

Technická zpráva číslo 410/2019

POROVNÁNÍ PROJEKTŮ HÚ VE VYBRANÝCH VYSPĚLÝCH ZEMÍCH

Autor: Hana Vojtěchová

ÚJV Řež, a.s.

Praha, listopad 2019

Název projektu: Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích

Název zprávy: *Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích*

Evidenční číslo objednatele: SÚRAO TZ 410/2019

Evidenční číslo poskytovatele: 19SMP250_Porovnani projektu HU

ŘEŠITELÉ:

ÚJV Řež, a.s.

Autor: Hana Vojtěchová

Obsah

1	Úvod	13
1.1	Zadání a účel	13
2	Projekt hlubinného úložiště v České republice (Stručné shrnutí)	15
2.1	Použitá dokumentace	16
3	Projekt hlubinného úložiště ve Finsku	17
3.1	Základní charakteristika úložiště	17
3.1.1	Výběr lokality	17
3.1.2	Ochranné bariéry	18
3.1.3	Způsob ukládání	18
3.1.4	Ukládací obalový soubor	19
3.1.5	Bentonitová bariéra	20
3.1.6	Skalní podloží	21
3.1.7	Zaplnění a uzavření úložiště	21
3.2	Zařízení pro přebalení vyhořelého jaderného paliva do ukládacích obalových souborů 22	
3.3	Podzemní součásti úložiště	24
3.4	Odhad nákladů	26
3.5	Použitá dokumentace	26
4	Projekt hlubinného úložiště ve Francii	27
4.1.1	Výběr lokality	27
4.2	Základní charakteristika úložiště	28
4.2.1	Geologické vlastnosti vybrané oblasti	30
4.2.2	Podzemní část úložiště	30
4.2.3	Spojovací infrastruktura	32
4.2.4	Povrchová zařízení	32
4.3	Provoz úložiště	33
4.3.1	Transport a příjem odpadů	33
4.3.2	Uložení odpadů	34
4.3.3	Uzavírání úložiště	36
4.4	Odhad nákladů	37
4.5	Použitá dokumentace	37
5	Projekt hlubinného úložiště ve Švédsku	38
5.1.1	Výběr lokality	38
5.2	Základní charakteristika úložiště	39

5.2.1	Ochranné bariéry	40
5.2.2	Způsob ukládání.....	41
5.2.3	Ukládací obalový soubor	42
5.2.4	Bentonitová bariéra	44
5.2.5	Skalnaté podloží.....	44
5.2.6	Zaplnění a uzavření úložiště.....	45
5.3	Podzemní součásti úložiště	46
5.3.1	Přístupové cesty.....	46
5.3.2	Ukládací tunely.....	47
5.3.3	Centrální servisní oblast.....	48
5.3.4	Přístupová rampa.....	48
5.3.5	Šachty	49
5.4	Odhad nákladů.....	49
5.5	Použitá dokumentace.....	49
6	Projekt hlubinného úložiště ve Švýcarsku	51
6.1	Základní charakteristika úložiště	51
6.1.1	Výběr lokality.....	53
6.1.2	Ukládací tunely.....	54
6.1.3	System bezpečnostních bariér	55
6.1.4	Ukládání odpadu	55
6.1.5	Uzavření úložiště.....	57
6.2	Povrchová zařízení	57
6.3	Geologická oblast.....	58
6.4	Odhad nákladů.....	59
6.5	Použitá dokumentace.....	60
7	Projekt hlubinného úložiště na Slovensku	61
7.1	Základní charakteristika úložiště	61
7.1.1	Návrh základního konceptu řešení	61
7.1.2	Výběr lokality.....	62
7.1.3	Ukládací obalový soubor (UOS)	63
7.1.4	Ukládání obalových souborů	64
7.1.5	Utěsnění obalového souboru.....	66
7.1.6	Uzavírání úložiště.....	66
7.2	Povrchová zařízení	67
7.3	Varianty řešení HÚ v krystalických a jílových horninách	68

7.4	Odhad nákladů.....	70
7.5	Použitá dokumentace.....	70
8	Projekt hlubinného úložiště v Maďarsku	71
8.1	Základní charakteristika úložiště	71
8.1.1	Výběr lokality.....	72
8.1.2	Koncept ukládání a předběžné posouzení bezpečnosti.....	73
8.1.3	Předpokládané množství a způsob ukládání odpadu	75
8.1.4	Základní části plánovaného HÚ.....	76
8.1.5	System bezpečnostních bariér	77
8.2	Geologická oblast.....	77
8.3	Odhad nákladů.....	79
8.4	Použitá dokumentace.....	80
9	Projekt hlubinného úložiště v Kanadě	82
9.1	Základní charakteristika úložiště	82
9.1.1	Výběr lokality.....	84
9.2	Povrchová zařízení	85
9.2.1	Kontejner na vyhořelé jaderné palivo a závod na výrobu ukládacích kontejnerů 88	
9.2.2	Závod pro přemísťování vyhořelého jaderného paliva do ukládacích kontejnerů 89	
9.2.3	Závod na produkci těsnících a ukládacích materiálů	91
9.2.4	Šachty a výtahy.....	91
9.3	Podzemní prostory	92
9.4	Odhad nákladů.....	94
9.5	Použitá dokumentace.....	95
10	Porovnání projektů – souhrn	96
10.1	Technická charakteristika projektů	96
10.2	Finanční charakteristika projektů.....	98
11	ZÁVĚR.....	101

Seznam obrázků:

Obr. 1:	Umístění hlubinného úložiště ONKALO v lokalitě Olkiluoto.....	18
Obr. 2	Koncept úložiště: vpravo vertikální forma ukládání, vlevo horizontální forma ukládání	19
Obr. 3	Ukládací obalové soubory pro vyhořelé jaderné palivo: JE Loviisa 1 & 2 (vlevo), JE Olkiluoto 1 & 2 (uprostřed) a JE Olkiluoto 3 (vpravo).	20

Obr. 4 Měděný plášť a vnitřní litinová vložka ukládacího obalového souboru	20
Obr. 5 Uzavírání ukládacích prostorů:	22
Obr. 6 Ukládací tunely vyplňované bloky z jílu a bentonitovými granulemi.....	22
Obr. 7 Přesun palivového souboru do vysoušecí jednotky.....	23
Obr. 8 Osazení víka kontejneru	23
Obr. 10 Kontrola sváru pomocí RTG skeneru a ultrazvuku	23
Obr. 9 Přivaření víka kontejneru elektronovým paprskem.....	23
Obr. 11 Podélný řez zařízením pro umístění a uzavření paliva do ukládacích kontejnerů:....	24
Obr. 12 Přenos ukládacího souboru výtahem do hloubky, v níž bude konečné uložení a dále jeho umístění na vozidlo	25
Obr. 13 Instalace (zavedení) bentonitových bloků	25
Obr. 14 Vrtání ukládací jímky v ukládacím tunelu	25
Obr. 15 Umístění ukládacího souboru do ukládací jímky	25
Obr. 16 Vitřifikovaný odpad v ocelové obálce.	27
Obr. 17 Mapa zájmové oblasti o velikosti 30 km ² pro hlubinné ukládání [5]	28
Obr. 18 Uspořádání úložiště	29
Obr. 19 Ukládání vysoce aktivních odpadů.....	31
Obr. 20 Ukládání středně aktivních odpadů.....	31
Obr. 21 Uspořádání zón a modulů v úložišti.	32
Obr. 22 Transportní cesty s odpady do úložiště.....	34
Obr. 23 Různé ukládací soubory dle typu odpadu: typ B pro středně aktivní odpad (nahore), typ C pro vitřifikovaný vysoce aktivní odpad (uprostřed) a CU pro vyhořelé palivové soubory (dole).....	35
Obr. 24 Stínící transportní kontejner.....	36
Obr. 25 Konstrukční a provozní fáze v úložišti v zóně C.	36
Obr. 26 Oblast vybraná pro konečné úložiště vyhořelého jaderného paliva ve Švédsku (červeně je znázorněna kandidátní oblast a zeleně prioritní část této oblasti).....	38
Obr. 27 Uspořádání referenčního návrhu úložiště KBS-3.	39
Obr. 28 Provozní (nadzemní) oblast úložiště.	40
Obr. 29 Systém bariér u projektu úložiště SKB-3.....	41
Obr. 30 Referenční model ukládání vyhořelého jaderného paliva v projektu KBS-3.	41
Obr. 31 Postup ukládání kontejnerů s vyhořelým jaderným palivem do úložiště SKB.	42
Obr. 32 Ukládací soubor na vyhořelé jaderné palivo.	43
Obr. 33 Geologické charakteristiky oblasti budoucího úložiště.	45
Obr. 34 Ukázka uzavření (zásyp a uzávěry) úložiště v jeho jednotlivých částech.	46
Obr. 35 Geometrie ukládací šachty (černá tenká čára) a přijatelné odchylky v geometrii (červená tečkovaná čára).	47

Obr. 36 Rozmístění ukládacích šachet v ukládacím tunelu.....	48
Obr. 37 Celkový pohled a základní uspořádání úložiště: Hlavní zařízení pro ukládání SF/HLW. 2. Úložiště ILW. 3. Pilotní zařízení. 4. Testovací zóna. 5. Přístupový tunel. 6. Ventilací a konstrukční šachta.	51
Obr. 38 Detail podzemní části úložiště.	52
Obr. 39 Přehled součástí úložiště pro vyhořelé jaderné palivo/HLW a ILW.....	52
Obr. 40 Druhá fáze výběru lokalit pro dvě úložiště (jedno pro nízko a středně aktivní odpady (LLW / ILW), druhé pro vysokoaktivní odpady (HLW)) – 6 lokalit.[5]	53
Obr. 41 Třetí fáze výběru lokalit pro dvě úložiště (jedno pro nízko a středně velké odpady (LLW / ILW), druhé pro vysokoaktivní odpady (HLW)) – 3 lokality vybrané pro další průzkumné práce [5].....	54
Obr. 42 Detail řezu ukládacího tunelu.....	54
Obr. 43 Bezpečnostní bariéry v úložišti vysoce aktivního odpadu: 1.Vitřifikovaná matrice, obsahující radioaktivní materiál; 2. Kovový kontejner; 3. Zásyp s bentonitem; 4. Hostitelská hornina.	55
Obr. 44 Ukládání souborů s odpadem.	56
Obr. 45 Ukládací vozík s odpadem v ukládací pozici (vlevo). Nákladní vůz umísťující bentonitový granulát v ukládacím tunelu, poté co byl odpad umístěn.	57
Obr. 46 Vlevo: situace po ukončení ukládání odpadu a uzavření všech ukládacích tunelů; vpravo: situace poté, co je hlavní ukládací zařízení uzavřeno a zaplombováno a pouze pilotní a testovací zařízení jsou přístupná v průběhu delšího monitorovacího období.	57
Obr. 47 Koncept povrchových zařízení pro úložiště vysoce radioaktivního odpadu:	58
Obr. 48 Geologický profil oblasti Zürcher Weinland.	59
Obr. 49 Zjednodušená tektonická mapa Slovenské republiky s vyznačením zájmových, studijních a průzkumných lokalit pro hlubinné úložiště VJP a RAO.....	62
Obr. 50 Schéma ukládání superkontejneru (SC) v úložném vrtu (schéma přebráno z ARP 2011 CZ [5])	65
Obr. 51 Schéma uložení superkontejnerů a distančních bloků v zavážecích vrtech (schéma přebráno z ARP 2011 CZ [5])	65
Obr. 52 Komora na ukládání ostatních RAO a hlavní chodba. (schéma přebráno z ARP 2011 CZ [5])	65
Obr. 53 Vztahy mezi jednotlivými moduly hlubinného úložiště [2]	68
Obr. 54 Geologická mapa s hloubkovými obrysy vrcholu pískovcové formace BCF na jihozápadním úpatí pohoří Mecsek. [6]	73
Obr. 55 Axonometrické schéma referenčního hlubinného úložiště [1].....	74
Obr. 56 Axonometrické schéma vertikálních ukládacích vrtů [1]	74
Obr. 57 Geologická mapa a řezy antiklinou západní Mecsek, včetně povrchového výchozu BCF [1]	78
Obr. 58 Návrh řešení hlubinného úložiště pro ukládání vyhořelého paliva v Kanadě.	84
Obr. 59 Koncepční rozložení povrchových zařízení hlubinného úložiště.....	86

Obr. 60 Schéma ukládacího kontejneru.....	89
Obr. 61 Závod pro přemístování vyhořelého jaderného paliva do ukládacích kontejnerů.	90
Obr. 62 Stanice sloužící k uzavírání kontejnerů, jejich plnění inertním plynem, svařování, obrábění a nedestruktivnímu testování.....	91
Obr. 63 Ukázka návrhu ukládacího tunelu s jímkami pro ukládání kontejnerů s vyhořelým jaderným palivem.	93
Obr. 64 Rozvržení hlubinného úložiště.....	94

Seznam tabulek:


Tab. 1 Předpokládané náklady na výstavbu a provoz úložiště ve Finsku v mil. EUR [3].	26
Tab. 2 Předpokládané náklady na výstavbu a provoz úložiště ve Švédsku v mil. SEK [6]	49
Tab. 3 Náklady na jednotlivé implementační fáze úložiště HLW/ILW.....	59
Tab. 4 Náklady na jednotlivé implementační fáze závodu na přebalení HLW anebo vyhořelého jaderného paliva do ukládacích obalových souborů.....	60
Tab. 5 Náklady na vývoj a realizaci HÚ [1]	70
Tab. 6 Harmonogram vývoje hlubinného ukládání VAO a VJP v Maďarsku [5].....	72
Tab. 7 Množství vyhořelého jaderného paliva v Maďarsku	75
Tab. 8 Předpokládané náklady na HÚ v Maďarsku (v cenách roku 2005) [5].....	80
Tab. 9 Předpokládané náklady na likvidaci vysokoaktivních odpadů v cenové relaci roku 2015 [7].....	80
Tab. 10 Budovy a komplexy nalézající se v ochranném pásmu.....	86
Tab. 11 Budovy a komplexy nalézající se v ostatních pásmech	88
Tab. 12 Předpokládané náklady v mil. CAD na hlubinné úložiště v Kanadě dle jeho jednotlivých implementačních fází [3].....	94
Tab. 13 Základní technické parametry projektů HÚ	97
Tab. 14 Finanční charakteristika projektů HÚ v cenové hladině 2014.....	99

Seznam textových příloh:

PŘÍLOHA 1 - Očekávaný politický vývoj v oblasti hlubinného ukládání v zemích EU

Seznam použitých zkratk:

ANDRA	Francouzská agentura pro správu jaderného odpadu
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (Federální společnost pro likvidaci radioaktivních odpadů)
DBE	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (německá společnost pro výstavbu a provoz úložišť odpadů)
BRIUG	Beijing Research Institute of Uranium Geology (Pekingský výzkumný ústav zabývající se geologií uranu, likvidací jaderného odpadu a technologiemi dálkového průzkumu)
EDZ	Excavation Disturbing Zone (zóna narušená hornickou činností)
EIA	Environmental impact assessment (posuzování vlivu na životní prostředí)
EMO	Elektrárna Mochovce
GRS	Gesellschaft für Anlagen – und Reaktorsicherheit (nezisková výzkumná organizace)
HÚ	Hlubinné úložiště
HWGRS	Heavy Water Cooled, Graphite Moderated Reactor (těžkou vodou chlazený a moderovaný reaktor)
IAEA	Mezinárodní agentúra pre atómovú energiu - MAAE (International Atomic Energy Agency)
IK HÚ	Informační komise pro dialog o hlubinném úložišti
IRAO	Institucionální radioaktivní odpady
JAVYS, a.s.	Jadrová a vyraďovacia spoločnosť, a. s. (akciová spoločnosť zodpovedná za provozování jaderné elektrárny V1, vyřazování jaderně energetických zařízení, zacházení s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem)
JE A1	Jaderná elektrárna A1 (jeden reaktor) v Jaslovských Bohunicích
JE V1	Jaderná elektrárna V1 (dva reaktory) v Jaslovských Bohunicích
JZ	Jaderné zařízení
KM	Knowledge Management (správa informací, nakládání s informacemi)
KORAD	Korea Radioactive Waste Agency (Jihokorejský vládní úřad pro bezpečné nakládání s radioaktivními odpady)
MDVRR SR	Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálního rozvoja Slovenskej Republiky
MH SR	Ministerstvo hospodárstva Slovenskej republiky
MSVP	Mezisklad vyhořelého paliva v Jaslovských Bohunicích
MZ SR	Ministerstvo zdravotníctva Slovenskej republiky
MŽP SR	Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky
NAGRA	Švýcarská národní agentura pro ukládání radioaktivního odpadu
NEA OECD	Agentúra pre atómovú energiu (Nuclear Energy Agency (NEA) within the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD))
NJF	Národní jadrový fond
POSIVA OY	Odborná organizace zodpovědná za konečnou likvidaci vyhořelého jaderného paliva ve Finsku
PURAM	Maďarská společnost s r.o pro nakládání s radioaktivními odpady
PVP Bukov	Podzemní výzkumné pracoviště Bukov
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (Švédská společnost pro jaderné palivo a nakládání s odpady)
SOGIN	Italská státní společnost pro decomissioning a management radioaktivních odpadů
STUBA	Slovenská technická univerzita v Bratislavě
RAO	Radioaktivní odpady
RP VaV	Rámcový program vývoje a výzkumu
RÚ RAO	Republikové úložiště radioaktivních odpadů
ÚJD SR	Úrad jadrového dozoru Slovenskej republiky
UMB	Univerzita Mateja Bela v Banskej Bystrici
URC Josef	Regionální podzemní výzkumné centrum Josef
ÚVRH	Útvar vedúceho hygienika resortu
ÚVSK SAV	Ústav výskumu sociálnej komunikácie Slovenskej akadémie vied
ÚVZ SR	Úrad verejného zdravotníctva Slovenskej republiky
VAO	Vysokoaktivní odpady

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

VJP	Vyhořelé jaderné palivo
VUJE	Inženýrská, projektová a výzkumná organizace
WWER	Water-Water Power Reactor (vodo-vodní energetický reaktor)
ZRAM	Zdravotnický radioaktivní materiál

Abstrakt

Studie je vypracována na základě objednávky Správy úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO). Shrnuje a porovnává základní technické vlastnosti a finanční náklady řešení hlubinného ukládání vyhořelého jaderného paliva v několika vybraných vyspělých zemích, které mají koncept (projekt) hlubinného úložiště nejvíce rozpracovaný, s důrazem na ty země, jejichž jaderný program a podmínky jsou blízké podmínkám České republiky.

Technické vlastnosti a finanční náklady srovnávaných zemí jsou dále porovnány s předpokládaným projektem hlubinného úložiště v ČR (Kapitola 10). Studie je doplněna o přílohu charakterizující předpokládaný vývoj problematiky v Evropské unii.

Klíčová slova

úložiště, siting, výběr lokality, radioaktivní odpady, vyhořelé jaderné palivo,

Abstract

The study is elaborated on the basis of an order issued by the Radioactive Waste Repository Authority (SÚRAO). There is summarised and compared basic technical qualities and financial costs of the projects of deep geological disposals in some representative countries, having a concept (project) of the deep geological disposal well-developed. There are accentuated the countries with a nuclear program and national conditions like the conditions of the Czech Republic.

The technical qualities and financial costs in the compared countries are compared with the hypothetical project of the deep geological disposal in the Czech Republic (Chapter 10). In the end of the Study is inserted an annex with characterisation of the expected development in the EU countries.

Keywords

repositories, radioactive waste, spent nuclear fuel, site selection,

1 Úvod

Příprava hlubinného úložiště si žádá využít všech nejlepších zkušeností a znalostí, které jsou ve světě k dispozici,

V doporučení pracovní skupiny NAPRO (National Programmes), ustanovené Evropským jaderným fórem (ENEF) pro přípravu vnitrostátních programů jednotlivých členských zemí EU17, se uvádí následující tři možné způsoby plnění výzkumných a vývojových úkolů:

- vlastním výzkumem na národní úrovni potřebným pro implementaci projektů;
- společnými výzkumnými aktivitami na bilaterální či mezinárodní úrovni; využíváním společných zdrojů a poznatků, zejména evropských rámcových programů výzkumu a vývoje;
- na základě kontraktu se zeměmi s pokročilejším výzkumným programem.

Všechny tyto možnosti by měly být, a také jsou, zvažovány též při návrhu výzkumných a vývojových prací a při řešení koncepčních cílů týkajících se hlubinného ukládání RAO a VJP v České republice.

Jedním z prostředků mezinárodní spolupráce je též uzavírání bilaterálních dohod mezi Českou republikou reprezentovanou Správou úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) a obdobnými organizacemi zodpovědnými za bezpečné nakládání s radioaktivními odpady z různých evropských i mimoevropských zemí jako je např. Německo (BGE, DBE a GRS), Francie (ANDRA), Švýcarsko (NAGRA), Finsko (POSIVA OY), Švédsko (SKB), Itálie (SOGIN), Maďarsko (PURAM), Čína (BRIUG) či Jižní Korea (KORAD). Bilaterální spolupráce je zaměřena na navazování a udržování kontaktů ve výzkumu a realizaci ukládání radioaktivních odpadů s řadou evropských i mimoevropských zemí.

Mezi tyto bilaterální dohody též patří Memorandum o porozumění mezi SÚRAO a slovenskou společností pro vyřazování jaderných zařízení a nakládání s radioaktivními odpady JAVYS a.s., které bylo podepsáno v červnu 2018, jehož cílem je napomoci k užší spolupráci na poli ukládání radioaktivních odpadů mezi českými a slovenskými experty. Memorandum má též velký význam v rámci mezinárodní spolupráce zemí V4. Cílem tohoto procesu je spolupráce sdílením a výměnou informací, znalostí a zkušeností, účastí na společných projektech v oblasti bezpečnosti ukládání vyhořelého jaderného paliva i vzájemná podpora účastí v evropských projektech. Je to rovněž další krok k vytváření společné strategie v oblasti posílení bezpečnosti při nakládání s radioaktivními odpady a s vyhořelým jaderným palivem v přípravě budoucího hlubinného úložiště v jednotlivých zemích.

1.1 Zadání a účel

Zadání Studie vychází ze smlouvy na plnění veřejné zakázky malého rozsahu s názvem „Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích“ (Ev. číslo smlouvy objednatele: SO2019-064). Smyslem tohoto dokumentu je jeho srozumitelnost pro čtenáře bez specifických odborných znalostí pro potřeby argumentace základních technických vlastností hlubinného úložiště připravovaného v ČR, uplatněného postupu vývoje a předpokládaných finančních nákladů HÚ vůči třetím stranám (stakeholderům).

V technické zprávě jsou porovnány základní technické vlastnosti řešení a s ním spojené

finanční náklady hlubinného ukládání vyhořelého jaderného paliva (VJP) v několika vybraných vyspělých zemích, které mají koncept (projekt) hlubinného úložiště nejvíce rozpracovaný, s důrazem na evropské země a zejména ty, jejichž jaderný program a podmínky jsou blízké podmínkám České republiky anebo s nimiž Česká republika na tomto programu spolupracuje (minimální rozsah: Švédsko, Finsko, Švýcarsko, Slovensko, Francie, Kanada a Maďarsko). Technické vlastnosti a finanční náklady srovnávaných projektů budou porovnány s předpokládaným projektem HÚ v ČR. Zpráva rovněž zahrnuje stručnou charakteristiku vývoje trendů v Evropské unii.

Předkládaná zpráva se tedy věnuje rešerši veřejných zdrojů informací o projektech hlubinného úložiště ve světě a zpracování informací z těchto zdrojů. Jak již bylo zmíněno výše, pro účely porovnání bylo vybráno celkem sedm zahraničních projektů hlubinných úložišť, a to ze šesti evropských zemí, konkrétně pak z Finska, Francie, Švédska, Švýcarska, na Slovenska a Maďarsku, a také z Kanady. Na úvod je velmi stručně popsán rovněž projekt rozvíjený v České republice (kap. 2).

V následujícím textu jsou nejdříve pro každý projekt hlubinného úložiště podány základní informace popisující geologickou formaci, v níž se bude úložiště nacházet, ochranné bariéry úložiště (inženýrské i geologické), jeho technické řešení (ukládací kontejner, povrchová zařízení, způsob ukládání apod.) a odhad nákladů na jednotlivé implementační fáze úložiště (tj. umístění, výstavba, provoz, vyřazování z provozu a uzavření úložiště). Taktéž je na konci každé kapitoly, která se věnuje danému národnímu projektu hlubinného úložiště, uveden přehled dokumentace, z níž bylo čerpáno.

V další části studie jsou shrnuty formou tabulky hlavní technické aspekty, které sumárně charakterizují technické řešení úložiště. Na technické shrnutí navazuje analýza a hodnocení nákladů na celý projekt hlubinného úložiště.

V úvodní rešeršní části (kapitoly 3 až 9) jsou cenové údaje uvedeny tak, jak byly zjištěny v primárních podkladech. Teprve v kapitole věnované cenovému porovnání jsou primárně zjištěné údaje o nákladech přepočteny na cenovou hladinu roku 2014 případně též odborným odhadem dále rozčleněny do jednotné struktury. Klíčovým údajem tohoto porovnání nákladů je přepočet nákladů na jednotkovou cenu – tunu těžkého kovu.

2 Projekt hlubinného úložiště v České republice (Stručné shrnutí)

Projekt hlubinného úložiště v České republice je rozpracován v tzv. Referenčním projektu z roku 1999 pro hypotetickou lokalitu. Koncept úložiště vycházel ze švédského projektu. Projekt byl v letech 2009-2012 aktualizován, včetně modifikace řešení (změna z vertikálního na horizontální ukládání úložných obalových souborů s použitím tzv. superkontejneru, koncipování vnitřního pouzdra obalového souboru jako bariéry, řešení dopravy odpadů k uložení po úpadnici místo vertikální výtahové šachty). V současnosti je posuzováno 7 lokalit. Uvedení úložiště do provozu se předpokládá v roce 2065.

Úložiště bude umístěno v krystalinické hornině s ukládací hloubkou 500 metrů. Palivové články budou překládány do úložných obalových souborů, jejichž vnější plášť se předpokládá z nízkolegované uhlíkaté oceli a vnitřní pouzdro (koncipované rovněž jako bariéra) a vnitřní vestavby pouzdra z korozivzdorné austenitické oceli. Ukládací soubor je navržen dvojího typu – pro 7 článků VVER-440 a pro 3 články VVER 1000, resp. pro články z nových jaderných zdrojů. V současnosti probíhá vývoj ukládacího souboru.


Ukládacích souborů bude uloženo až 5 880 (včetně nových zdrojů), což představuje 9 910 t těžkého kovu k uložení. Kromě vyhořelého jaderného paliva se počítá s uložením dlouhodobých RAO v celkem cca 2 990 ks betonkontejnerů o hrubém objemu 4,9 m³.

