) /VJP mají být uloženy v HÚ. Přepracování zatím není zakotveno v legislativě, je to ale možná uvažovaná varianta. Do zájmové kategorie patří dle klasifikace některé odpady kategorie B a C. Tyto odpady budou ukládány v HÚ (společné pro všechny typy odpadů).	ANO
Brazílie	Není rozhodnuto, zda VJP se bude ukládat přímo nebo bude přepracováno. V plánech vyřazování není podrobný popis, odpady se předpokládají prozatím skladovat.	NE Program ukládání LILW-LL a VJP je v začátcích, je teprve připravována koncepce nakládání.

Země	Způsob uložení HLW, LILW-LL	Relevance pro podrobnější rešerši
Bulharsko	VJP se odváží do Ruska na přepracování, datum návratu není k dispozici. Předpokládá se, že HLW a LILW-LL budou uloženy do HÚ. Než bude HÚ k dispozici, odpad se bude skladovat.	NE Program ukládání HLW a LILW-LL není po technické stránce rozpracován do velkých podrobností.
Čína	VJP se předpokládá přepracovávat, HLW budou uloženy do HÚ. Odpady typu LILW jsou ukládány v provozovaných úložištích. Odpady typu LILW-LL jsou zatím skladovány.	NE Zatím není rozhodnuto, zda se oba typy odpadů budou ukládat společně.
Egypt	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit v HÚ. Jaderná elektrárna El-Dabaa je ve fázi výstavby.	NE Program ukládání VJP a RAO je v začátcích, je teprve připravována koncepce nakládání.
Finsko	VJP a odpady typu LILW-LL budou ukládány ve společném úložišti, na výškově oddělených ukládacích horizontech.	ANO
Francie	VJP a odpady typu LILW-LL budou ukládány ve společném úložišti, na stejném ukládacím horizontu.	ANO
Holandsko	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit ve společném HÚ. Nicméně koncept nakládání s RAO upřednostňuje dlouhodobé skladování.	ANO
Indie	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit v HÚ. Nejsou k dispozici plány vyřazování JE, zatím se pouze deklaruje prodloužení provozu.	NE Program ukládání VJP a RAO je není podrobněji rozpracován.
Irán	VJP se bude do HÚ ukládat nepřepracované. JE Bushehr 1 je v rané fázi v provozu, Bushehr 2 ve fázi výstavby. Plány vyřazování nejsou dostupné.	NE

Země	Způsob uložení HLW, LILW-LL	Relevance pro podrobnější rešerši
		Program ukládání VJP a RAO je není podrobněji rozpracován. Prozatím se řeší pouze nakládání s nízkoaktivními odpady.
Itálie	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit v HÚ, v současné době jsou skladovány.	NE Není podrobněji rozpracován harmonogram způsob uložení tohoto typu odpadů.
Japonsko	TRU waste (transuranic waste) se předpokládá uložit v HÚ. Ostatní odpady budou uloženy v samostatném úložišti, v hloubce cca 50-100 m.	ANO
JAR	JAR upřednostňuje technologii BDF (Borehole Disposal Facility).	NE
Kanada	Odpady typu LILW-LL budou uloženy v geologickém úložišti v lokalitě jaderné elektrárny Bruce. Nebudou ukládány společně s VJP (HLW).	Podmínečně ano Ačkoliv se nepředpokládá společné úložiště pro HLW a LILW-LL, lze po technické stránce získat informace o způsobu ukládání LILW-LL, technický koncept je rozpracován.
Kazachstán	VJP a odpady typu LILW-LL se zatím skladují.	NE Podrobnější plán ukládání HLW a LILW-LL není k dispozici.
Korea	VJP bude uloženo do HÚ. LILW odpady budou uloženy v samostatném úložišti, odpady typu LILW-LL nejsou samostatně řešeny.	NE Zatím není rozhodnuto, zda se oba typy odpadů budou ukládat společně.
Litva	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit v HÚ. Kandidátní lokality jsou umístěny v krystalinických a sedimentárních horninách. Předpokládá se převzít švédský případně švýcarský koncept.	NE

Země	Způsob uložení HLW, LILW-LL	Relevance pro podrobnější rešerši
		Koncepty budou obdobné švédskému případně švýcarskému řešení. Oba koncepty jsou vybrané k podrobnějšímu zpracování
Lotyšsko	Odpady typu LILW-LL a HLW budou uloženy v geologickém úložišti. Koncepte nakládání s RAO upřednostňuje uložení v mezinárodním úložišti.	NE Koncepte nakládání s RAO upřednostňuje uložení v mezinárodním úložišti.
Maďarsko	Podle národního programu se předpokládá uložit VJP a LILW-LL do společného HÚ.	ANO
Mexiko	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit v HÚ, v současné době jsou skladovány.	NE Není podrobněji rozpracován harmonogram způsob uložení tohoto typu odpadů.
Německo	Podle národního programu se předpokládá ukládat všechny typy odpadů v geologických formacích. Odpad typu LILW-LL budou ukládány v úložišti KONRAD.	Podmínečně ano Ačkoliv se nepředpokládá společné úložiště pro HLW a LILW-LL, lze po technické stránce získat informace o způsobu ukládání LILW-LL, technický koncept je rozpracován.
Pákistán	Koncepte zmiňuje pouze skladování. JE jsou v rané fázi provozu, plány vyřazování nejsou dostupné.	NE Program ukládání VJP a RAO je v začátcích, je teprve připravována koncepte nakládání.
Rumunsko	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit v HÚ. Jediné provozované JE jsou typu CANDU, obdobně jako Kanada. Koncept nakládání s RAO předpokládá využit kanadskou zkušenost.	NE Koncept není podrobněji rozpracován a bude založen na kanadském řešení.

Země	Způsob uložení HLW, LILW-LL	Relevance pro podrobnější rešerši
Rusko	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit v HÚ, v krystalinických horninách.	ANO
Slovensko	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit v HÚ. Slovensko pracuje se dvěma variantami – mezinárodní úložiště a domácí úložiště.	ANO Koncepte uložení VJP a RAO je velmi podobná českému přístupu.
Slovinsko	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit v HÚ. Slovinsko pracuje se dvěma variantami – mezinárodní úložiště a domácí úložiště. O konečném přístupu není zatím rozhodnuto. Slovinský program ukládání na vlastním území přejímá SKB koncept.	NE Konečný přístup k ukládání není rozhodnut.
Spojené emiráty	RAO tohoto typu zatím vznikají jen v institucionální sféře a jsou skladovány. JE jsou ve fázi výstavby, případně začátku provozu.	NE Program ukládání LILW-LL a VJP je v raném stádiu.
Spojené státy americké	Odpady tohoto typu nebudou uloženy ve společném úložišti s VJP.	Podmínečně ano Ačkoliv se nepředpokládá společné úložiště pro HLW a LILW-LL, lze po technické stránce získat informace o způsobu ukládání LILW-LL.
Španělsko	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit ve společném HÚ. Národní koncept nakládání s RAO upřednostňuje dlouhodobé skladování (úložiště El Cabril).	NE Koncept hlubinného úložiště není podrobněji rozpracován.
Švédsko	Odpady tohoto typu nebudou uloženy ve společném úložišti s VJP. V současné době se skladují.	Podmínečně ano Ačkoliv se nepředpokládá společné úložiště pro HLW a LILW-LL, lze po technické stránce získat informace o způsobu ukládání LILW-LL, technický koncept je rozpracován.

Země	Způsob uložení HLW, LILW-LL	Relevance pro podrobnější rešerši
Švýcarsko	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit v HÚ. Prozatím není rozhodnuto, zda budou uloženy ve společném úložišti v oddělených prostorách, nebo v různých úložištích.	ANO
Ukrajina	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit v HÚ, prozatím se skladují. Vybrané lokality jsou v krystalinických horninách, je převzato technické řešení KBS-3.	NE Koncept je založen na švédském přístupu. Švédský koncept je vybrán k podrobnějšímu zpracování.
Turecko	RAO tohoto typu zatím vznikají jen v institucionální sféře a jsou skladovány. JE jsou ve fázi výstavby.	NE Program ukládání LILW-LL a VJP je v raném stádiu.
Velká Británie	Odpady tohoto typu se předpokládá uložit ve společném HÚ.	ANO

Tab. 1: Přehled zemí s provozem a výstavbou energetických reaktorů a nakládání s VJP a RAO (zdroj: IAEA 2022)

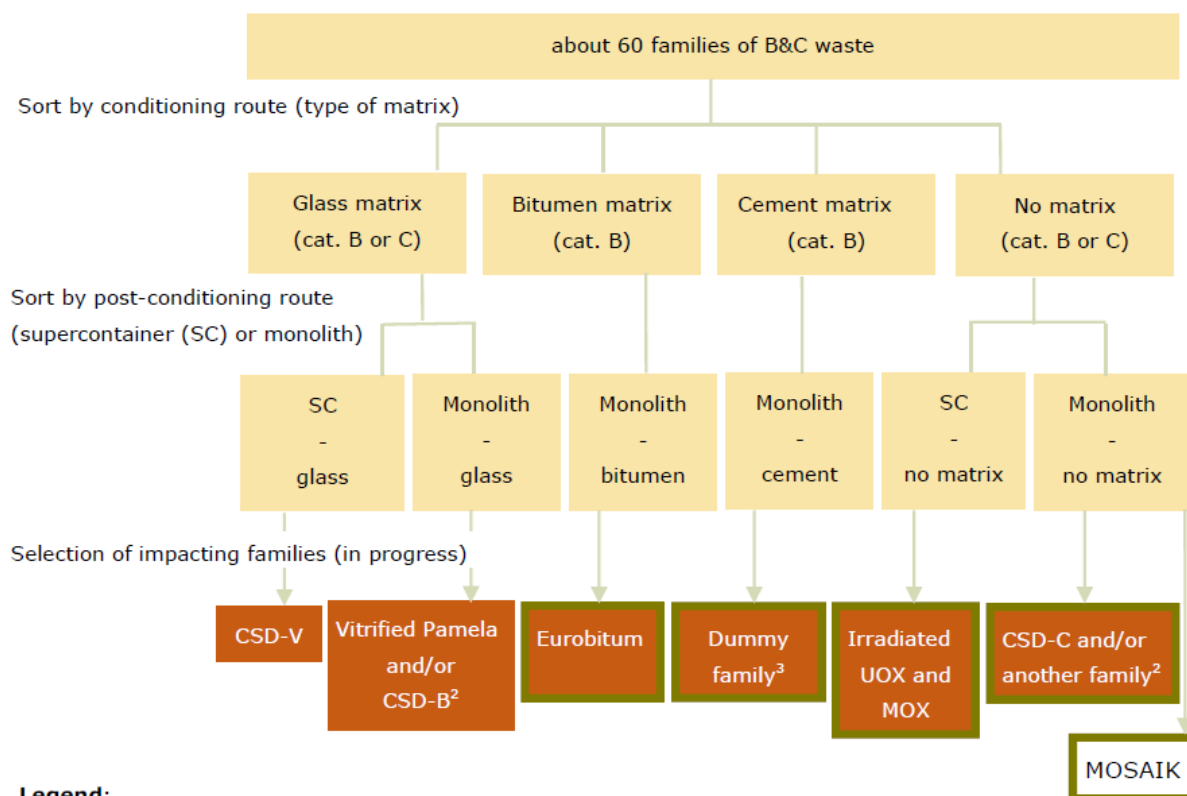
3 Podrobná rešerše vybraných zemí

3.1 Belgie

V Belgii se odpad rozděluje do tří kategorií (Kingdom of Belgium 2016):

- Kategorie A, nízko a středně aktivní odpady obsahující krátkodobé radionuklidy
- Kategorie B, nízko a středně aktivní odpady obsahující významné množství dlouhodobých radionuklidů. V době zpracování emituje větší množství tepla, ale po době, určené ke skladování toto zbytkové teplo je tak malé, že nemohou být zařazeny do kategorie C.
- Kategorie C, vysokoaktivní odpad obsahující významné množství dlouhodobých radionuklidů. Po době, určené ke skladování stále uvolňují velké množství zbytkového tepla. Jedná se především o VJP a odpad z přepracování VJP.

Odpady kategorií B a C vznikají na různých pracovištích, a podle charakteru jsou rozdělena do skupin, které určují jejich další zpracování a úpravu (vitifikace, bitumenace, cementace, případně bez fixační matrice).



² to be confirmed

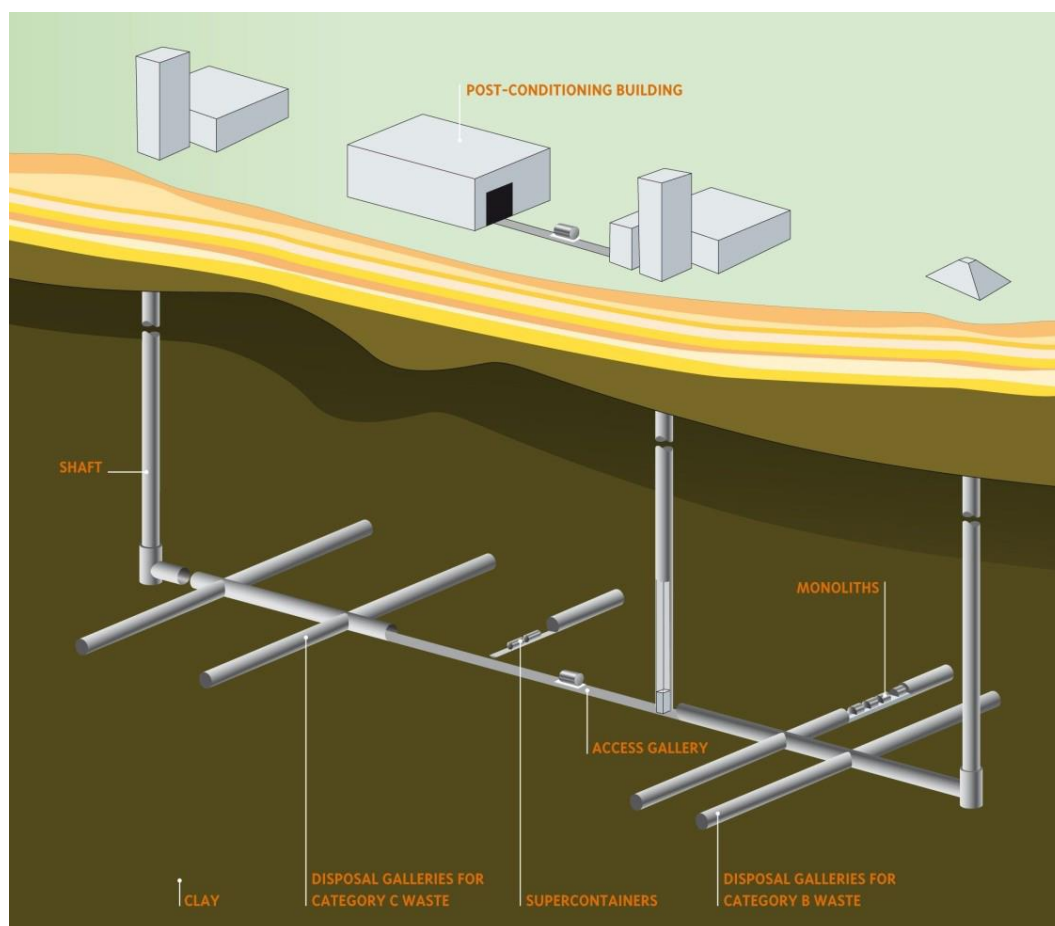
³ to be defined

Obr. 1: Schéma nakládání s odpady kategorií B a C (Zdroj: ONDRAF/NIRAS 2013)

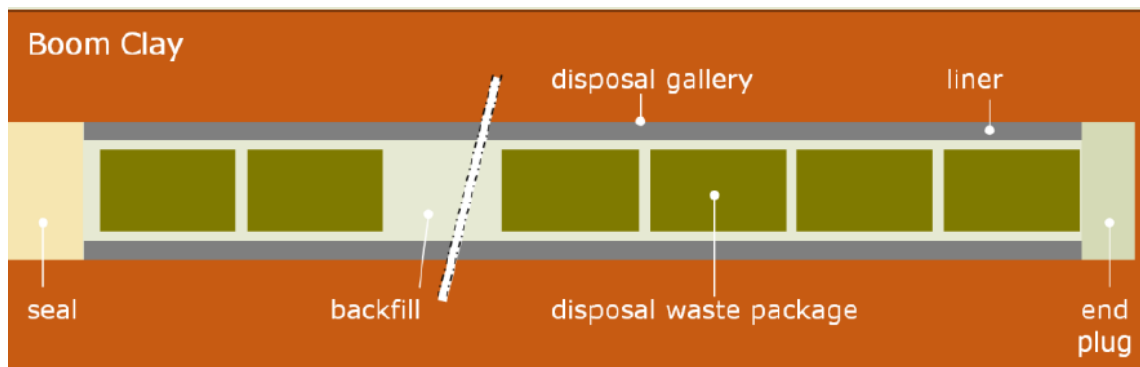
Předpokládá se, že budou vybudovány dva druhy úložišť. Přípovrchové úložiště pro odpad kategorie A, a hlubinné úložiště pro odpad kategorií B a C. Hlubinné úložiště bude vybudované v sedimentárních horninách, podzemní prostory budou zajištěny betonovými konstrukčními prvky.

Hlubinné úložiště bude rozděleno do několika sekcí, odpady kategorií B a C budou uloženy odděleně na stejném horizontu. Šířka ukládacích prostor bude cca 3 m, a délka maximálně 1 km. Vzájemní vzdálenost bude od 50 do 100 m, v závislosti na ukládaném odpadu. (ONDRAF/NIRAS 2013)

Systém inženýrských bariér odpovídá předpokládanému typu odpadu. Po uložení odpadu budou volné prostory zaplněny výplňovým materiálem. Ukládací sekce budou uzavřeny betonovou zátkou.



Obr. 2: Konceptní řešení uložení odpadů kategorií B a C v hlubinném úložišti (Zdroj: ONDRAF/NIRAS 2013)

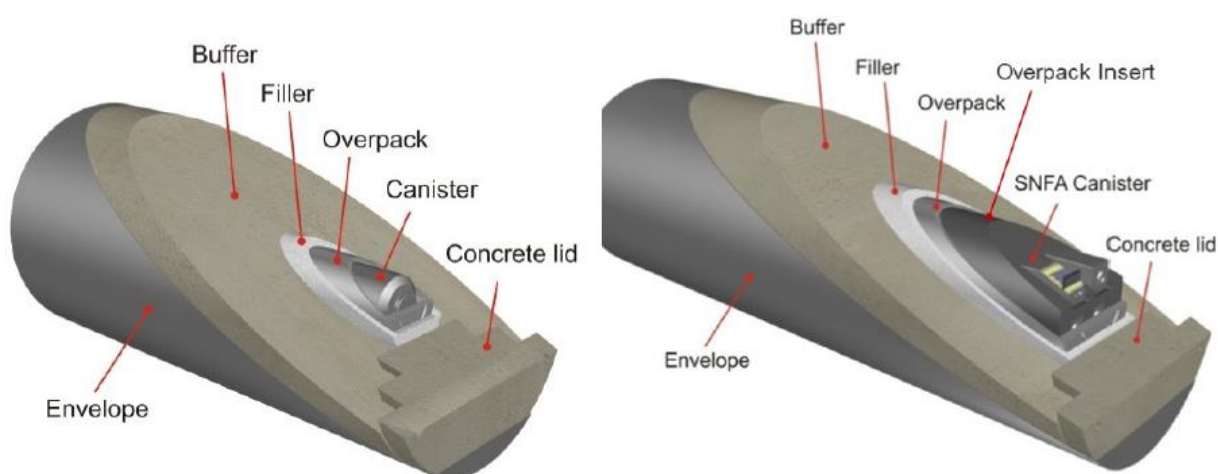


Obr. 3: Podélný řez ukládacího prostoru (Zdroj: ONDRAF/NIRAS 2013)

Odpady kategorie C budou ukládány v tzv. superkontejnerech. Primární obalové soubory budou vloženy do kontejneru z uhlíkové oceli, zalaty konstrukční vrstvou betonu Portlandského typu a utěsněny v místě uložení bentonitem.

Délka jednotlivých superkontejnerů se pohybuje v rozmezí 4-6,2 m. Nejtěžší superkontejner bude vážit cca 70 t.

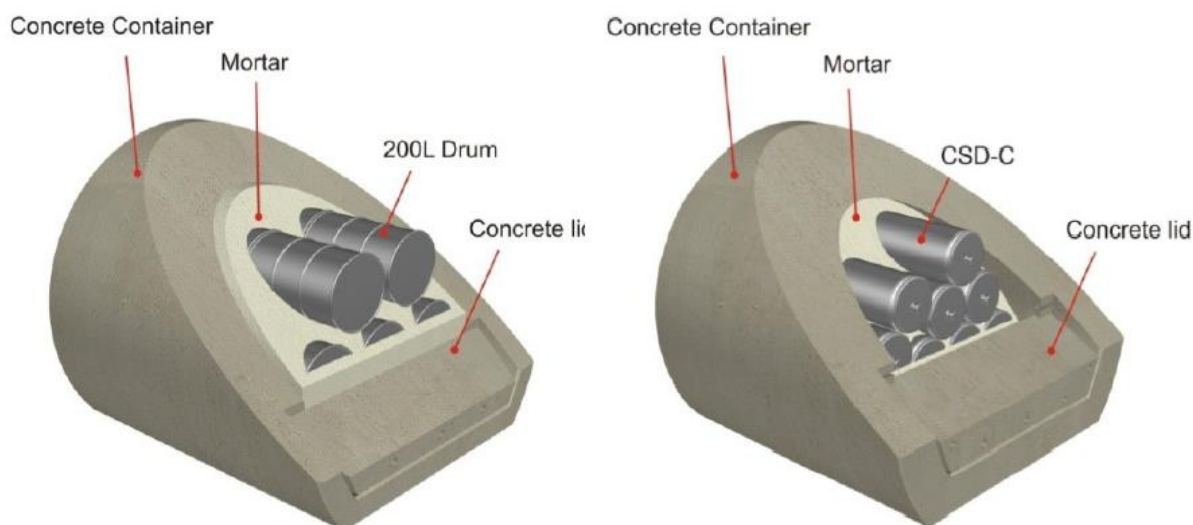
Superkontejner je vyroben na povrchu, a je transportován a uložen jako celek.