Ukládací obalové soubory budou ukládány do horizontálních vrtů v tzv. superkontejneru, což je perforovaný koš (jako nosná konstrukce) s bentonitovými prefabrikáty o tloušťce stěny 70 cm obklopující vložený ocelový ukládací soubor. Betonkontejnery s ostatními RAO budou ukládány do velkoobjemových komor stohováním.

Z důvodu minimalizace velikosti nadzemního areálu se nově uvažuje umístění překládacího a přebalovacího pracoviště v kaverně pod úroveň terénu. Pro těžbu rubaniny, dopravu lidí a spouštění materiálu bude použito svislé jámy. Pro dopravu samotných ukládacích souborů a kontejnerů a také těžkých (dopravních) mechanismů bude sloužit úpadnice (svážná rampa). Doprava odpadů k uložení po úpadnici se předpokládá bezkolejová.

Výstavba a provoz budou probíhat v časových etapách. Nejprve bude vybudována podzemní laboratoř (v hloubce cca 250 m), následně proběhne výstavba hlubinného úložiště, nadzemního i podzemního areálu. V rámci výstavby bude vyražena a připravena pro příjem ukládacích souborů jedna sekce. V další etapě, po zahájení provozu HÚ, budou probíhat činnosti spojené s ukládáním vyhořelého paliva a RAO s postupným utěšňováním zaplněných úložných prostor. Ražba dalších ukládacích sekcí bude probíhat postupně, podle potřeby. V posledním časovém období provozu úložiště se budou provádět činnosti spojené s utěšňováním zaplněných úložných prostor, a přípravné činnosti k ukončení provozu úložiště.

Odhad nákladů je v aktualizaci projektu stanoven v cenové úrovni roku 2011. Investiční náklady tzv. srovnávací varianty s umístěním přebalovacího závodu v podzemní vychází na 29 108,5 mil. CZK (což je o cca 5 % levněji než s nadzemním závodem). Z toho cca 4 020 mil. CZK tvoří náklady na výzkum a vývoj včetně vybudování podzemní laboratoře. Provozní náklady se odvíjejí od předpokladů směnnosti a délky provozu v rozpětí 61 968,2 (3 směny, 67 let provozu) až 75 458,9 mil. CZK (2 směny, 90 let provozu). Provozní náklady v sobě zahrnují i náklady na uzavření úložiště po ukončení provozu. K uvedeným nákladům

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

se dále předpokládají náklady ve výši 450-500 mil. CZK na připojení areálu úložiště k existující průmyslové a dopravní infrastruktuře. Celkové náklady na výstavbu, provoz a uzavření úložiště tak budou v rozpětí 91 576,7 až 105 067,4 mil. CZK. Dle kurzu CZK/EUR v roce 2014 to činí 3 326 až 3 816 mil. EUR.

2.1 Použitá dokumentace

[1] <http://surao.cz/cze/Informacni-koutek/Dokumenty-ke-stazeni/Referencni-projekt>

3 Projekt hlubinného úložiště ve Finsku

Konečné úložiště vyhořelého jaderného paliva ve Finsku se bude nacházet v oblasti jaderné elektrárny Olkiluoto. Koncept úložiště je převzat ze Švédska, jedná se o KBS-3 multibariérový koncept úložiště vyhořelého jaderného paliva. Projektem konečného úložiště pro vysoceaktivní odpad (High Level Waste – HLW) se zabývá společnost Posiva Oy, která je zodpovědná za konečné uložení vyhořelého jaderného paliva.

Účelem úložiště je zajistit umístění vyhořelého jaderného paliva do ukládacích obalových souborů, jejich uzavření a trvalé uložení do skalního podloží. Úložiště se obecně bude skládat ze dvou částí:

- zařízení, které se nachází nad zemí a slouží k přijímání palivových souborů, jejich sušení a umístění do ukládacích obalových souborů,
- vlastního úložiště, které se bude nacházet hluboko uvnitř skalního podloží a jehož nejvýznamnější součástí jsou tunely, do nichž se trvale uloží ukládací obalové soubory s vyhořelým jaderným palivem.

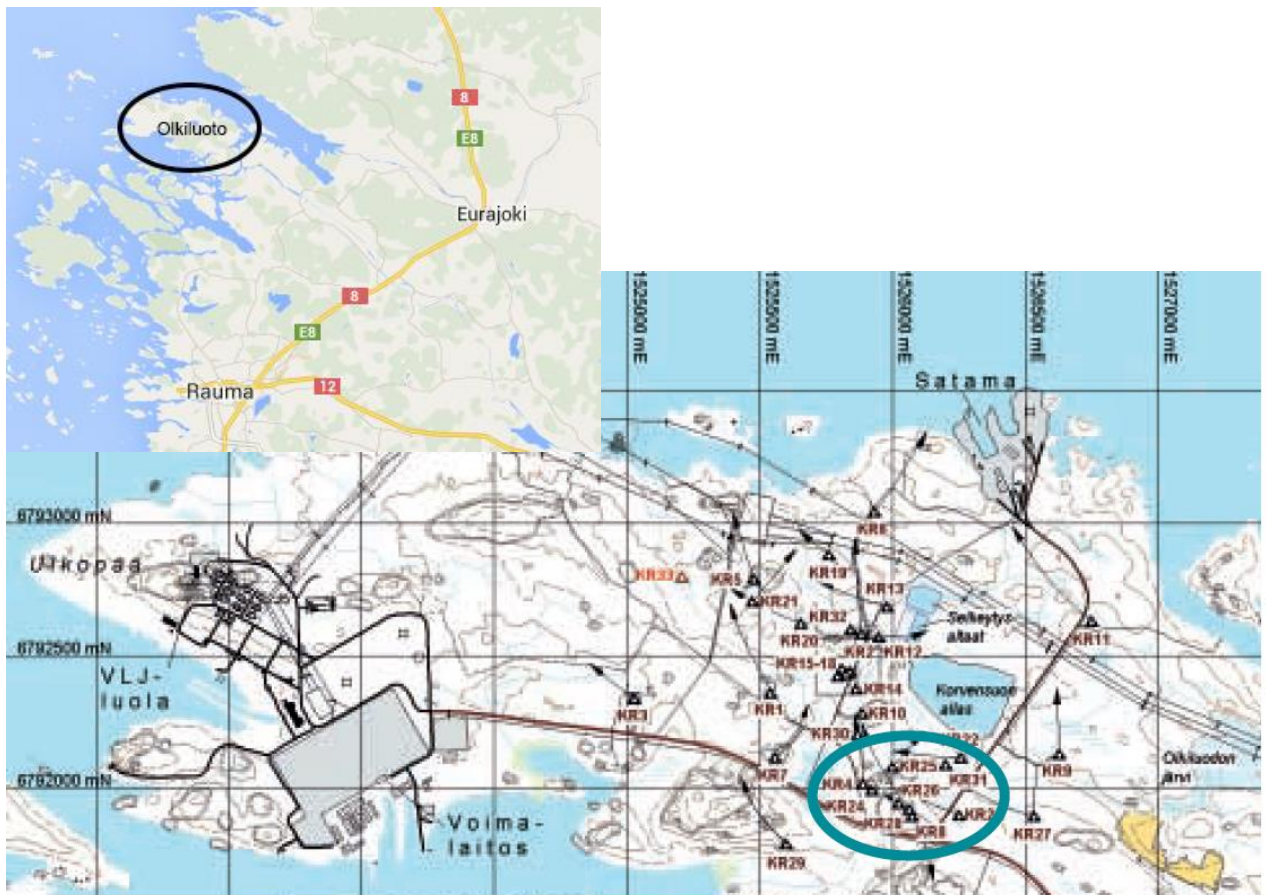
3.1 Základní charakteristika úložiště

Vyhořelé jaderné palivo bude uloženo v ukládacích obalových souborech vyrobených z mědi, které budou následně uloženy ve skalnatém podloží oblasti Olkiluoto v hloubce 400 až 450 m[1]. Základním principem konečného úložiště je použití multibariérového systému, jenž má zajistit, že nedojde k úniku radioaktivních látek do životního prostředí a jaderný odpad nebude přístupný lidské populaci.

Společnost Posiva vypracovala plán konečného úložiště na základě švédského konceptu KBS-3, který byl vyvinut společností SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co), jenž je ve Švédsku zodpovědná za nakládání s jaderným odpadem. Toto řešení je založeno na multibariérovém principu, kde jsou radioaktivní látky zadržovány uvnitř několika vzájemně se překrývajících ochranných bariér tak, že selhání jedné bariéry nebo předpokládaná geologická či jiná změna neohrozí izolaci odpadů.

3.1.1 Výběr lokality

V roce 1999 Posiva předložila vládě žádost o vládní rozhodnutí ohledně umístění hlubinného úložiště. V žádosti byla navržena lokality Olkiluoto v Eurajoki. Před vydáním rozhodnutí vláda požádala o vyjádření obec Eurajoki (která měla v této otázce právo veta) a Úřad radiální a jaderné bezpečnosti. Městská rada Eurajoki schválila Olkiluoto jako místo pro úložiště 20 hlasy proti 7. Po obdržení těchto prohlášení vláda neviděla žádnou překážku pozitivnímu zásadnímu rozhodnutí, které bylo učiněno v prosinci 2000. Návrh byl dále projednán parlamentem, který v květnu 2001 ratifikoval kladné rozhodnutí vlády 159 hlasy proti 3. Hlubinné úložiště ONKALO v lokalitě Olkiluoto na západním pobřeží Finska je vzdálené 24 km od nejbližšího města.



© National Land Survey of Finland, permission No 119/MYY/04

Obr. 1: Umístění hlubinného úložiště ONKALO v lokalitě Olkiluoto

3.1.2 Ochranné bariéry

Forma paliva: První ochrannou bariéru tvoří sama forma paliva. Uranové palivo se nachází v pevné formě, která se rozpouští jen velmi pomalu umístěn v plynotěsných kovových tyčích, přičemž se rozpouští ve vodě jen velmi pomalu, což zpomaluje rychlost uvolňování radioaktivních látek.

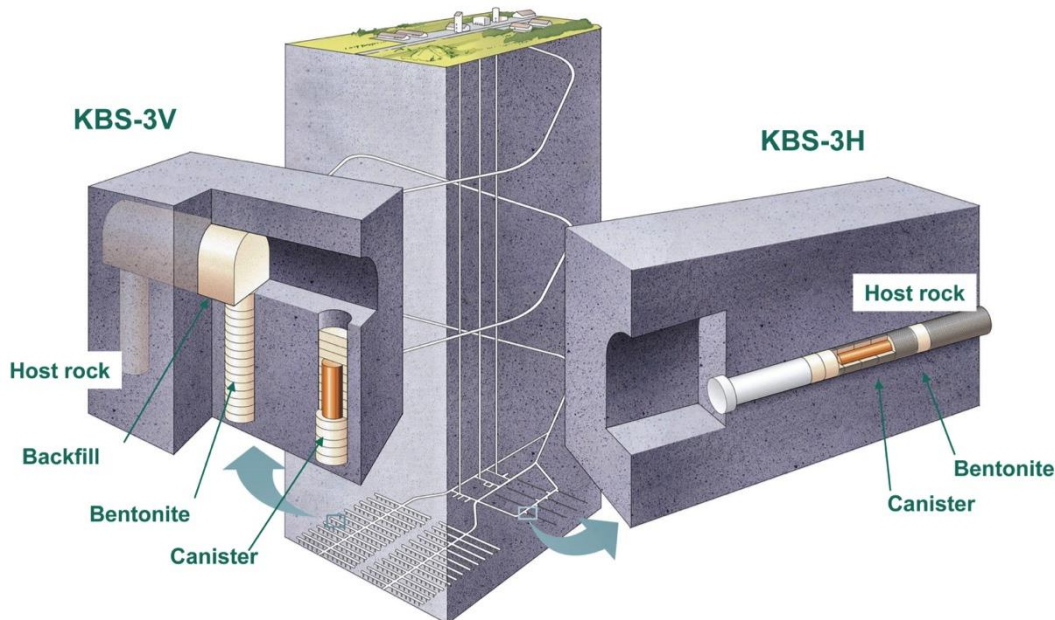
Ukládací obalové soubory: Palivo je uloženo do plynotěsných, korozivzdorných kontejnerů vyrobených z mědi a litiny. Kontejner chrání palivové soubory před mechanickým namáháním, které se může vyskytnout v hlubokém skalnatém podloží.

Bentonitová bariéra: Ukládací obalový soubor je obklopen bentonitovým jílem, takže chrání soubor před případnými otřesy ve skalnatém podloží a zpomaluje pohyb vody v blízkosti ukládacího souboru.

3.1.3 Způsob ukládání

V současných plánech Posiva se předpokládá umístění ukládacích obalových souborů do vertikálních jímek uvnitř ukládacích tunelů. Nicméně Posiva, společně se společností SKB, zkoumá také možnost ukládat tyto soubory do horizontálních jímek. U horizontálního řešení

by byly ukládací soubory s bentonitem umístěny v ocelovém perforovaném plášti. Několik ukládacích souborů je pak odděleno bentonitovým jílem a umístěno jeden za druhým do jámky. Koncept úložiště je schematicky zobrazen na Obr. 2, je zde znázorněna jak vertikální varianta, tak i horizontální varianta ukládání obalových souborů s vyhořelým jaderným palivem.



Obr. 2 Koncept úložiště: vpravo vertikální forma ukládání, vlevo horizontální forma ukládání

3.1.4 Ukládací obalový soubor

Ukládací obalové soubory představují masivní kovové kontejnery, jejichž vnitřní část je vyrobena z tvárné grafitické litiny a vnější část je vyrobena z mědi. Společně s vyhořelým palivem ze čtyř provozovaných jaderných elektráren a z jedné elektrárny ve výstavbě, bude ke konečnému uložení potřeba přibližně 2 800 ukládacích obalových souborů.

Konstrukční materiály, konstrukce, výrobní metody a technologie uzavření ukládacích obalových souborů byly důkladně prozkoumány tak, aby se dosáhlo vytvoření mechanicky a chemicky odolného kontejneru, který může zůstat těsný hluboko uvnitř skalního podloží po dobu nejméně 100 000 let. Těsnost kontejneru je zajištěna vysokými nároky na zajištění kvality při výrobě a rozsáhlými kontrolami.

Vnější část ukládacího souboru je vyrobena z 5 cm silné měděné vrstvy. Tato vrstva ochrání vnitřní vložku a palivové soubory před korozi a vlivem podzemní vody. Rozsáhle experimentální a teoretické studie zaměřené na korozi a erozi vnějšího pláště prokázaly, že jeho těsnost by se neměla ztratit i za nepříznivých podmínek po stovky tisíc let. Zásoby mědi v přírodě ukazují, že měď může zůstat po stovky tisíc let uvnitř skalního podloží bez korozních změn. Dalším příkladem jsou prastaré měděné nástroje (např. měděný sekáček, který byl nalezeno v Suomussalmi ve Finsku), které odolaly korozi a zůstaly v dobrém stavu po tisíce let.

Vnitřní část ukládacího souboru je vyrobena z litiny, která je dostatečně silná, aby odolala mechanickému namáhání, kterému může být soubor uvnitř skalnatého podloží vystaven. Soubor byl zdokonalen tak, aby snášel i extrémní podmínky, jako je zemětřesení nebo tlak způsobený kontinentálním ledovcem. Litina byla vybrána, protože je houževnatá a pevná, a tudíž je ideálním materiálem pro vnitřní část ukládacího souboru. Litina se také snadněji odlévá než řada jiných materiálů, jako je například ocel.

V případě finských jaderných elektráren, budou ukládány tři různé typy palivových souborů: jeden typ v případě JE Loviisa 1 a 2, další typ v případě JE Olkiluoto 1 a 2 a poslední typ je navržen pro nově budovanou jednotku Olkiluoto 3. Každý z těchto typů palivových souborů má rozdílnou velikost, a tudíž bude mít i rozdílný ukládací obalový soubor. Všechny tři typy ukládacích obalových souborů budou mít shodný průměr 1,05 m. Lišit se budou svojí výškou dle konkrétního typu palivového souboru, a také počtem palivových souborů, které pojmu.



Obr. 3 Ukládací obalové soubory pro vyhořelé jaderné palivo: JE Loviisa 1 & 2 (vlevo), JE Olkiluoto 1 & 2 (uprostřed) a JE Olkiluoto 3 (vpravo).



Obr. 4 Měděný plášť a vnitřní litinová vložka ukládacího obalového souboru

3.1.5 Bentonitová bariéra

Měděné ukládací soubory budou od okolní skály izolovány tlumícím materiálem ve formě řady bloků vylisovaných z bentonitu. Bloky budou umístěny v ukládacích jímkách, tak aby oddělovaly ukládací obalový soubor od skalního podloží.

Bentonit je v přírodě se vyskytující druh jílu, který významně expanduje, přijde-li do styku s vodou a zároveň neumožňuje její prosakování. Expandující bentonit je tak schopen vyplnit prostory obklopující ukládací obalový soubor a zároveň zabránit styku vody s měděným

pláštěm souboru. V případě netěsnosti ukládacího obalového souboru také zabrání přístupu radioaktivních látek ke skalnatému podloží.

Bentonitová bariéra ochrání také ukládací soubory před mechanickým poškozením v případě možných změn ve skalním podloží. Bentonit se totiž chová jako plastelína, v případě nutnosti se ohýbá, ale zároveň může díky své plasticitě obnovit původní tvar. Kromě toho rychle vyplňuje a uzavírá praskliny, které mohou vznikat při pohybu skalnatého podloží.

3.1.6 Skalní podloží

Vyhořelé palivo bude uloženo v hloubce 400 – 450 m ve skalnatém podloží, které se nachází v oblasti Olkiluoto. Hluboko uvnitř tohoto podloží převládají stabilní a předvídatelné podmínky. Hlavním typem horniny ve skalnatém podloží Olkiluoto je migmatitová rula. Skalní podloží v oblasti je staré přibližně 1 800 až 1 900 milionů let. V podloží se mohou nacházet různé struktury, z nichž některé vedou vodu, nicméně ukládací tunely a jámy pro ukládací obalové soubory budou umístěny uvnitř skalního podloží tak, aby se těmto strukturám vyhnuly.

Skalnaté podloží chrání ukládací soubory proti externím vlivům, zajišťuje mechanicky a chemicky stabilní podmínky k ukládání a omezuje množství podzemní vody, která by mohla přijít do styku s ukládacími soubory. Skalní podloží ve Finsku je stabilní a pravděpodobnost pohybů většího rozsahu uvnitř tohoto podloží je minimální. Výsledky výzkumu ukazují, že uvnitř skalního podloží (v hloubce několik 100 m) je spodní voda prakticky zbavena kyslíku a teče velmi pomalu, což je také důvod, proč její korozivní efekty jsou velmi malé.

Skála je také schopna účinně stínit záření z obalových souborů, jelikož skála o tloušťce dva metry je dostatečná k zeslabení záření na úroveň přirozeného pozadí. Pokud by se vyhořelé palivo, v důsledku nepředvídatelných okolností, dostalo do kontaktu s podzemními vodami, látky rozpuštěné ve vodě by zůstaly zadrženy především v bentonitu a skalním podloží obklopující ukládací soubory.

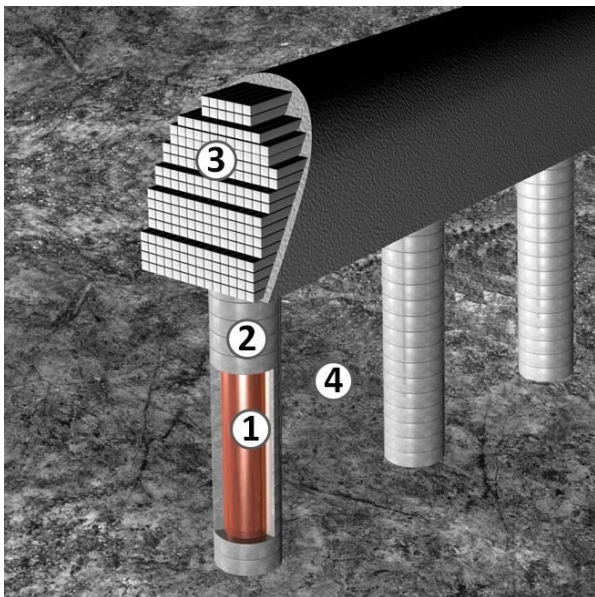
S uložením ukládacích obalových souborů do hloubky větší než 400 se lze vyhnout dopadu potenciálních změn, jak na povrchu úložiště, tak i v atmosféře. Kromě toho budou ukládací soubory mimo dosah lidské činnosti (například vrtané studny) a do zařízení bude velmi problematické vstoupit. Skalnaté podloží oblasti Olkiluoto je studováno od roku 1980. Od této doby byl proveden rozsáhlý výzkum s cílem prozkoumat detailně vlastnosti této oblasti, přičemž řada výzkumných prací stále pokračuje (například je budováno výzkumné podzemní pracoviště Onkalo).

3.1.7 Zaplnění a uzavření úložiště

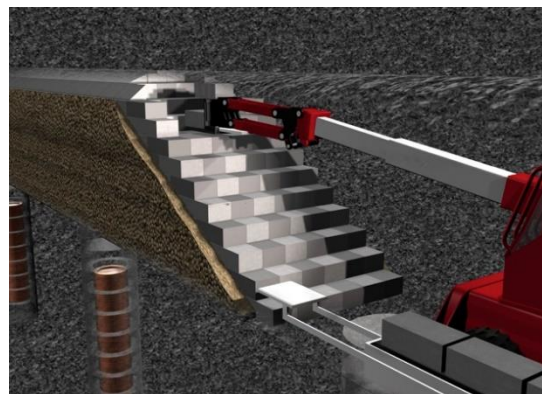
Jakmile budou ukládací obalové soubory uloženy včetně tlumící vrstvy bentonitu, budou ukládací tunely zaplněny a uzavřeny jílovými bloky a granulemi. Výhodou jílu je jeho nízká propustnost a dlouhodobá chemická a mechanická stabilita. Posiva vybrala jako výplňový

materiál předlisované bloky z jílu a bentonitové granule. Alternativou k tomuto materiálu jsou bloky plněné drceným bentonitem, přičemž ten tvoří více než 30 % jejich objemu.

Tunely budou zaplňovány v několika fázích po celou dobu provozu úložiště. Na konci provozu úložiště budou zaplněny také prostory technických zařízení, přístupový tunel a šachty. Z pohledu dlouhodobé bezpečnosti je nezbytné zaplnit a uzavřít úložiště takovým způsobem, aby se podmínky uvnitř úložiště co nejvíce přiblížily k původním přírodním podmínkám předcházející výkopové práce.



Obr. 5 Uzavírání ukládacích prostorů:
1. Ukládací obalový soubor, 2. Tlumící vrstva bentonitu, 3. Zaplnění tunelu, 4. Skalní podloží



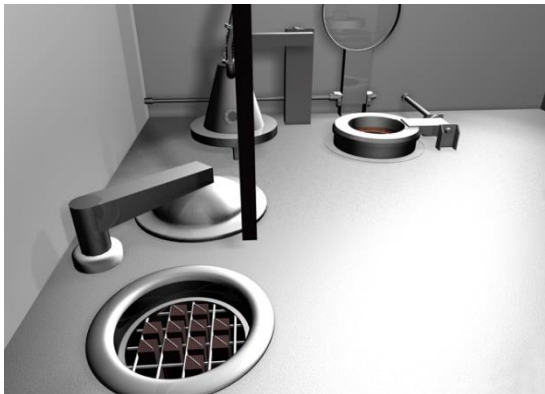
Obr. 6 Ukládací tunely vyplňované bloky z jílu a bentonitovými granulemi

3.2 Zařízení pro přebalení vyhořelého jaderného paliva do ukládacích obalových souborů

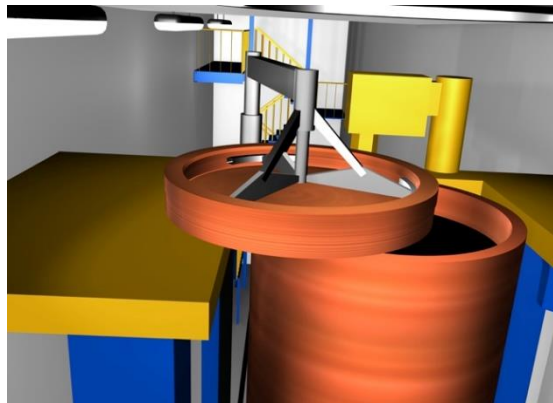
Vyhořelé jaderné palivo bude umístěno a uzavřeno do ukládacích obalových souborů (kontejnerů) v nadzemním závodě. Další zařízení, která budou sloužit jako pomocné provozy budou umístěna také nad zemí.

Nejprve je palivo dopraveno do oblasti příjmu v transportních obalových souborech. Zde se také nacházejí ukládací obalové soubory. Transportní a ukládací obalové soubory jsou umístěny v těsné blízkosti u sebe v manipulační horké komoře. V této komoře je palivo přemístěno z transportního souboru nejprve do vysoušecí stanice a pak do ukládacího souboru. Jakmile je ukládací obalový soubor naplněn palivovými články, je zaplněn argonem a těsně uzavřen vnitřním litinovým obalem. Z manipulační komory je ukládací obalový soubor přemístěn do svařovací stanice. Ve svařovací stanici je uzavřen víkem, které je přivařeno elektronovým paprskem, což zaručuje pevný a silný svár. Těsnost svaru je pak kontrolována v monitorovací stanici pomocí nedestruktivních metod, které využívají především RTG záření a ultrazvuk.

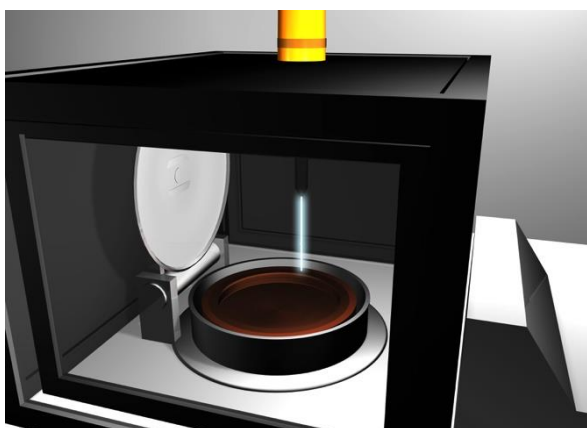
Zařízení pro ukládání paliva do obalových souborů je navrženo takovým způsobem, aby nedošlo k uvolnění žádných radioaktivních látek do životního prostředí, i v případě porušení obalového souboru. Soubory, které prošly kontrolou, jsou pak přemístěny buď výtahem, nebo přístupovým tunelem pomocí speciálního vozidla do úložiště.



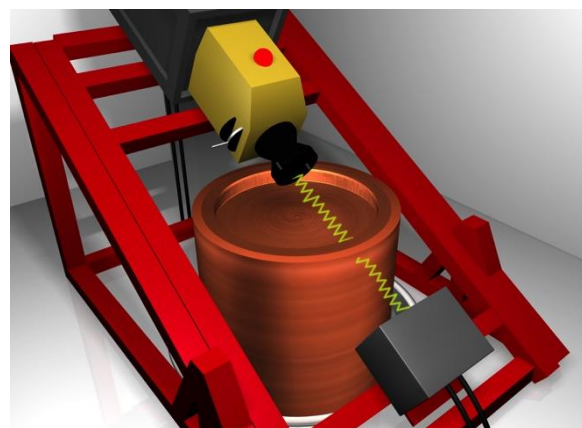
Obr. 7 Přesun palivového souboru do vysoušecí jednotky



Obr. 8 Osazení víka kontejneru



Obr. 10 Přivažení víka kontejneru elektronovým paprskem



Obr. 9 Kontrola sváru pomocí RTG skeneru a ultrazvuku

Kromě zařízení pro umístění a uzavření paliva do ukládacích obalových souborů, jsou součástí nadzemního komplexu také pomocné a podpůrné celky a budovy. Jedná se o různé provozní budovy, budovy výzkumu, budovy obsahující ventilační a elektrické systémy, skladovací haly a opravní. Oddělené prostory jsou vyhrazeny pro ukládání vytěžené horniny a drcené kameniny ze skalního podloží a také pro potřeby stavby a stavebních úprav. Celý nadzemní komplex bude zaujímat přibližně (budovy, silnice, sklady a skládky zeminy) 20 hektarů.



Obr. 11 Podélný řez zařízením pro umístění a uzavření paliva do ukládacích kontejnerů:
1. Příjem a úložný prostor pro nové obalové soubory; 2. Horká komora; 3. Svařovací komora; 4. Kontrola svarů; 5. Čištění povrchu ukládacích obalových souborů; 6. Výtah pro přesun souborů do úložiště.

3.3 Podzemní součásti úložiště

Ukládací tunely se budou nacházet ve skalním podloží v hloubce 400–500 m. Tunely budou raženy přímo ve skále a ukládací soubory se uloží do ukládacích šachet vyražených v těchto tunelech. Podzemní úložiště bude rozděleno do tří částí:

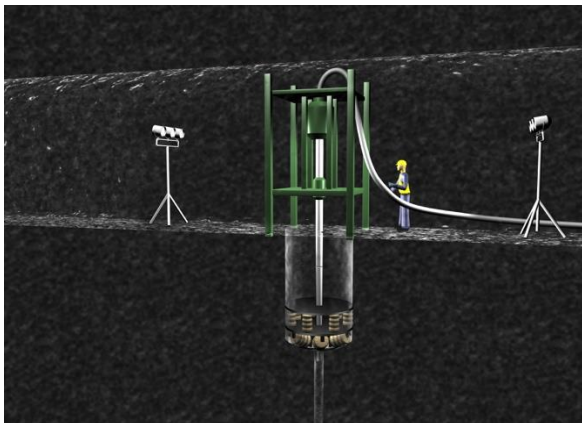
- ukládací tunely, kde budou uloženy ukládací soubory s vyhořelým jaderným palivem,
- centrální tunely, které spojují ukládací tunely a přístupové tunely nebo šachty,
- podzemní pomocná technická zařízení.

Velikost konečného úložiště závisí na množství vyhořelého jaderného paliva. Základní předpoklad je, že úložiště bude mít kapacitu pro množství paliva ekvivalentní 5 500 t TK, což znamená uložení celkem 2 800 ukládacích obalových souborů. V tomto případě bude objem vytěžené horniny přibližně 1,3 milionu m³ (bez započítání ukládacích šachet). V souladu se současnými plány bude počet požadovaných ukládacích tunelů 137. Celková délka tunelů byla odhadnuta na 42 km, tunely se rozprostírají na ploše mezi 2 až 3 km².

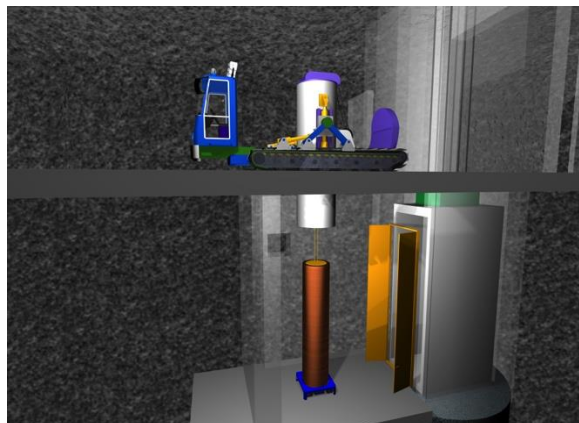
Z povrchu dolů do úložiště vede přístupový tunel a čtyři svislé šachty. Vertikální šachty obsahují šachtu pro personál, šachtu pro ukládací soubory a také dvě větrací šachty. Přístupový tunel, šachta pro personál a obě větrací šachty budou vybudovány již v průběhu výstavby výzkumného pracoviště Onkalo. V referenčním projektu se předpokládá umístování ukládacích obalových souborů do jámek hlubokých 6 až 8 m, vyvrtaných do dna

ukládacích tunelů. Jímky budou uzavřeny předlisovaným bentonitovým jílem. Jako alternativa se uvažuje umístit ukládací soubory horizontálních jímek.

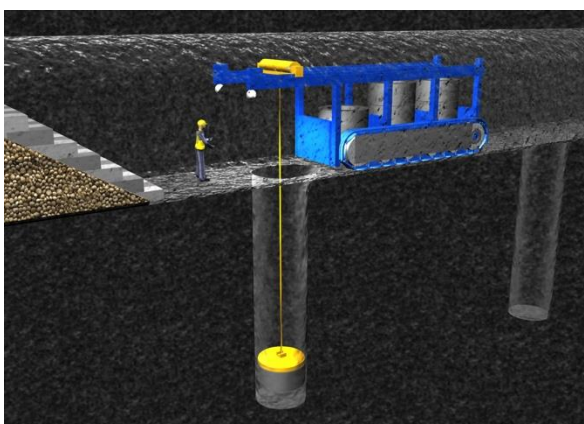
V průběhu provozu úložiště budou ukládací tunely postupně uzavírány, tak jak budou zaplněny ukládacími obalovými soubory. K jejich uzavření budou použity lisované bloky z bentonitového jílu. Nepředpokládá se, že všechny ukládací tunely budou vybudovány ve stejném okamžiku od zahájení provozu úložiště. Přibližně jedna polovina a maximálně až 58 % z celkového objemu všech ukládacích prostor bude neuzavřena. Předpokládá se, že bude celkem 8 fází výstavby úložiště. Kromě fáze základní výstavby a fáze konečného ukládání, zde bude také šest fází výkopových prací. Díky rozdělení výstavby do několika fází, bude možné rozložit i investice do delšího časového období. Toto řešení také pomůže minimalizovat množství průsakových vod a nároky na odvětrávání. Další výhodou několika stavebních fází, že v jejich průběhu lze shromažďovat nová data a optimalizovat rozhodnutí na základě nejnovějších poznatků. Postupy jednotlivých prací uvnitř úložiště jsou znázorněny na Obr. 12 až Obr. 15



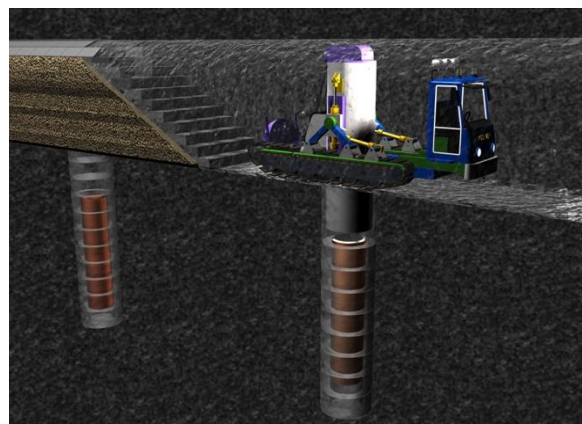
Obr. 12 Přenos ukládacího souboru výtahem do hloubky, v níž bude konečné uložení a dále jeho umístění na vozidlo



Obr. 14 Vrtání ukládací jímky v ukládacím tunelu



Obr. 13 Instalace (zavedení) bentonitových bloků



Obr. 15 Umístění ukládacího souboru do ukládací jímky

3.4 Odhad nákladů

Odhad nákladů byl proveden pro předpokládané uložení vyhořelého jaderného paliva z jaderných elektráren Olkiluoto 1-3 a Loviisa 1-2 (cca se bude jednat o 5 500 t TK). Hodnoty uvedené v tabulce vycházejí z odhadů z roku 2009 [2]¹.

Tab. 1 Předpokládané náklady na výstavbu a provoz úložiště ve Finsku v mil. EUR [3].

Výstavba	700
Nadzemní zařízení	150
Úložiště (včetně laboratoře ONKALO)	550
Provoz	2 420
Závod na uzavírání vyhořelého jaderného paliva do ukládacích obalových souborů	1 200
Kontejnery	580
Úložiště	630
Transport	20
Vyřazování z provozu a utěsnění	200
Demontáž a nakládání s odpady	10
Uzavření úložiště	190
Celkem	3 320

3.5 Použitá dokumentace

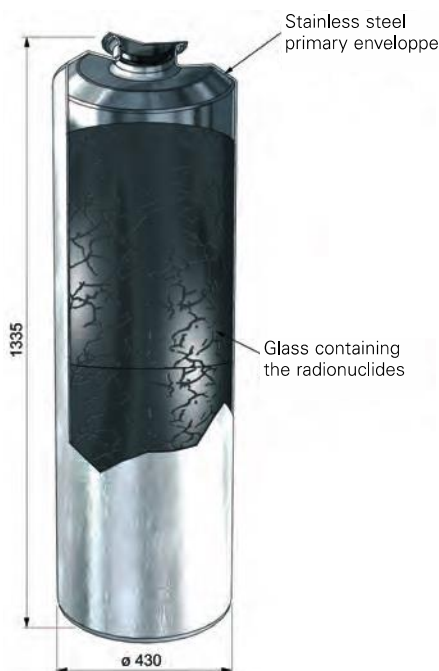
- [1] Posiva OY: Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa nuclear power plants - Summary of the activities during 2011, Nuclear Waste Management Plans and Annual Reports.
- [2] Posiva OY: The final disposal facility for spent nuclear fuel - environmental impact assessment report from 1999.
- [3] Challenges in Cost Estimation of Geological Disposal: Optimisation as a Goal, EURADWASTE '13, 8th EC Conference on the Management of Radioactive Waste, Vilnius, Lithuania, 2013.
- [4] T. Kukkola, T Saanio: Cost Estimate of Olkiluoto Disposal Facility for Spent Nuclear Fuel, Working Report 2005-10, 2005.

¹ Náklady byly prvotně vyčísleny v dokumentu [2], avšak v roce 2013 byly v dokumentu [3] prezentovány jako evaluované k roku 2009.

4 Projekt hlubinného úložiště ve Francii

Za bezpečné řešení nakládání se všemi typy radioaktivních odpadů ve Francii zodpovídá národní agentura ANDRA (L'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs). ANDRA spadá pod dohled ministerstev pro energetiku, výzkum a životní prostředí. ANDRA také připravuje projekt hlubinného úložiště pro radioaktivní odpad, který se nazývá Cigéo (Centre industriel de stockage géologique).

V úložišti by měl být ukládán především odpad vznikající při přepracování vyhořelého jaderného paliva. Jeho aktivita se pohybuje od několik GBq po desítky GBq na gram. Obsahuje různé krátkodobé a dlouhodobé radionuklidy. Některé z nich jsou velmi dlouho žijící, jako například ^{36}Cl ($T_{1/2} = 3 \cdot 10^5$ let) a ^{129}I ($T_{1/2} = 16 \cdot 10^6$ let). Vzhledem k přítomnosti některých produktů štěpení (jako např. ^{90}Sr nebo ^{137}Cs) a aktinoidů (především ^{241}Am), produkují vysoce aktivní odpady teplo. Odpad z přepracování je vitrifikovaný a umístěn do kontejneru z nerezavějící oceli (viz Obr. 16). Takovýto kontejner obsahuje přibližně 400 kg skla a 70 kg odpadu. Kromě vysoce aktivních odpadů budou v úložišti uloženy i středně aktivní odpady.

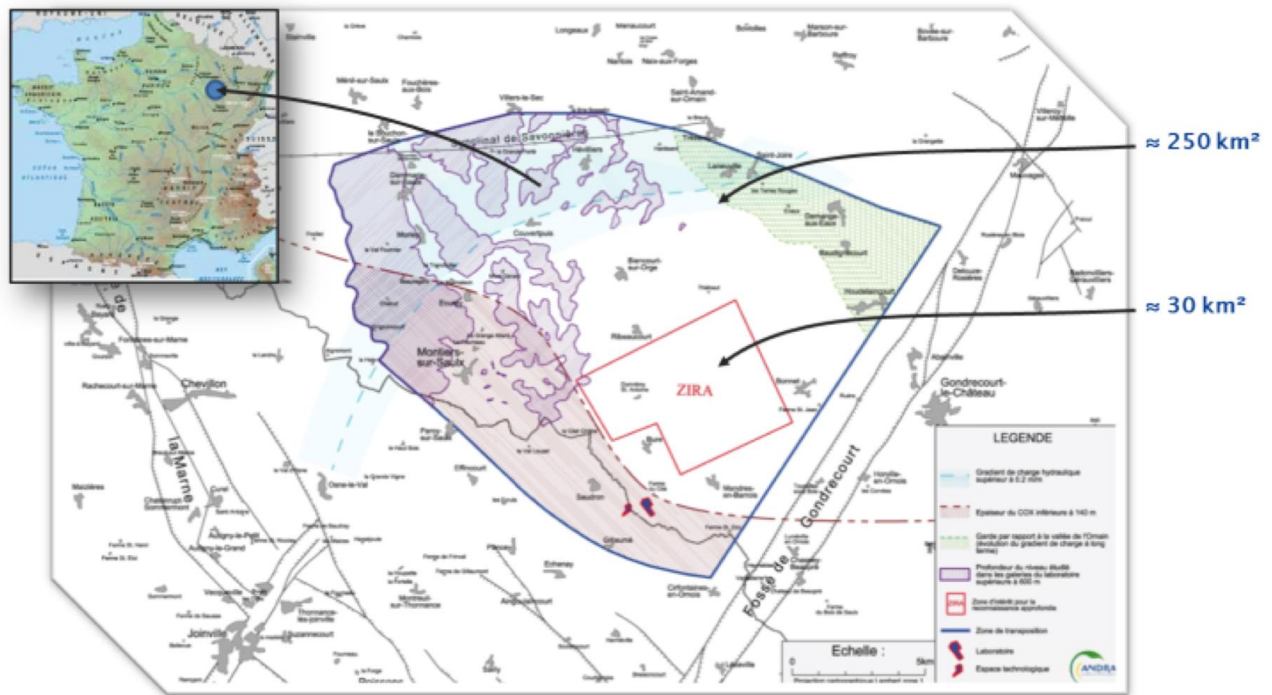


Obr. 16 Vitřifikovaný odpad v ocelové obálce.

4.1.1 Výběr lokality

Úložiště se bude nalézat v oblasti, která se rozkládá podél departmentu Meuse a Haute-Marne v severovýchodní Francii. Výzkum v této oblasti probíhá již od roku 1990. V roce 2009 navrhla ANDRA francouzské vládě podzemní oblast o rozloze 30 km², která se nachází v centru původně definované širší oblasti 250 km². Oblast byla následně schválena vládou.

Dále ANDRA definovala několik oblastí pro průzkum za účelem umístění povrchových zařízení, které budou nezbytné při provozu úložiště, z nichž bylo doporučena zalesněná oblast údolí Ormançon, která se nachází blízko vybrané podzemní oblasti budoucího úložiště.



Obr. 17 Mapa zájmové oblasti o velikosti 30 km² pro hlubinné ukládání [5]

4.2 Základní charakteristika úložiště

Úložiště bude mít v podzemní části zónu pro ukládání vysoce aktivních odpadů a zónu pro ukládání středně aktivních odpadů. Objemy odpadů, které by měly být uloženy úložišti Cigéo, se odhadují na:

- cca 10 000 m³ vysoce aktivního odpadu,
- cca 70 000 m³ středněaktivního odpadu.

Výsledné odpady se pak umístí do ukládacích obalových souborů, což bude představovat celkem 30 000 m³ objemu v případě vysoce aktivních odpadů (cca 60 000 obalových souborů) a 350 000 m³ objemu v případě středně aktivních odpadů (cca 180 000 obalových souborů). Tento odhad nezahrnuje předpokládané prodloužení provozní životnosti reaktorů o 30 %. Bere však v úvahu odpady, které budou produkovány jadernými zařízeními ve výstavbě (Flamanville, Jules Horowitz a ITER). Podle zdroje [5] by se mělo jednat o ekvivalent 64 150 t TK.

Úložiště Cigéo se bude skládat z povrchových zařízení, které se budou nacházet ve dvou oblastech, dále pak šachet, ramp a podzemního úložiště. Úložiště se bude skládat z následujících částí (viz Obr. 18):

1. Oblast přijímání odpadu a zóna přípravy

Bude se nacházet pár kilometrů od hlubinného úložiště, tato zóna bude obsahovat budovu pro příjem, kontrolu a přípravu ukládacích souborů s odpadem před jejich transportem do úložiště,

2. Rampy

Jedna rampa bude použita k transportu ukládacích souborů s odpadem do podzemí, zatímco další bude použita jako šachta technického přístupu.

3. Podzemní úložiště

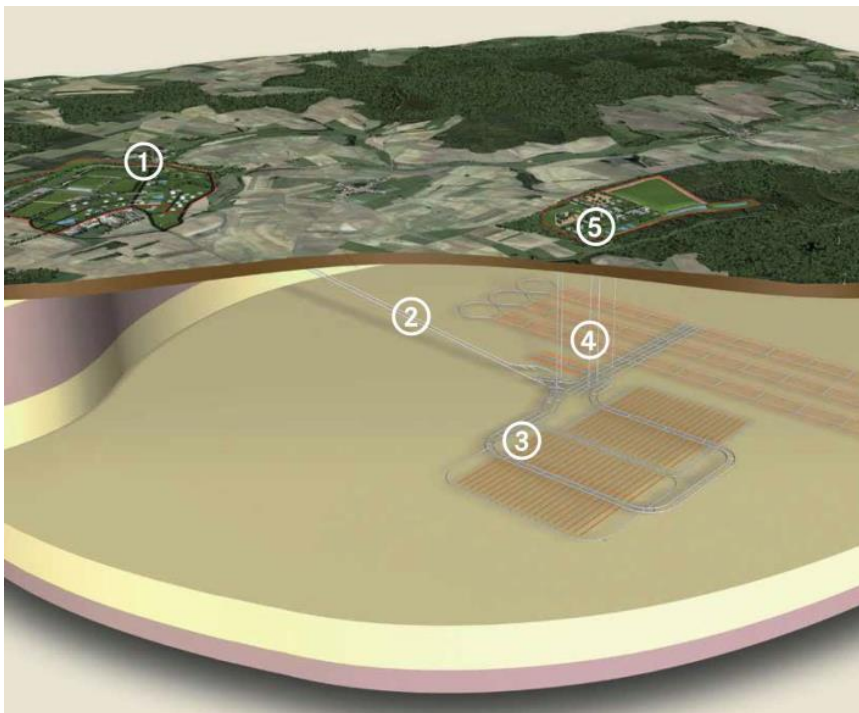
Bude rozděleno na zóny dle typu ukládaných odpadů a bude rozšiřováno dle potřeby v průběhu provozu a bude rozděleno do různých zón.

4. Šachty

Pět vertikálních šachet bude spojoval podzemní úložiště s nadzemní pracovní oblastí. Šachty budou použity k transportu personálu, materiálu a zařízení na povrch a do podzemí, pomocí nich bude zajišťována přesun vytěžené horniny na povrch a dodávka čerstvého vzduchu do podzemí.

5. Základna pro důlní činnosti a stavební práce

Bude umístěna přímo nad úložištěm, tato zóna bude konkrétně využívána pro hloubení a výstavbu podzemních komplexů. Hornina vytěžená v průběhu výstavby těchto komplexů bude hromaděna v této oblasti.



Obr. 18 Uspořádání úložiště.

4.2.1 Geologické vlastnosti vybrané oblasti

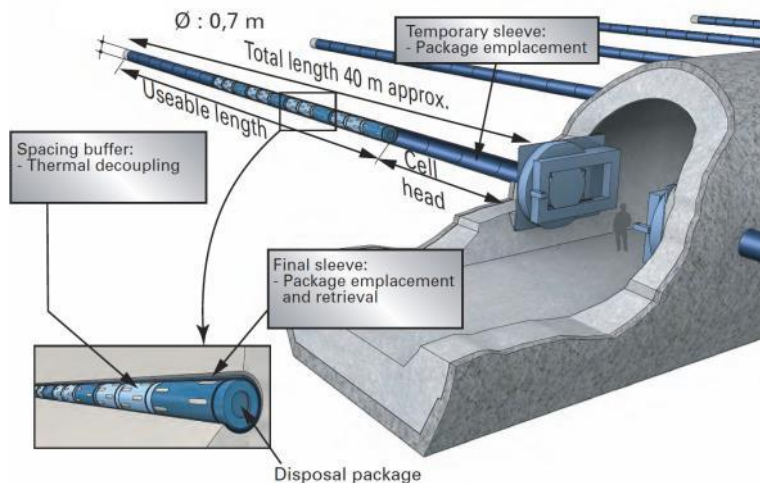
Oblast departmentu Meuse/Haute-marne splňuje vysoké požadavky kladené na geologické formace pro hlubinné ukládání. ANDRA provádí v této oblasti od roku 1994 geologický průzkum, který umožnil důkladně charakterizovat a seznámit se s geologickou formací a vlastnostmi jílovitého podloží. Oblast se nachází ve východní části tzv. Pařížské pánve a jedná se o geologicky jednoduchý útvar s řadou vrstev vápence, slínu (směs jílu a karbonátu) a jílovitých hornin pocházejících z prehistorických oceánů. Taktéž geometrie geologických vrstev není komplikovaná. Analýzy vzorků z 2 000 metrů hlubokého vrtu potvrdily, že přímo nad zónou určenou pro výstavbu hlubinného úložiště nejsou žádné významné přírodní zdroje. Průzkumy zároveň prokázaly, že oblast představuje geologicky a seizmicky vysoce stabilní prostředí.

Jíl z období střední a svrchní jury (tzv. stupeň Callov-Oxford) vznikl cca před 160 miliony lety. Jedná se o homogenní vrstvu v celé ploše oblasti a tloušťce více než 130 m. Ve zkoumané oblasti nebyly zjištěny žádné zlomy, které by vrstvu negativně ovlivňovaly. Jediné známé zlomy se nacházejí vně této oblasti (Marne, a Poissons/Roche-Betaincourt). Tato jílovitá skála má takové vlastnosti, které zajišťují zadržení radionuklidů obsažených v ukládaných odpadech po velmi dlouhou dobu:

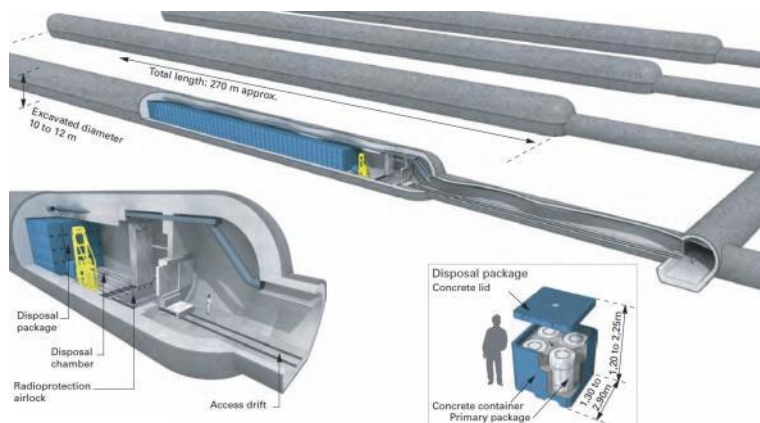
- velmi malá propustnost omezuje průsak vody vrstvou a zabraňuje tak šíření radionuklidů. Migrace rozpustných chemických prvků difúzí je velmi pomalá,
- chemické složení horniny omezuje rozpouštění řady radionuklidů, například aktinoidů, a tím zabraňuje jejich migraci horninou,
- jílovitý základ skály, která je složena z navzájem se překrývajících vrstev, mezi nimiž mohou být radionuklidy zachyceny, taktéž průtok vody přes tyto vrstvy je velmi pomalý.

4.2.2 Podzemní část úložiště

Úložiště se bude nacházet v hloubce okolo 500 m, přičemž se předpokládá, že se bude rozšiřovat postupně v průběhu provozu. Bude se skládat z oddělených zón pro ukládání vysoce aktivních odpadů a středně aktivních odpadů, spojovacích štol a technického zázemí. Předpokládá se, že cca po 100 letech provozu bude mít půdorys úložiště rozlohu okolo 15 km². Ukládací tunely i buňky budou horizontálního typu, ukládací soubory s odpadem budou do nich umisťovat robotické systémy. Vysoce aktivní odpad bude ukládán do buněk s kovovou výstelkou, jejich délka bude několik stovek metrů a průměr okolo 70 cm (viz Obr. 19). Středně aktivní odpad bude také ukládán do horizontálních buněk o délce několik stovek metrů, nicméně jejich průměr bude okolo deseti metrů (viz Obr. 20). Ukládací zóny budou modulární tak, aby mohly být stavěny a uváděny do provozu v postupně průběhu času.