Obr. 4: Superkontejner pro uložení odpadu kategorie C. Vlevo: Vitřifikovaný vysokoaktivní odpad z přepracování VJP. Vpravo: Nepřepracované VJP. (Zdroj: ONDRAF/NIRAS 2013)

Odpady kategorie B budou uložena do tzv. monolitu. Primární obalové soubory budou fixovány v cementové zálivce v betonových kesonech z Portlandského cementu. Vnější průměr monolitu je vždy 2,8 metru, délka se pohybuje v rozmezí 1,9 - 2,9 m. Hmotnost se pohybuje od 32 do 39 tun.

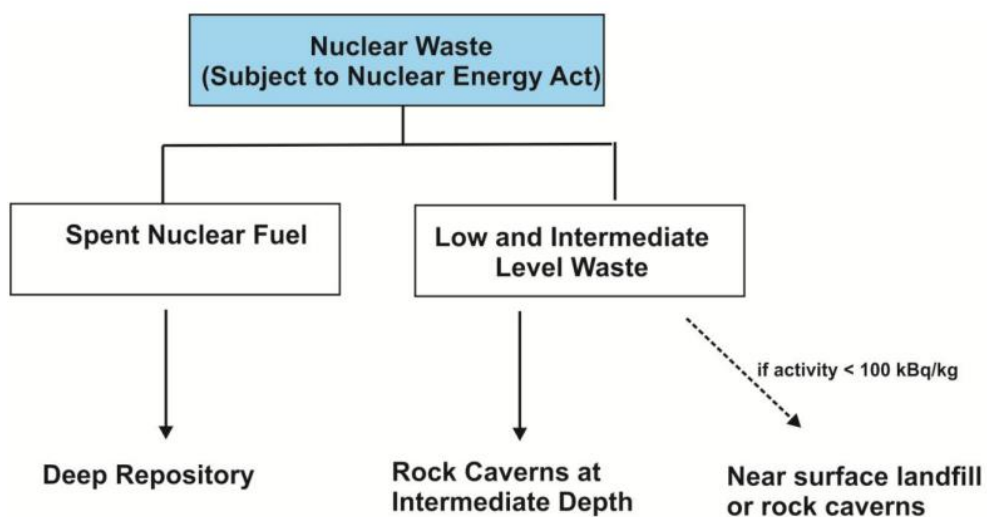
Monolit je vyroben na povrchu, a je transportován a uložen jako celek.



Obr. 5: Monolit pro odpad kategorie B s různými typy primárních obalových souborů. (Zdroj: ONDRAF/NIRAS 2013)

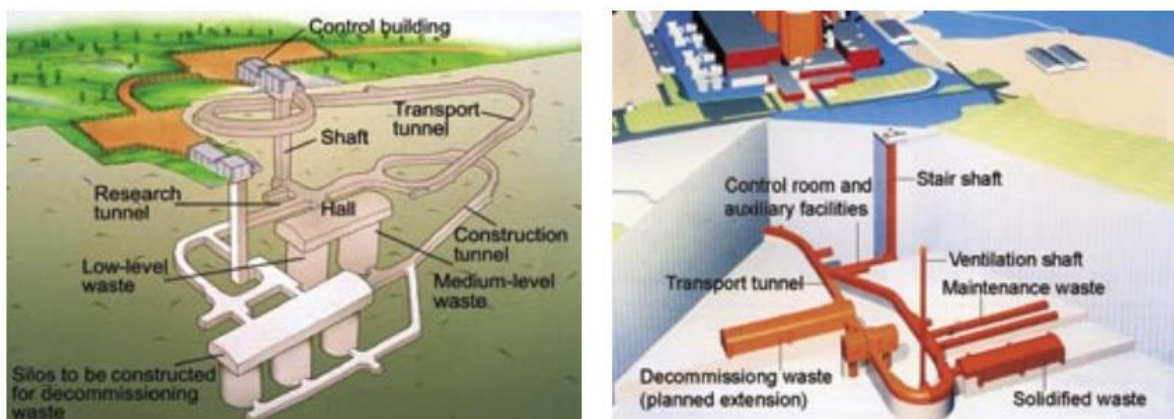
3.2 Finsko

Ve Finsku jsou radioaktivní odpady klasifikovány do tří základních kategorií, které budou ukládány dle následujícího schématu.



Obr. 6: Kategorie radioaktivních odpadů a způsob jejich uložení (Zdroj: MOEE 2015)

Finský koncept předpokládá, že úložiště nízko a středně aktivního odpadu budou vybudována v lokalitách jaderných elektráren, Olkiluoto and Loviisa.

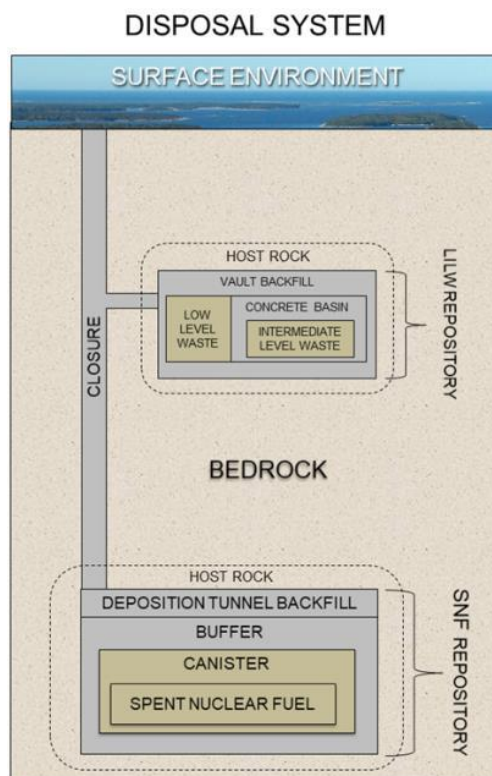


The final disposal repository for operating waste in Olkiluoto was put into operation in 1992.

In Loviisa, final disposal of operating waste started in 1998.

Obr. 7 Technické řešení úložišť Olkiluoto a Loviisa (Zdroj: Finnish Energy Industries, 2007)

V lokalitě hlubinného úložiště bude na úrovni cca -180 m vybudováno úložiště pro nízko a středně aktivní odpady, které budou vznikat při provozu Encapsulation plant. Po ukončení provozu sem budou uloženy rovněž odpady z jejího vyřazování.



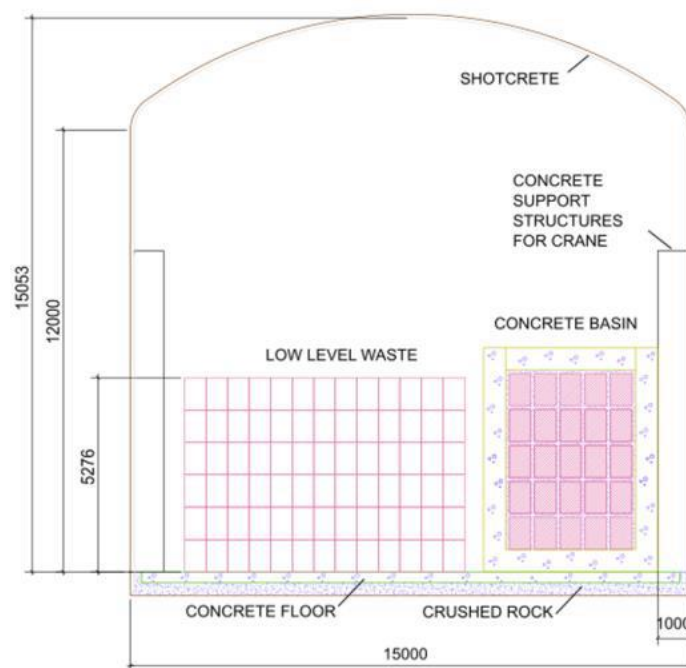
Obr. 8: Schematické zobrazení umístění částí úložiště pro VJP a ostatní RAO (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022)

Licence pro výstavbu hlubinného úložiště nabyla platnosti v roce 2016. V roce 2021 byly zahájeny práce na úložném horizontu pro VJP. Podle stávajícího postupu prací se očekává, že zavážení VJP bude zahájeno cca v roce 2025.

Předpokládá se, že výstavba úložiště RAO bude zahájena v roce 2030.

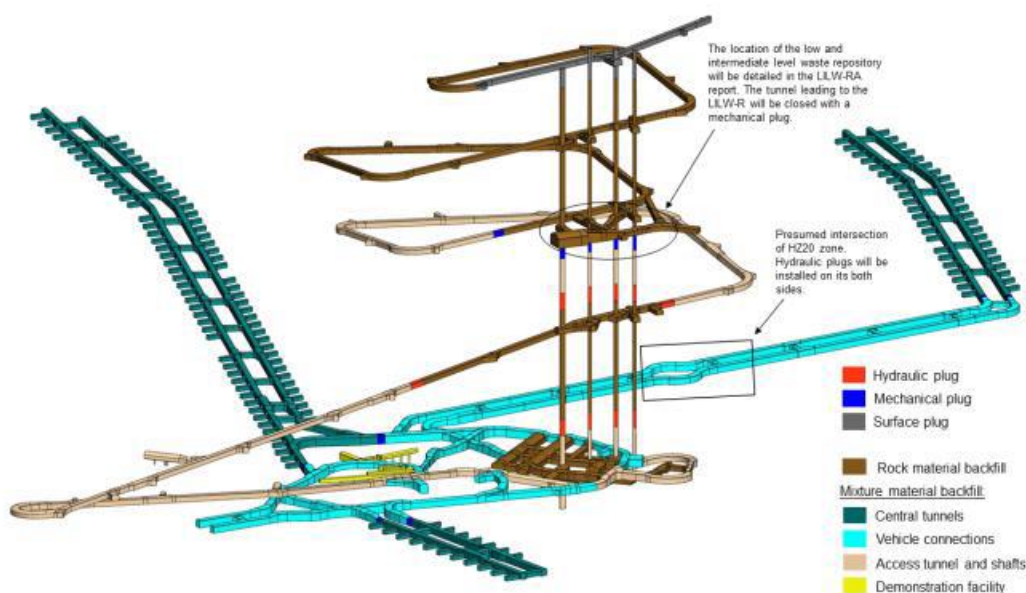
Úložiště bude od části úložiště VJP odděleno výškově, společná bude pouze přístupová chodba z povrchu. Předpokládaný objem úložiště je cca 10 800 m³, objem bude možné více upřesnit až po zahájení provozu Encapsulation plant.

Odpad se bude ukládat ve velkoobjemových komorách, obalové soubory budou stohovány. Středněaktivní odpady budou umístěny do přídatných betonových jímek. Po zaplnění budou komory vyplněny drcenou horninou. V současné době se předpokládá, že bude mít stejný charakter jako výplňový materiál přístupové chodby.



Obr. 9: Příčný řez ukládací komorou nízko a středně aktivních odpadů v Olkiluoto (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022)

Po zaplnění a ukončení provozu úložiště VJP budou uzavřeny zavážecí a přístupové chodby, a následně bude ukončen provoz úložiště RAO. Předpokládá se, že úložiště RAO bude od přístupové chodby odděleno mechanickou zátkou.



Obr. 10: Systém uzavírání úložiště (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022)

Mechanická zátka nemá bezpečnostní funkci. Bude vystavěna z low pH betonu, s železnou výztuží a s vysokým obsahem kameniva.






Nízko a středně aktivní odpad je ukládán v ocelových sudech, kapalné odpady jsou fixovány do matrice.

Ačkoliv informací o způsobu uložení nízko a středně odpadů v úložišti bylo dostupných relativně dost, podrobnější informace o tom, zda bude odpad ukládán v přímo primárních obalech (sudech) nebo v dalších přebalech, se nepodařilo dohledat.

3.3 Francie

Francouzský systém nakládání s RAO dělí odpady do několika základních kategorií:

CLASSIFICATION OF RADIOACTIVE WASTE AND ASSOCIATED MANAGEMENT SOLUTIONS

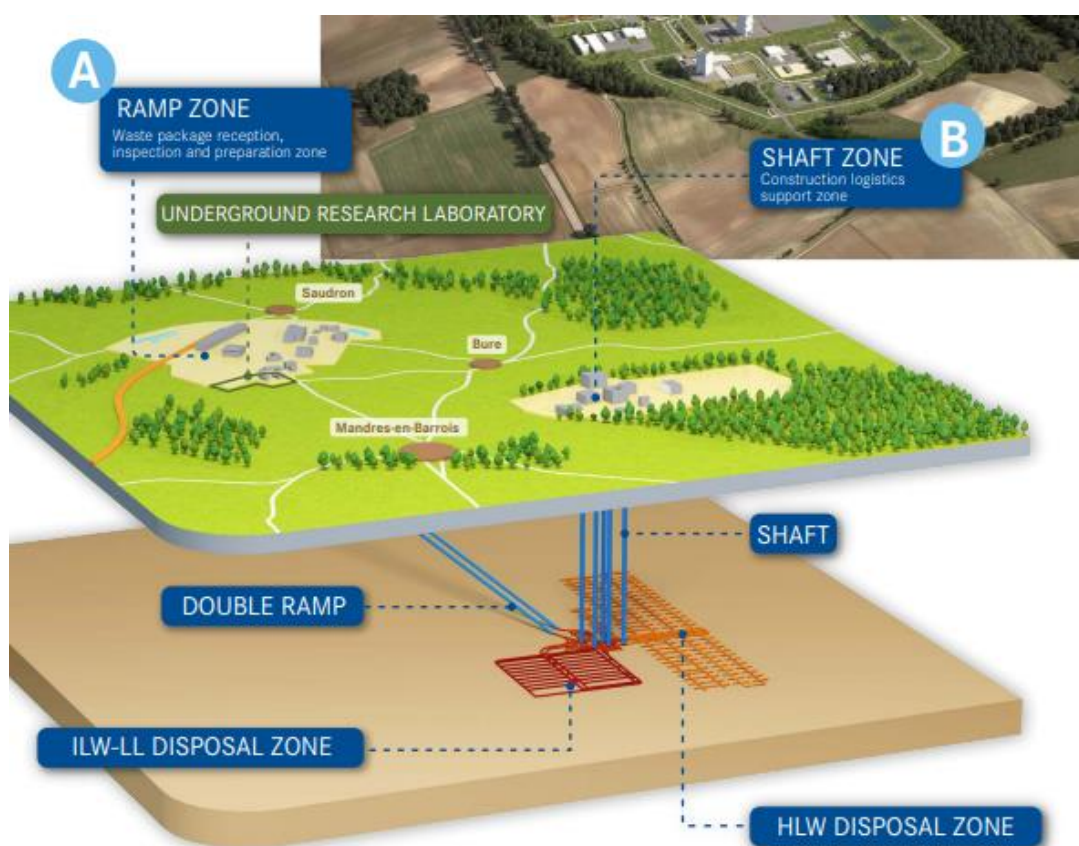
Category	Very short-lived waste	Short-lived waste	Long-lived waste
Very low-level waste (VLLW)	 Management through radioactive decay	 Surface disposal (Industrial facility for grouping, storage and disposal)	 Near-surface disposal under development
Low-level waste (LLW)		 Surface disposal (Aube and Manche disposal facilities)	 Deep geological disposal under development (Cigeo project)
Intermediate-level waste (ILW)			 Deep geological disposal under development (Cigeo project)
High-level waste (HLW)	Not applicable		

Obr. 11: Francouzský systém klasifikace a nakládání s RAO (Zdroj: ANDRA 2020a)

RAO typu LILW-LL jsou především tvořeny kovovým konstrukčním materiálem zbylým po přepracování VJP, aktivovaným materiálem z provozu a vyřazování jaderných elektráren, grafitem, odpadem obsahující radium, zejména z průmyslových činností a dalšími odpady, jako např. zbytky po konverzi uranu ze závodu Orano Malvési a provozní odpad z přepracovatelského závodu v La Hague.

Odpady typu HLW pochází z přepracování VJP, jsou fixovány ve skle.

Koncept předpokládá, že tato odpady budou uloženy ve společném hlubinném úložišti, vybranou hostitelskou horninou jsou jíly.



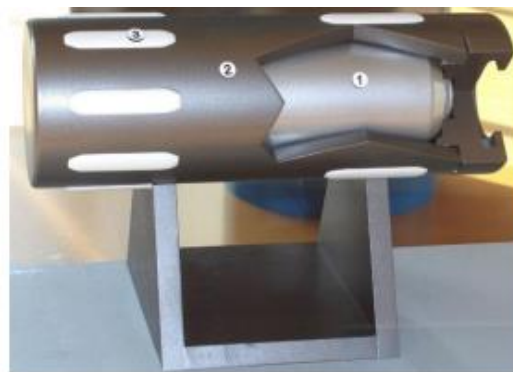
Obr. 12: Francouzský koncept hlubinného úložiště (Zdroj: ANDRA 2020b)

Odpady budou ukládány v oddělených sekcích, na stejném ukládacím horizontu. RAO typu LILW-LL bude uloženo v tunelech, cca 500 m dlouhých a 10 m širokých. RAO typu HLW bude uloženo v ukládacích tunelech dlouhých cca 100 m, s užším profilem, cca 1 m (Espivent et al., 2016). Po zaplnění budou tunely vyplněny bentonitem a uzavřeny zátkami.

Cigeo projekt je navržen pro uložení cca 55 000 ks HLW a cca 175 000 ks ILW-LL primárních obalových souborů. Ty budou dováženy od jednotlivých producentů. V místě úložiště budou vloženy do ukládacích obalových souborů.



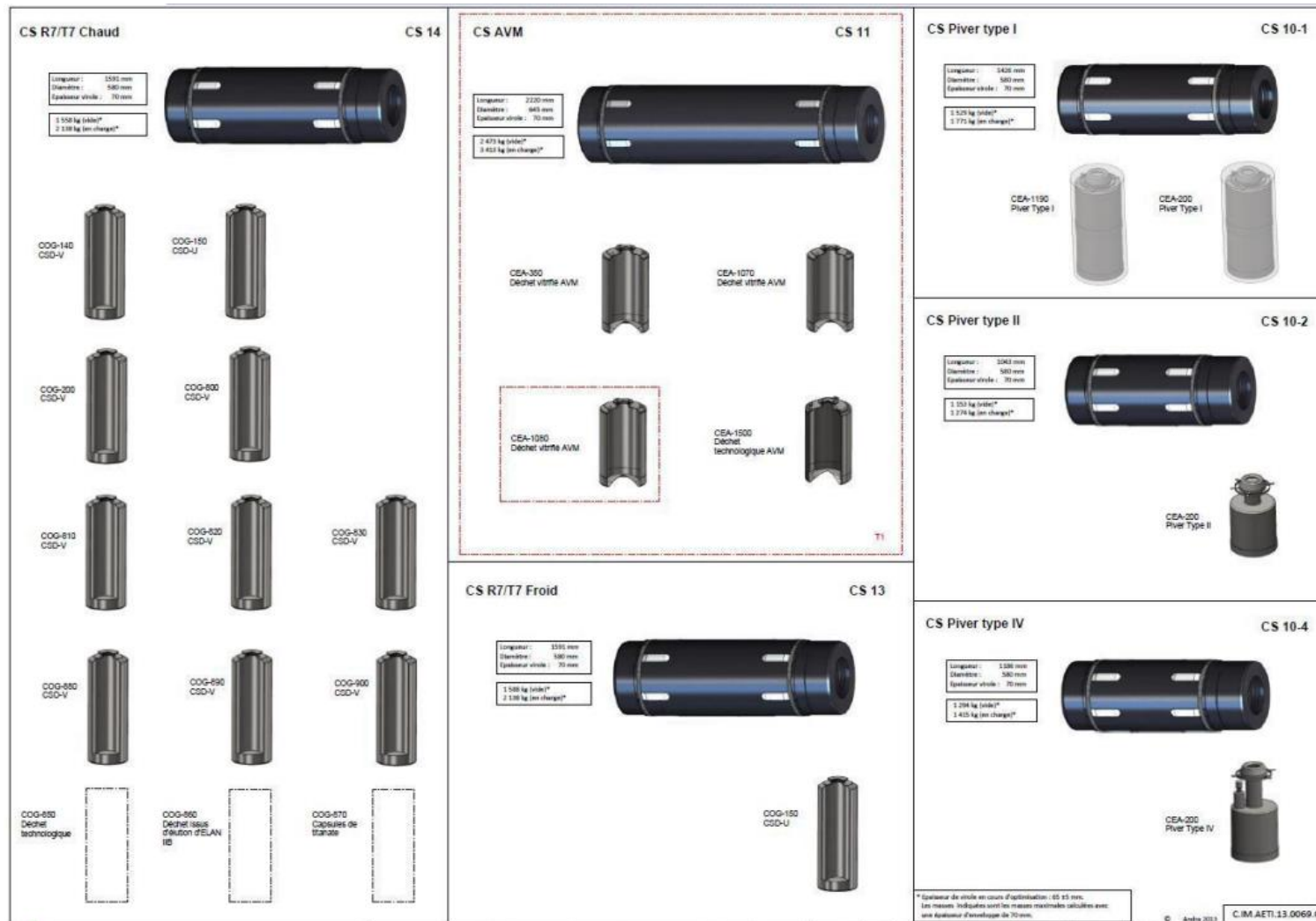
Dummy ILW-LL primary package in a section of its disposal overpack



HLW disposal package

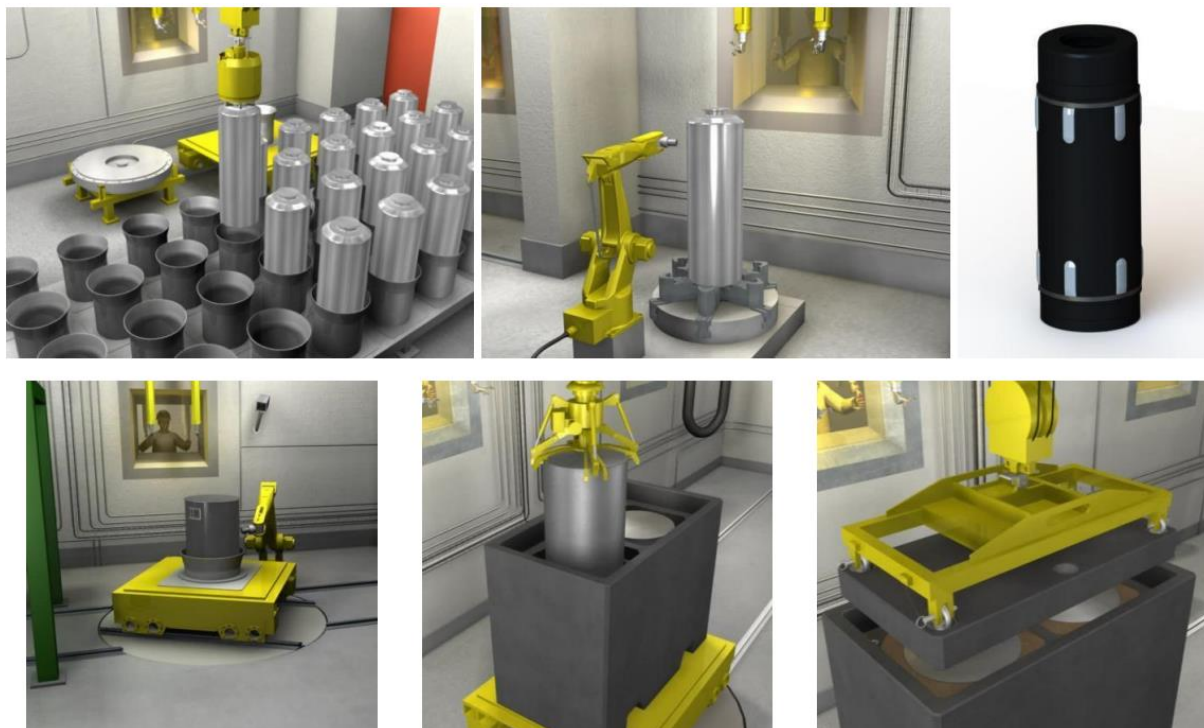
Obr. 13: HLW a ILW-LL obalové soubory (Zdroj: Espivent et al., 2016)

Primární obaly jsou kovové, vnější přebal pro ILW-LL je betonový, pro HLW kovový.

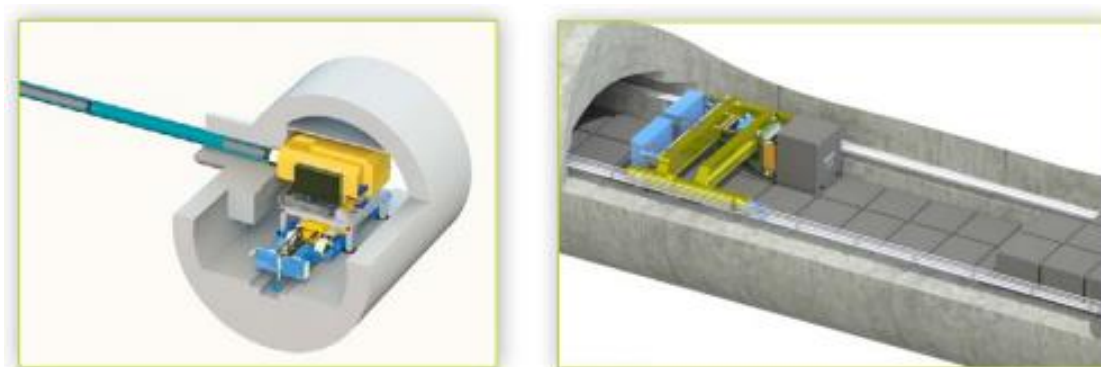


Obr. 15: Ukládací obalové soubory pro odpad typu HLW. (Zdroj: Launeau 2016)

Všechny manipulace budou dálkově ovládané, jak zavážení primárních obalových souborů do ukládacích obalových souborů, tak zavážení ukládacích obalových souborů do úložných prostor.



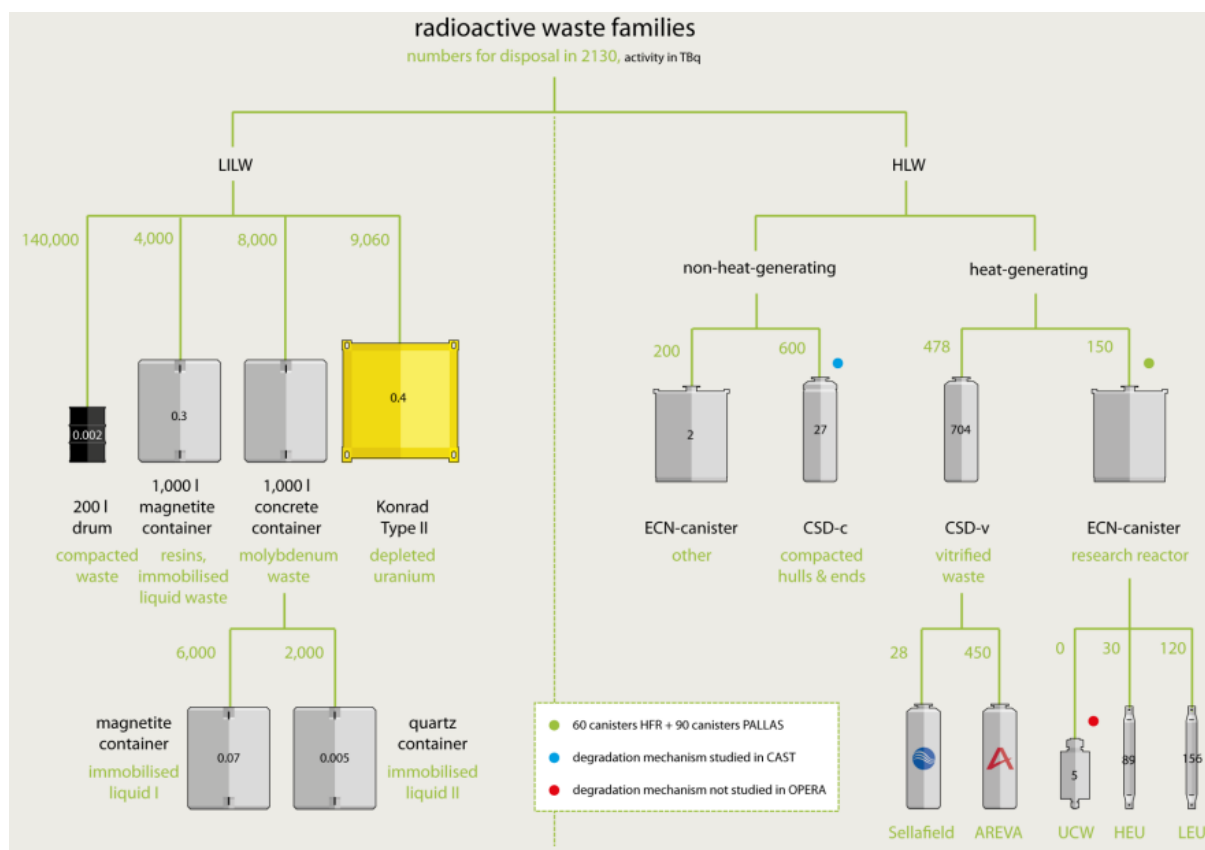
Obr. 16: Zavážení primárních obalových souborů do ukládacích obalových souborů. Nahoře: odpad typu HLW. Dole: odpad typu ILW-LL. (Zdroj: Launeau 2016)



Obr. 17: Zavážení ukládacích obalových souborů do úložných prostor. Vlevo: odpad typu HLW. Vpravo: odpad typu ILW-LL. (Zdroj: ANDRA 2020b)

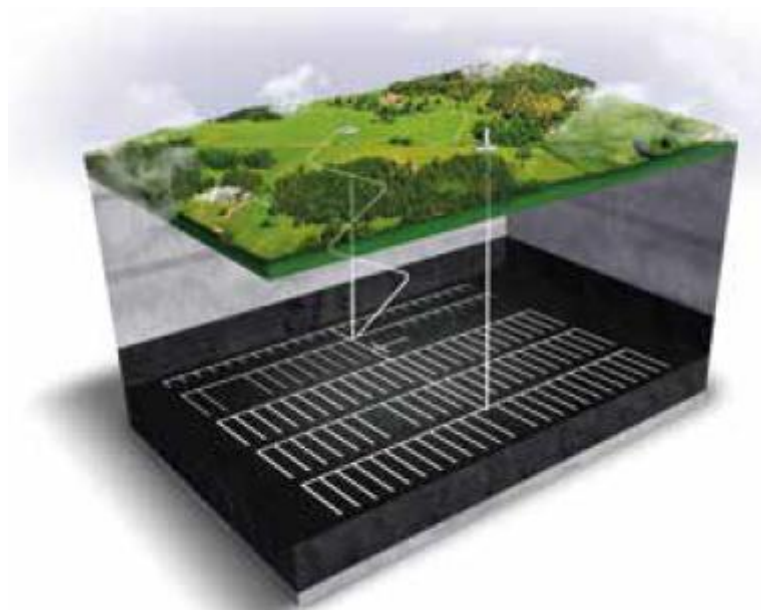
3.4 Holandsko

Holandský systém klasifikace LILW a HLW odpadů zohledňuje původ vzniku, radionuklidové složení a charakteristiku obsažených radionuklidů v odpadu. Podle těchto charakteristik se dělí do tzv. waste families, které dále určují způsob úpravy, a použitý obalový soubor pro uložení.



Obr. 18: Holandský systém klasifikace RAO (Zdroj: Verhoef et al. 2016)

Podle národní strategie se předpokládá, že odpady budou skladovány po dobu 100 let (Verhoef et al. 2016). Referenční datum pro zahájení provozu hlubinného úložiště je rok 2130. Hostitelskou horninou budou sedimentární horniny. Pro zpevnění vyražených prostor bude využity betonové segmenty.



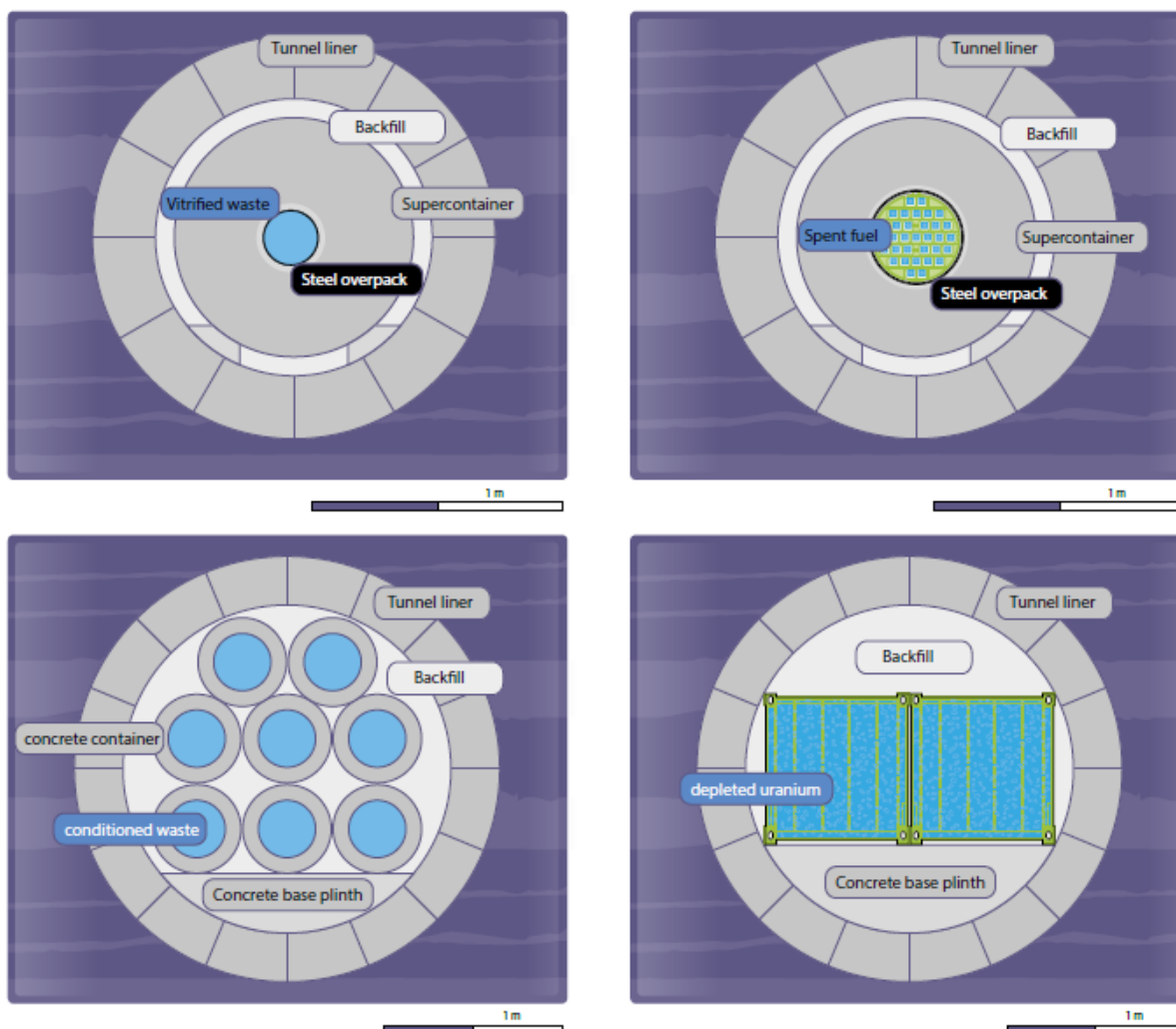
Obr. 19: Koncepční řešení hlubinného úložiště ((Zdroj: Verhoef et al. 2017).

Různé typy odpadů budou ukládány na společném ukládacím horizontu v oddělených sekcích – pro vitrifikovaný odpad, pro nepřepracované palivo z výzkumných reaktorů, pro HLW negenerující zbytkové teplo, pro LILW odpady a ochuzený uran. Základní rozměry ukládacích prostor jsou uvedeny na následujícím obrázku.

	Number	Length (m)	Diameter ¹ (m)	Concrete Support Thickness (m)	Gallery Spacing (m)
Shaft	2	500	6.2 / 5.0	0.60	
Transport Galleries	5	6000	6.2 / 5.0	0.60	200
Disposal tunnels					
Heat-generating HLW	47	45	3.2 / 2.2	0.50	50
Spent fuel	6	45	3.2 / 2.2	0.50	50
Non-heat-generating HLW	36	200	3.2 / 2.2	0.50	50
LILW and DU	65	200	4.8 / 3.7	0.55	50

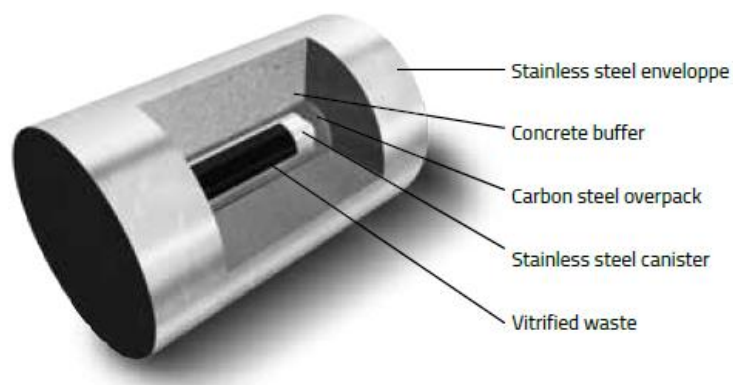
Obr. 20: Rozměry podzemních prostor úložiště. ¹ rozměr komory vyražený / využitelný. (Zdroj: Verhoef et al. 2017).

Konstrukční prvky k zajištění stability tunelu budou betonové segmenty. Navrhovaný materiál nebude obsahovat portlandit, a předpokládá se, že pórová cementová voda bude mít pH max 12,5. Jako výplňový materiál bude použit odolný pěnový beton (Verhoef et al. 2017).



Obr. 21: Systém inženýrských bariér. Nahoře vlevo: superkontejner CSD-v (vitřifikovaný odpad) a CSD-c (kovový aktivovaný materiál). Nahoře vpravo: superkontejner ECN pro VJP a ostatní HLW. Dole vlevo: 1000 l betonové nebo magnetitové kontejnery s 200 l sudy LILW odpadů. Vpravo dole: dva typy kontejnerů Konrad pro ochuzený uran. (Zdroj: Verhoef et al. 2017)

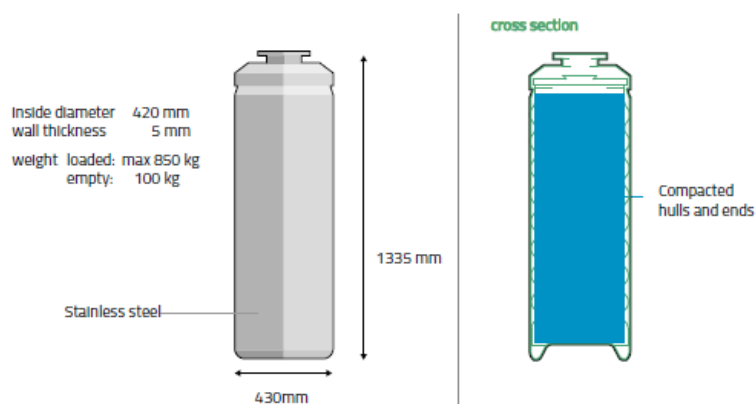
OPERA superkontejner vychází z belgického konceptu, je tvořen obalem z uhlíkové oceli, ve kterém jsou umístěny 2 primární obalové soubory s HLW nebo 1 primární obalový soubor s VJP. Ten je umístěn v betonovém kontejneru s nerezovým obalem. Protože holandský koncept předpokládá delší dobu skladování než belgický, může být tloušťka betonového stínění adekvátně zmenšena. Na povrchu tohoto kontejneru by dávkový příkon neměl přesáhnout 10 mSv/h.



Obr. 22: OPERA superkontejner pro odpad typu HLW. (Zdroj: Verhoef et al. 2017)

Outer container diameter	1,9 m
Outer container length	2.5 m for 1 CSD and 3.0 m for 2 (ECN) containers
Waste container	One CSD-V-canister, one CSD-C-canister, or 2 (ECN) containers
Concrete thickness	0.6 - 0.7 m
Carbon steel overpack thickness	3 cm (to meet a 1000 year containment requirement)
Stainless steel envelope thickness	0,4 cm
Max. dose rate at container surface	10 mSv/hr
Weight	Approx. 20,000 kg, up to max. 24,000 kg

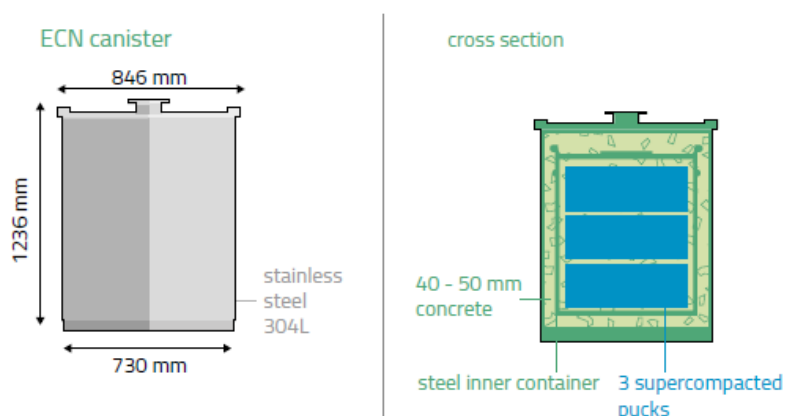
Obr. 23: Základní charakteristiky OPERA superkontejneru. (Zdroj: Verhoef et al. 2017)



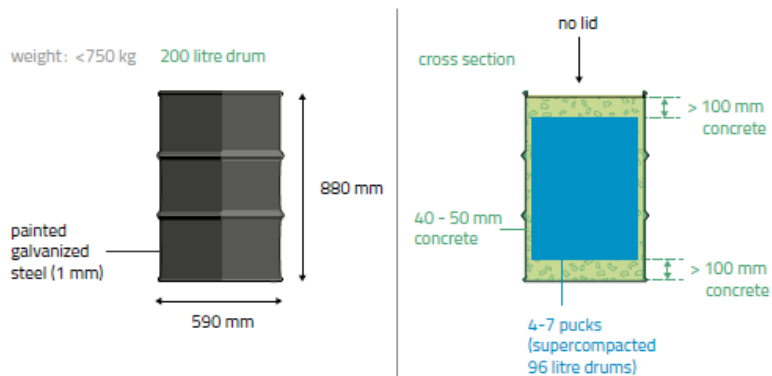
Obr. 24: Obalový soubor pro ostatní HLW (Zdroj: Verhoef et al. 2017)

Odpady kategorie LILW lze rozdělit do čtyř hlavních skupin. Obalové soubory odpovídají charakteru odpadů v těchto skupinách:

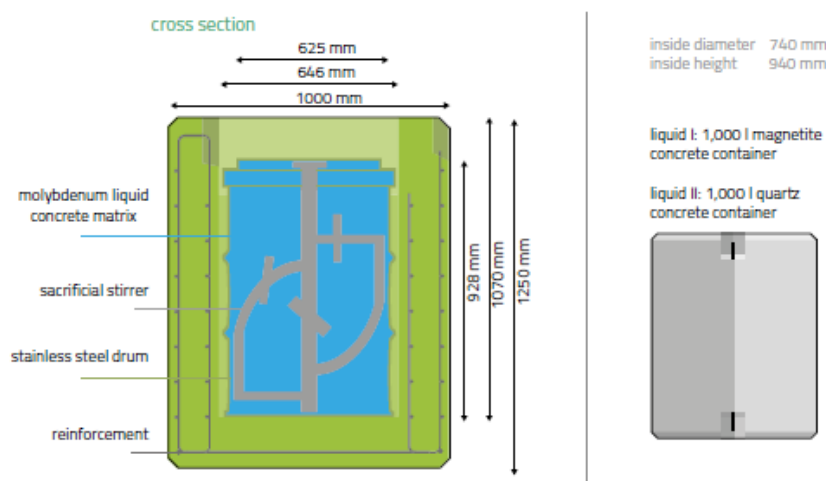
- Ochuzený uran z procesu obohacování uranu;
- Provozní odpad z jaderných elektráren a institucionální odpad;
- Radioizotopy, používané k lékařským účelům;
- Zpevněné ionexy.