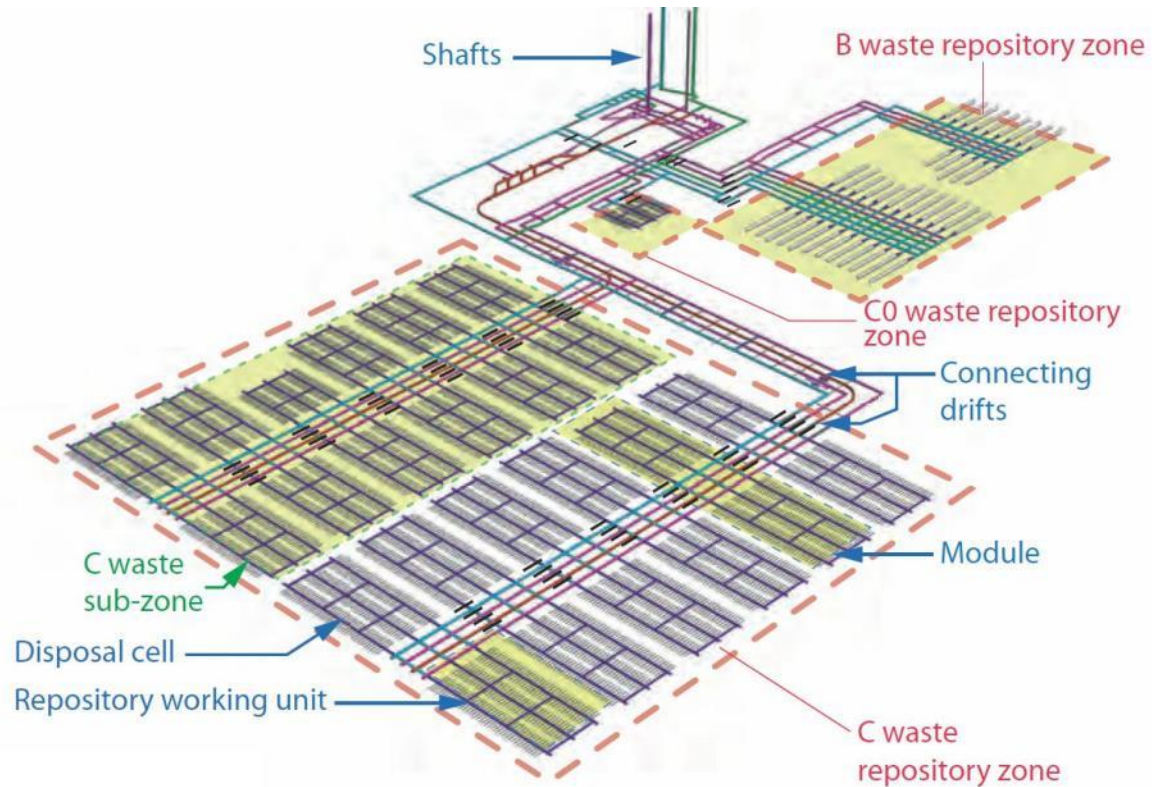


Obr. 19 Ukládání vysoce aktivních odpadů.



Obr. 20 Ukládání středně aktivních odpadů.

Zóny úložiště jsou navzájem odděleny podle typu odpadu, který je v nich uložen (viz Obr. 21). Různé kategorie ukládacích souborů (B – ukládací soubor pro středně aktivní odpady, C – ukládací soubor pro vitrifikovaný vysoce aktivní odpad a dle potřeby CU – ukládací soubor pro vyhořelé palivové soubory) jsou umísťovány do oddělených zón, rozdělených na moduly a ukládací buňky. V zóně B, odpovídá modul přímo jedné buňce. V zónách C (a CU) je do modulu seskupena řada buněk (od jednotek až po stovky), které jsou zaplňovány postupně. Díky tomuto řešení může být současně ve výstavbě a v provozu několik modulů v téže zóně.



Obr. 21 Uspořádání zón a modulů v úložišti.

4.2.3 Spojovací infrastruktura

Předpokládají se dva typy infrastruktury, která bude propojovat povrchová zařízení s podzemním úložištěm. Vertikální šachty budou sloužit k přesunu personálu, konstrukčních zařízení, materiálu a ventilaci podzemního komplexu úložiště. Ukládací soubory s odpadem budou transportovány lanovkou v nájezdové rampě.

4.2.4 Povrchová zařízení

Povrchová zařízení úložiště Cigéo budou rozdělena do dvou lokalit, jedna bude určena pro přístupovou rampu a druhá pro vertikální šachty. Obě lokality budou navzájem vzdáleny několik kilometrů. Zařízení s přístupovou rampou budou postavena v lokalitě, která byla již připravena pro podzemní laboratoř. Hornina vytěžená v oblasti přístupové rampy bude transportována do oblasti ventilačních šachet, kde bude hromaděna. Uvažuje se i o propojení obou lokalit dopravníkem, tak aby se snížily nároky na dopravu mezi oběma lokalitami. Povrchová zařízení budou mít vlastní havarijní plánování a bezpečnostní zařízení (požární stanice, fyzickou ochranu atd.).

Mezi zařízení v zóně 1 (oblast s přístupovou rampou) budou náležet budovy pro příjem a kontrolu obalových souborů s odpady a jejich přípravu pro transport do hlubinného úložiště přístupovou rampou. Zóna bude mít rozlohu cca 200 ha a bude obsahovat:

- komplex jaderných zařízení, kde budou obalové soubory přijímány, kontrolovány a zpracovány do ukládacích obalových souborů a seskupeny za účelem jejich přesunu do ukládacích buněk v hlubinném úložišti,

- oblast, kde se bude nacházet železniční terminál, v případě, že bude železnice zvolena jako doprava pro transport kontejnerů s odpady do Cigéo,
- infrastruktura vyžadovaná pro provoz zařízení (elektrorozvodna, systém sběru dešťových vod, čistírna odpadních vod apod.)
- oblast pro stavební práce a údržbu zařízení,
- návštěvnické centrum,
- objekty pro pracovníky, jídelny a kanceláře.

Zóna 2 (oblast s vertikálními šachtami) se bude nacházet přibližně 5 km od zóny 1. Její zařízení budou primárně využívána pro hloubení a výstavbu konstrukcí a stavebních celků v podzemí. Rozloha zóny se bude pohybovat okolo 110 ha (vyjma nahromaděné vytěžené horniny). Tato zóna se bude nacházet přímo nad hlubinným úložištěm a bude obsahovat:

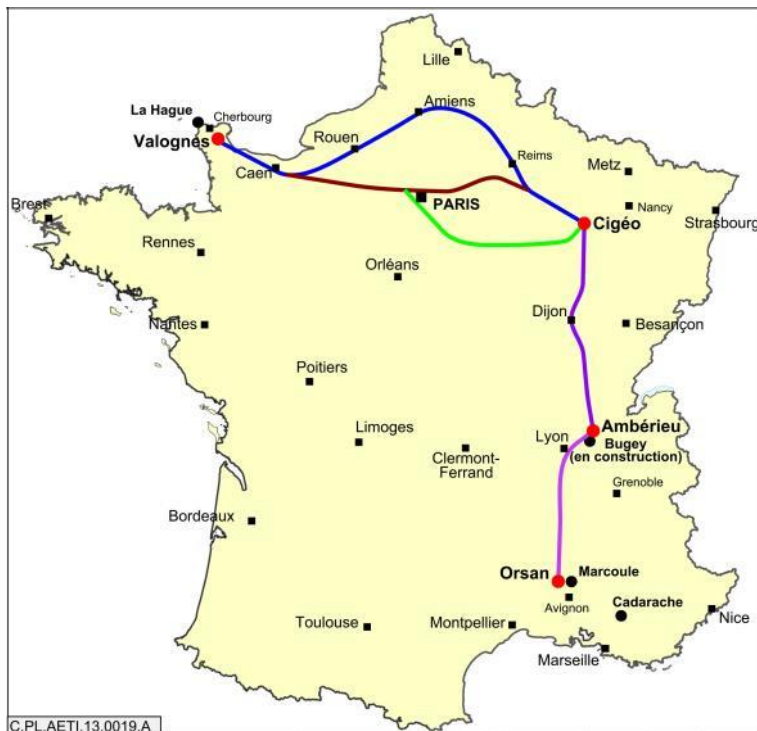
- oblast pro podzemní práce,
- oblast obsahující zařízení pro údržbu a šachty pro transport personálu a ventilaci úložiště,
- infrastruktura vyžadovaná pro provoz zařízení (elektrorozvodna, systém sběru dešťových vod, čistírna odpadních vod apod.)

Hornina vytěžená z oblasti hlubinného úložiště bude hromaděna a upravována v blízkosti této zóny. Valy se zeminou budou vytvářeny postupně, přičemž se předpokládá, že budou zabírat celkem plochu o rozloze 130 ha.

4.3 Provoz úložiště

4.3.1 Transport a příjem odpadů

Předpokládá se, že Areva, CEA a EDF budou posílat do Cigéo cca 700 až 900 obalových souborů s odpady ročně od roku 2030 až 2040. Preferovanou dopravou bude železnice, což bude znamenat více než 100 vlaků (přibližně 10 vagónů na vlak) za rok. CEA počítá také s transportem omezeného množství odpadů z oblasti Valduc silniční dopravou. Jak vyplývá z Obr. 22, jsou k dispozici železniční trasy, které mohou spojit Cigéo s místy jako jsou La Hague, Cadarache, Marcoule a Bugey.



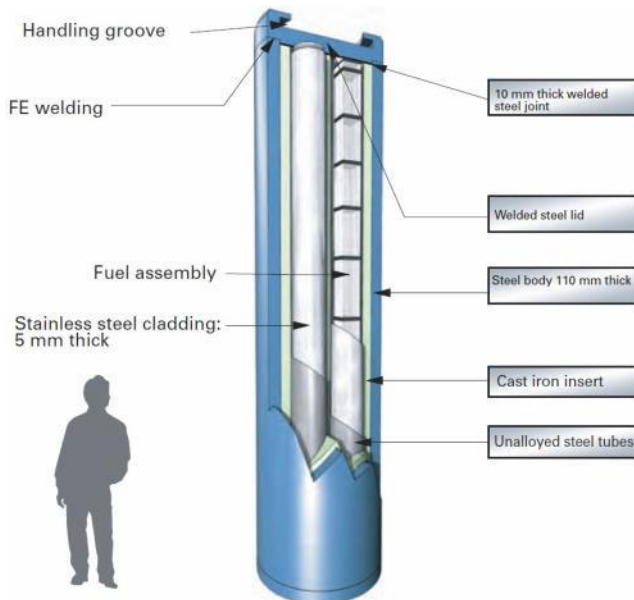
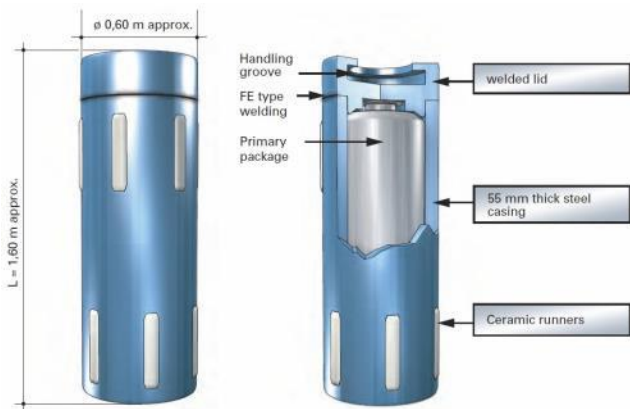
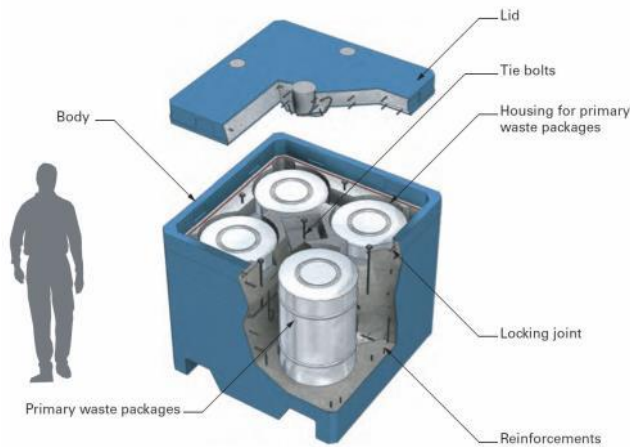
Obr. 22 Transportní cesty s odpady do úložiště.

Obalové soubory s odpady nebudou přijaty do Cigéo, dokud neprojdou procesem, který zajistí, že splňují veškerá technická kritéria pro zajištění bezpečného ukládání. Producenti odpadů budou muset podat žádost agentuře ANDRA, přičemž v rámci žádosti bude muset být prokázáno, že obalové soubory splní technická kritéria. Teprve poté mohou být odpady přijaty do Cigéo. Před umístěním obalových souborů s odpady do úložiště bude provedena řada kontrol, a to jak v místech producentů, tak i v Cigéo.

4.3.2 Uložení odpadů

Po příjezdu do Cigéo, budou obalové soubory s odpady přesunuty do budov, kde budou vyjmuty z jejich transportních kontejnerů a kontrolovány (kontaminace, dávkový příkon atd.). Tyto budou také použity pro správu odpadů před jejich transportem do podzemního úložiště, nicméně nebudou sloužit jako náhrada skladovacích prostor producentů odpadů. Předpokládá se, že některé obalové soubory od producentů odpadu budou rovnou připraveny k uložení. Následně budou obalové soubory s odpady umístěny do ukládacích souborů. Různé ukládací soubory jsou zobrazeny na Obr. 23.

Ukládací soubory budou umístěny do stínících transportních kontejnerů (Obr. 24), které se umístí na lanovou dráhu, jež bude transportovat odpady do podzemí. Rychlost pohybu lanové dráhy bude odpovídat rychlosti chůze člověka. Umisťování odpadů do ukládacích buněk bude prováděno dálkovým řízením. Transportní kontejner se spojí s uzávěrem buňky, tak aby bylo zajištěno těsnění ve chvíli, kdy se uzávěr buňky otevře. Uzávěr buňky nebude možné otevřít, dokud nebude transportní kontejner správně připojen. Manipulační systém následně přesune ukládací soubory do buňky a uzávěr buňky bude uzavřen.



Obr. 23 Různé ukládací soubory dle typu odpadu: typ B pro středně aktivní odpad (nahore), typ C pro vitrifikovaný vysoce aktivní odpad (uprostřed) a CU pro vyhořelé palivové soubory (dole).



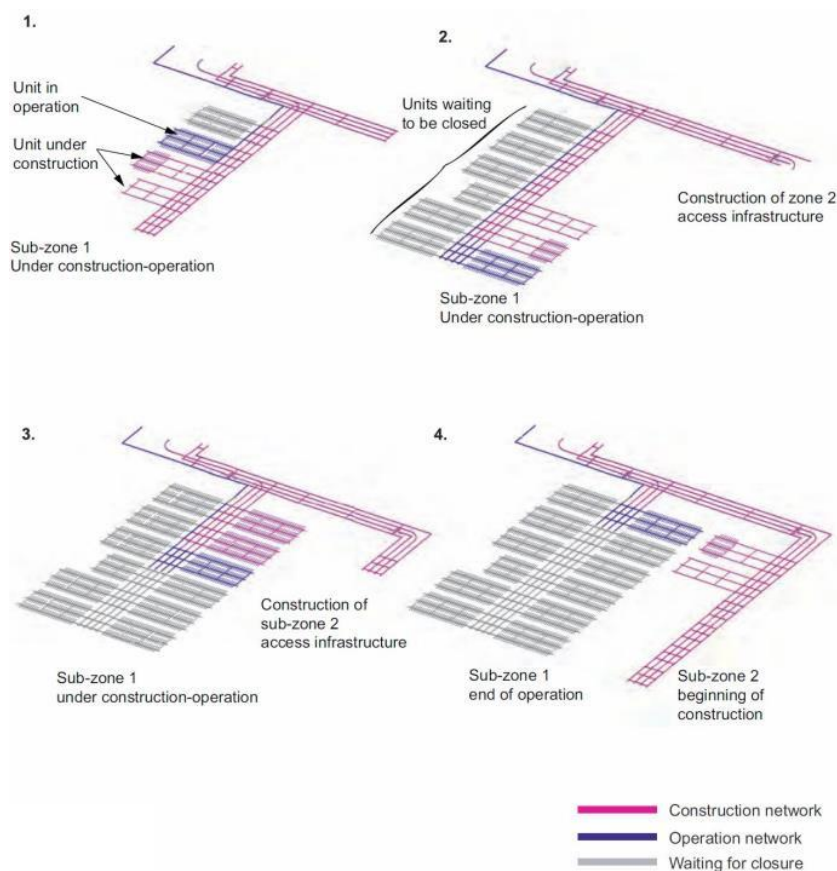
Obr. 24 Stínící transportní kontejner.

4.3.3 Uzavírání úložiště

Předpokládá se, že úložiště bude uzavíráno postupně (viz Obr. 25), zónu po zóně:

- utěsněním ukládacích buněk jílovou strukturou,
- zasypaní přístupových štol k ukládacím buňkám a později i hlavních štol,
- zasypaní a utěsnění šachet a později i ramp.

Konstrukční části budou zasypany jílem, který byl vytěžen v průběhu hloubení úložiště a je uložen na povrchu. Utěsnění bude vytvořeno expansním jílem a betonem, aby byl omezen průsak vody šachtami, které spojují úložiště s povrchem. Povrchová zařízení budou demontována ve chvíli, kdy bude hlubinné úložiště uzavřeno.



Obr. 25 Konstrukční a provozní fáze v úložišti v zóně C.

4.4 Odhad nákladů

Pracovní skupina v letech 2004–2005 odhadla náklady na výstavbu, provoz a uzavření úložiště v rozmezí 13,5 až 16,5 miliard EUR, které by měly být rozloženy na období více než 100 let předpokládaného provozu úložiště. Náklady jsou odhadnuty na uložení jak vysoceaktivního, tak i středněaktivního odpadu. Horní mez nákladů měla zahrnout nárůst cen a inflaci, které byly v době odhadu předpokládány do roku 2012. V odhadu předloženém ministerstvu ekologie v říjnu 2014 uvedla ANDRA revidovaný odhad nákladů ve výši 34,4 miliardy EUR na základě cen v roce 2012. Tento odhad zahrnoval 19,8 miliard EUR na výstavbu zařízení, 8,8 miliard EUR na provozní náklady na 100 let, 4,1 miliardy EUR na daně/poplatky a 1,7 miliardy EUR na ostatní výdaje. EDF, Areva a CEA však tvrdily, že náklady na projekt Cigéo se budou pohybovat mezi 20 až 30 miliardami EUR. Začátkem roku 2016 francouzský ministr energetiky na základě ministerského nařízení rozhodl, že „referenční náklady“ na zařízení budou činit 25 miliard EUR na základě hospodářské situace k 31. prosinci 2011. V nařízení se rovněž uvádí, že náklady na projekt budou pravidelně aktualizovány, a to alespoň v každém klíčovém milníku vývoje úložiště.

4.5 Použitá dokumentace

- [1] Andra: Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation – Dossier Argile, Report Andra 2005.
- [2] Andra: Safety evaluation of a geological repository – Dossier Argile, Report Andra 2005.
- [3] Andra: Assets of granite formations for deep geological disposal – Dossier Argile, Report Andra 2005.
- [4] Marc Butez et al.: Industrial Program of Waste Management – Cigéo Project, ref. No. 13033, WM Conference 2013, Phoenix, USA.
- [5] Faybishenko, B., J. Birkholzer, D. Sassani, P. Swift (eds.). 2016: International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation – Fifth Worldwide Review, Chapter 8 – France, LBNL-1006984, <https://eesa.lbl.gov/worldwide-review/>

5 Projekt hlubinného úložiště ve Švédsku

Úložiště se obecně bude skládat ze dvou částí:

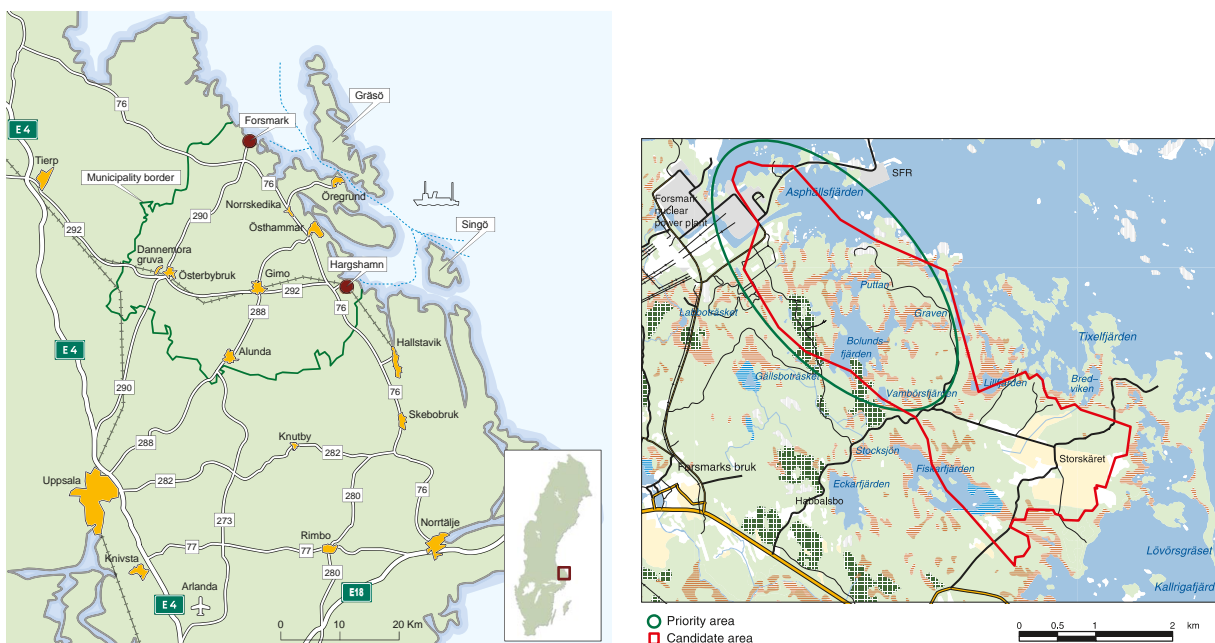
- zařízení, která se nachází nad zemí a slouží k přijímání uzavřených obalových souborů a jejich přípravě k uložení,
- vlastního úložiště, které se bude nacházet hluboko uvnitř skalního podloží a jehož nejvýznamnější součástí jsou tunely, do nichž se trvale uloží ukládací obalové soubory s vyhořelým jaderným palivem.

SKB očekává zahájení výstavby v průběhu roku 2020 a dokončení o deset let později.

5.1.1 Výběr lokality

Za nakládání s radioaktivním odpadem je ve Švédsku zodpovědná společnost SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB). V roce 2011 předložila společnost SKB švédskému úřadu pro dohled nad jadernou bezpečností a radiální ochranou (SSM – Strål säkerhets myndigheten) žádost o licenci pro výstavbu hlubinného úložiště vyhořelého jaderného paliva, které má být umístěno ve Forsmarku (v blízkosti stejnojmenné jaderné elektrárny).

Forsmark se nachází 120 km severně od Stockholmu podél pobřeží Öregrundsgrepen u Baltského moře. Vybraná oblast je přibližně 6 km dlouhá a 2 km široká (viz. Obr. 26). Jaderná elektrárna Forsmark se nachází mimo kandidátní oblast.

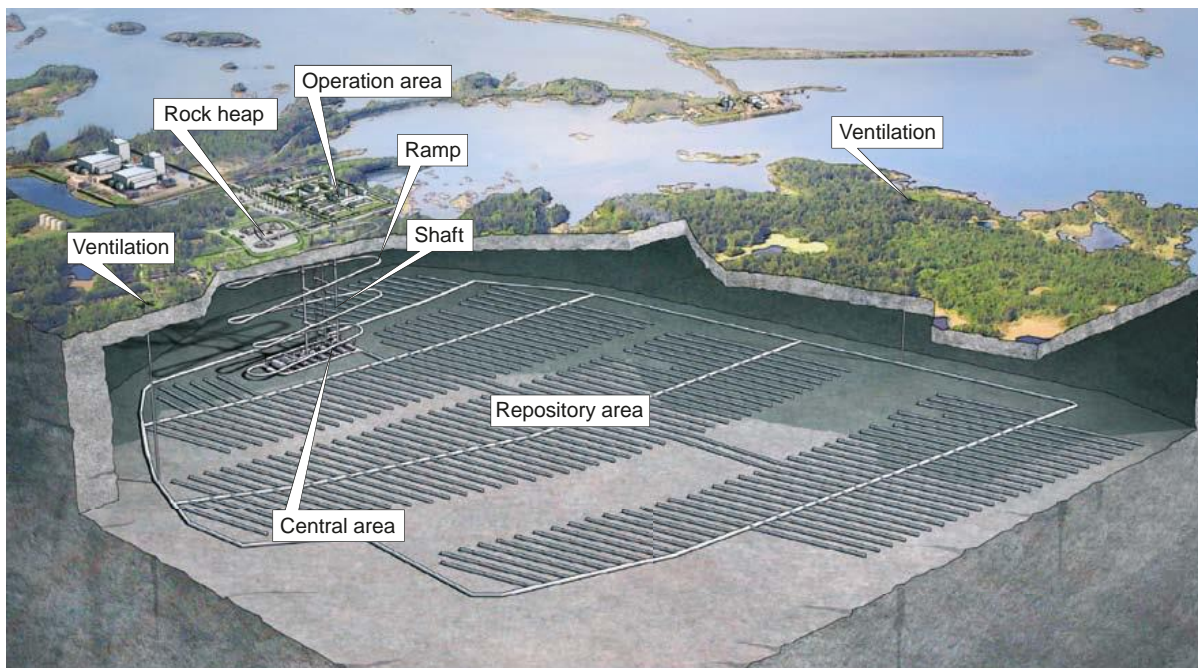


Obr. 26 Oblast vybraná pro konečné úložiště vyhořelého jaderného paliva ve Švédsku (červeně je znázorněna kandidátní oblast a zeleně prioritní část této oblasti)

5.2 Základní charakteristika úložiště

Úložiště bude vybudováno na základě projektu KBS-3 vyvinutého společností SKB. Tento projekt je založen na multibariérovém principu, kde jsou radioaktivní látky zadržovány uvnitř několika vzájemně se překrývajících ochranných bariér tak, že selhání jedné bariéry nebo předpokládaná geologická či jiná změna neohrozí izolaci odpadů. Projekt KBS-3 předpokládá kromě výstavby úložiště, také závod na uzavření vyhořelého jaderného paliva do ukládacích souborů. Obě jaderná zařízení se budou nacházet ve dvou různých lokalitách.

Vyhořelé jaderné palivo bude uloženo v ukládacích obalových souborech vyrobených z mědi v závodě, který se bude vybudován v Oskarshamn. Ukládací soubory budou následně uloženy ve skalnatém podloží oblasti, která se nachází v průmyslové zóně ve Forsmarku. Podzemní ukládací prostory budou v hloubce cca 500 m [1]. Kapacita úložiště by měla být pro cca 6 000 ukládacích souborů (s obsahem 11 700 t TK). Předpokládá se, že v době dokončení celého úložiště se bude nacházet podzemí přibližně 60 km tunelů a celková plocha bude cca 4 km². Uspořádání úložiště je znázorněno na Obr. 27.