Obr. 25: Obalový soubor pro ochuzený uran (Zdroj: Verhoef et al. 2017)



Obr. 26: Obalový soubor pro provozní a institucionální odpad (Zdroj: Verhoef et al. 2017)



Obr. 27: Obalový soubor pro radioizotopy používané k lékařským účelům (Zdroj: Verhoef et al. 2017)

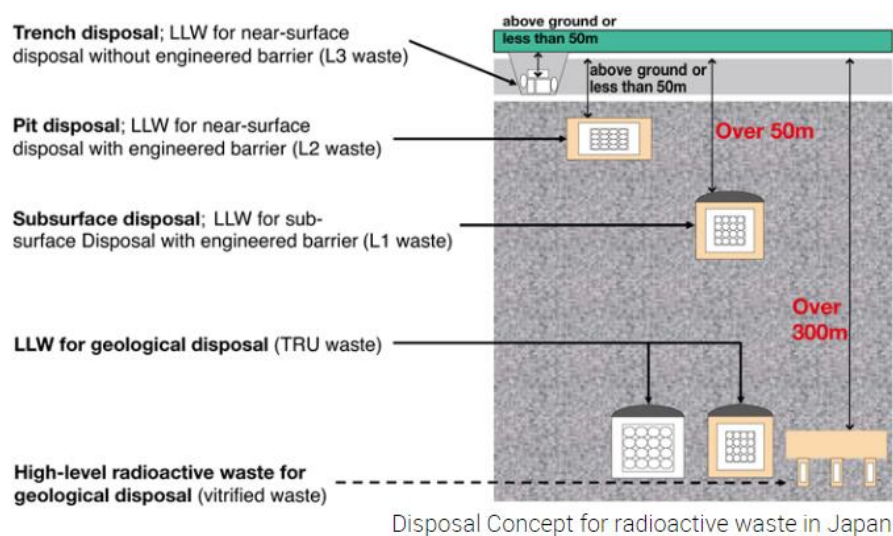
Ionexy zpevněné cementovou matricí jsou ukládány do 200 l sudů. Ty jsou následně vkládány do 1000 l betonového kontejneru.

3.5 Japonsko

V Japonsku se odpad třídí na dvě základní kategorie, HLW a LLW, přičemž kategorie LLW se dělí na čtyři další podkategorie:

- HLW (vitřifikovaný odpad z přepracování VJP)
- LLW (ostatní odpad)
 - LLW3 (s velmi nízkou úrovní aktivity)
 - LLW2 (s nízkou úrovní aktivity)
 - LLW1 (se střední úrovní aktivity)
 - TRU waste (kontaminovaný odpad z přepracování, který nespadá do kategorie HLW)

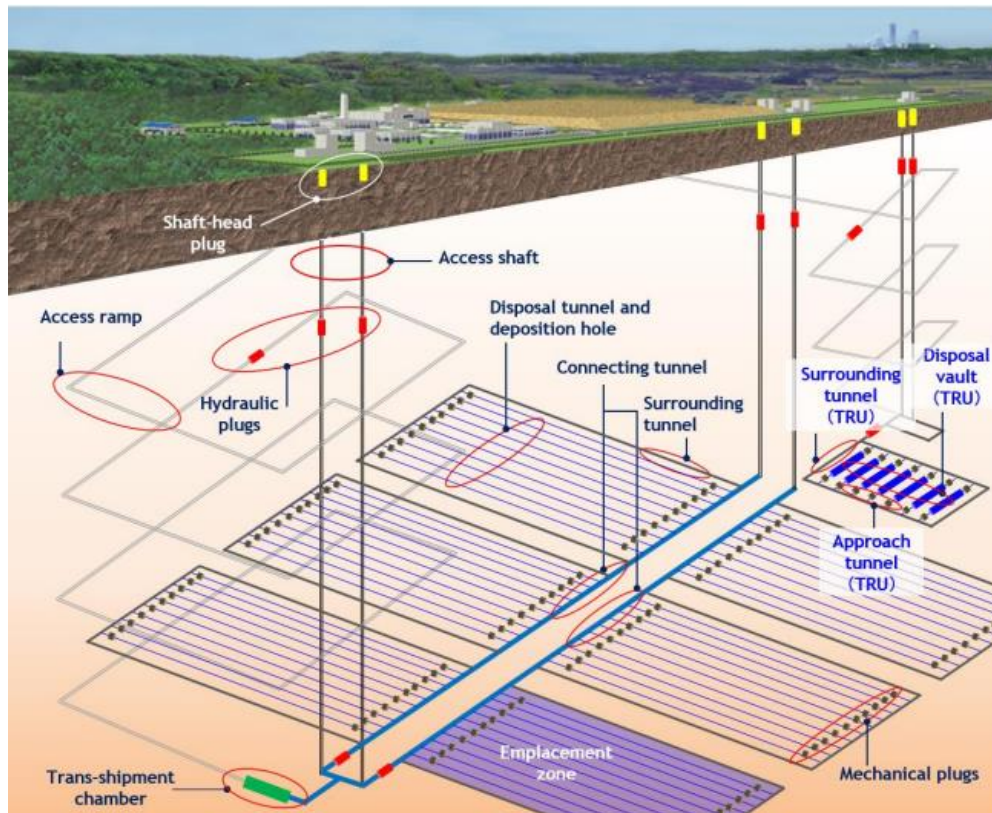
Způsob uložení odpadu a použité inženýrské bariéry odpovídají výše uvedené kategorizaci.



Obr. 28: Japonský přístup k ukládání RAO (Zdroj: <https://www.jnfl.co.jp/en/business/llw/>)

V hlubinném úložišti budou uloženy společně vitrifikovaný odpad a odpad typu TRU. Předpokládá se, že úložiště bude vybudováno v krystalinických horninách.

Při ražbě bude využita metoda TBM (tunnel boring machine) nebo NRTM (Nová rakouská tunelovací metoda).

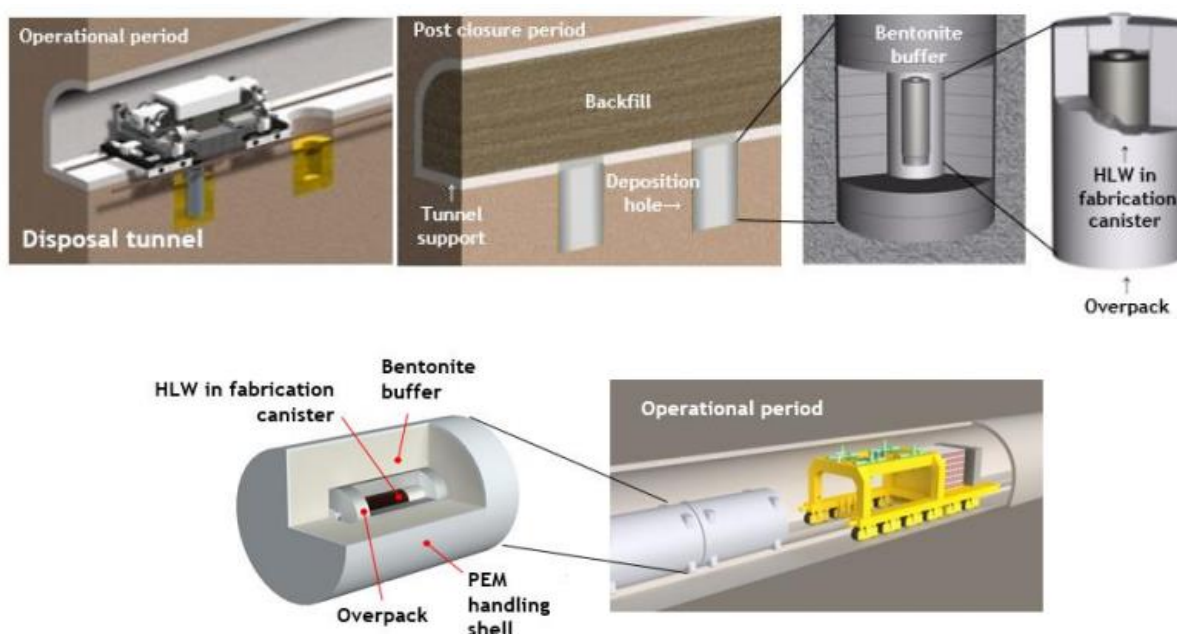


Obr. 29: Konceptní řešení společného úložiště pro odpady typu HLW a TRU (Zdroj: NUMO 2021)

Vitrifikovaný odpad bude uložen ve vrtech, jako buffer bude použit bentonit. Po zavezení budou přístupové chodby vyplněny bentonitem a uzavřeny mechanickou zátkou. Alternativním výplňovým materiálem může být malta nebo pryskyřice, ale prozatím nebyly dostatečně prověřena jejich dostatečnost pro zajištění dlouhodobé bezpečnosti.

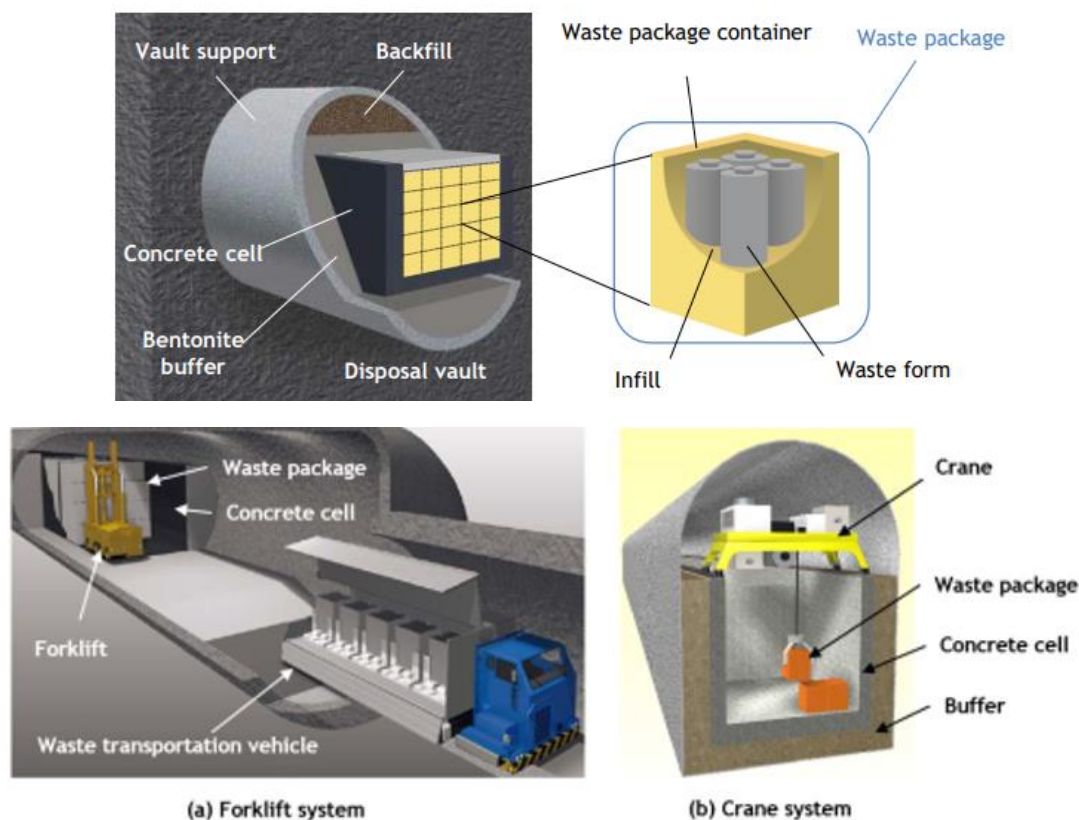
Pro zavážení obalových souborů a jejich zatěsňování ve vrtech jsou rozpracované dvě metody. První z nich, H12, předpokládá zavážení obalového souboru (overpack) do vrtu a utěsnění bentonitem v místě uložení. Druhá metoda, PEM (Prefabricated Engineered barrier system Module), je obdobná jako u konceptu SKB-H předpokládá přípravu superkontejneru na povrchu a zavezení do vrtu jako celek.

Overpack pro odpad typu HLW je vyroben z uhlíkové oceli o tloušťce 190 m, s přivařeným víkem (NUMO 2021).



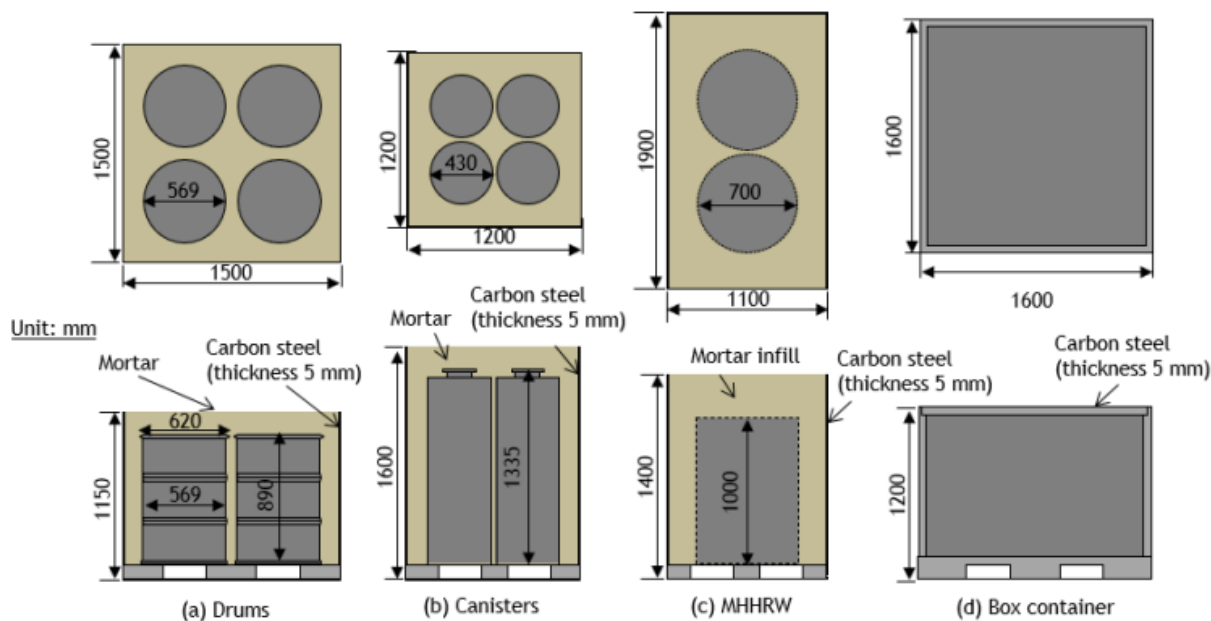
Obr. 30: Způsob uložení vitrifikovaného odpadu typu HLW. Nahoře: metoda zavážení H12. Dole: metoda PEM. (Zdroj: NUMO 2021)

Odpad typu TRU bude ukládán v horizontálních vrtech. Podle charakteru uloženého odpadu budou inženýrské bariéry zahrnovat fixační matici uvnitř primárních obalových souborů, ukládací obalový soubor, fixační materiál v ukládacím kontejneru, betonové konstrukční prvky a v některých případech bentonit jako výplňový materiál.

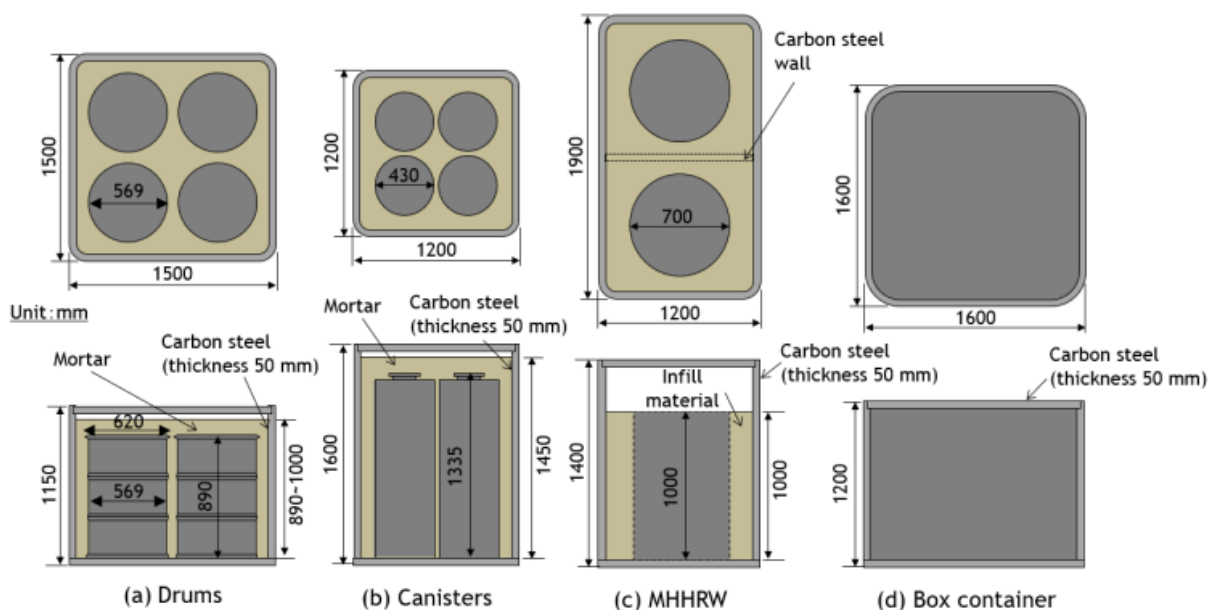


Obr. 31: Způsob uložení odpadu typu TRU. (Zdroj: NUMO 2008, NUMO 2021)

Pro odpad typu TRU jsou variantně navrženy dva kontejnery, jeden pro manipulaci vysokozdvíhacím vozíkem, druhý pro manipulaci jeřábem.



Obr. 32: Kontejner pro odpad typu TRU pro manipulaci vysokozdvíhacím vozíkem (Zdroj: NUMO 2021)



Obr. 33: Kontejner pro odpad typu TRU pro manipulaci jeřábem (Zdroj: NUMO 2021)

Primárním obalem, vkládaným do kontejneru, může být 200 l sud příp. kanystr pro kovové materiály z přepracování VJP. Kontejner bude vyplněn cementovou zálivkou.

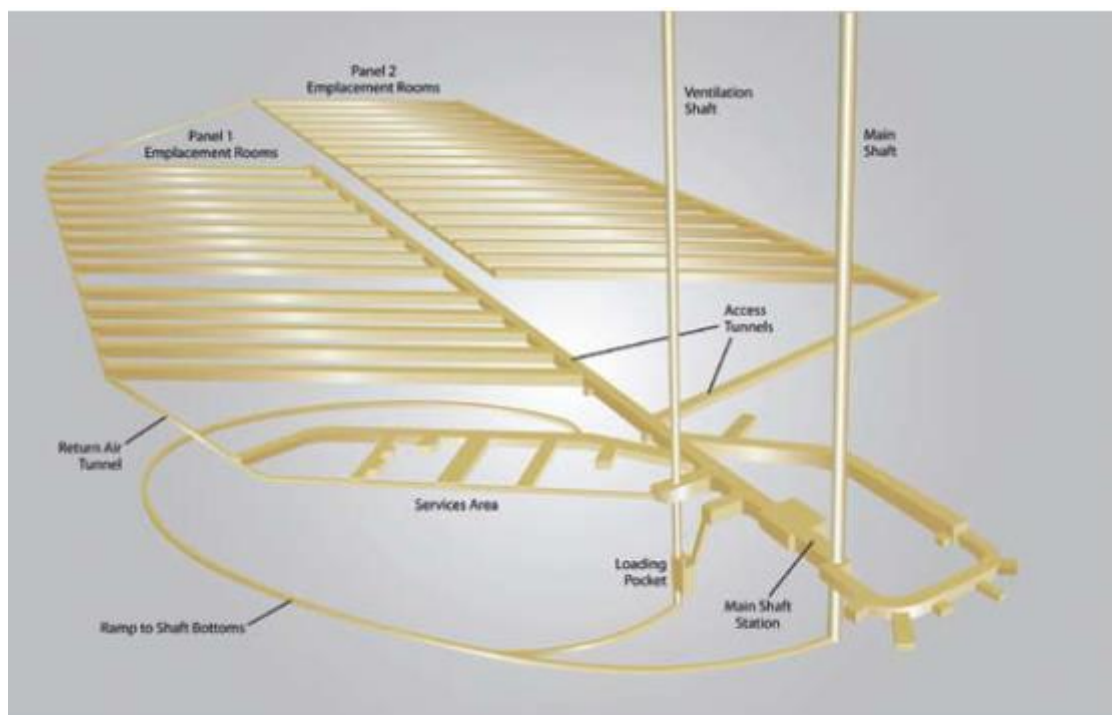
3.6 Kanada

Kanadský systém nakládání s radioaktivními odpady rozeznává 4 základní skupiny (REGDOC-2.11.1):

- Nízkoaktivní RAO (LLW), které obsahují primárně krátkodobé radionuklidy,
- Středněaktivní RAO (ILW), které obsahují signifikantní množství dlouhodobých radionuklidů,
- Vysokoaktivní RAO (HLW), vyhořelé jaderné palivo,
- Odpad z těžby a zpracování uranové rudy.