Obr. 27 Uspořádání referenčního návrhu úložiště KBS-3.

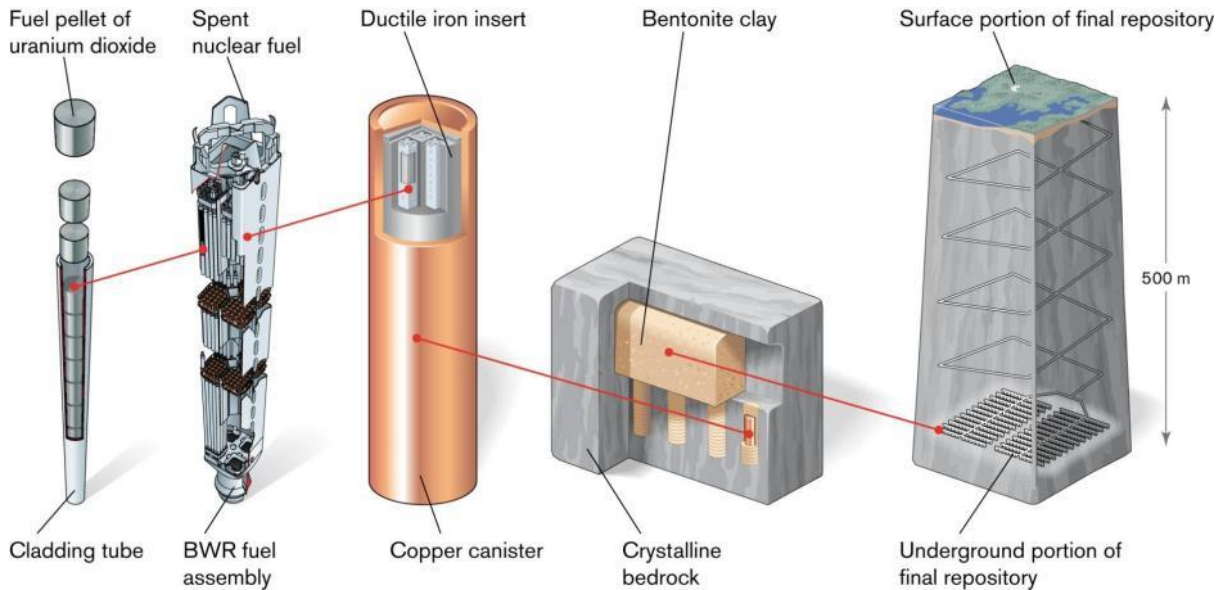
Provozní oblast (viz Obr. 28) bude obsahovat odbavovací halu pro přijímání přepravních kontejnerů s vyhořelým palivem, závod na přípravu tlumícího a zásypového materiálu, rozvodnu elektrické energie, kanceláře, dílny, garáže a informační budovu. Součástí areálu bude také budova pro výtah a větrací šachty. Celkem bude areál zabírat plochu přibližně 0,5 km². Velkou část této plochy bude zaujímat prostor pro uložení vytěžené horniny.



Obr. 28 Provozní (nadzemní) oblast úložiště.

5.2.1 Ochranné bariéry

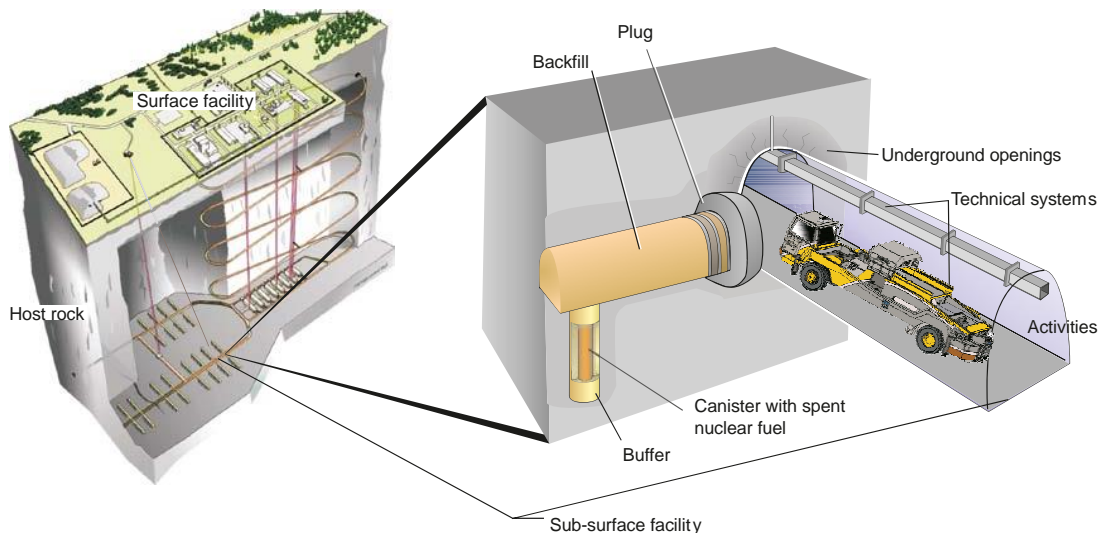
První ochrannou bariéru tvoří sama forma paliva. Uranové palivo se nachází v pevné formě, která se rozpouští ve vodě jen velmi pomalu, což zpomaluje rychlost uvolňování radioaktivních látek. Uranové pelety jsou dále umístěny v palivových tyčích, což představuje další bariéru. Palivové soubory se uzavřou do korozivzdorných kontejnerů (ukládacích souborů) vyrobených z mědi a litiny. Takovýto kontejner chrání palivové soubory před mechanickým namáháním, které se může vyskytnout ve skalnatém podloží. Ukládací obalový soubor po jeho uložení do ukládací šachty je obklopen bentonitovým jílem, takže chrání soubor před případnými otřesy ve skalnatém podloží a zpomaluje pohyb vody v blízkosti ukládacího souboru. Posledním ochrannou bariérou je samotné skalnaté podloží, ve kterém se celý ukládací komplex nachází. Systém bariér v projektu úložiště KBS-3 je znázorněn na Obr. 29.



Obr. 29 Systém bariér u projektu úložiště SKB-3.

5.2.2 Způsob ukládání

Referenčním modelem ukládání projektu KBS-3 je umístění ukládacích obalových souborů do vertikálních šachet uvnitř ukládacích tunelů. Ukládací soubory jsou v šachtách obklopeny vrstvou bentonitu. Po zaplnění všech šachet v ukládacím tunelu, je tunel zasypán a uzavřen (viz Obr. Obr. 30). Společnost SKB zkoumá také možnost ukládat tyto soubory horizontálně.

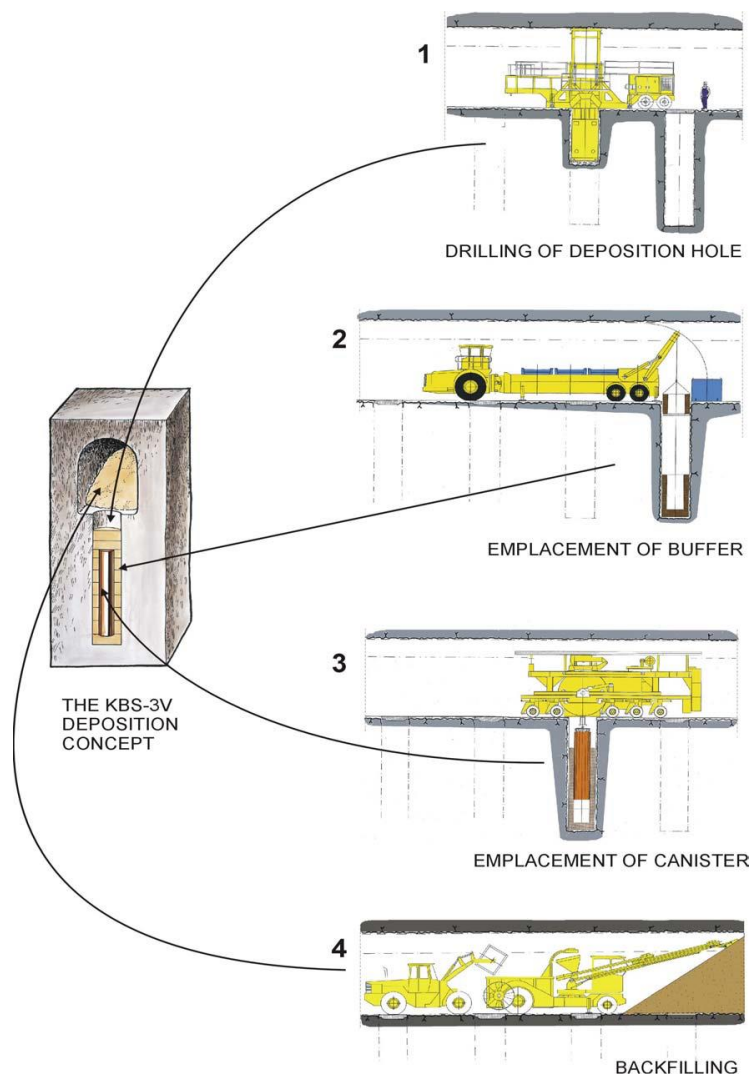


Obr. 30 Referenční model ukládání vyhořelého jaderného paliva v projektu KBS-3.

Obecně lze ukládání v úložišti rozčlenit do následujících bodů (viz Obr. 31):

- vyhloubení tunelů použitím běžných metod,
- postupné ukládání ukládacích souborů do šachet vrtaných na dně ukládacích tunelů,

- zajištění stínění ukládacích souborů v průběhu všech manipulací při procesu ukládání,
- umístění tlumící vrstvy z vysoce kompaktního bentonitu okolo ukládacího souboru,
- zasypaní po ukončení uložení ukládacích souborů v ukládacích tunelech směsí bentonitu a drcené skály.



Obr. 31 Postup ukládání kontejnerů s vyhořelým jaderným palivem do úložiště SKB.

5.2.3 Ukládací obalový soubor

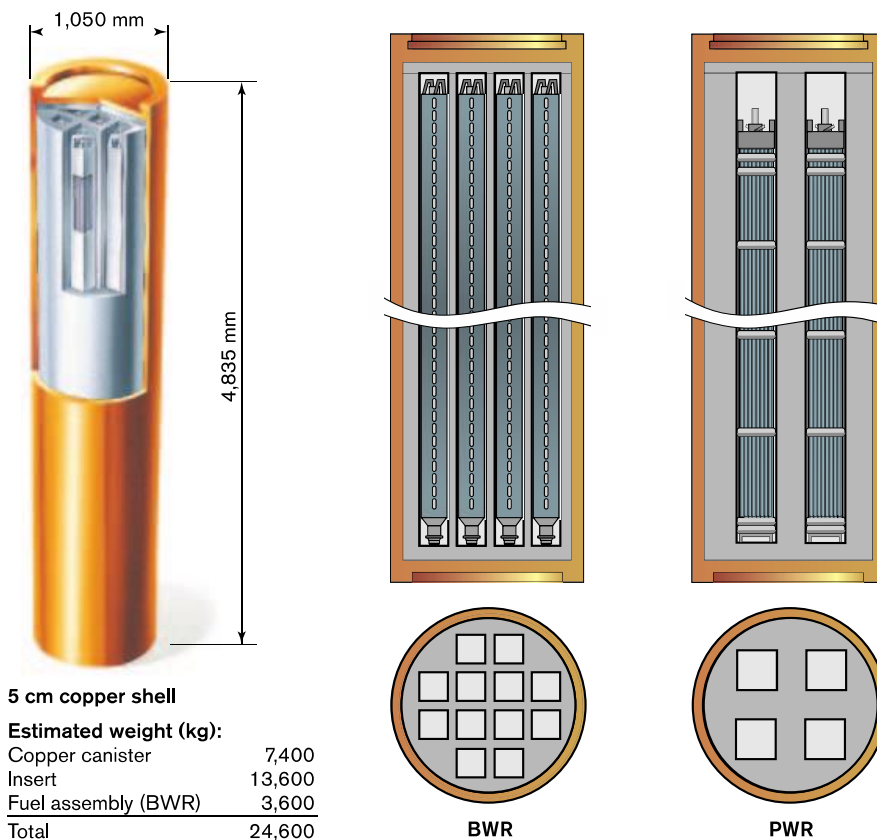
Ukládací obalové soubory představují masivní kovové kontejnery, jejichž vnitřní část je vyrobena z tvárné grafitické litiny a vnější část je vyrobena z mědi. Společně s vyhořelým palivem ze čtyř provozovaných jaderných elektráren a z jedné elektrárny ve vyřazování, bude ke konečnému uložení potřeba přibližně 6 000 ukládacích souborů.

Konstrukční materiály, konstrukce, výrobní metody a technologie uzavření ukládacích obalových souborů byly důkladně prozkoumány tak, aby se dosáhlo vytvoření mechanicky

a chemicky odolného kontejneru, který může zůstat těsný hluboko uvnitř skalního podloží po dobu nejméně 100 000 let. Těsnost kontejneru je zajištěna vysokými nároky na zajištění kvality při výrobě a rozsáhlými kontrolami.

Ukládací soubor je válcového tvaru s měděným pláštěm a nosnou vložkou (viz Obr. 38). Měď byla vybrána kvůli její odolnosti vůči korozi v chemickém prostředí, které bude v úložišti. Jelikož měď nemůže poskytnout požadovanou mechanickou pevnost je doplněna o nosnou vložku, která poskytne dostatečnou mechanickou pevnost. Jako nejvhodnější materiál pro vložku je v současnosti považována litina, která je dostatečně silná, aby odolala mechanickému namáhání, kterému může být soubor uvnitř skalnatého podloží vystaven. Litina byla vybrána, protože je houževnatá a pevná, a tudíž je ideálním materiálem pro vnitřní část ukládacího souboru. Litina se také snadněji odlévá než řada jiných materiálů, jako je například ocel.

Všechny ukládací soubory budou mít stejné vnější rozměry, což usnadní manipulace a zajistí bezpečné, efektivní a spolehlivé nakládání s nimi. Palivové soubory z reaktorů BWR a PWR budou ukládány vždy zvlášť do ukládacích souborů, což je dáno různými rozměry palivových souborů. V důsledku toho jsou navrženy dvě verze vložek, jedna přizpůsobena palivovým souborům z reaktorů BWR a druhá z PWR. Výška obalového souboru je určena délkou nejvyššího palivového souboru (BWR). Do ukládacího souboru bude možné uložit 12 palivových souborů v případě BWR paliva a 4 palivové soubory v případě PWR paliva (viz Obr. 32). Délka souboru je 4 835 mm a průměr 1 050 mm, tloušťka měděného pláště je 49 mm. Bližší technická specifikace ukládacího souboru je podána ve zprávě [2].



Obr. 32 Ukládací soubor na vyhořelé jaderné palivo.

5.2.4 Bentonitová bariéra

Měděné ukládací soubory budou od okolní skály izolovány tlumícím materiálem ve formě řady bloků vylisovaných z bentonitu. Bloky budou umístěny v ukládacích jámkách, tak aby oddělovaly ukládací obalový soubor od skalního podloží.

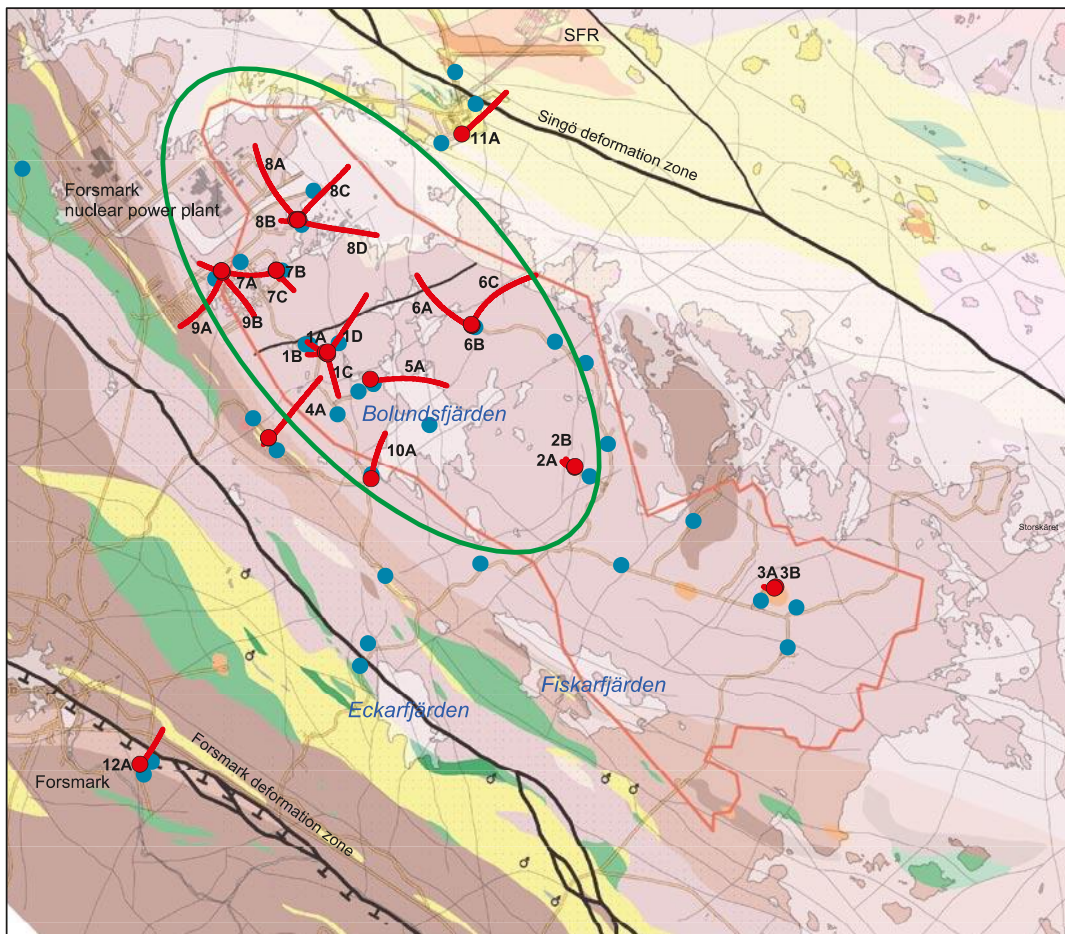
Bentonit je v přírodě se vyskytující druh jílu, který významně expanduje, přijde-li do styku s vodou a zároveň neumožňuje její prosakování. Expandující bentonit je tak schopen vyplnit prostory obklopující ukládací obalový soubor a zároveň zabránit styku vody s měděným pláštěm souboru. V případě netěsnosti ukládacího obalového souboru také zabrání přístupu radioaktivních látek ke skalnatému podloží.

Bentonitová bariéra ochrání také ukládací soubory před mechanickým poškozením v případě možných změn ve skalním podloží. Bentonit se totiž chová jako plastelína, v případě nutnosti se ohýbá, ale zároveň může díky své plasticitě obnovit původní tvar. Kromě toho rychle vyplňuje a uzavírá praskliny, které mohou vznikat při pohybu skalnatého podloží. Bližší specifikace tlumícího materiálu a jeho přípravy je popsána ve zprávě [3].

5.2.5 Skalnaté podloží

Skalnaté podloží chrání ukládací soubory proti externím vlivům, zajišťuje mechanicky a chemicky stabilní podmínky k ukládání a omezuje množství podzemní vody, která by mohla přijít do styku s ukládacími soubory. Výsledky výzkumu ukazují, že uvnitř skalního podloží (v hloubce několik 100 m) je spodní voda prakticky zbavena kyslíku a teče velmi pomalu, což je také důvod, proč její korozivní efekty jsou velmi malé. Skála je také schopna účinně stínit záření z obalových souborů, jelikož skála o tloušťce dva metry je dostatečná k zeslabení záření na úroveň přirozeného pozadí. Pokud by se vyhořelé palivo, v důsledku nepředvídatelných okolností, dostalo do kontaktu s podzemní vodou, látky rozpuštěné ve vodě by zůstaly zadrženy především v bentonitu a skalním podloží obklopující ukládací soubory.

Prioritní oblast pro konečné úložiště se rozkládá jihovýchodním směrem od jaderné elektrárny Forsmark, asi 3 km směrem k Bolundsfjärden (viz Obr. 33). Úložiště bude umístěno v hloubce asi 470 m v této prioritní oblasti, zatímco zařízení na povrchu a s tím související aktivity mohou být umístěny ve stávajícím průmyslovém areálu. Zkoumané podloží ve vybrané oblasti Forsmark je geologicky homogenní a převládá zde, od povrchu až do hloubky nejméně 1000 m, metagranit s vysokým obsahem křemene. Skála má vysokou tepelnou vodivost a dobré pevnostní charakteristiky. Bližší charakteristiky vybrané lokality lze nalézt ve zprávě [4].



- Priority area for complete site investigation
- Candidate area
- Cored borehole, horizontal projection
- Percussion boreholes

0 500 1 000 m
© Lantmäteriet
Date: 2007-08-21, 13:00



Dominant rock type

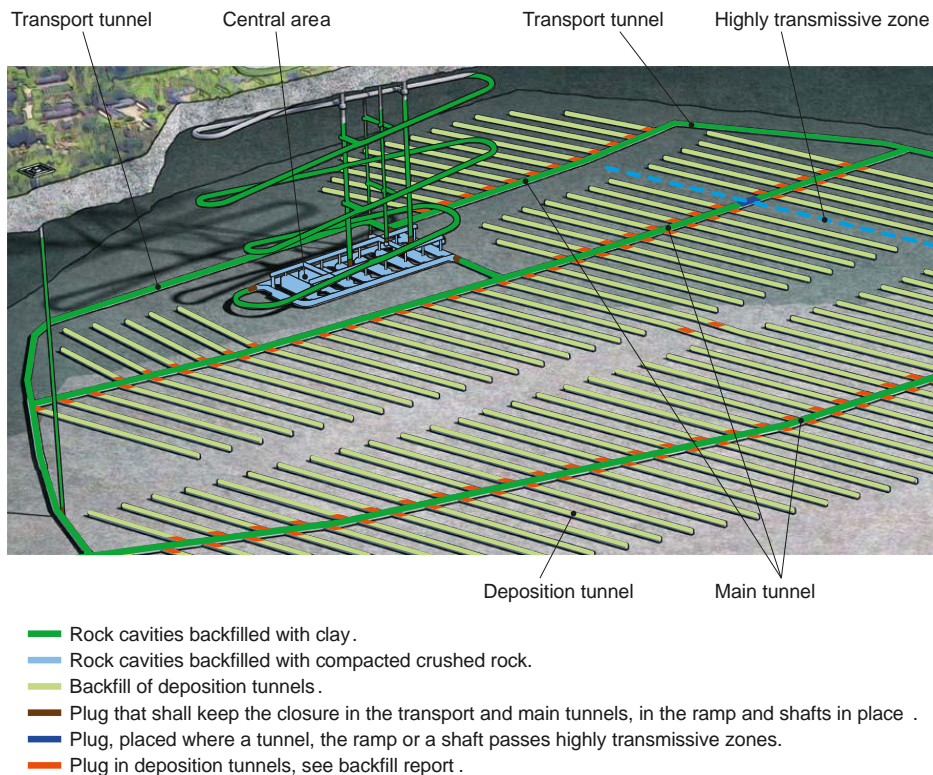
- Pegmatite, pegmatite granite
- Granite, granodiorite and tonalite, metamorphic, fine- to medium-grained
- Granodiorite, metamorphic, aplitic
- Granite to granodiorite, metamorphic, medium-grained
- Granodiorite, metamorphic
- Tonalite to granodiorite, metamorphic

- Diorite, quartz diorite and gabbro, metamorphic
- Ultramafic rock, metamorphic
- Magnetite mineralization associated with calc-silicate rock (skarn)
- Sulphide mineralization
- Felsic to intermediate volcanic rock, metamorphic
- ⋯ Mixed and/or heavily foliated rock (heavy ductile deformation)
- Major deformation zones

Obr. 33 Geologické charakteristiky oblasti budoucího úložiště.

5.2.6 Zaplnění a uzavření úložiště

Úložiště bude uzavíráno postupně tak, jak budou zaplňovány jednotlivé ukládací šachty a tunely. Ukládací tunely budou zaplněny zásypovým materiálem a uzavřeny uzávěry z vhodného materiálu. Ukázka způsobu uzavření úložiště je na Obr. 34, bližší informace lze získat ve zprávě [5].



Obr. 34 Ukázka uzavření (zásyp a uzávěry) úložiště v jeho jednotlivých částech.

5.3 Podzemní součásti úložiště

Podzemní část úložiště bude obsahovat centrální servisní oblast, oblast ukládání pro počáteční fázi provozu a oblast ukládání pro standardní provoz. Ukládací tunely potřebné pro uvedení úložiště do provozu budou vyhloubeny ještě před zahájením ukládání. Předpokládá se, že většina ukládacích tunelů bude ražena, nicméně ražba bude probíhat postupně. Jakmile bude zahájen pravidelný provoz, přibližně 10 tunelů bude vyhloubeno a připraveno v jedné větvi ukládací oblasti. Asi 5 tunelů bude zaplněno v jednom roce a souběžně bude vyhloubeno dalších pět tunelů v paralelní větvi. Tímto způsobem budou práce pokračovat s postupnou ražbou přibližně 5 tunelů za rok, dokud nebude všechno palivo uloženo (v cca 150 tunelech). Co se týká přístupových cest z nadzemí do hlubinného úložiště, počítá se jak s šachtami, tak i rampou pro přepravu těžkých a objemných zařízení.

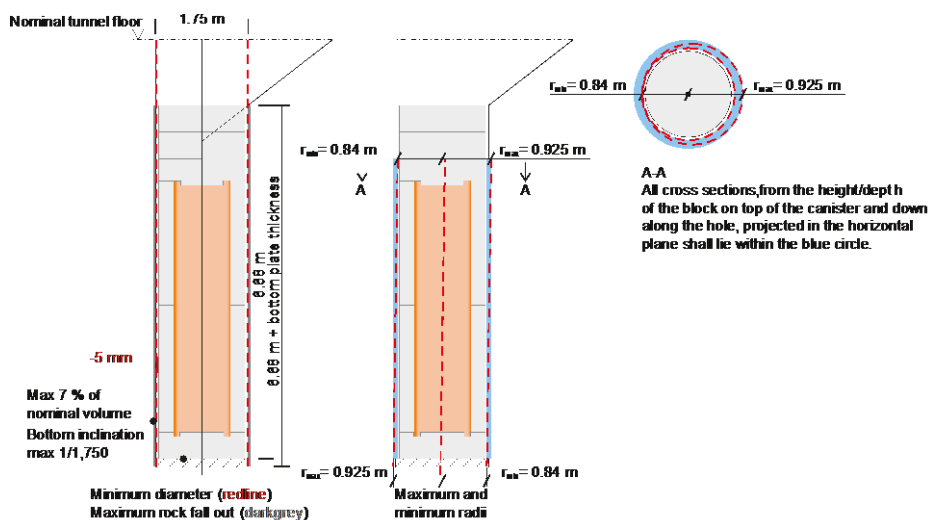
5.3.1 Přístupové cesty

Přístup do podzemí bude zajištěn pomocí přístupové rampy a šachtou s jedním nebo dvěma výtahy. Další šachty budou sloužit k přívodu odvodu vzduchu a bude se nacházet na konci ukládací oblasti.