Středněaktivní RAO mají být uloženy v samostatném úložišti v krystalinických horninách, v hloubce cca 680 m v areálu jaderné elektrárny Bruce. Počátkem roku 2020 bylo umístění úložiště v referendu zamítnuto. Práce na projektu jsou přerušeny.

Technické řešení úložiště předpokládá dvě oddělené sekce, první se 14 ukládacími komorami, druhé se 17 komorami. Komory budou přibližně 250 m dlouhé, 8 m široké a 7 m vysoké. Po zaplnění budou komory uzavřeny betonovými zátkami (NWMO 2011). Po zaplnění sekce budou zátkami uzavřeny přístupové chodby a následně celé úložiště. Jako výplňový materiál bude použit materiál na bázi cementu.



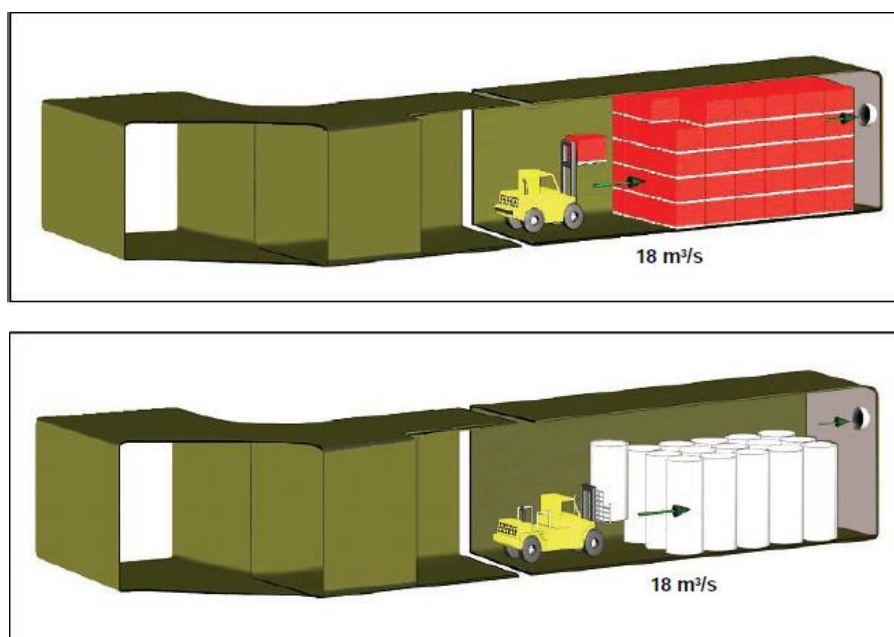
Obr. 34: Kanadský koncept uložení nízko a středněaktivních odpadů. (Zdroj: OPG 2011)

Odpady jsou v současné době skladovány v různých obalech, od sudů, přes ISO kontejnery a speciální kontejnery pro odpady s vyšší aktivitou. Snahou je budoucí ukládací obaly s ohledem na manipulaci zjednotit.

Future DGR-specific containers:

- BINOPK - LLW container overpack for AIB02, AIBN, RB90, NPBSB, and DRACK containers
- RLSHLD - 3m³ resin liner shield container (for RL and RLSS, 2 liners per shield)
- THESHLD - IC-18 tile-hole-equivalent liner shield container (for THLIC18, one liner per shield)
- SGSGMT - Steam generator segment (cut up SG)
- ILWSHLD - ILW shield (replaces tile-hole-equiv IC-18 once DGR in service)**

Obr. 35: Předpokládané typy ukládacích obalových souborů. (Zdroj: OPG 2010)



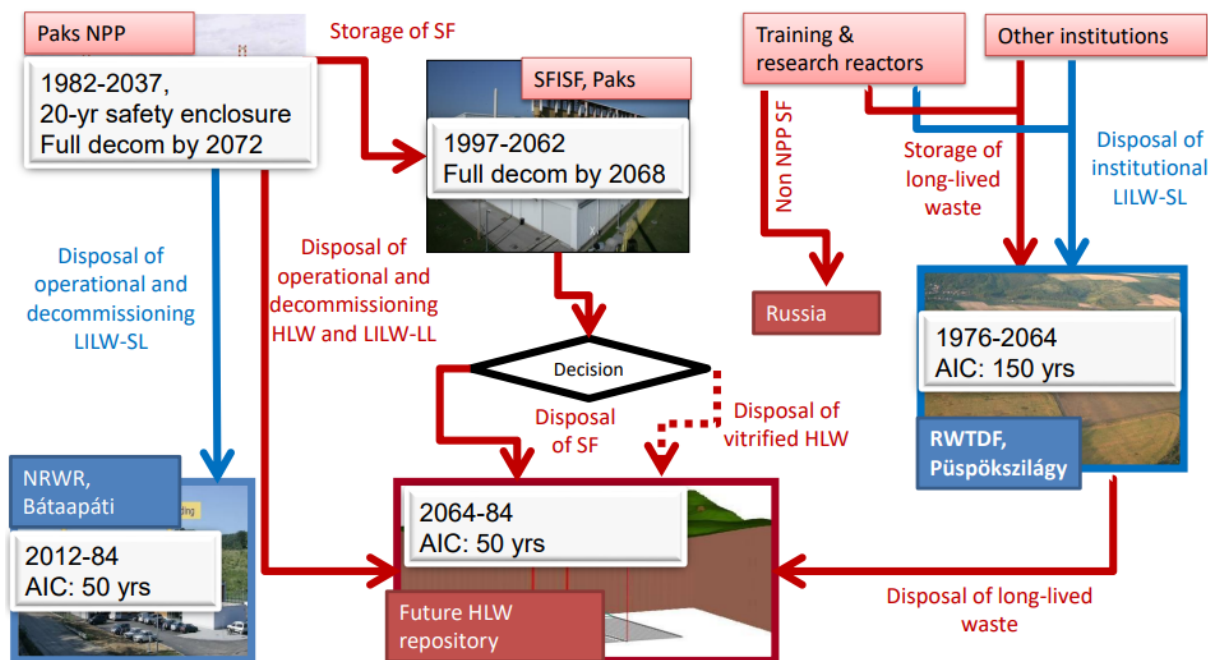
Obr. 36: Zavážení RAO. Nahoře: Komora s odpady typu LLW. Dole: Komora s odpady typu ILW. (Zdroj: NWMO 2011)

3.7 Maďarsko

Účelem hlubinného úložiště v podmínkách Maďarska je zajistit likvidaci vyhořelého paliva a radioaktivních dopadů nepřijatelných do Národního úložiště radioaktivních odpadů (National Radioactive Waste Repository NRWR v Bátaapáti).

Maďarský systém nakládání s RAO odlišuje tři základní skupiny:

- Odpad typu LILW s obsahem krátkodobých radionuklidů (s poločasem přeměny menším než 30 let) a limitovaným obsahem dlouhodobých alfa zářičů;
- Odpad typu LILW-LL s obsahem dlouhodobých radionuklidů (s poločasem přeměny větším než 30 let);
- Odpad typu HLW.

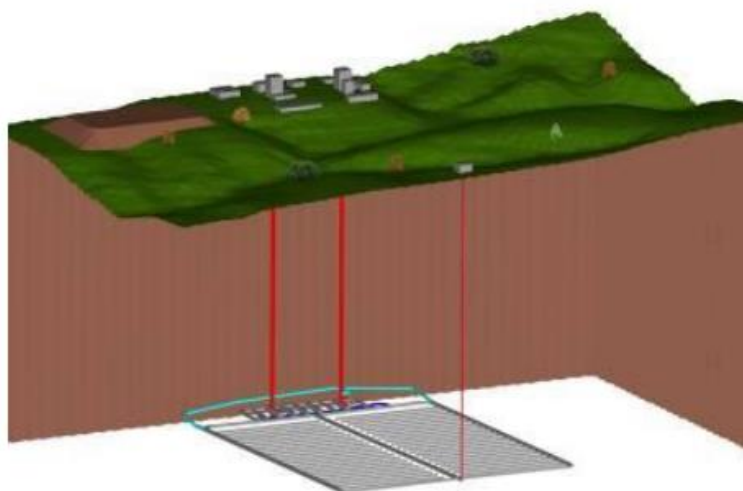


Obr. 37: Princip nakládání s RAO v Maďarsku (Zdroj: Molnár a Lázár 2018)

Odpad typu HLW a LILW–LL se předpokládá uložení ve společném úložišti, preferovanou hostitelskou horninou jsou jíly. Předpokládané zahájení provozu je v roce 2064. Probíhají především práce zaměřené na geologickou charakterizaci lokalit.

Technický koncept je ve velmi raném stádiu. Ukládací horizont bude umístěn v hloubce 500-800 m, přístupové šachty i ukládací prostory budou vyraženy konvenční metodou. Vyražené prostory budou zpevněny konstrukčními prvky na bázi cementu (Faybishenko et al. 2017).

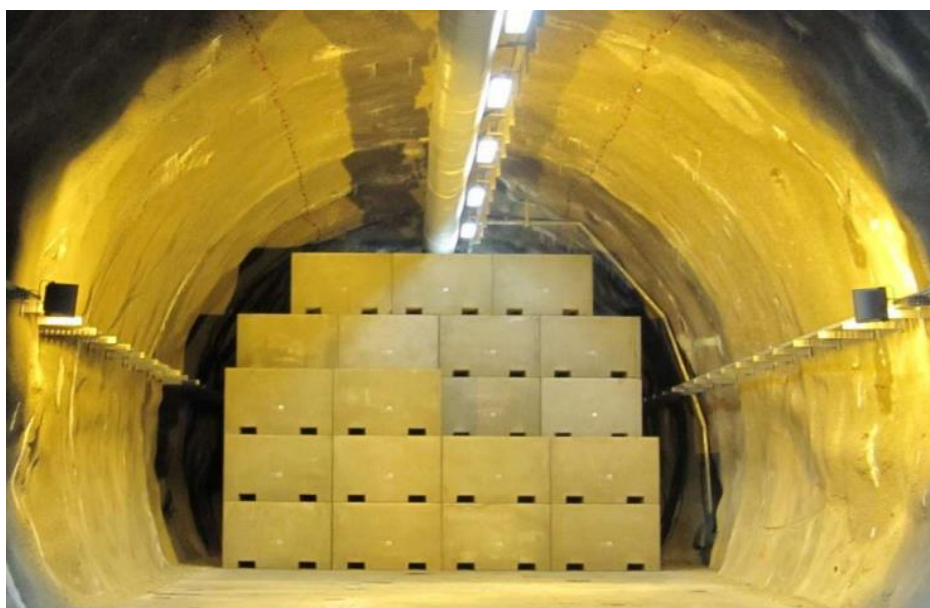
VJP bude ukládáno ve vertikálních vrtech, v obalových souborech s měděným přebalem.



Obr. 38: Maďarský koncept hlubinného úložiště (Zdroj: Molnár a Lázár 2018)

Ačkoliv koncept hlubinného úložiště není rozpracován do velké hloubky, zájem o nalezení podrobnějších informací je daný okolním prostředím a způsobem ukládání středně a nízkoaktivních odpadů v úložišti Bataapáti (NRWR). Zde směřuje nízko a středně aktivní odpad z provozu jaderné elektrárny Pakš a bude zde uložen odpad vyřazování jaderných elektráren. Národní úložiště radioaktivních odpadů v Bataapáti je podpovrchové úložiště vybudované v granitech v hloubce 200 - 250 m .

Odpad se ukládá v primárních obalech, vložených do betonových kontejnerů se ocelovou konstrukcí.



Obr. 39: Způsob uložení RAO v Bataapáti (Zdroj: Baksay 2015).



Obr. 40: Obalový soubor pro uložení odpadů v Bataapáti. (Zdroj: PURAM 2016)

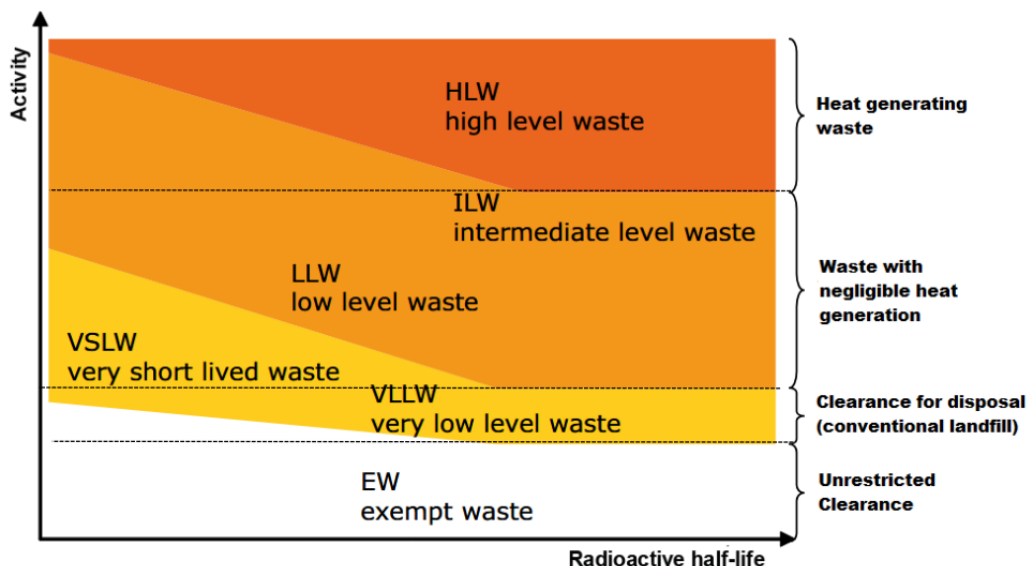
V HÚ bude ukládáno společně VJP a odpad neuložitelný v Bataapáti.

UOS s VJP budou ukládány v ukládacích šachtách/vrtech jeden na druhý. Ostatní radioaktivní odpady budou ukládány v různém uspořádání v ukládacích štolách v OS z nerezové oceli.

U všech typů odpadů, se ukládací štoly po jejich zaplnění a ukončení závázky, postupně jedna po druhé utěsní za použití vhodné směsi bentonitu a vytěžené horniny granulované na vhodnou velikost zrna. (Vojtěchová 2019)

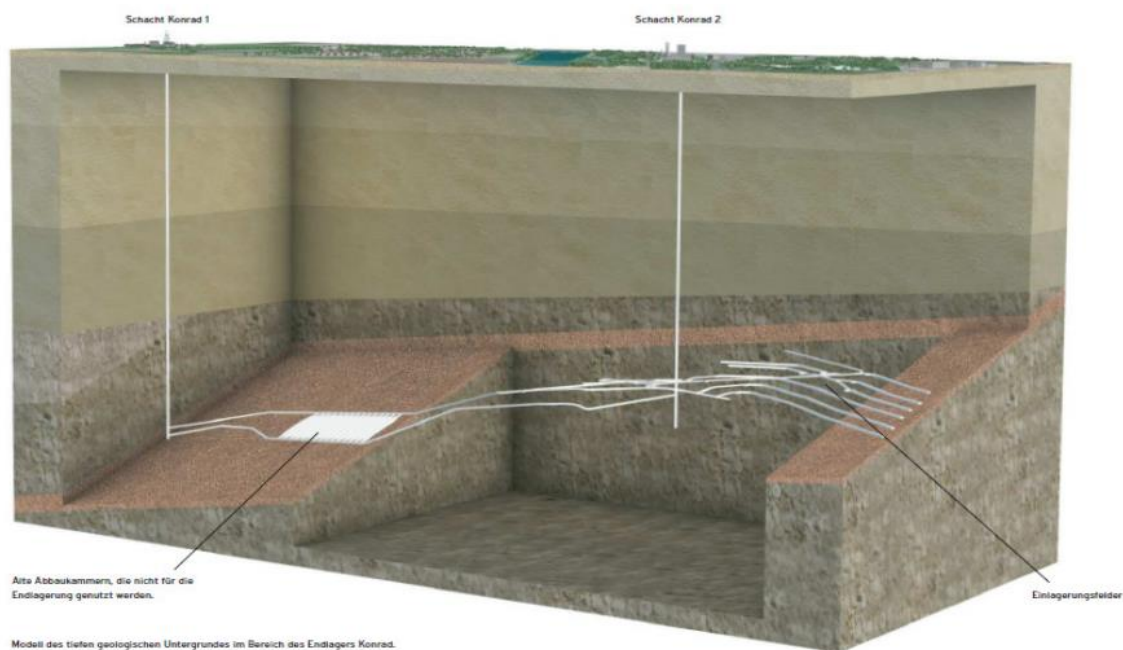
3.8 Německo

Německý systém klasifikace radioaktivních odpadů odpovídá klasifikaci IAEA.

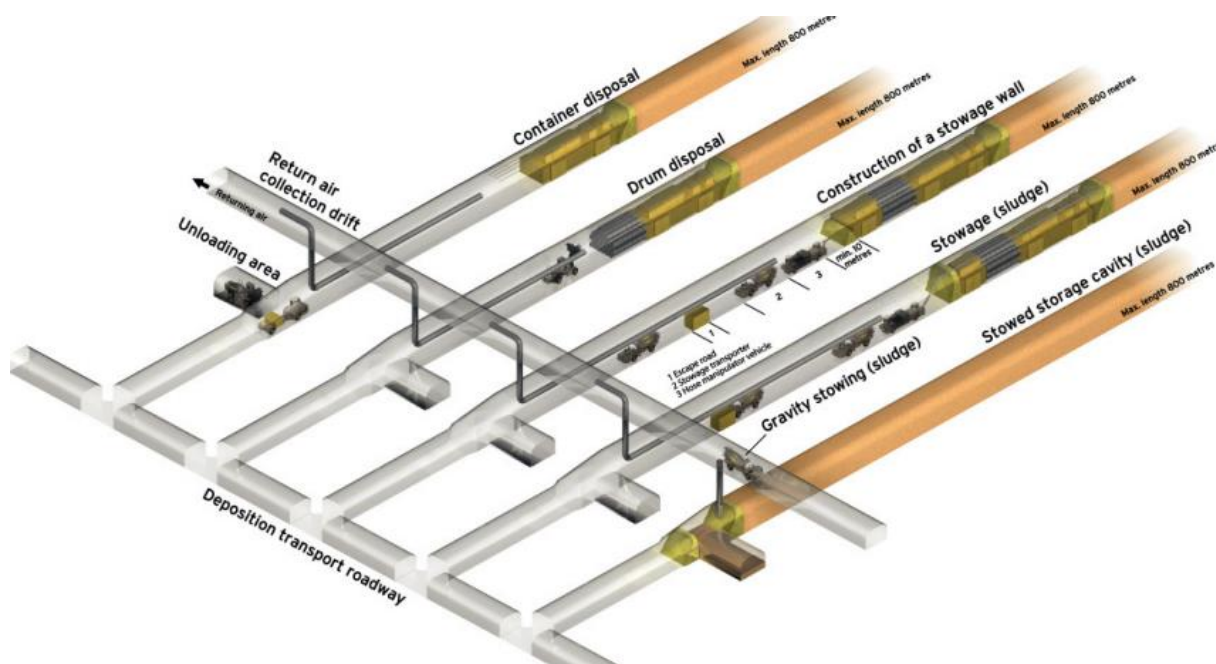


Obr. 41: systém klasifikace radioaktivních odpadů v Německu (Zdroj: Wealer 2018).

Odpad typu LILW bude uložen v důlním díle KONRAD, kde se dobývala železná ruda. Stavební práce na předávací stanici byly zahájeny na podzim roku 2017. V hloubce cca 800-1300 m bude vybudováno 5 ukládacích komor. Komory budou plněny postupně, po cca 50 m budou postaveny oddělovací betonové sněhy. Uvnitř bude odpad stabilizován cementovou zálivkou (Zdroj: Repository Konrad 2022).



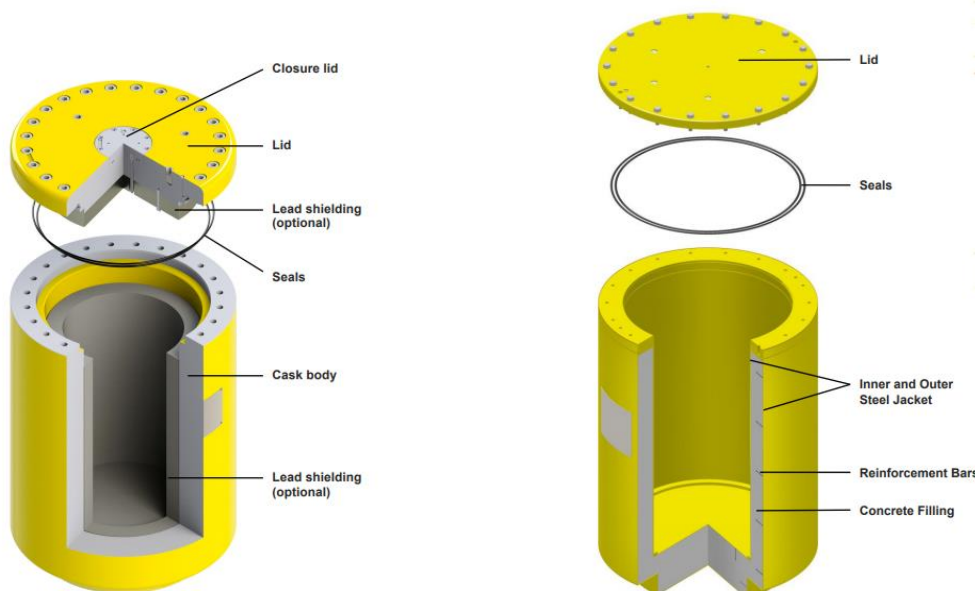
Obr. 42: Dispozice úložiště KONRAD (Zdroj: Warnecke 2009)



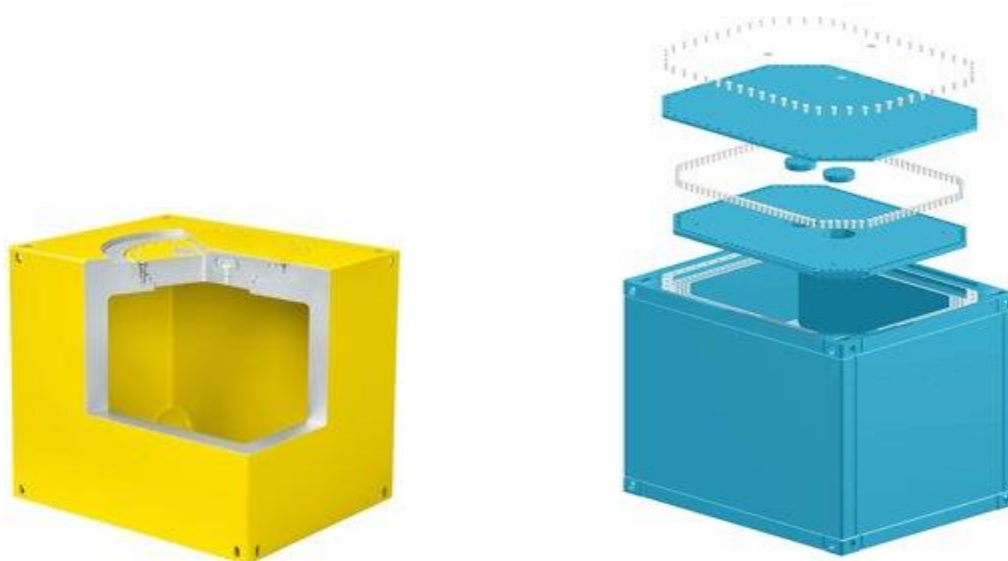
Obr. 43: Zavážení RAO na ukládacím horizontu v úložišti KONRAD (Zdroj: Warnecke 2009)

Podle charakteru ukládaného RAO budou využity různé druhy obalových souborů.

Obalový soubor MOSAIK je vyroben z litiny, a je určen pro uložení ionexů, koncentrátů a kalů. Obalový soubor UBA je kovový s betonovým stíněním a je určen pro pevný odpad. OS Yellow Box je vyroben z litiny. OS SBox je ocelový, s integrovaným topným systémem.



Obr. 44: Obalové soubory MOSAIK (vlevo), UBA (vpravo). (Zdroj: GNS 2022)



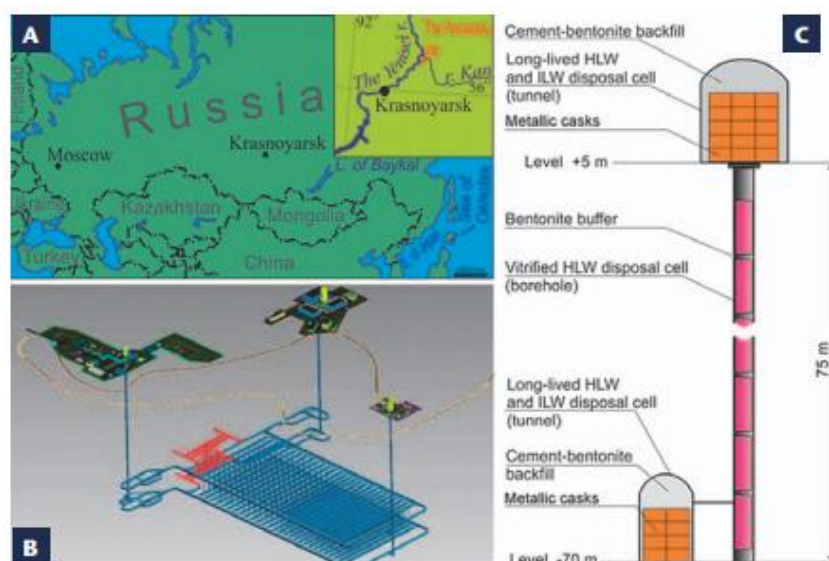
Obr. 45: Obalové soubory Yellow Box (vlevo), SBox (vpravo). (Zdroj: GNS 2022)

3.9 Rusko

Ruský systém dělí radioaktivní odpady na dvě základní skupiny – speciální (bez dalšího využití) a vyjmutelné (s možností dalšího využití). Odpady vyjmutelné se dále klasifikují do 6 tříd (Rosatom 2017):

- Třída 1 jsou vysokoaktivní odpady generující teplo.
- Třída 2 jsou pevné vysokoaktivní odpady a středněaktivní odpady s poločasem přeměny delším než 31 let, a musí být uloženy v hlubinném úložišti.
- Třída 3 jsou středně a nízkoaktivní RAO obsahující dlouhodobé radionuklidy s poločasem přeměny delším než 31 let, které budou uloženy v úložištích do hloubky cca 100 m.
- Třída 4 jsou nízko a velmi nízko aktivní RAO, které budou uloženy v přípovrchových úložištích.
- Třída 5 zahrnuje kapalné středně a nízkoaktivní RAO, které se musí injektovat do vrtů v souladu se Zákonem č. 190, o nakládání s RAO.
- Třída 6 jsou RAO, které vznikají při těžbě a zpracování uranové rudy.

Hlubinné úložiště se předpokládá vybudovat v lokalitě Jenisejskij. V něm budou společně uloženy vysokoaktivní odpady (třída 1), což představuje vitrifikovaný opad z přepracování VJP; a nízko a středně aktivní odpady obsahující dlouhodobé radionuklidy (třída 2), které budou fixovány v cementové matrici. Kontejnery s odpadem třídy 1 budou umístěny mezi dvěma horizontálními úrovněmi ve vertikálních vrtech. Ocelové kontejnery s odpadem třídy 2 budou umístěny ve chodbách, dlouhých 15-20 m. Ukládací prostory vrtů budou vyplněny bentonitem, přístupové chodby drcenou horninou. (Laverov et al. 2016).



Obr. 46: Hlubinné úložiště v Rusku; (A) vybraná lokalita (Jenisejskij), (B) model hlubinného úložiště, červenou barvou je vyznačeno umístění podzemní laboratoře, (C) ilustrativní ukázka ukládání RAO (Zdroj: Laverov et al. 2016)

3.10 Slovensko

Slovenský systém klasifikace radioaktivních odpadů rozděluje RAO do 5 skupin:

a) přechodné radioaktivní odpady, jejichž aktivita během skladování vzhledem k velmi krátké době poločasu přeměny poklesne pod mezní hodnotu pro jejich uvádění do životního prostředí;

b) velmi nízkoaktivní radioaktivní odpady, jejichž aktivita je mírně vyšší než mezní hodnota pro jejich uvádění do životního prostředí, obsahují přednostně radionuklidy s krátkou dobou poločasu přeměny, případně i radionuklidy s dlouhou dobou poločasu přeměny v nízké koncentraci, které při ukládání vyžadují nižší stupeň izolace od životního prostředí systémem inženýrských bariér nebo nevyžadují použití inženýrských bariér a doba institucionální kontroly úložiště je kratší než v případě povrchového typu úložiště radioaktivních odpadů;

c) nízkoaktivní radioaktivní odpady, jejichž průměrná hmotnostní aktivita radionuklidů s dlouhou dobou poločasu přeměny, zejména radionuklidů emitujících alfa záření, je nižší než 400 Bq/g, maximální hmotnostní aktivita radionuklidů s dlouhou dobou poločasu přeměny, zejména radionuklidů emitujících alfa záření, je lokálně nižší než 4 000 Bq/g, neprodukují zbytkové teplo a po úpravě splňují limity a podmínky bezpečného provozu pro povrchový typ úložiště radioaktivních odpadů;

d) středně aktivní radioaktivní odpady, jejichž průměrná hmotnostní aktivita radionuklidů s dlouhou dobou poločasu přeměny, zejména radionuklidů emitujících alfa záření, se rovná 400 Bq/g nebo je vyšší, mohou produkovat zbytkové teplo a opatření k jeho odvodu jsou nižší než v případě vysokoaktivních radioaktivních odpadů a po úpravě nesplňují limity a podmínky bezpečného provozu pro povrchový typ úložiště radioaktivních odpadů;

e) vysokoaktivní radioaktivní odpady, jejichž průměrná hmotnostní aktivita radionuklidů s krátkou i dlouhou dobou poločasu přeměny, zejména radionuklidů emitujících alfa záření,

převyšuje hodnoty stanovené pro nízkoaktivní a středněaktivní radioaktivní odpady, jsou uložitelné pouze v hlubinném typu úložiště z radioaktivních odpadů, přičemž představují významný faktor při projektování těchto úložišť.

Zodpovednosť	Dlhodobá politika	Financovanie záväzkov	Aktuálna prax/zariadenia	Plánované zariadenia
Vyhoreté palivo	Hlbinné úložisko alebo multilat. riešenie	Národný jadrový fond	Dlhodobé skladovanie	Hlbinné úložisko
Odpady z palivového cyklu	Hlbinné / povrchové úložisko	Národný jadrový fond	Úložisko nízkoaktívnych RAO	Hlbinné úložisko pre vysokoaktívne RAO
Inštitucionálne odpady	V procese schvaľovania	Reexport alebo finančná záruka	Skladovanie	Úložisko (s niektorými výnimkami)
Závazky na vyradenie z prevádzky	Bezprostredné kontinuálne vyradenie	Národný jadrový fond	Bezprostredné kontinuálne vyradenie	Úložisko pre kontaminovanú zem a stavebné materiály
Použitú uzatvorenú žiariče	Úložisko	Reexport alebo finančná záruka	Skladovanie	Úložisko (s niektorými výnimkami)

Obr. 47: Způsob uložení RAO a VJP ve Slovenské republice (Zdroj: ÚJD 2021).

Slovenský přístup k budování hlubinného úložiště uznává „dvojitý přístup“. To znamená, že mimo alternativu vybudování vlastního úložiště zvažuje též koncept HÚ s mezinárodním statutem – možnost ukládání radioaktivních odpadů z více států do hlubinného úložiště vybudovaného na území jednoho z nich.

Ačkoliv koncept hlubinného úložiště není rozpracován do velké hloubky, zájem o Slovenskou republiku a rozpracování rešerše je daný pokročilým stupněm vyřazovacích prací.

Návrh základního konceptu řešení HÚ

Umístění

- Lokalita není známa
- Hloubka umístění úložných prostor -500 m

Hostitelské prostředí

- Horninový masiv krystalické horniny
jílové horniny

Průměrná teplota zemského povrchu 10°C

Ukládaný inventář

- Vysoko aktivní odpady a odpady neuložitelné do JZ RÚ RAO (odpady z vyřazování JE
- IRAO (institucionální radioaktivní odpady)
- VJP (s výhledem 60 let jeho produkce)

Odpady z vyřazování jaderných elektráren budou tvořit cca 80% odpadu obsahujících dlouhodobé radionuklidy, který ČR plánuje uložit do hlubinného úložiště. Rešeršní práce se zaměřily spíše na používané obalové soubory.

Odpad se ukládá ve vláknobetonových kontejnerech, které slouží buď jako primární obal nebo jako přebal pro primární obaly, většinou ocelové sudy.

Kontejner je vyroben ze speciálního vláknobetonu, skládá z těla, víka a dvou zátek. Má krychlový tvar s vnějšími rozměry 1,7x1,7x1,7 m, s využitelným objemem 3 m³. Vnější a vnitřní plášť je vyhotoven z ocelových plechů tl. 10 mm se zavařeným vnitřním a vnějším dnem o tl. 15 mm. Celý meziprostor OS je vyplněn betonem. Lze ho stohovat maximálně ve 3 vrstvách. (JAVYS 2022).



Obr. 48: Vláknobetonový kontejner (Zdroj: JAVYS 2022)

Shrnutí parametrů VBK

Kapacita	3,1m ³
Stínění	těles, víko kontejneru s dvojitými zátkami a případná těsnící vložka
Rozměry	tělo 1700 x 1700 x 1700 mm Víko 1500 x 1500 x 145 mm Zátka r 300 mm, tloušťka 145 mm
Hmotnost	víko 0,7 t Prázdné těleso kontejneru 3,5 t Plný kontejner max. 20,0 t Zátka 1 ks 0,02 t
Materiál VBK	beton zesílený vlákny amorfnní vysokolegované oceli

Uzavírání sekcí s RAO

Volný prostor mezi VBK kontejnery v komoře s RAO bude rovněž v určité fázi provozu úložiště vyplněn vhodnou výplňovou směsí (zásypem). Uzavírání komory s RAO zahrnuje následující činnosti:

- uzavření vstupu do komory,
- vyplnění volného prostoru komory.

Zaplněná komora bude ve vstupu uzavřena betonovou příčkou, která bude sloužit jako bednění. U stropu bude do uzávěry vložena ocelová trubka, která bude sloužit jako odvětrávací a kontrolní otvor.

Komora bude pak zaplněna výplňovou směsí, která bude do komory vtlačována pomocí čerpadel odvětrávacími vrtly. Směs bude k čerpadlům dopravována autodomíhávačem. Jako výplňová směs bude použit nejdříve beton, je možné však uvažovat i o popílku, směsi jemně drcené horniny (odpad při vrtání horizontálních ukládacích vrtů) a vhodného pojiva (cementu, jílu) apod. (Vojtěchová 2019)

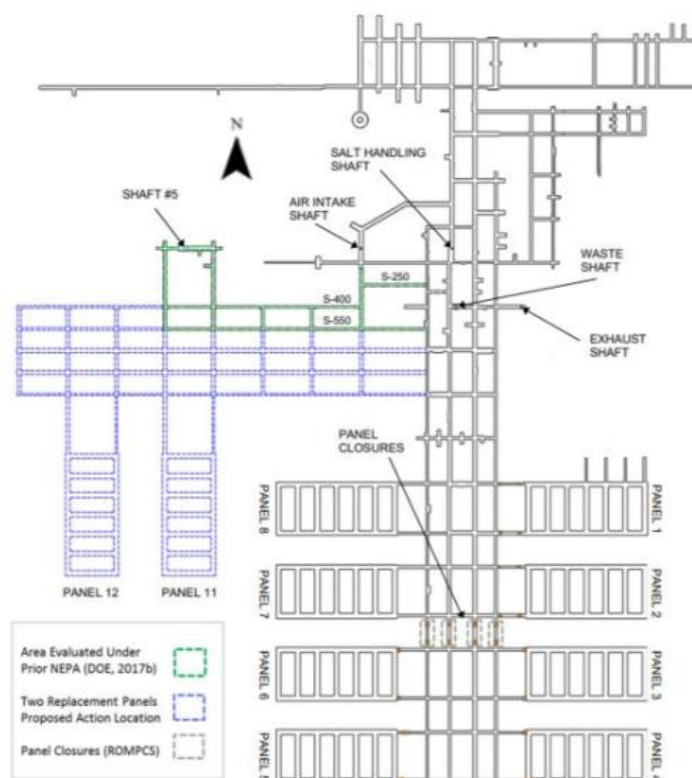
3.11 Spojené státy americké

Americký systém klasifikace radioaktivních odpadů je poněkud odlišný od systému IAEA. Odpady se dělí podle jejich vlastností do několika kategorií (US NRC 2022):

- Nízkoaktivní odpad, který zahrnuje běžný provozní a institucionální odpad;
- Odpad související s přepracováním (TRU waste), který zahrnuje vedlejší produkty z přepracování paliva;
- Vysokoaktivní odpad, který zahrnuje ozářené nebo vyhořelé jaderné palivo;
- Odpad z těžby a úpravy uranové rudy.

Tomuto dělení odpovídá i předpokládaný způsob uložení.

Odpady typu TRU jsou ukládány v úložišti WIPP cca 650 m pod povrchem, hostitelskou horninou jsou solné formace. Odpad se ukládá v oddělených sekcích se sedmi komorami, které jsou cca 4 m vysoké, cca 10 m široké a cca 90 m dlouhé. Komory jsou od sebe vzdálené 100 m. Po zaplnění jsou sekce uzavřeny ocelovými přepážkami. Komory vyplněny nejsou, na kontejnery jsou umístěny pytle s absorbérem vlhkosti (MgO).



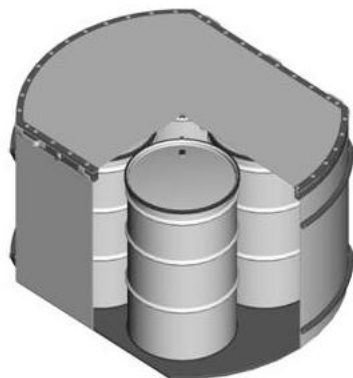
Obr. 49: Dispoziční řešení ukládacího horizontu WIPP (Zdroj: Hedden 2021)



Obr. 50: Způsob uložení odpadů ve WIPP. (Zdroj: Nelson and White 2009).

Primárním obalem jsou sudy, které jsou vloženy do kovových přebalů, ve variantách pro různý počet sudů, dle aktivity ukládaného RAO (varianta pro 1 – 10 primárních obalových souborů) (DOE 2007).

Pro ilustraci jsou uvedeny (ve vazbě na předcházející obrázek) SWB (Standard waste box) a TDOP (Ten drum over-pack).



Standard Waste Box

Table 1 – SWB Weights

Component	Weight (pounds)		
	Maximum Gross	Nominal Tare	Net Content
SWB	4,000	640	3360

Table 2 – SWB Dimensions

Dimension	Approximate Measurement (Inches)	
	Inside	Outside
Height	36 9/16	36 7/8
Length	68 3/4	71
Width	52	54 1/2

Obr. 51 – Obalový soubor SWB (Zdroj: WIPP SWB 2022)

**Ten-Drum Overpack****Table 1 – TDOP Weights**

Component	Weight (pounds)		
	Maximum Gross	Approximate Empty	Shipping Content
TDOP	6,700	1,700	5,000

Table 2 – TDOP Dimensions

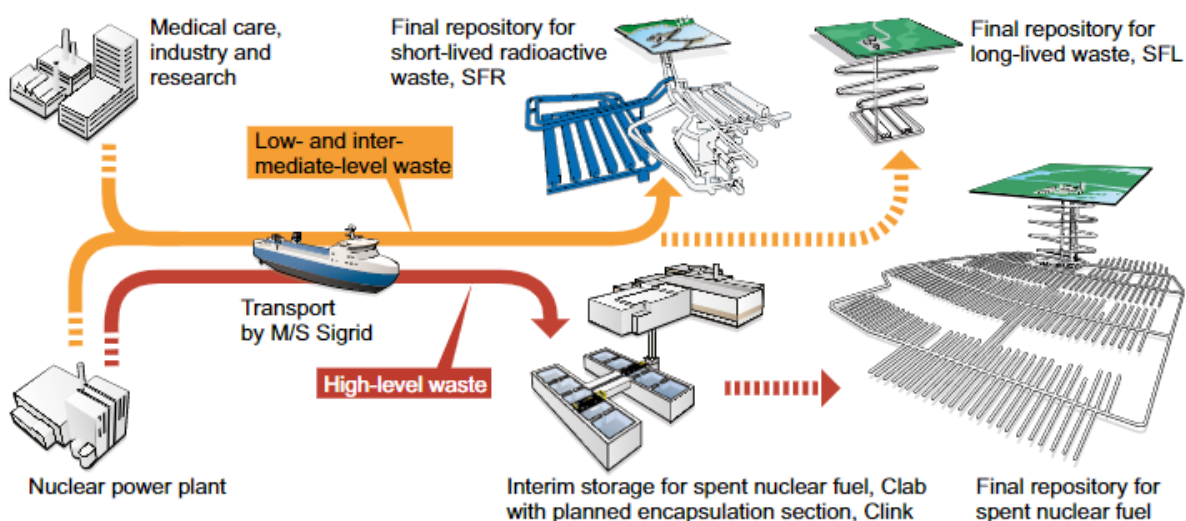
Dimension	Approximate Measurement (Inches)	
	Inside	Outside
Height	72 5/8	73 1/8

Obr. 52 Obalový soubor TDOP (Zdroj: WIPP TDOP 2022)

3.12 Švédsko

Švédský koncept nakládání s RAO předpokládá vybudovat tři úložiště, pro radioaktivní odpad obsahující krátkodobé radionuklidy (SFR), pro radioaktivní odpad obsahující dlouhodobé radionuklidy (SFL) a vyhořelé jaderné palivo.

Předpokládá se, že úložiště by mělo být uvedeno do provozu kolem roku 2045. Zatím ještě není vybraná lokalita.

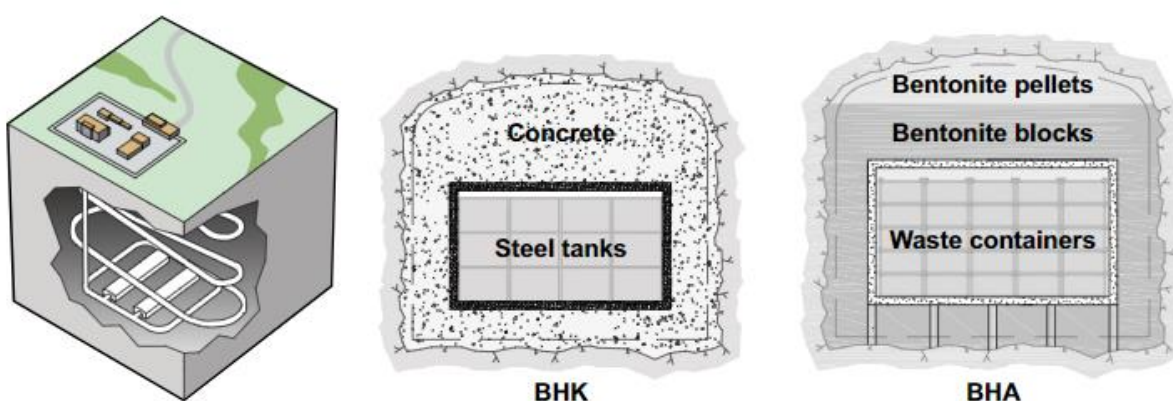


Obr. 53: Švédský systém klasifikace a nakládání s RAO (Zdroj: SKB 2019)

Úložiště pro radioaktivní odpad obsahující dlouhodobé radionuklidy bude mít dvě části / ukládací komory, které, s ohledem na ukládaný typ odpadu, budou mít poněkud odlišný systém inženýrských bariér.