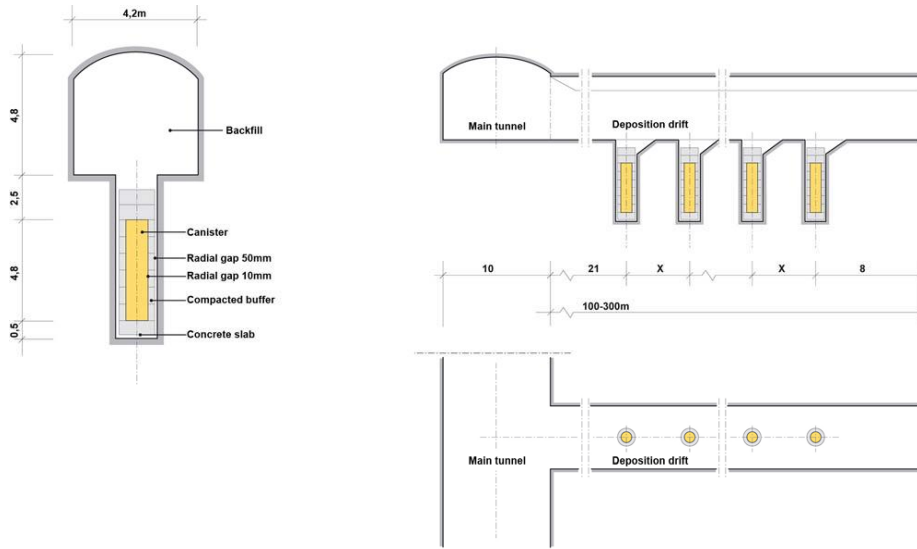
5.3.2 Ukládací tunely

Ukládací tunely jsou připojeny k servisní oblasti tunely pro dopravu, komunikaci, větrání a inženýrské sítě. Ukládací šachty jsou přibližně 8 m hluboké a mají průměr 1,75 m (viz Obr. 41). Celkový objem vyhloubené horniny či skály se bude pohybovat okolo 1 850 000 m³ a vyhloubený objem ukládacích tunelů bude představovat cca 50% celkového vytěženého objemu. Ukládací soubory jsou uloženy v tlumící vrstvě z vysoce ztuhnutého bentonitu, dodaného z výrobní budovy přes rampu. Tunely jsou od sebe vzdáleny 40 m a prostor mezi ukládacími šachtami je 6 m.

Oblast ukládání je určena pro uložení cca 6 000 ukládacích souborů s vyhořelým jaderným palivem. Pro takovéto množství odpadu je nutné vyhloubit více než 150 ukládacích tunelů, přičemž každý ukládací tunel bude obsahovat přibližně 40 ukládacích šachet. Tunely budou rovné a rovnoběžné a budou propojeny dvěma hlavními komunikačními tunely. Délka ukládacích tunelů by měla být přibližně 265 m. Nicméně skutečná délka se může měnit podle aktuální potřeby. Na Obr. 35 je znázorněna geometrie ukládací šachty a na Obr. 36 ukládacího tunelu.



Obr. 35 Geometrie ukládací šachty (černá tenká čára) a přijatelné odchylky v geometrii (červená tečkovaná čára).



Obr. 36 Rozmístění ukládacích šachet v ukládacím tunelu.

5.3.3 Centrální servisní oblast

Centrální servisní oblast (viz Obr. 40) v úložišti se bude skládat ze sedmi sálů a tunelů-šachet. Tato oblast bude mít rozlohu 275 x 110 m. Všechny sály budou na svém konci napojeny ke dvěma paralelním tunelům oběma tunelům. Bude se jednat o tyto sály:

1. Sál pro překládku ukládacích souborů z transportních kontejnerů do stínících obalů, součástí je i ukládací stroj.
2. Sál, který bude obsahovat dílnu a sklad. V dílně bude možné provádět drobné údržbářské práce a opravy.
3. Výtahový sál připojený přes šachtu k výtahové a ventilační budově nacházející se v nadzemní části.
4. Ventilační sál, do kterého je veden čerstvý z ventilační budovy nacházející se v nadzemní části. Vzduch je rozváděn do jednotlivých sálů, na rampu a do oblasti ukládání.
5. Sál s elektrorozvodnou.
6. Sál pro parkování vozidel a skladování baterií.
7. Odvodňovací sál se dvěma nádržemi pro sběr vody z podzemních oblastí.

5.3.4 Přístupová rampa

Za běžného provozu se bude používat rampa pro přepravu transportních kontejnerů s ukládacími soubory do podzemní části úložiště. Rampa bude 5,5 m široká a 5 m vysoká, průměrný sklon rampy bude 1:10. Rampa má několik míst bez jakéhokoliv sklonu a o šířce 10 m. Délka rampy je asi 5 km.

5.3.5 Šachty

K dispozici bude několik šachet spojující nadzemní a podzemní část:

- výtahová šachta,
- dvě větrací šachty do centrální servisní oblasti,
- šachta pro transport vytěžené horniny, tlumícího a zásypového materiálu,
- jedna odvětrávací šachta na konci ukládací oblasti.

5.4 Odhad nákladů

Odhad nákladů byl proveden pro předpokládané uložení veškerého vyhořelého jaderného paliva z švédských jaderných elektráren a výzkumných reaktorů. Celkem se bude jednat o cca 6 000 ukládacích souborů pro palivo s ekvivalentem 11 700 t TK. Hodnoty uvedené v tabulce odpovídají cenové úrovni v roce 2010. V ceně není zahrnut závod na uzavírání vyhořelého jaderného paliva do ukládacích obalových souborů a jejich výrobu.


Tab. 2 Předpokládané náklady na výstavbu a provoz úložiště ve Švédsku v mil. SEK [6]

Investiční náklady	14 790
Zařízení mimo lokalitu úložiště (včetně provozu)	260
Provozní oblasti na povrchu	8 690
Úložiště	6 100
Provoz a údržba	7 430
Provozní oblasti na povrchu	7 110
Úložiště	320
Zasypávání a utěšňování úložiště	1 720
Vyřazování z provozu a uzavření	2 520
Provozní oblasti na povrchu	180
Úložiště	2 340
Celkem	26 460

Při přepočtu 9,1 SEK za 1 EUR (v roce 2014) by celková cena činila 2 907,7 miliónů EUR.

5.5 Použitá dokumentace

- [1] SKB: Design and production of the KBS-3 repository, Technical Report TR-10-12, 2010.

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

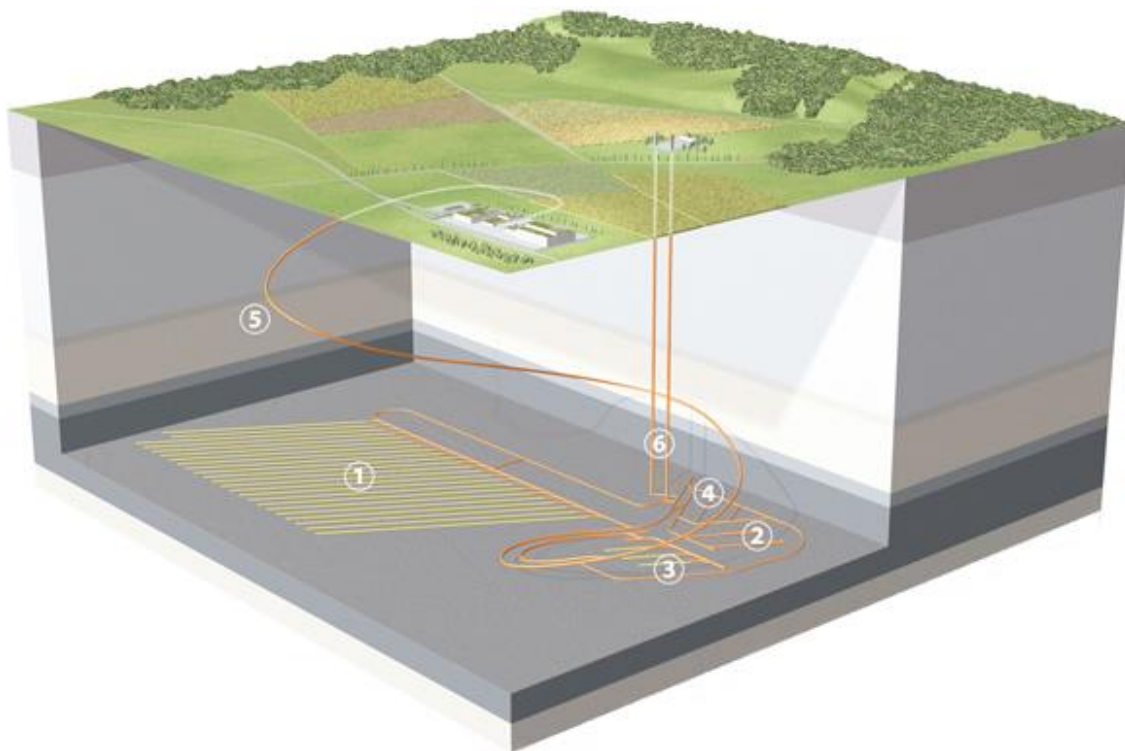
- [2] SKB: Design, production and initial state of the canister, Technical Report TR-10-14, 2010.
- [3] SKB: Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, Technical Report TR-10-47, 2010.
- [4] SKB: Final repository for spent fuel in Forsmark – basis for decision and reasons for site selection, SKBdoc 1221293, 2009.
- [5] SKB: Design, production and initial state of the closure, Technical Report TR-10-17, 2010.
- [6] SKB: Costs starting in 2012 for the radioactive residual products from nuclear power, Basis for fees and guarantees during the period 2012–2014, Technical Report TR-11-05, 2010.

6 Projekt hlubinného úložiště ve Švýcarsku

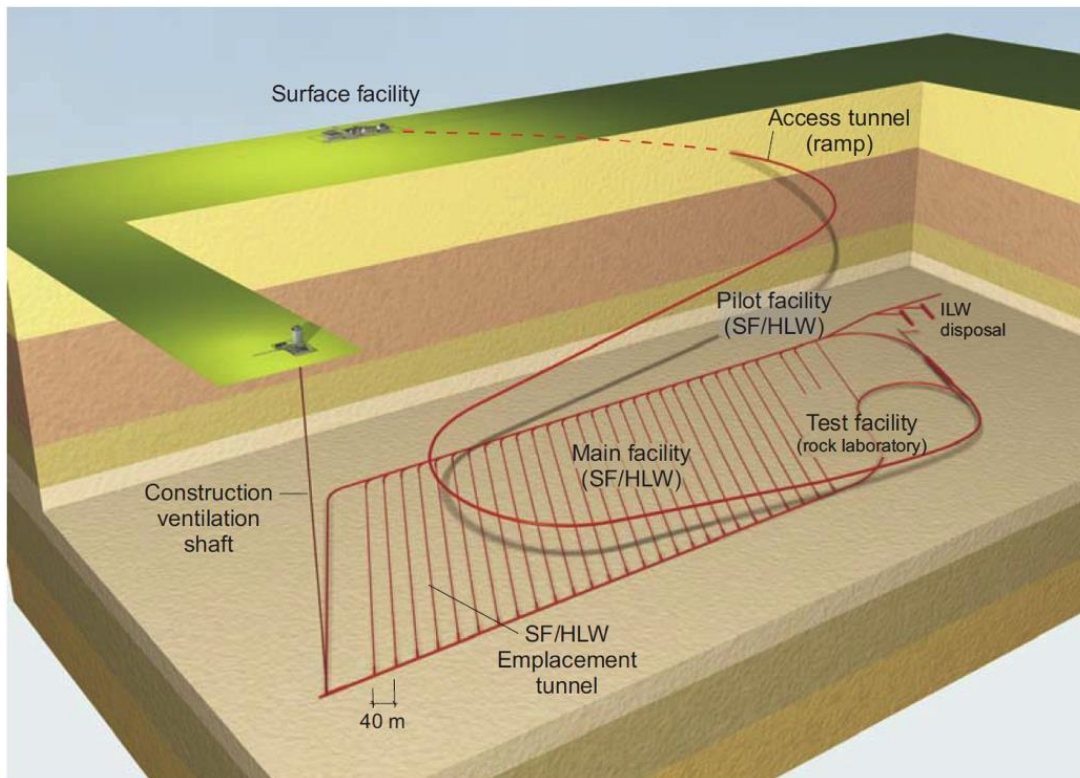
Za řešení problematiky nakládání s radioaktivním odpadem je ve Švýcarsku zodpovědná společnost NAGRA (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle). Do hlubinného úložiště bude jak vyhořelé jaderné palivo z jaderných elektráren (cca 3 220 t TK), tak i vitrifikovaný vysoce aktivní odpad z přepracovacích závodů ve Francii a Velké Británii, kam byla část paliva zaslána na přepracování (224 t HLW z ekvivalentních cca 1 120 t TK přepracovaného vyhořelého paliva). Úložiště by mělo sloužit i pro středněaktivní odpad (ILW). V současnosti vybrány tři oblasti s vhodnou geologickou formací, jedná se o Zürich Nordost, Northof Lägern a Jura Ost.

6.1 Základní charakteristika úložiště

Při přípravě konceptu úložiště byly brány v úvahu jak základní principy ukládání HLW, tak i geologická oblast. Celkový pohled na úložiště je znázorněn na Obr. 37 a Obr. 38.

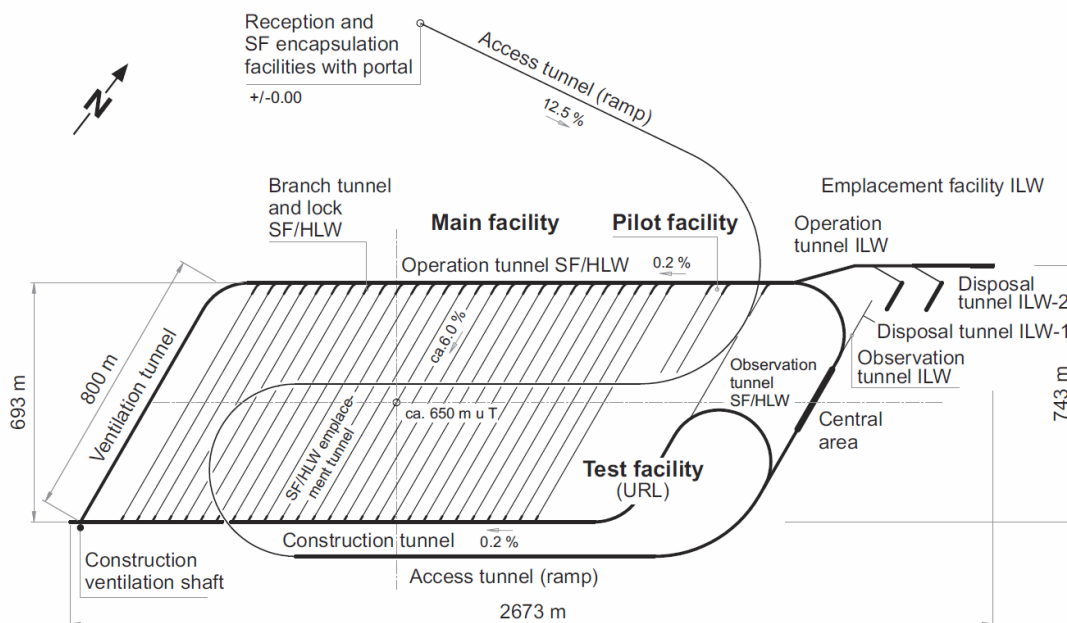


Obr. 37 Celkový pohled a základní uspořádání úložiště: Hlavní zařízení pro ukládání SF/HLW. 2. Úložiště ILW. 3. Pilotní zařízení. 4. Testovací zóna. 5. Přístupový tunel. 6. Ventilační a konstrukční šachta.



Obr. 38 Detail podzemní části úložiště.

Základními prvky úložiště jsou ukládací tunely uvnitř hostitelské horniny, několik pomocných podzemních zařízení souvisejících s výstavbou úložiště, jeho provozem, odvětráváním, sledováním a zasypáváním ukládacích tunelů. Dále povrchová zařízení pro nakládání s odpady jejich a umístění do obalových souborů a další infrastruktura nezbytná k provozu a údržbě úložiště. Detaily jednotlivých částí úložiště vyplývají z Obr. 39.

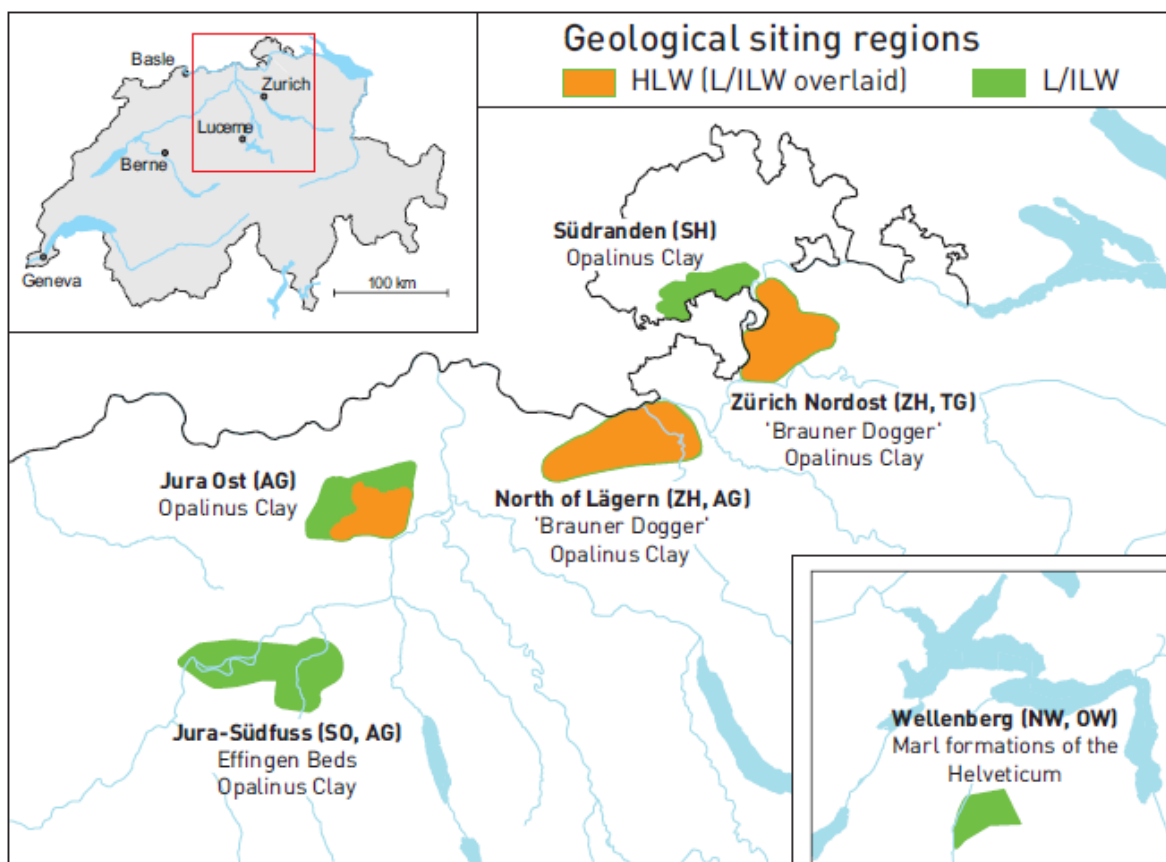


Obr. 39 Přehled součástí úložiště pro vyhořelé jaderné palivo/HLW a ILW

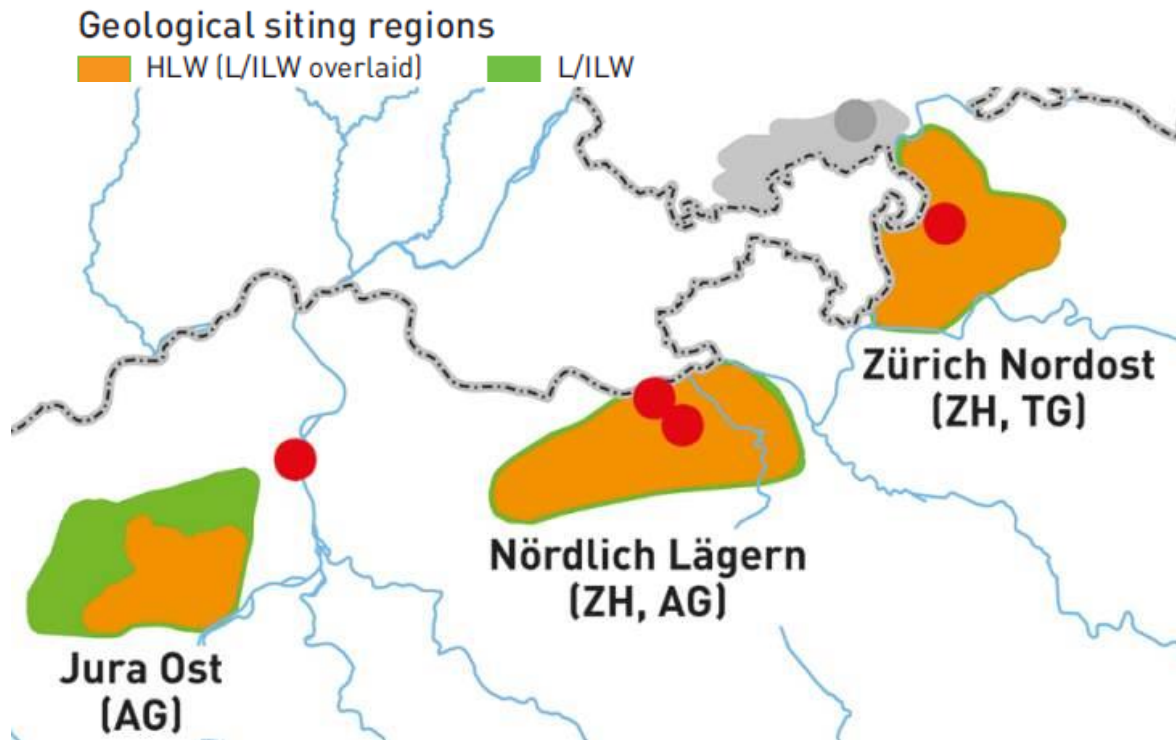
6.1.1 Výběr lokality

V listopadu 2011 v první fázi procesu výběru lokalit bylo navrženo šest lokalit: pro dvě různá úložiště: jedno pro nízko a středně velké odpady (LLW / ILW), druhé pro vysokoaktivní odpady (HLW).

Druhá fáze procesu výběru lokalit, která začala na konci roku 2011, měla za cíl zúžit vyšetřovaná místa na nejméně dvě lokality pro každé z úložišť. Nagra v lednu 2015 navrhla, aby byla ve třetí závěrečné fázi procesu výběru lokalit provedena další šetření v navrhovaných regionech Zürich Nordost a Jura Ost. Další čtyři regiony, o nichž se uvažovalo ve druhé fázi – Südranden, Nördlich Lägern, Jura-Südfuss a Wellenberg – budou označeny jako rezervní. V prosinci 2016 však Švýcarský federální inspektorát jaderné bezpečnosti navrhl, aby byl do závěrečné fáze zařazen také region Nördlich Lägern. [5]



Obr. 40 Druhá fáze výběru lokalit pro dvě úložiště (jedno pro nízko a středně aktivní odpady (LLW / ILW), druhé pro vysokoaktivní odpady (HLW)) – 6 lokalit.[5]

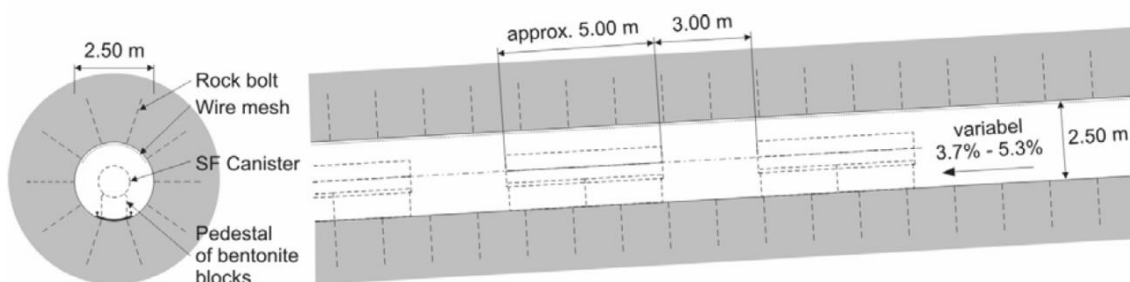


Obr. 41 Třetí fáze výběru lokalit pro dvě úložiště (jedno pro nízko a středně velké odpady (LLW / ILW), druhé pro vysokoaktivní odpady (HLW)) – 3 lokality vybrané pro další průzkumné práce [5]

6.1.2 Ukládací tunely

Ukládací tunely jsou umístěny ve střední rovině formace hornin a jsou orientovány především s ohledem na horizontální namáhání. Je jasné, že koncept horizontální umístění představuje nejvýhodnější řešení z hlediska omezené tloušťky hostitelské sedimentární horniny.

V případě ukládacích tunelů není uvažována žádná speciální výstelka. Toto bude vyžadovat příznivé (minimální poruchy) podmínky v hostitelské hornině, omezit hlavní napětí kolmé k osám ukládacích tunelů a minimalizovat čas mezi výkopem a zasypáním tunelu. Namísto vložky se počítá se systémem šroubů a drátěné sítě tak, jak je zobrazeno na Obr. 42. Nicméně v případě méně příznivých geotechnických podmínek, lze uvažovat alternativu v podobě vložky ze stříkaného betonu nebo jiné podobné řešení.



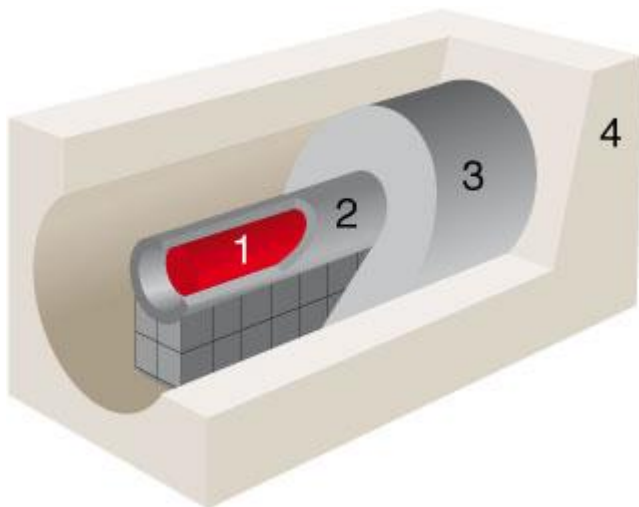
Obr. 42 Detail řezu ukládacího tunelu.

Výstavba ukládacích tunelů bude prováděna pomocí otevřených razících štítů, které se používají pro ražbu v tvrdé skále. Přístup k stavebním pracím bude zajištěn pomocí šachty a stavebního tunelu. Část ve výstavbě bude oddělena od provozního tunelu a všech aktivit s jadernými odpady.

6.1.3 Systém bezpečnostních bariér

Systém bezpečnostních bariér bude vycházet ze tří inženýrských bariér a jedné geologické bariéry.

V případě vyhořelého jaderného paliva reprezentuje první inženýrskou bariéru pokrytí palivových proutků s uranovými peletami. Co se týká vysoce aktivních produktů štěpení z přepracovacích závodů, představuje první bariéru vitrifikovaná matrice (viz Obr. 43). Dalšími inženýrskými bariérami je masivní ocelový kontejner (druhá bariéra, možnou alternativou je např. ocelová vložka s měděným pláštěm) a bentonitové výplně (třetí bariéra). Bentonitová výplň bude tvořena hybridním systémem: kontejnery budou umístěny na prefabrikovaných podstavcích z bentonitových bloků a zbytek ukládacího tunelu bude vyplněn (zasypán) bentonitovým granulátem. Geologickou bariéru představuje stabilní skalní formace.



Obr. 43 Bezpečnostní bariéry v úložišti vysoce aktivního odpadu: 1. Vitrifikovaná matrice, obsahující radioaktivní materiál; 2. Kovový kontejner; 3. Zásyp s bentonitem; 4. Hostitelská hornina.

6.1.4 Ukládání odpadu

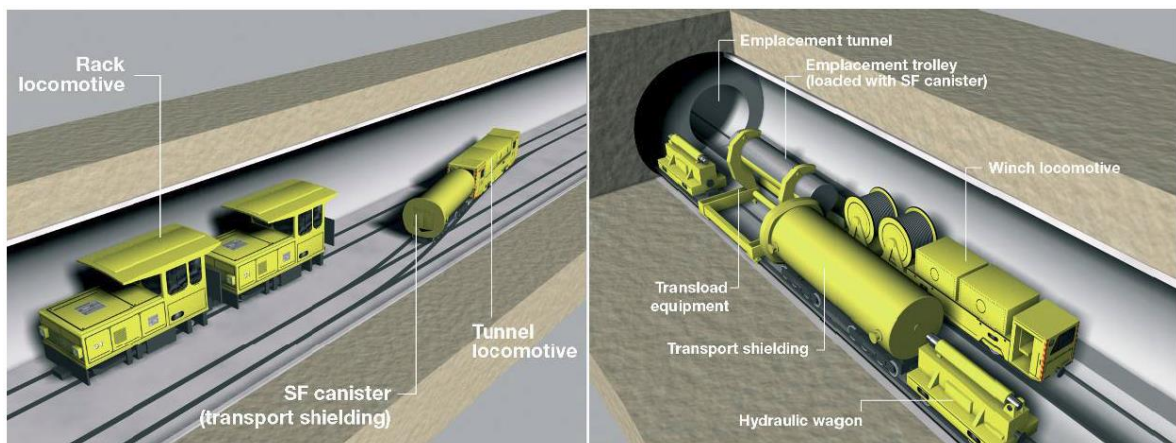
Z Obr. 22 a 23 vyplývá, že k ukládacím tunelům se přistupuje pomocí přístupového tunelu (rampy) a pomocí šachty, možné jsou i alternativy jako jsou vícenásobné nebo šikmé šachty. Co se týká konceptu přístupu, tak se vychází ze značných zkušeností z těžebního průmyslu. Výhodou navrženého modelu přístupu je možnost oddělení povrchového zařízení od oblasti podzemního ukládání a také možnost přepravy těžkých nákladů.

Podzemní přeprava obalových souborů s odpady je v referenčním případě prováděna kolejovým systémem a transportním kontejnerem. Podélná část rampy může mít maximální

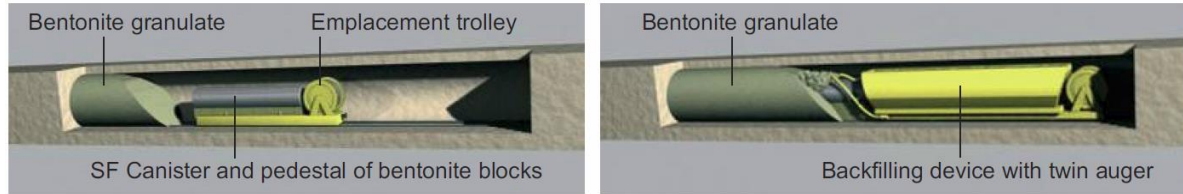
sklon až 12,5 %, což vyžaduje ozubnicovou dráhu a adekvátní minimální zakřivení ($R \geq 250$ m).

Umísťování odpadu je prováděno pomocí speciálně navrženého zařízení, které umožňuje dálkové řízení. Zaplnění ukládacích tunelů bentonitem je také dálkově řízené. Všechna ukládací zařízení se pohybují na železničních kolejnicích a jsou poháněna elektrickými motory a navijáky, jelikož ukládací tunely mají sklon mezi 4 až 6% v závislosti na sub-horizontální vrstvě hostitelské horniny. Následující body a příslušné obrázky ilustrují jednotlivé posloupnosti ukládaní:

- Přesun ukládaných souborů z povrchu do úrovně úložiště se provádí běžnými ozubnicovými lokomotivami. V centrální oblasti v úrovni úložiště je vůz nesoucí ukládaný soubor v transportním kontejneru přesunut na ukládací lokomotivu (viz Obr. 44 vlevo).
- Podstavec z bentonitových bloků je umístěn na ukládacím vozíku v rozšířené pobočce každého ukládacího tunelu (viz Obr. 44 vpravo). Pobočka tunelu je vybavena dvojitou dráhou a uzávěrem.
- Transportní kontejner s ukládacím kontejnerem obsahujícím odpad je umístěn vedle ukládacího vozíku. Poté co je dokončena veškerá příprava, operátoři opustí uzávěr a všechny následující činnosti budou prováděny na základě dálkově řízených operací. Ukládací kontejner je pak vytlačen z transportního kontejneru pomocí hydraulického zařízení (hydraulický vůz) a přesunut na ukládací vozík pomocí překládacího zařízení (Obr. 44 vpravo).
- Ukládací vozík je poháněn gravitací a řízen navijákem lokomotivy uvnitř uzávěru do ukládací pozice (viz Obr. 45 vlevo). V ukládací pozici je podstavec a ukládací kontejner postupně spuštěn a ukládací vozík je vytažen zpět do uzávěru.
- Poté co je ukládací kontejner s odpadem uložen, je zbytek tunelu vyplněn bentonitovým granulátem pomocí dvojitého šneka a nákladního vozu, který je kontinuálně tažen zpět pomocí navijáků při postupném zasypávání (viz Obr. 45 vpravo).



Obr. 44 Ukládání souborů s odpadem.

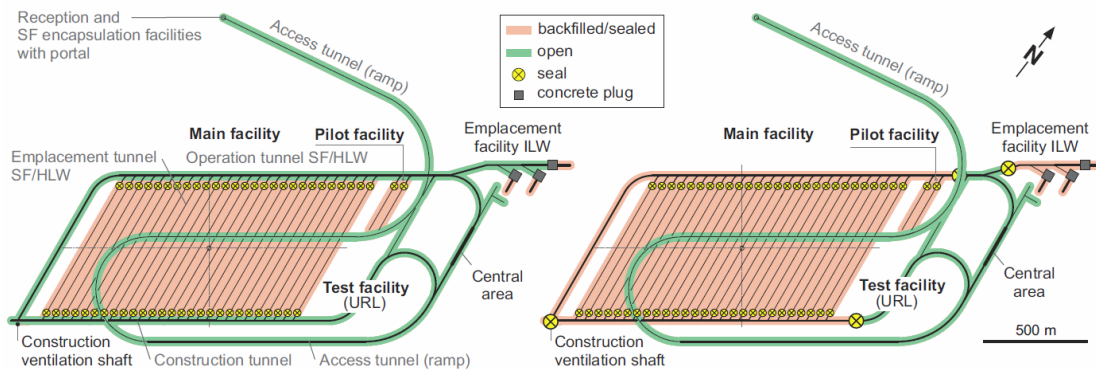


Obr. 45 Ukládací vozík s odpadem v ukládací pozici (vlevo). Nákladní vůz umísťující bentonitový granulát v ukládacím tunelu, poté co byl odpad umístěn.

6.1.5 Uzavření úložiště

V souladu s konceptem „monitorování dlouhodobého geologického úložiště“ se předpokládá uzavírání úložiště v několika krocích. V první fázi (v průběhu normálního provozu) jsou všechny ukládací tunely zasypány a utěsněny společně s odpadem (viz Obr. 46 vlevo).

V období monitorování jsou přístupové tunely k ukládacím tunelům zasypány, v tomto období budou k dispozici pouze pilotní a zkušební zařízení (viz Obr. 46 vpravo). Po delším monitorovacím období jsou zbývající otevřené tunely zasypány a utěsněny, nyní je přístupné pouze sledovací zařízení, které umožňuje monitorování a řízení pilotního a zkušebního zařízení. Následně pokračuje dlouhodobé monitorování z povrchu.



Obr. 46 Vlevo: situace po ukončení ukládání odpadu a uzavření všech ukládacích tunelů; vpravo: situace poté, co je hlavní ukládací zařízení uzavřeno a zaplombováno a pouze pilotní a testovací zařízení jsou přístupná v průběhu delšího monitorovacího období.

6.2 Povrchová zařízení

Infrastruktura na povrchu hlubinného úložiště zahrnuje povrchová zařízení s přístupovými cestami, a pokud to bude možné, tak i železniční spojení. Součástí by měla být i zařízení šachet. Povrchová zařízení budou sloužit především jako portál do úložiště. Bude zde docházet k příjmu odpadu a jeho přípravě k uložení. Ukázka konceptu povrchových zařízení je uvedena na Obr. 47.

K povrchovým zařízením bude patřit administrativní budova, návštěvnické centrum, různé provozní budovy a také závod na uzavření HLW nebo vyhořelého jaderného paliva do ukládacích obalových souborů. V tomto závodě bude vyhořelé jaderné palivo nebo vitrifikovaný vysoce aktivní odpad přemístěn z transportních a skladovacích kontejnerů do

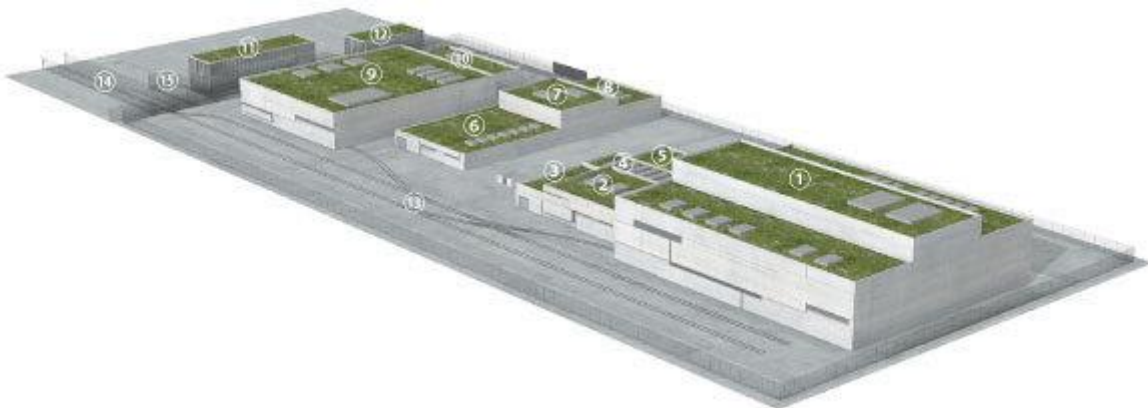
ukládacích kontejnerů. Budova závodu musí splňovat velmi přísné bezpečnostní požadavky

a musí odolat i významným dopadům, jako je zemětřesení nebo pád letadla. Součástí povrchových zařízení bude přístupová budova do úložiště, odkud bude transportován odpad do podzemní ukládací oblasti.

Pro povrchová zařízení bude potřeba plocha přibližně 8 hektarů o šířce cca 150 m. Konečná lokalita, rozmístění i řešení budov bude teprve určeno společností NAGRA na základě diskuze s okolní populací.

Dalšími komponentami povrchové infrastruktury úložiště budou šachty zajišťující ventilaci a transport materiálu. Věže těchto šachet a související drobné stavby budou vyžadovat plochu přibližně 1 hektar. Také bude potřeba prostor pro uskladnění materiálů vytěžených v průběhu výstavby přístupových a ukládacích tunelů. Některé z těchto materiálů budou opětovně využívány při uzavírání úložiště.

Jakmile bude veškerý odpad uložen, bude úložiště monitorováno po dobu několika desítek let. V této době nebude povrchová infrastruktura již dále vyžadována a bude moci dojít k její demolici. Později budou zbourány i poslední budovy, s výjimkou zařízení pro dlouhodobé monitorování.



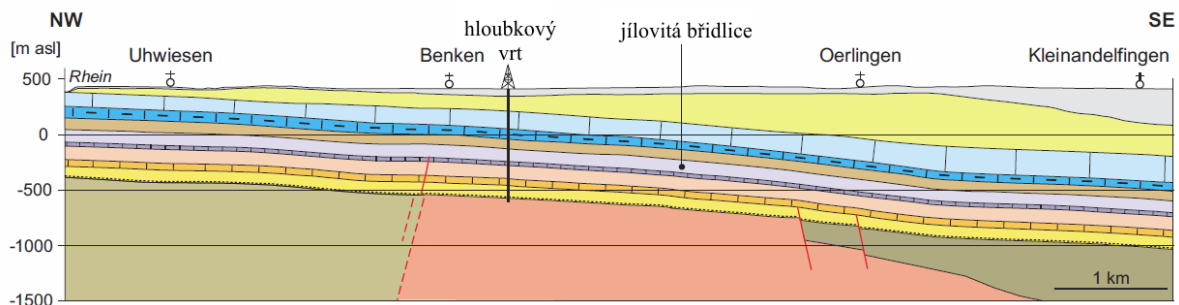
Obr. 47 Koncept povrchových zařízení pro úložiště vysoce radioaktivního odpadu:

1. Závod na umístění vyhořelého jaderného paliva a HLW do kontejnerů a jejich uzavírání. 2. Dílny. 3. Budova požární ochrany. 4. Závod pro čištění transportních kontejnerů. 5. Závod pro úpravu a zpracování provozních odpadů a garáže. 6. Přístup do úložiště. 7. Budova elektrických zařízení a rozvodů. 8. Budova vzduchotechniky. 9. Závod na umístění ILW odpadů do kontejnerů a jejich uzavírání. 10. Závod pro zpracování zásypových, výplňových a těsnících materiálů. 11. Administrativní centrum. 12. Návštěvnické centrum. 13. Dopravní terminál. 14. a 15. Zakočení dopravního uzlu pro vlaky a vozidla.

6.3 Geologická oblast

Na základě geologického průzkumu byla vybrána jako nejvhodnější hornina jílovitá hornina zvaná „Opalinus Clay“. Jedná se o jílovitou břidlici, která vznikla ze sedimentů asi před 180 miliony let. Tato formace se nachází v severní části Švýcarska v oblasti Zürcher Weinland.

Průzkum potvrdil její pozoruhodnou homogenitu. Formace horniny je přibližně 100 m silná a nachází se v hloubce mezi 450 až 850 m. Geologický profil oblasti vyplývá z Obr. 48.




Obr. 48 Geologický profil oblasti Zürcher Weinland.

6.4 Odhad nákladů

V následujících tabulkách (Tab. 5 a 6) jsou uvedeny odhady nákladů na jednotlivé implementační fáze úložiště HLW/ILW a závodu na přebalení HLW anebo vyhořelého jaderného paliva do ukládacích obalových souborů. Jedná se o odhad z roku 2011 [3].

Tab. 3 Náklady na jednotlivé implementační fáze úložiště HLW/ILW

Fáze	Náklady [tis. CHF]
Umístění	439 095
Výstavba / provoz zkušební laboratoře	918 088
Výstavba úložiště	1 076 947
Provoz úložiště	884 085
Monitorování	998 353
Uzavření	228 940
Celkové náklady	4 545 508

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

Tab. 4 Náklady na jednotlivé implementační fáze závodu na přebalení HLW anebo vyhořelého jaderného paliva do ukládacích obalových souborů

Fáze	Náklady [tis. CHF]
Umístění	8 876
Výstavba / provoz zkušební laboratoře	36 354
Výstavba	715 060
Provoz	634 141
Monitorování	21 807
Uzavření	-
Celkové náklady	1 416 238

V součtu lze přepočítat celkové náklady uvedené v obou tabulkách dle průměrného kursu CHF/EUR v roce 2014 (=0,8233 CHF/EUR) na hodnotu 4 908,3 mil. EUR.

Podrobné informace specifikující jednotlivé náklady, a především vstupní hodnoty pro odhad těchto nákladů lze naléznout ve zprávě [3].

6.5 Použitá dokumentace

- [1] T. Fries, A. Claudel, H. Weber, L. Johnson, O. Leupin: The Swiss concept for the disposal of spent fuel and vitrified HLW, International Conference on Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository Prague, 2008.
- [2] Projekt Opalinuston – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technical Report NTB 02-02. Wettingen, Switzerland, 2003.
- [3] Fachgruppe Kernenergie der swisselectric: Kostenstudie 2011 (KS11) – Schätzung der Entsorgungskosten der Schweizer Kernkraftwerke.
- [4] Zpráva OECD: Safety of Disposal of Spent Fuel, HLW and Long-lived ILW in Switzerland, 2004.
- [5] World nuclear news (wnn): Swiss repository site search moves to final stage, 23 November 2018: <http://world-nuclear-news.org/Articles/Swiss-repository-site-search-moves-to-final-stage>

7 Projekt hlubinného úložiště na Slovensku

Za řešení problematiky nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem je na Slovensku zodpovědná státní akciová společnost pro vyřazování jaderných zařízení a nakládání s radioaktivními odpady JAVYS a.s. Účelem hlubinného úložiště v podmínkách SR je zajistit likvidaci vyhořelého paliva a radioaktivních odpadů nepřijatelných do povrchového úložiště (JZ RÚ RAO v Mochovcích). Půjde o komplex podzemních děl a objektů na povrchu ve vzájemné součinnosti. Východiskem pro přípravu programu výzkumu a vývoje hlubinného úložiště na Slovensku je dokument „Návrh vnútroštátnej politiky a vnútroštátneho programu nakladania s vyhořetým jadrovým palivom a rádioaktívnymi odpadmi v SR ako aktualizácia strategického dokumentu Stratégia záverečnej časti mierového využívania jadrovej energie v Slovenskej republike“ (návrh schválen usnesením vlády č. 387/2015).

7.1 Základní charakteristika úložiště

Podzemní ukládací systém zahrnuje několik inženýrských a přírodních bariér. Bariéru představuje především upravený odpad včetně svého obalu na finální uložení, umělé tzv. inženýrské izolační bariéry, které vyplňují prostor mezi obalem a hostitelskou horninou a přírodní bariéry tvořené hostitelskou horninou. V konceptu ukládání VJP a RAO v SR se uvažuje o dvou typech přírodní bariéry podle druhu hostitelské horniny. Jde o prostředí krystalické a sedimentární. Toto rozdělení zásadně ovlivňuje konstrukci HÚ, způsob ukládání i tvar a vlastnosti obalových souborů.

Způsob ukládání VJP a RAO v HÚ je závislý na zvolené variantě koncepčního řešení [2]:

- a) druh ukládaného odpadu
 - A – VJP bez demontáže + RAO
 - B – vitrifikát z přepracování VJP + RAO
- b) hostitelské prostředí
 - 1 – ukládání do prostředí krystalických hornin
 - 2 – ukládání do formací sedimentárních (jílových) hornin
- c) způsob dopravy do podzemí
 - X – doprava do podzemí šachtou
 - Y – doprava do podzemí spojovací úklonnou chodbou (po šroubovici)

7.1.1 Návrh základního konceptu řešení

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) – cca 895 m³

- **IRAO** (institucionální radioaktivní odpady) – cca 0,2 m³
Díky existujícím nejistotám v inventarizaci radioaktivních odpadů neuložitelných v JZ RÚ RAO je úložiště dimenzováno na cca 1000 VBK.
- **Vyhořelé jaderné palivo** (s výhledem 60 let jeho produkce) – 4 154 t (33 647 palivových souborů) [2]

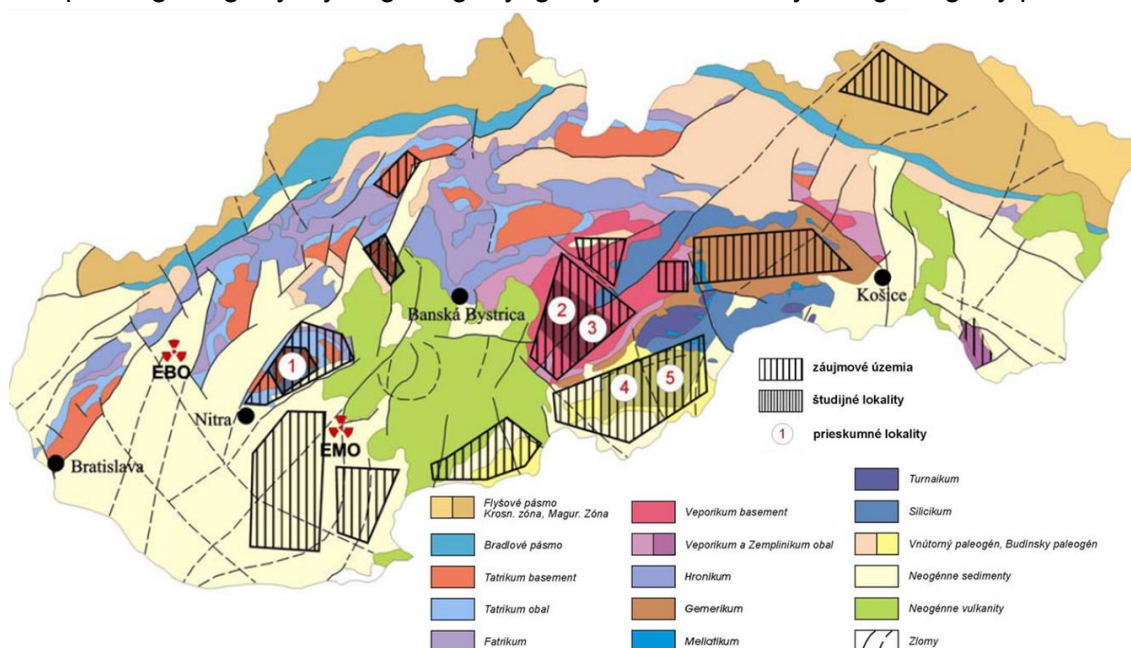
7.1.2 Výběr lokality

Výběr perspektivních geologických struktur se uskutečňoval v 90. letech podle předem schváleného a později postupně inovovaného kritériálního hodnotícího procesu. V hodnotícím procesu při výběru zájmových území byly využity především archivní materiály. V následujících etapách se již na základě terénního výzkumu v nezbytném rozsahu ze zájmových území vybralo 6 studijních lokalit. V dalším období se navrhovalo pokračovat ve výzkumu a průzkumu v granitoidních a sedimentárních horninových prostředích na pěti nejperspektivnějších studijních lokalitách:

- Centrální část pohorí Trábeč (granitoidy)
- Jižní část Veporských vrchov (granitoidy)
- Jihozápadní část Stolických vrchov (granitoidy)
- Východní část Cerovej vrchoviny (sedimenty)
- Západní část Rimavskej kotliny (sedimenty).

Zjednodušená tektonická mapa Slovenské republiky s vyznačením zájmových, studijních a průzkumných lokalit pro vybudování hlubinného úložiště VJP a RAO je uvedena na Obr. 49.

Po roce 2000 se předpokládala výrazná redukce počtu kandidátských lokalit a určení typu horninového hostitelského prostředí. Na kandidátských lokalitách měl pokračovat komplexní geologický, hydrogeologický, geofyzikální a inženýrsko-geologický průzkum.



Obr. 49 Zjednodušená tektonická mapa Slovenské republiky s vyznačením zájmových, studijních a průzkumných lokalit pro hlubinné úložiště VJP a RAO

V současnosti se všechny studijní lokality považují za rovnocenné, proto i rozsah prací plánovaný pro jednotlivé lokality se předpokládá přibližně stejný. Avšak z důvodu efektivního způsobu vynakládání finančních prostředků a také z důvodu zajištění dostatečných odborných i technických kapacit, nelze geologický průzkum realizovat na všech pěti lokalitách současně. Z analýzy doposud provedených prací v rámci vývoje HÚ v SR vyplývá, že výzkumné a průzkumné práce nejvíce pokročily v studijních lokalitách Západní část Rimavskej kotliny a Centrální část pohorí Tribeč, a proto bylo doporučeno zahájit plánované práce právě v těchto lokalitách.[3]

7.1.3 Ukládací obalový soubor (UOS)

1) UOS pro vyhořelé jaderné palivo

Dvouplášťový obal s antikorozií povrchovou úpravou na vnějším povrchu [2]:

- vnitřní pouzdro (nerezová ocel)
- vnější přebal
- ochranná antikorozií vrstva na vnějším přebalu
- kapacita: 7 palivových kazet VVER 440

Jde o dvouplášťový obal s antikorozií povrchovou ochranou, který se skládá z vnitřního pouzdra, vnějšího přebalu a ochranné antikorozií vrstvy na vnějším povrchu přebalu.