Jedna komora bude určena pro kovový odpad z vyřazování jaderných elektráren (BHK), a po zaplnění bude zaplněna výplňovým materiálem na bázi cementu. Předpokládá se, v této komoře budou uloženy materiály z tlakové nádoby reaktoru, vodící a řídicí tyče, detektory z aktivní zóny a další aktivovaný materiál.

Druhá komora je vyčleněna pro odpad, produkovaný především Studsvik Nuclear AB (BHA). Jedná se o odpad z výzkumných činností a z vyřazení tohoto výzkumného zařízení a dále institucionální odpad producentů z oblasti průmyslu a medicíny. Odpad tvoří především vysycené ionexy, kaly, nástroje, technologická zařízení apod. Tato komora bude před uzavřením zaplněna bentonitem.

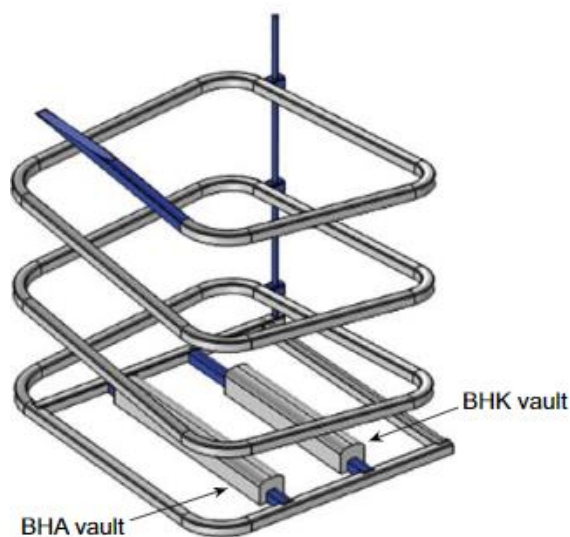


Obr. 54: Konceptní řešení úložiště pro RAO obsahující dlouhodobé radionuklidy (Zdroj: SKB 2019)

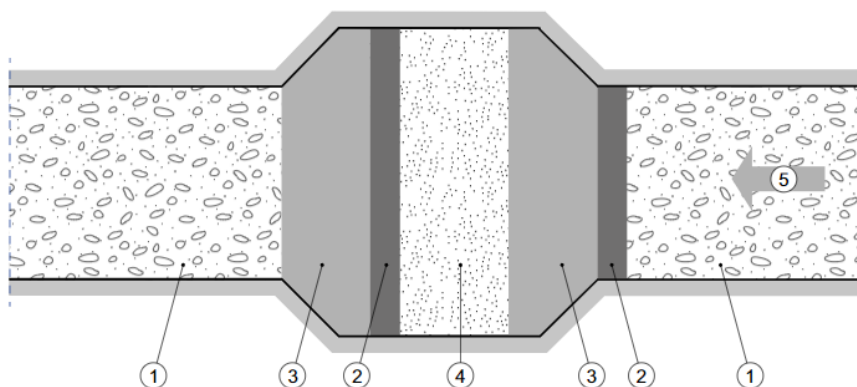
Úložiště bude umístěno v hloubce – 500 m. Komora pro odpad typu BHA bude mít délku cca 170 m, šířku cca 20,6m a výšku cca 18,4 m. Komora pro odpad typu BHK bude mít délku cca

134 m, šířku cca 20,6 m a výšku cca 19,6 m. bude ji tvořit 6 samostatných jímek, do nichž se budou ukládat odpady. Tyto jámy budou v provozním období zajišťovat stínění již uložených odpadů.

Po ukončení provozu budou ukládací prostory zátkami. Zátky budou sloužit nejen jako mechanická uzávěra, ale také budou mít funkci utěsnit ukládací prostory a zabránit vytvoření preferenčních cest.



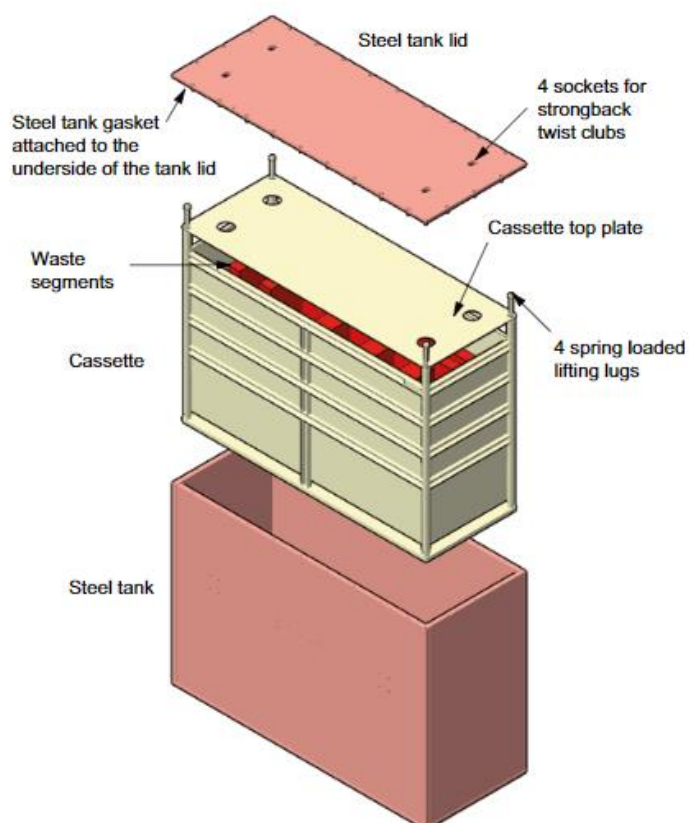
Obr. 55: Umístění zátek v úložišti (Zdroj: SKB 2019)



Obr. 56: Schéma uzavírací zátky. 1 - zásyp z drcené horniny, 2 – betonová opěrná zeď, 3 – litý beton, 4 – bentonit, 5 - směr zásypu. (Zdroj: SKB 2019)

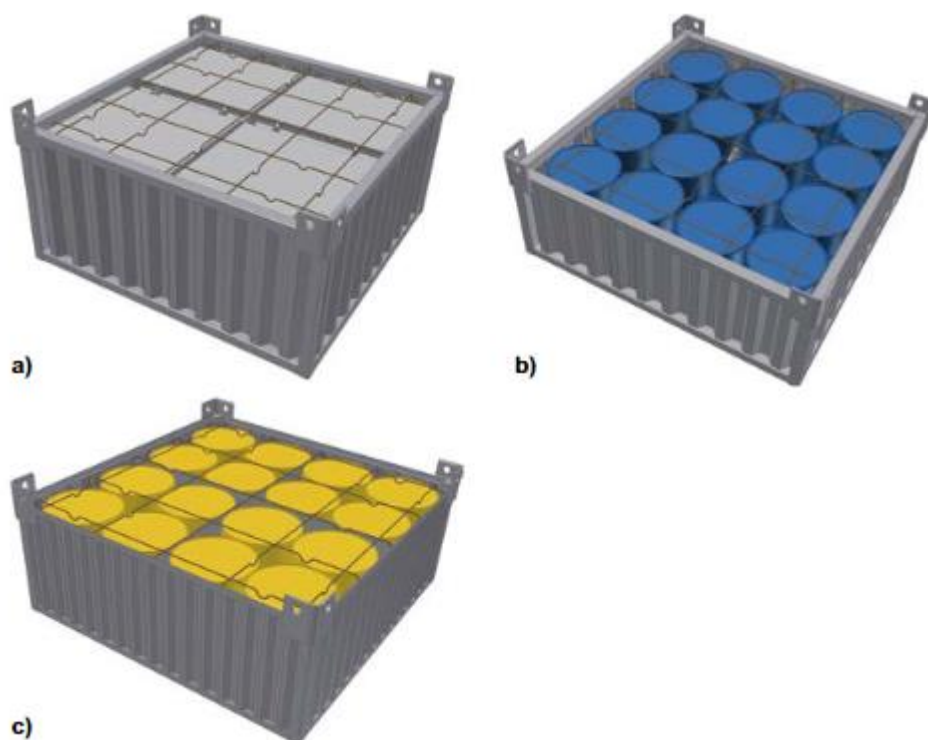
Odpad obou typů se v současné době skladuje, a předpokládá se, že ve stejných obalových souborech bude uložen úložiště.

Obalové soubory pro odpad typu BHK má vnější rozměry 3,3x1,3x2,3 m, s různými tloušťkami stěn – 50,100,1500nebo 200 mm. Úložný objem pro odpad je cca 10 m³, maximální hmotnost odpadu cca 6-7 t.



Obr. 57: Obalový soubor pro odpad typu BHK (Zdroj: SKB 2019)

Obalové soubory typu BHA jsou spíše paletového typu, neboť odpad se v současné době ukládá do beden, 200 l, příp. 280 l sudů. Obalový soubor nebude uzavřen víkem, o zaplnění odpady bude v úložišti zalit zálivkou na bázi cementu.



Obr. 58: Obalový soubor pro odpady typu BHA, a) standardní bedny, b) 200 l sudy, c) speciální 280 l sudy (Zdroj: SKB 2019)

Table 4-1. Total weights, volumes and voidage of waste and waste packaging in BHK and BHA (data from Section 3.6 in the Initial state report).

	BHK	BHA
Weight waste (tonnes)	4 619	2 716
Weight packaging and grout (tonnes)	17 700	11 900
Waste volume ^a (m ³)	-	4 140
Disposal volume ^b	6 774	10 742
Void in waste (m ³)	1 200	1 300
Initial state pore volume (m ³)	3 100	5 000
Number of waste packages	606 ^c	1 325

^a Inner waste package volume for the BHA waste.

^b Volume the waste packages will occupy in the concrete cassettes.

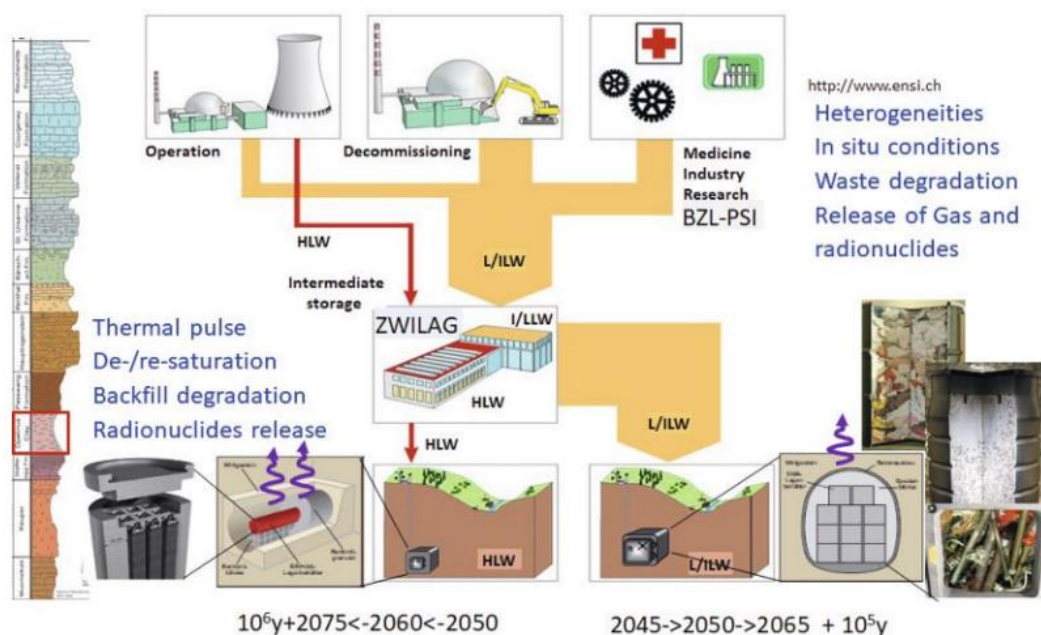
^c Steel tanks. In addition, 115 m³ secondary wastes and 659 m³ of the PWR biological shields are expected to be deposited in BHK, according to Herschend (2014, Table 5-3, 5-4 and 5-5).

Obr. 59: Sumární informace o uložených obalových souborech a RAO (Zdroj: SKB 2019)

3.13 Švýcarsko

Švýcarsko rozlišuje dvě základní skupiny radioaktivních odpadů:

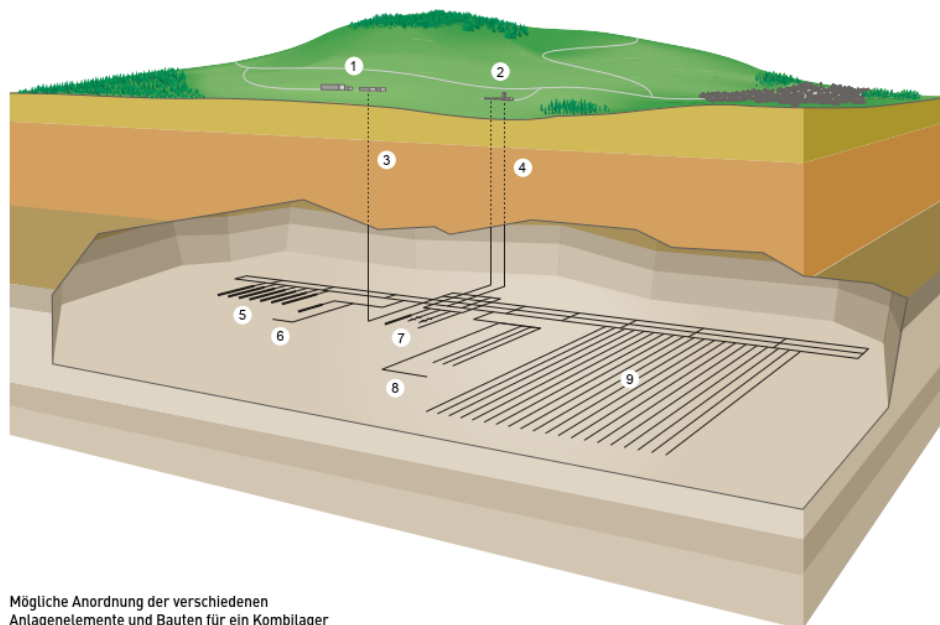
- Vysokoaktivní odpad (VJP, odpad z přepracování);
- Nízko a středně aktivní odpad.



Obr. 60: Nakládání s RAO podle švýcarského národního programu (Zdroj: Churakov 2020)

Oba typy odpadu musí být uloženy v hlubinném úložišti. Švýcarský koncept předpokládá vybudovat úložiště v sedimentárních horninách.

Protože odpady mají různé vlastnosti, musí být odděleny – buď v různých úložištích, anebo ve stejném úložišti, ale oddělených sekcích. Obě sekce se nachází na stejném ukládacím horizontu, obslužná část je společná.

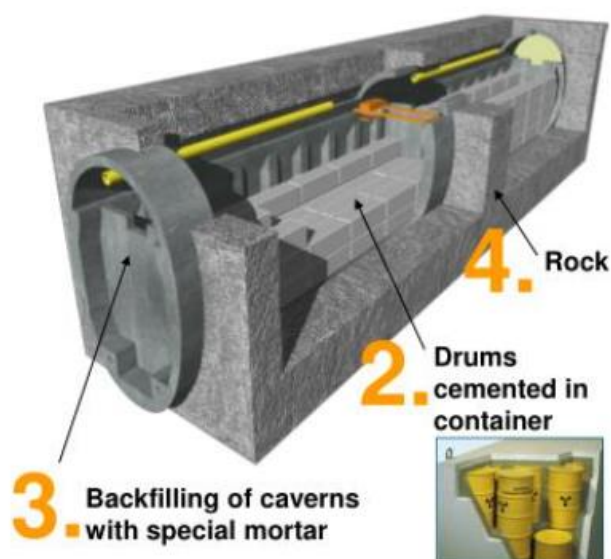


Mögliche Anordnung der verschiedenen Anlagenelemente und Bauten für ein Kombilager gemäss dem derzeitigen Stand der Projektentwicklung

- 1) Oberflächenanlage
- 2) Nebenzuganganlage
- 3) Zugangsschacht (Hauptzugang)
- 4) Betriebs- und Lüftungsschacht (Nebenzugänge)
- 5) Hauptlager schwach- und mittelaktive Abfälle
- 6) Pilotlager schwach- und mittelaktive Abfälle
- 7) Bauten für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag/Testbereiche
- 8) Pilotlager hochaktive Abfälle
- 9) Hauptlager hochaktive Abfälle

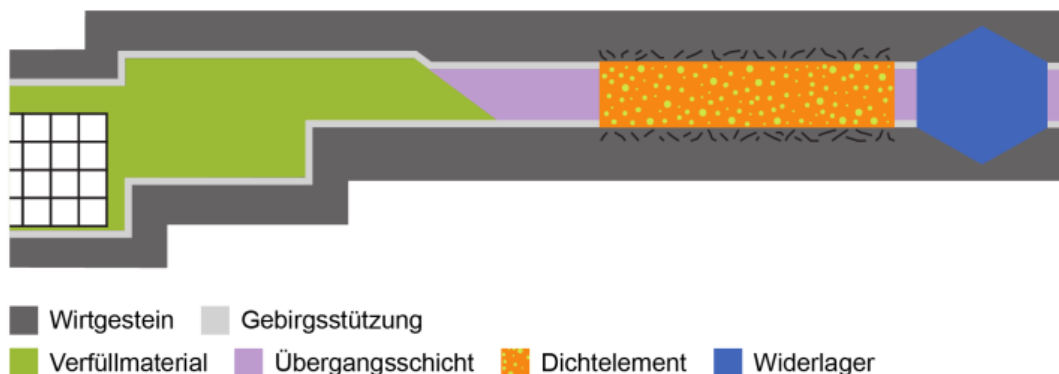
Obr. 61: Švýcarský koncept hlubinného úložiště. 5) část úložiště pro odpad s dlouhodobými nuklidy, 9) část úložiště pro VJP. (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022)

Nízko a středně aktivní RAO bude uložen v kavernách, cca 150-300 dlouhých a cca 8 m širokých. Obalové soubory budou ukládány na sebe. Po zaplnění budou komory vyplněny cementovou maltou.



Obr. 62: Uložené obalové soubory (Zdroj: Weber 2014)

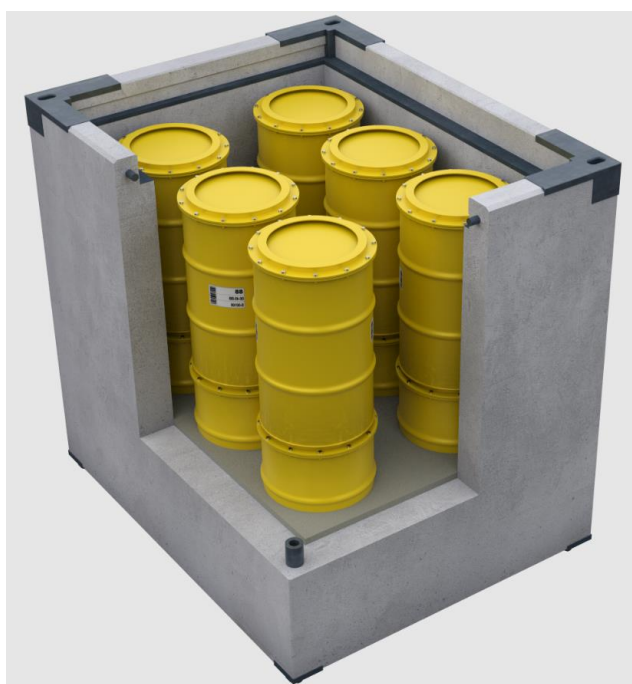
Zaplňené komory budou uzavřeny zátkou, která bude mít mechanickou i těsnící funkci.



Obr. 63: Podélná řez zátkou ukládací komory RAO. Černá barva – hostitelská hornina. Šedá barva – konstrukční prvky. Zelená barva – výplňový materiál kaverny. Fialová barva – přechodová vrstva. Oranžová barva – těsnící bariéra. Modrá barva – cementová zátka. (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022)

Zátkou bude rovněž uzavřena sekce pro ukládání RAO, a po ukončení provozu bude uzavřeno celé úložiště.

RAO se ukládá do sudů. Ty budou vloženy do betonových kontejnerů a následně uloženy v úložišti.



Obr. 64: Ukládací obalový soubor pro RAO. (Zdroj: NAGRA 2022)

3.14 Velká Británie

Velká Británie kategorizuje RAO do čtyř základních skupin: HLW (vysokoaktivní odpady), ILW (středněaktivní odpady, LLW (nízkoaktivní odpady) a VLLW (velmi nízkoaktivní odpady).

Z pohledu konečného uložení pak na dvě další skupiny (NDA 2019):

- HAW (higher activity waste), které zahrnují dle výše uvedeného členění HLW, ILW a malou frakci LLW)
 - HHGW (high-heat generating waste), což je nepřeprocessované VJP a VAO z přepracování VJP;
 - LHGW (low-heat generating waste), které zahrnují frakci odpadu LLW, ILW, ochuzený uran atd.;
- LAW (lower activity waste), které zahrnují dle výše uvedeného členění LLW a VLLW.

Odpady typu HAW (HHGW a LHGW) se předpokládá umístit do stejného úložiště. Britský program nepreferuje žádnou z potenciálně vhodných hostitelských hornin. S ohledem na to, že není doposud rozhodnuto o hostitelském prostředí, RWM si vybrala pro různé druhy odpadů šest ilustrativních technických konceptů hlubinného ukládání. Pro ně získává informace a rozpracovává obecné požadavky pro národní program. Po výběru hostitelského prostředí budou tyto požadavky a znalosti z ilustrativního konceptu rozpracovány do technického řešení, které bude vyhovovat národnímu programu.

Host rock	Illustrative Geological Disposal Concept Examples ^d	
	LHGW	HHGW
Higher strength rocks ^a	UK LHGW Concept (RWM, UK)	KBS-3V Concept (SKB, Sweden)
Lower strength sedimentary rock ^b	Opalinus Clay Concept (Nagra, Switzerland)	Opalinus Clay Concept (Nagra, Switzerland)
Evaporites ^c	WIPP Bedded Salt Concept (US-DOE, USA)	Gorleben Salt Dome Concept (DBE-Technology, Germany)

Notes

a. Higher strength rocks – the UK LHGW concept and KBS-3V concept for spent fuel were selected due to availability of information on these concepts for the UK context.

b. Lower strength sedimentary rocks – the Opalinus Clay concept for disposal of long-lived ILW, HLW and spent fuel was selected because a recent OECD Nuclear Energy Agency review regarded the Nagra (Switzerland) assessment of the concept as state of the art with respect to the level of knowledge available. However, it should be noted that there is similarly extensive information available for a concept that has been developed for implementation in Callovo-Oxfordian Clay by Andra (France), and which has also been accorded strong endorsement from international peer review. Although we will use the Opalinus Clay concept as the basis of the illustrative example, we will also draw on information from the Andra programme. In addition, we will draw on information from the Belgian super container concept, based on disposal of HHGW in Boom Clay.

c. Evaporites – the concept for the disposal of transuranic wastes (TRU) (long-lived ILW) in a bedded salt host rock at the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in New Mexico was selected because of the wealth of information available from this facility. The concept for disposal of HHGW in a salt dome host rock developed by DBE Technology (Germany) was selected due to the level of concept information available.

d. For planning purposes the illustrative concept for depleted, natural and low enriched uranium is assumed to be same as for ILW/LLW and for plutonium and highly enriched uranium is assumed to be same as for HLW/SF.

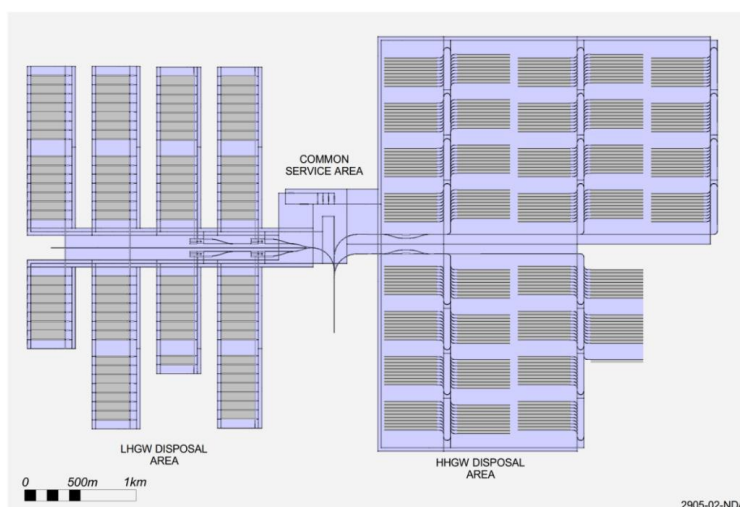
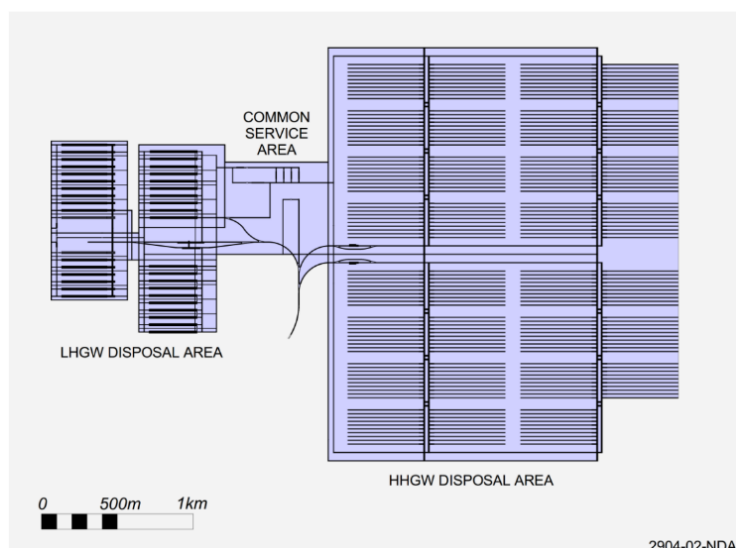
0649-06-NDA

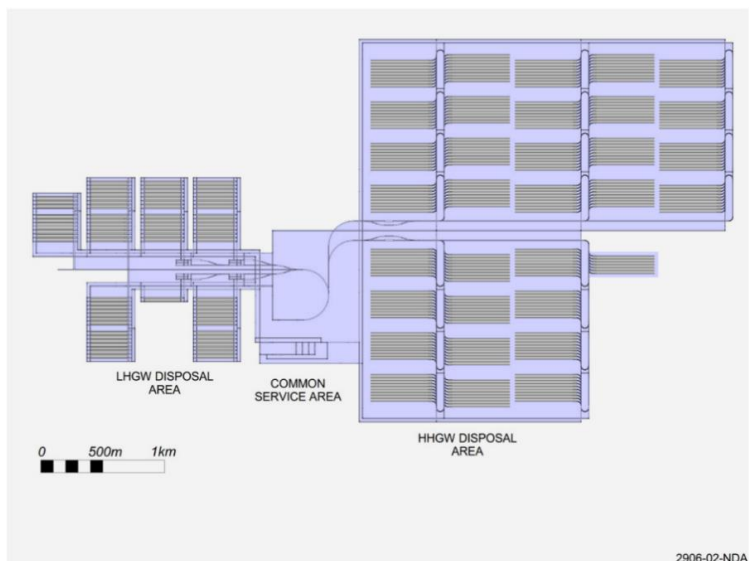
Obr. 65: Předpokládaný koncept technického řešení hlubinného úložiště v různých typech horninového masivu. (Zdroj: Faybishenko et al. 2017).

Tomu bude odpovídat i předpokládaná hloubka ukládacího horizontu – v rozmezí 500-650 m.

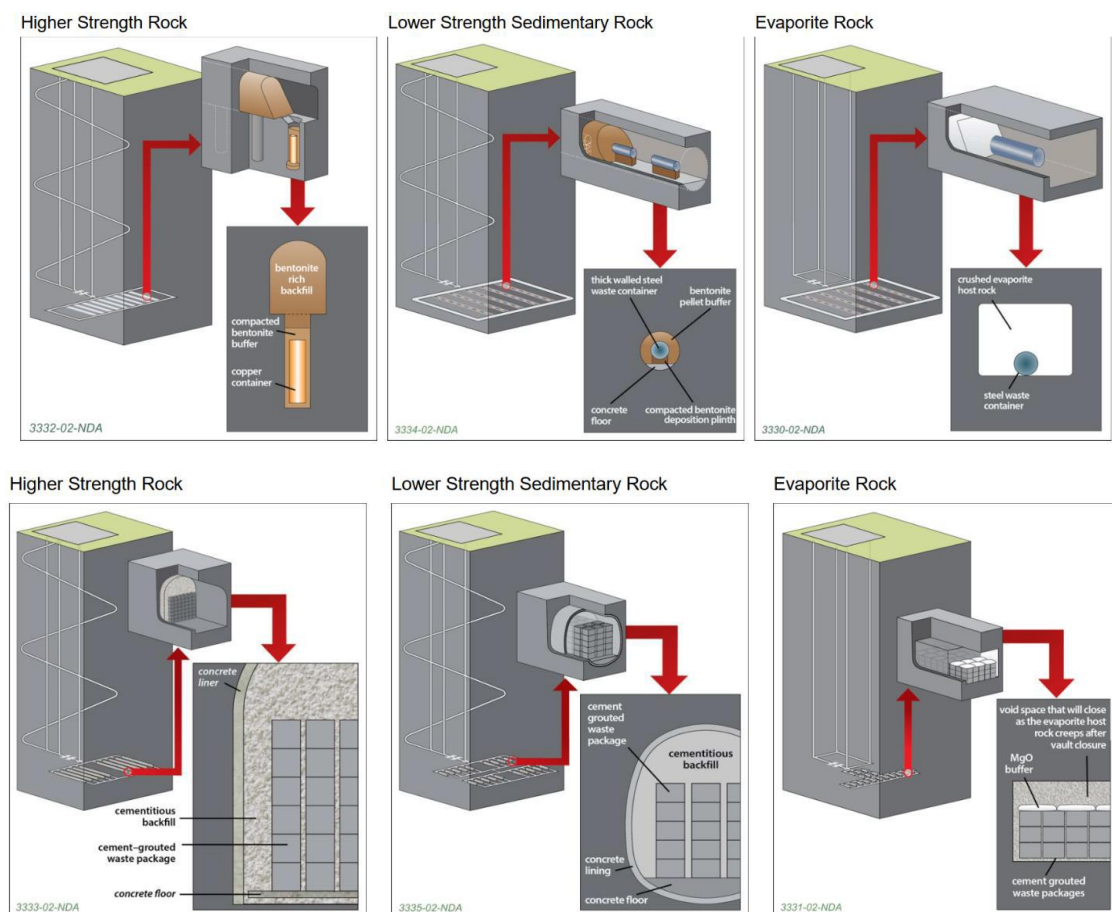
Odpady typu HHGW a LHGW budou uloženy na stejném horizontu, jednotlivé sekce budou od sebe vzdáleny cca 500 m (Kumpulainen et al. 2022).

Úložiště bude vybudováno pomocí různých technik, metodou drill and blast, TBM (tunnel-boring machine), kontinuální mechanickou ražbou dle vybrané hostitelské horniny.





Obr. 66: Dispozice ukládacího horizontu v krystalinických horninách (nahore), a sedimentárních horninách (uprostřed), v evaporitech (dole). (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022).



Obr. 67: Koncept ukládání odpadů typu HHGW (nahore) a LHGW (dole). (Zdroj: Kumpulainen et al. 2022)

Pro zaplnění ukládacích prostor s odpady a následně i přístupových chodeb úložiště jsou navrženy různé způsoby pro jednotlivé koncepty.

Tab. 2: Způsob uzavírání ukládacích a přístupových prostor. (Zdroj: RWM2016a, Kumpulainen et al. 2022)

	Krystalinické horniny	Sedimentární horniny	Evapority
Výplňový materiál v sekci HHGW	Bentonit - bloky a pelety	Bentonit - pelety	Drcená hornina
Výplňový materiál v sekci LHGW	NRVB (Nirex reference vault backfill, tj. Portlandský cement s jemným kamenivem obsahujícím drcené vápencové plnivo a hydratované vápno (CaOH).	Cementová zálivka	Bez výplně, pouze s dodáním absorbéru vlhkosti (MgO)
Zátky	Zhutněný bentonit s betonovými konstrukčními prvky	Zhutněný bentonit s betonovými konstrukčními prvky	Betonová stěna
Výplň přístupových chodeb na ukládací horizont	Drcená hornina	Bentonit a písek (30:70)	Drcená hornina

Pro odpad typu LHGW je navrženo několik druhů obalových souborů, podle charakteru uloženého odpadu (RWM 2020).

Tab. 3: Obalové soubory pro LHGW (Zdroj: RWM2020)

Nestíněné obalové soubory	Stíněné obalové soubory	Robustní stíněné obalové soubory
500 l sud (kovový)	4 m kontejner (kovový s betonovým stíněním do 300 mm)	500 l robustní stíněný sud (tlustostěnná litina, tloušťka stěny cca 160 mm)
3 m ³ sud (kovový, tloušťka stěny cca 3 mm)	2 m kontejner (kovový s betonovým stíněním do 200 mm)	3 m ³ robustní stíněný kontejner (tlustostěnná litina, tloušťka stěny cca 160 mm)
3 m ³ kontejner (boční manipulační úchyty)	3 m ³ betonový kontejner (železobeton, cca 240 mm tloušťka)	

Nestíněné obalové soubory	Stíněné obalové soubory	Robustní stíněné obalové soubory
3 m ³ kontejner (rohové manipulační úchyty)	500 l betonový sud (železobeton, cca 150 mm tloušťka)	
Kontejner na různorodý beta gama odpad	1 m ³ betonový sud (železobeton, cca 150 mm tloušťka)	



Obr. 68: Nestíněné obalové soubory (Zdroj: RWM2020)



Obr. 69: Stíněné obalové soubory (Zdroj: RWM2020)



Obr. 70: Robustní stíněné obalové soubory (Zdroj: RWM2020)

4 Závěr

Nejen Česká republika, ale i další země plánují vybudovat společné úložiště pro vysokoaktivní odpad a odpad obsahující dlouhodobé radionuklidy do společného úložiště s vyhořelým jaderným palivem.

Vysokoaktivní odpady, které generují teplo, což jsou vitrifikované odpady z přepracování VJP jsou ukládány v sekci vyhořelého jaderného paliva, neboť obsažené radionuklidy jsou obdobné inventáři v sekci VJP. Materiál inženýrských bariér, tedy obalové soubory a tlumící bariéra jsou pak obdobné – kovové kontejnery a bentonit jako buffer.

V sekci ostatních RAO s dlouhodobými radionuklidy jsou výplňové materiály založeny převážně na bázi cementu, rovněž se využívá bentonit, drcená hornina nebo směs těchto materiálů. RAO jsou ukládány v betonových kontejnerech, betonkontejnerech, obalových souborech z oceli nebo z litiny.

I když se všechny typy odpadů ukládají na jeden horizont, vždy jsou sekce oddělené. Je to i proto, že se používá rozdílný materiál obalových souborů a výplňových materiálů. Dostatečná vzdálenost má být zárukou vzájemného minimálního ovlivnění obou sekcí. Některé země, např. Finsko, volí ze stejného důvodu jinou úroveň ukládacího horizontu.

Reference

- ANDRA (2020A): Essentials, a condensed version of the National Inventory of Radioactive Materials and Waste. France.
- ANDRA (2020b): The Cigeo Project. France's Industrial Centre for Geological Disposal of Radioactive Waste. France.
- BAKSAY A. (2015): Low and Intermediate Level waste Disposal in Hungary. International Workshop on the Safe Disposal of Low Level Radioactive Waste ASN Headquarters, Montrouge, France, 3-5. February 2015.
- DOE (2007): CH Packaging Operatios Manual, DOE/WIPP-02-3184, Revision 5, U.S. Department of Energy, 2007.
- ESPIVENT C., MOUTARDE M., TICHAUER M. (2016): I&HLW transportation and handling in a deep geological disposal. Paper No. 4017, Proceedings of the 18th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials PATRAM 2016, Japan.
- FAYBISHENKO B., BIRKHOLZER J., SASSANI D. SWIFT P. (EDS.) (2017): International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review. United States: N. p., LBNL-1006984. Web. doi:10.2172/1353043.
- FINNISH ENERGY INDUSTRIES (2007): Nuclear Waste Management in Finland, Nuclear Waste, ISBN 978-952-5615-13-5 Helsinki.
- HEDDEN A. (2021): Waste Isolation Pilot Plant needs more space to dispose of nuclear waste, officials say. Carlsbad Current-Argus 27.01.2021.
- CHURAKOV S.V., HUMMEL W., FERNANDES M. (2020): Fundamental research on radiochemistry of geological nuclear waste disposal. *Chimia* 74, 1000–1009
- KINGDOM OF BELGIUM (2015): National Programme for the Management of Spent Fuel and Radioactive Waste. Document drafted by the National Programme Committee pursuant to the Law of 3 June 2014 transposing European Directive 2011/70/Euratom of 19 July 2011.
- KUMPULAINEN S., HAGROS A., HEINO V. (2022): State-of-the-Art Study of Foreign Concepts of Engineered Elements in DGR, SÚRAO Technical report n. TZ 575/2022.
- LAUNEAU F. (2016): CIGEO's core components. ANDRA presentation. ICGR, 2016.
- LAVEROV N.P., YUDINTSEV S.V., KOTCHKIN B.T., Malchovsky V.I. (2016): The Russian Strategy of using Crystalline Rock as a Repository for Nuclear Waste, Elements, Vol. 12, PP. 253–256.
- MOEE (2015): Management of spent fuel and radioactive waste in Finland – national programme in accordance with Article 12 of the Council Directive 2011/70/Euratom, Ministry of Employment and the Economy, Energy Department. Finland.
- MOLNÁR B, LÁZÁR I. (2018): National Report of Hungary. 6th Review Meeting of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Presentace.

- NDA (2019): 2019 UK Radioactive Waste Inventory. Report prepared for the Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS) and the Nuclear Decommissioning Authority (NDA) by Pöyry Energy Ltd and Wood Nuclear Ltd.
- NELSON R.A., WHITE D.S. (2009): New Payload Initiatives for Shipments to WIPP Will Expand DOE's Ability to Dispose of Transuranic Waste – 9063, WM2009 Conference, March 1-5, 2009, Phoenix, AZ.
- NUMO (2008): Geological Disposal of TRU Waste. Nuclear Waste Management Organization of Japan.
- NUMO (2021): The NUMO Pre-Siting DDM-based Safety Case. NUMO-TR-21-01. Nuclear Waste Management Organization of Japan.
- NWMO (2011): OPG's Deep Geologic Repository Project for Low & Intermediate Waste. Preliminary Safety Report 00216-SR-01320-00001 R000. Nuclear Waste Management Organization. Canada.
- ONDRAF/NIRAS (2013): Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the geological disposal of high-level and/or long-lived radioactive waste including irradiated fuel if considered as waste. State-of-the-art report as of December 2012. NIRON-TR 2013-12 E.
- OPG (2010): Reference L&ILW Inventory for the Deep Geologic Repository. 00216-REP-03902-00003-R003, Ontario Power Generation Inc. Canada.
- OPG (2011): OPG's Deep Geologic Repository Project for Low & Intermediate Waste. Environmental Impact Summary. Ontario Power Generation Inc. Canada
- POSPÍŠKOVÁ I. ET AL. (2009): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě – I. etapa – Analýza vstupních předpokladů řešení. ÚJV Řež a.s. – divize ENERGOPROJEKT PRAHA.
- POSPÍŠKOVÁ I. ET AL. (2011): Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě – Závěrečná zpráva. ÚJV Řež a.s. – divize ENERGOPROJEKT PRAHA.
- PURAM (2016): With responsibility, Safety And Guarantees. Edited by Gabriella Honti. Printed by Páskum Press Ltd., Szekszárd
- ROSATOM (2017): The fifth National Report of the Russian Federation has been drafted in accordance with Article 32 of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management. State Atomic Energy Corporation Rosatom and the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service. Moscow.
- RWM (2016a): Geological disposal: Generic disposal facility designs, RWM Report DSSC/412/01, Radioactive Waste Management
- RWM (2016b): Geological disposal: Generic environmental safety case – Main report, RWM Report DSSC/203/01, Radioactive Waste Management
- RWM (2016c): Geological disposal: Design status report, NDA/RWM/141, Radioactive Waste Management

RWM (2020): Waste Package Specification and Guidance Documentation: Specification for Waste Packages Containing Low Heat Generating Waste: Part D – Container Specific Requirements. WPS/300/04.

SKB (2019): Post-closure safety for a proposed repository concept for SFL. Zpráva TR-19-01. Aktualizace 02/2020. ISSN 1404–0344.

ÚJD (2021): Správa Slovenskej republiky spracovaná v zmysle smernice Rady 2011/70/Euratom. Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky v spolupráci s Úradom verejného zdravotníctva Slovenskej republiky, Ministerstvom dopravy a výstavby Slovenskej republiky, Ministerstvom hospodárstva Slovenskej republiky, Ministerstvom vnútra Slovenskej republiky, Ministerstvom životného prostredia Slovenskej republiky, Národným jadrovým fondom a spoločnosťou JAVYS, a. s.

VERHOEF E.V., NEEFT E.A.C, DEISSMANN G., FILBY A., WIEGERS R.B, KERS D.A (2016): Waste families in OPERA. OPERA-PG-COV023. COVRA N.V.

VERHOEF E.V., NEEFT E.A.C, CAHPMAN N, MCCOMBIE CH. (2017): Opera Safety Case. COVRA.

VOJTĚCHOVÁ H. (2019): Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích – MS SURAO TZ 410/2019, Praha.

WARNECKE E. (2009): German boundary conditions affecting decommissioning technology. R²D²P Workshop on “Decommissioning Technologies” Forschungszentrum Karlsruhe. Germany 06-10 July 09.

WEALER B. (2018): Nuclear Waste in Germany. 23RD REFORM Group Meeting. October 14, 2018, Salzburg.

WEBER H. (2014): National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste Switzerland. Prezentace. NAGRA, 2014.

Zákony:

REGDOC-2.11.1, Waste Management, Volume I: Management of Radioactive Waste, sets out requirements and guidance for managing radioactive waste, Regulatory document. Canada.

www stránky:

GNS, Packaging. [cit.19.4.2022]. Dostupné z:
<https://www.gns.de/language=en/23373/packaging>

IAEA Country profile. [cit. 14.4.2022]. Dostupné z: <https://cnpp.iaea.org/pages/index.htm>

Japan Nuclear Fuel Limited, Low-Level Radioactive Waste Disposal. [cit. 14.4.2022]. Dostupné z: <https://www.jnfl.co.jp/en/business/llw/>

JAVYS, Výroba vlákonobetónových kontajnerov. [cit. 22.4.2022]. Dostupné z:
<https://www.javys.sk/sk/obchodne-informacie/ponuka-sluzieb/vyroba-vlaknobetonovych-kontajnerov>

NAGRA, obalový soubor pro RAO. [cit. 11.4.2022]. Dostupné z:

<https://www.nagra.ch/en/volumes-of-radioactive-waste>

Repository Konrad. [cit. 19.4.2022]. Dostupné z: <https://www.bge.de/de/konrad/>

US NRC. Radioactive waste. [cit. 19.4.2022]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/waste.html>

WIPP. [cit. 19.4.2022]. Dostupné z: <https://wipp.energy.gov/wipp-site.asp>

WIPP SWB [cit. 7. 6. 2022]. Dostupné z:

[https://www.wipp.energy.gov/library/cpp/cpp/standard%20waste%20box%20\(swb\).htm](https://www.wipp.energy.gov/library/cpp/cpp/standard%20waste%20box%20(swb).htm)

WIPP TDOP [cit. 7. 6. 2022]. Dostupné z: [https://www.wipp.energy.gov/library/cpp/cpp/ten-drum%20overpack%20\(tdop\).htm](https://www.wipp.energy.gov/library/cpp/cpp/ten-drum%20overpack%20(tdop).htm)



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

www.surao.cz