Vnitřní pouzdro je vyrobeno z nerezové oceli. Plášť pouzdra je ze plechu tloušťky 5 mm. K plášti je přivařeny ploché dno. Uvnitř pouzdra je vestavěná část zhotovená ze 7 profilovaných trubek ze slitiny hliníku. Vestavěná část slouží k usnadnění plnění pouzdra tím, že určuje a fixuje polohu zavedených palivových souborů a zlepšuje navádění palivových souborů při jejich vkládání do pouzdra. Vytváří tedy lůžka pro palivové soubory, zlepšuje přestup tepla a fixuje polohu souboru z hlediska natáčení v tolerancích nutných pro spolehlivou funkci záchyty.

Pouzdro je uzavřeno víkem, které je hermeticky přivařené k plášti. Víko je vybaveno manipulačním úchytem.

Na povrchu vnějšího přebalu je ochranný povlak proti korozním vlivům okolního prostředí. Je navrženo řešení vytvoření ochranné vrstvy metodou žárového nástřiku NiCr 80/20.

Počet uložených palivových souborů	7
Typ paliva	VVER 440
Stav paliva	celý palivový soubor (nerozebraný, nezkrácený)
Mechanické zatížení	Vnější tlak 20 MPa
Teplota na povrchu obalového souboru	100 °C
Rozměry	Ø 650 × 3670 mm
Hmotnost	3500 kg (bez paliva) 5000 kg (s palivem)
Celkové uvažované množství paliva	cca 33 647 palivových souborů cca 4 807 obalových souborů
Tepelný výkon UOS naplněného VJP	cca 657 W
Vzdálenost úložných míst	krystalické horniny: 5,9 m
Hloubka umístění úložných prostor	krystalické horniny 500 m

2) UOS pro radioaktivní odpady

Vláknobetonový kontejner – VBK

- vnější a vnitřní plášť z ocelových plechů [2]
- kapacita: 3,1 m³

Při předpokládaném objemu RAO na ukládání to znamená ukládání přibližně 350 kontejnerů. Jak bylo zmíněno výše, díky nejistotám v inventarizaci radioaktivních odpadů, neuložitelných v JZ RÚ RAO je úložiště dimenzováno na cca 1050 VBK.

V případě ukládání RAO může VBK sloužit jako ukládací i přepravní obalový soubor. Na ukládání ostatních RAO (např. Institucionálních nevhodných pro uložení v povrchových úložištích) může plnit pouze funkci ukládacího obalového souboru.

Obalový soubor je vyhotoven z vnějšího a vnitřního pláště z ocelových plechů tloušťky 10 mm se zavařeným vnitřním a vnějším dnem o tloušťce 15 mm. Celý meziprostor obalového souboru je vyplněn betonem [2]. Případné alternativy řešení kontejnerů pro tento typ odpadů bude řešen ve výzkumném programu.”

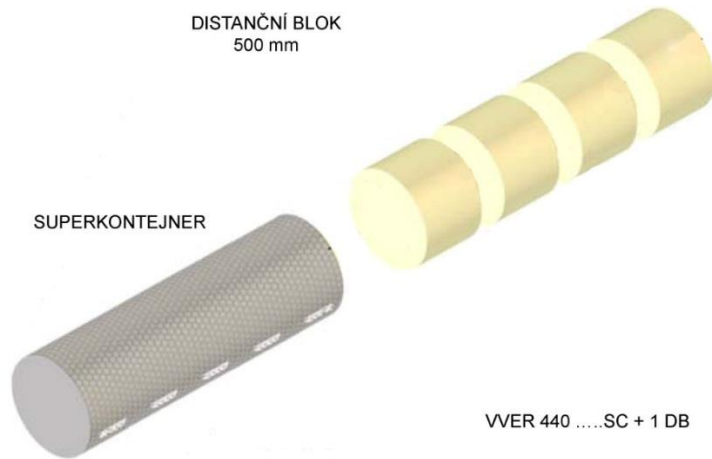
Kapacita	3,1 m ³
Stínění	Těleso, víko kontejneru s dvojitými zátkami a případná těsnící vložka
Rozměry	tělo 1700 × 1700 × 1700 mm víko 1500 × 1500 × tloušťka 145 mm zátky r 300 mm, tloušťka 145 mm
Hmotnost	víko 0,7 t prázdné těleso kontejneru 3,5 t plný kontejner max. 20,0 t zátky 1 ks 0,02 t
Celkové uvažované množství RAO	viz kap. 7.1.1 úložiště dimenzováno na 1050 VBK
Materiál VBK	Beton zesílený vlákny amorfní vysokolegované oceli

7.1.4 Ukládání obalových souborů

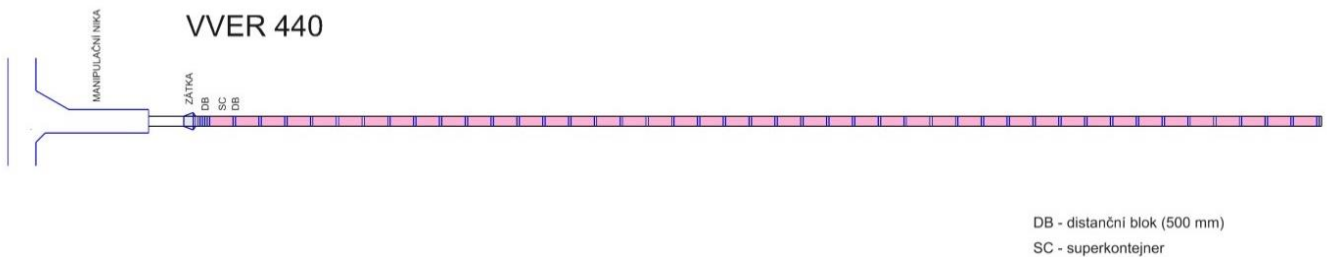
Ukládání UOS s VJP:

- *Krystalické horniny* – horizontální ukládání – zastíněná pouzdra, vzdálenost mezi pouzdry 1 m, inženýrské bariéry cca 30 cm, zbývající volný prostor chodby vyplněn směsí materiálu a písku.
- *Jílové horniny* – horizontální ukládání – zastíněná pouzdra, vzdálenost mezi pouzdry 1 m, inženýrské bariéry cca 30 cm, zbývající volný prostor chodby vyplněn směsí materiálu a písku.

Schéma uložení kontejnerů s vyhořelým jaderným palivem (z VVER 440) a umístění distančních bloků v ukládacích vrtech (s projektovanou délkou 250 m), je prezentováno na Obr. 50 a Obr. 51.



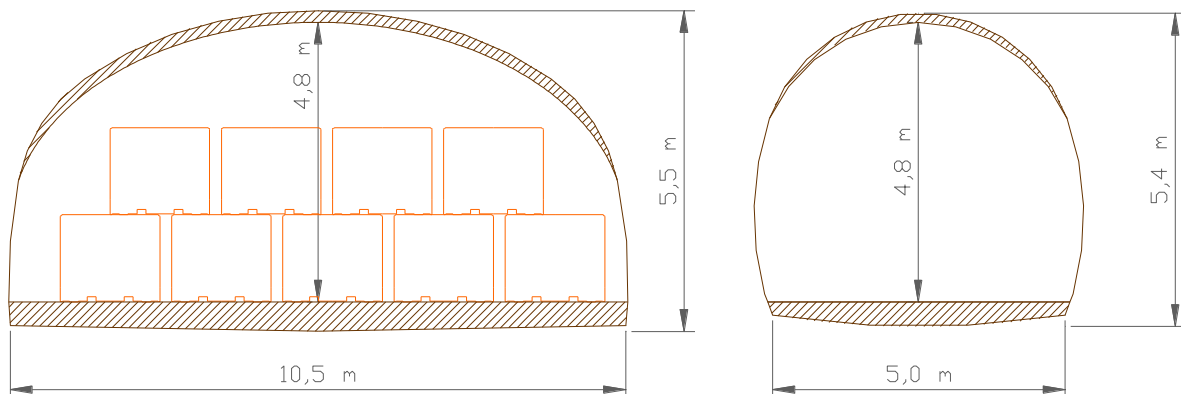
Obr. 50 Schéma ukládání superkontejneru (SC) v úložném vrtu (schéma přebráno z ARP 2011 CZ [5])



Obr. 51 Schéma uložení superkontejnerů a distančních bloků v zavážecích vrtech (schéma přebráno z ARP 2011 CZ [5])

Ukládání UOS s RAO

- Krystalické horniny – horizontální ukládání – po dvou nad sebou do úložné chodby a utěsněno bentonitem, tj. inženýrská bariéra tloušťky 300 mm.
- Jílové horniny – horizontální ukládání – po jednom v řadě do úložné chodby a utěsněno bentonitem, tj. inženýrská bariéra tloušťky 300 mm.



Obr. 52 Komora na ukládání ostatních RAO a hlavní chodba. (schéma přebráno z ARP 2011 CZ [5])

7.1.5 Utěsnění obalového souboru

Budou využity materiály na bázi bentonitu. Bentonit se obecně, na základě dosud známých poznatků, považuje za neoptimálnější inženýrskou bariéru. Jedná se o směs na bázi jílových minerálů. Jílové minerály – bentonit, ve formě bloků, jsou vhodné jako prvotní inženýrské bariéry pro obložení pouzder VJP a kontejnerů VAO. Směs bentonitu s hrubozrnným materiálem je vhodná na zaplnění (předpokládá se zafoukáním) volných prostor v zakládacích chodbách a na zpětné založení ostatních objektů při definitivním uzavírání hlubinného úložiště.[2]

7.1.6 Uzavírání úložiště

Uzavírání ukládacích sekcí je závěrečným krokem technologického postupu ukládání. Tyto činnosti budou prováděny důlními postupy a postupy podzemního stavitelství.

Uzavírání sekcí s VJP

Uzavírání sekcí s VJP zahrnuje následující činnosti:

- zaplnění počátečních úseků ukládacích vrtů mezi jejich ústím a koncovou zátkou a zajištění ústí vrtů,
- zaplnění manipulačních nik,
- zaplnění křídla větrací chodby,
- zaplnění Zavážecí chodby.

Ukládací sekvence je vždy ukončena určitým počtem distančních bloků a koncovou, ocelově-betonovou zátkou. Zátka je umístěna 7,5 m od ústí vrtu. Prostor před zátkou má objem cca 29,5 m³.

Předpokládá se, že prostor před zátkou bude založen drcenou horninou s jílovým pojivem, která bude ve vrtu zhutňovaná speciálním mobilním utlačovacím strojem. V ústí vrtu se předpokládá ukotvení lehké ocelové armatury a zastříkání torkretem. Toto „víčko“ pouze zabráni vypadávání základky v mezičase před úplným založením manipulační niky.

Niky, křídlo větrací chodby a ukládací chodba budou založeny směsí drcené horniny a jílu v plném profilu. Směs bude na místo dopravována kolovými dopravními prostředky v sybkém stavu a pomocí zakládacího stroje s pásovým dopravníkem bude navržena do chodby. Zároveň bude vibrátorem spřaženým s dopravníkem zhutňována.

Založené úseky chodeb budou od provozované části HÚ odděleny betonovou příčkou.[2]

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.

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

Komora bude pak zaplněna výplňovou směsí, která bude do komory vtačována pomocí čerpadel odvodušňovacími vrty. 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.

7.2 Povrchová zařízení

Nadzemní část byla řešena pro obě varianty horninového prostředí – krystalických i jílových hornin [2].

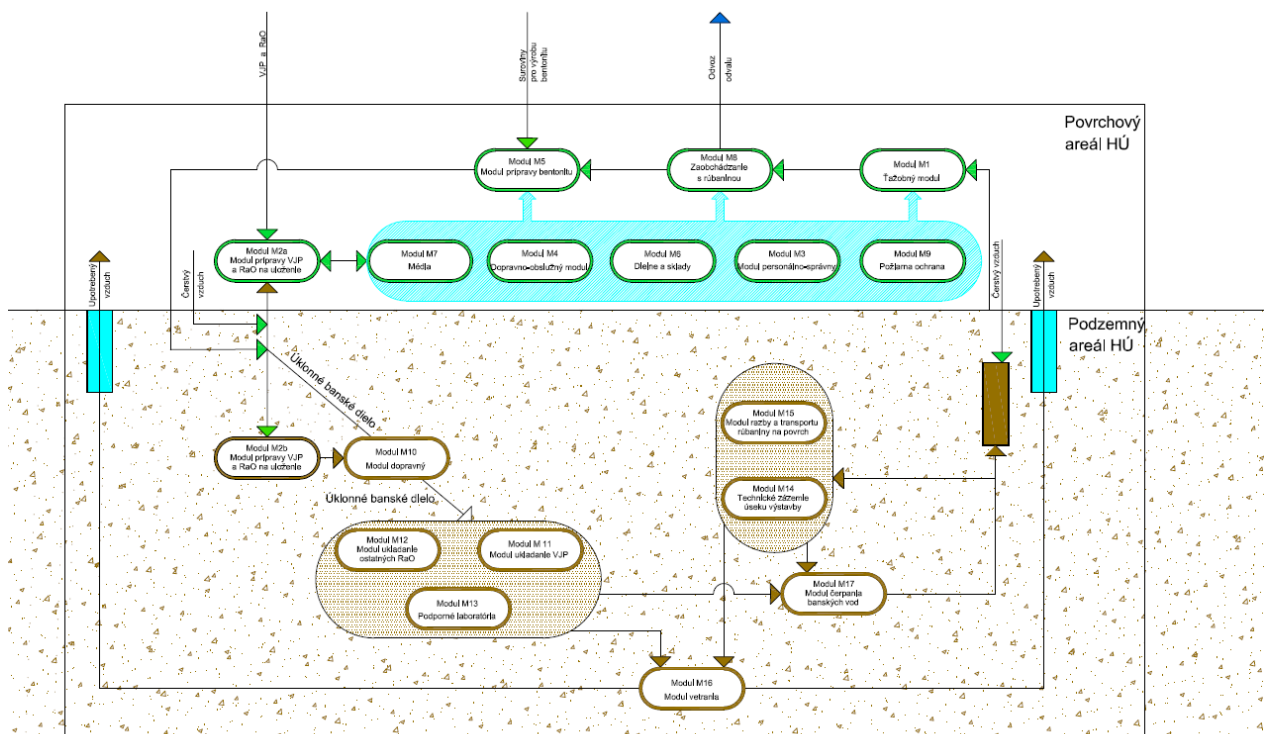
Hlavními objekty povrchového areálu budou:

- 1) **Sklad VJP** – VJP je ve skladu umístěno v ocelových kontejnerech s dostatečnými stínícími vlastnostmi vůči gama i neutronovému záření. Celý sklad je koncipován jako železobetonová důlní stavba. Část skladu bude totiž vyražena v přilehlém masivu, část bude zhotovena jako železobetonová stavba a následně zavezena horninou. Stavba přímo navazuje na povrchový areál HÚ; část je ve výšce 1,2 m z titulu potřeby prokládání kontejnerů. Sklad je vybudován jako stavba s betonovým ostěním a železnými výztužemi. Podzemní část skladu je v současnosti projektována na 4 skladovací chodby. Skladovací chodba je velkoprostorové důlní dílo. Manipulace s kontejnery je navržena mostovými jeřáby. Sklad má samostatné větrání.
- 2) **Příprava VJP k uložení** – Tato stavba slouží k veškerým činnostem souvisejícím s příjmem VJP, resp. prázdných úložných souborů, a pro celkovou povrchovou obsluhu důlní stavby. Obdobně jako u skladu jde vlastně o hornickou stavbu na úrovni 0. Tudy budou do důlní stavby přiváděny energie a čistý vzduch, bude dopravována obsluha a odváděny vyčištěné vody a vzduch. Součástí stavby bude překládací uzel, horká komora a související aktivní provozy. I tento objekt má svůj samostatný větrací systém. Skládá se z těchto stavebních objektů: portál tunelů, vrátnice aktivní zóny a železniční vrátnice aktivní zóny, oplocení aktivní zóny, objekt aktivního provozu a sklad prázdných obalů.

Obě uvedené stavby je možné chápat i jako přechod mezi pozemními a podzemními objekty. Z areálu objektu přípravy VJP na ukládání je vyražena spirálová zavážecí chodba (úpadnice) k těžební jámě TJ-1S (úroveň záhlaví náraziště - 50 m n.m.) a dále na úroveň - 300 m n. m. (větrací stanice, čerpací stanice, laboratoř).

Přirozeně, na povrchu se budou nacházet i další objekty, technologická zařízení, informační centrum atd. Na povrch budou vyústěny také důlní díla či jejich části: jámy, tunely, ventilace atp., respektive se na povrchu budou vyskytovat zařízení potřebné pro činnosti provozu v podzemí.

Vztahy mezi jednotlivými moduly HÚ jsou zobrazeny na Obr. 53.



Obr. 53 Vztahy mezi jednotlivými moduly hlubinného úložiště [2]

7.3 Varianty řešení HÚ v krystalických a jílových horninách

1) Varianta řešení HÚ v krystalických horninách

Hlubinné úložiště je založeno a lokalizováno na území, které splňuje následující základní předpoklady:

- Všechny výškové údaje jsou vztaženy k úrovni stavební nuly, tj k úrovni povrchové stavby.
- Na hlubinném úložišti je projektován i sklad VJP (sklad je koncipován jako místo pro skladování běžných přepravních a skladovacích kontejnerů s vyhořelým jaderným palivem).
- Geomorfologický předpoklad pro hlubinné úložiště je ten, že stavba bude zavedena do horského masivu (jinak řečeno, povrchová stavba bude v údolí, podzemní stavba bude v horském masivu)
- Podzemní prostory budou vyraženy ve velmi pevných a pevných horninách, pravděpodobně granitického typu v hloubce -500 m.
- Horninový masiv v hloubce 500 m pod povrchem je hydrogeologicky bezpečný (horniny jsou nepropustné, není očekáván větší přítok podzemních vod – tyto hloubky krystalického masivu jsou podle předpokladů prakticky suché).
- Ukládání VJP se bude provádět do velkoprofilových horizontálních vrtů – bude zvolen takzvaný horizontální způsob ukládání (průměry vrtů 2,2 m).
- Ukládání ostatních RAO bude prováděno ve VBK do velkoobjemových komor ve stozích.
- Pro těžbu rubaniny, přepravu lidí a spouštění materiálu bude použita svislá jáma.

- Pro dopravu VJP, RAO, těžkých mechanismů, a to především dopravních a ukládacích, bude vybudována spojovací úklonná chodba (úpatnice), a to z horizontu 0 m až na ukládacímu horizont -500 m.
- Při výstavbě hlubinného úložiště může být po určitý časový interval použita na jednotlivých horizontech i kolejová doprava, která bude v určitém okamžiku (po propojení všech horizontů bezkolejovou dopravou) demontována a veškerá doprava pak bude bezkolejová.
- Úklonná doprava a doprava na ukládacím horizontu bude bezkolejová (v období ukládání VJP a RAO).
- Čerpání vod z HÚ je řešeno samostatným krátkým horizontem, tento horizont nebude zpřístupněn prostřednictvím úpatnice, ale jen prostřednictvím tažné jámy.
- Přejímací místo bude umístěno v objektech pro skladování VJP (před skladem s tím, že dále bude vyražen zavážecí tunel).
- Pro přípravu VJP k uložení bude vybudována samostatná kapacita; půjde o technologický uzel v podzemí – stavebně komplikovaný a bezpečný z hlediska radiační ochrany.[2]

2) Varianta řešení HÚ v jílových/sedimentárních horninách

Hlubinné úložiště je založeno a lokalizováno na území, které splňuje následující základní předpoklady:

- Všechny výškové údaje jsou vztaheny k úrovni stavební nuly, tj k úrovni povrchové stavby.
- Podzemní prostory budou vyraženy v sedimentárních horninách (jílových horninách).
- Vzdálenost mezi jamami (těžební, větrací) je navržena 200 m.
- Optimální varianta zabezpečení dopravy se jeví varianta svislým dílem – jámou.
- Ukládací horizont je navržen v hloubce - 600 m
- Horninový masiv v hloubce 600 m pod povrchem je hydrogeologicky bezpečný (horniny jsou nepropustné, není očekáván větší přítok podzemních vod – tyto hloubky krystalického masivu jsou podle předpokladů prakticky suché).
- Ukládání VJP: V závislosti na výše uvedeném je navrhované koncepční řešení velikosti průřezu ukládacích chodeb přizpůsobeno předpokládanému způsobu ukládání pouzder. Tomuto způsobu ukládání VJP vyhovuje v podzemních dílech z dopravní do ukládací chodby úhel odbočení 60° a velikost průřezu 4 100 / 3 500 mm. Velkost průřezu o průměru 2,5 až 3,1 m.
- Ukládání ostatních RAO bude prováděno ve VBK do velkoobjemových komor ve stozích. Předpokládanému způsobu ukládání VAO vyhovuje v podzemních dílech z dopravní do ukládací chodby úhel odbočení 90° a velikost průřezu 4 100 / 3 700 mm. Velkost průřezu o průměru 3,5 až 3,7 m. Vzhledem k předpokládané hmotnosti kontejneru a předpokládané stabilitě horninového prostředí, není možné ukládat kontejner bočním přeložením na ukládací místo.
- Svislá doprava bude zajišťovat dopravní propojení mezi povrchem a podzemní částí hlubinného úložiště. K zajištění horizontální dopravy v podzemí je navrženo využít kolejovou dopravu lokomotivami a vozový park. Tento způsob dopravy bude použit i při ražení podzemních děl úložiště

- Pro zabezpečení odvodu vody se při nárazištích tažné jámy vybuduje strojovna s čerpacími agregáty, a jako žumpa bude sloužit prostor jámy pod nárazištěm – jámová tůň. Odvod vody se předpokládá samospádem, proto všechny objekty budou se budou realizovat stoupáním směrem od tažné jámy k větracím.
- Pro přípravu VJP k uložení bude vybudována samostatná kapacita; půjde o technologický uzel v podzemí – stavebně komplikovaný a bezpečný z hlediska radiační ochrany. [2]

7.4 Odhad nákladů

Výše nákladů souvisejících vývojem, výstavbou, provozem a uzavíráním hlubinného úložiště je silně závislá na době provozu jaderných elektráren V2 a EMO. Dle Návrhu Vnútroštátnej politiky (2015) pro jejich 40letý provoz jsou odhadované náklady v cenové úrovni roku 2014 ve výši 3 738,019 mil. € a pro 60letý provoz ve výši 4 432,037 mil. €. Uvedený odhad je expertní úpravou odhadů učiněných v době implementace slovenského programu vývoje hlubinného úložiště v letech 1996–2001.[1]

Tab. 5 Náklady na vývoj a realizaci HÚ [1]

Náklady na vývoj a realizaci HÚ							po roku 2020	
[mil. €]								
Rok	2015	2016	2017	2018	2019	2020	40letý provoz	60letý provoz
v cenách r. 2014	0,023	0,048	0,434	1,616	4,037	6,389	3 725,336	4 419,353
v nominálních cenách	0,024	0,051	0,460	1,749	4,497	7,308	13 618,767	19 212,168

7.5 Použitá dokumentace

- [1] Návrh vnútroštátnej politiky a vnútroštátneho programu nakladania s vyhoretým jadrovým palivom a rádioaktívnymi odpadmi v SR ako aktualizácia strategického dokumentu "Stratégia záverečnej časti mierového využívania jadrovej energie v Slovenskej republike" (návrh schválen usnesením vlády č. 387/2015).
- [2] Havlová et al. (2016a): Aktualizovaná Štúdia realizovateľnosti hlbinného úložiska v SR. ÚJP arh. č.1568, 2016.
- [3] Havlová V. et al. (2018a): Záverečná správa – Plán prác na roky 2019–2024 v oblasti vývoja HÚ v SR, výstup 4.2 projektu Hlbinné úložisko – výber lokality, 2. Etapa – 1. Časť IPR č.: I00TUND20008, JAVYS, Bratislava, 2018
- [4] Havlová V. et al. (2018b): Rámcový program vývoja a výskumu v oblasti hlbinného ukladania podľa požiadavky Návrhu vnútroštátneho programu nakladania s VJP a RAO v SR, výstup B.2 projektu Hlbinné úložisko – výber lokality, 2. Etapa – 1. Časť IPR č.: I00TUND20008, JAVYS, Bratislava, 2018
- [5] ARP 2011 CZ: Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. Projektu ÚJV Řež, a.s. pro SÚRAO (2009 - 2013)

8 Projekt hlubinného úložiště v Maďarsku

Základním legislativním dokumentem týkající se jaderné energetiky včetně nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem je Zákon CXVI z roku 1996 o tomové energii (Act CXVI of 1996 on Atomic energy) a příslušná prováděcí nařízení z roku 2013. Maďarský národní program nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým palivem byl dokončen a schválen vládou dne 24. srpna 2016 po schválení národní politiky Parlamentem v dubnu 2015. Národní politika stanoví základní zásady nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým palivem a okrajové podmínky pro národní program. Zákon o atomové energii stanovuje odpovídající institucionální rámec, ve kterém je kompetentním dozorovým orgánem nad jadernými zařízeními (JE, výzkumné a výcvikové reaktory, mezisklady vyhořelého paliva) a zařízení pro likvidaci radioaktivních odpadů) Maďarský úřad pro atomovou energii (HAEA). Na druhou stranu, národní organizací pro nakládání s radioaktivními odpady je státní akciová společnost pro nakládání s radioaktivními odpady – PURAM (Public Limited Company for Radioactive Waste Management).

Důležitým rysem maďarského národního programu je to, že doposud nebylo učiněno konečné rozhodnutí ohledně využití přepracování VJP na konci palivového cyklu. Z tohoto důvodu národní politika vyžaduje pružný (reverzibilní) a přesto aktivní přístup k otázce výzkumu a vývoje projektu hlubinného úložiště v Maďarsku nazývaný „DO and SEE“. To znamená, že namísto odkládání reálných činností (například do doby, než bude známo konečné politické rozhodnutí), je zapotřebí skutečný a probíhající výzkumný program pro hlubinné ukládání.

Přestože konečné rozhodnutí o přepracování není k dispozici, výzkumný program a další plánovací činnosti při provádění národního programu by měly být založeny na referenčním scénáři, který v současné době počítá s přímým ukládáním vyhořelého paliva v národním hlubinném úložišti, spolu s ostatní vysokoaktivními odpady vznikajícími při provozu a vyřazování JZ.


8.1 Základní charakteristika úložiště

Jak již bylo zmíněno výše realizátorem projektu hlubinného úložiště je státní akciová společnost pro nakládání s radioaktivními odpady – PURAM (založená v roce 1998).

Účelem hlubinného úložiště v podmínkách Maďarska je zajistit likvidaci vyhořelého paliva a radioaktivních odpadů nepřijatelných do Národního úložiště radioaktivních odpadů (National Radioactive Waste Repository – NRWR) v Bátaapáti. (Do NRWR směřují nízko a středněaktivní odpady z provozu jaderné elektrárny Pakš. Jedná se o podpovrchové úložiště vybudované v granitech v hloubce 200-250 m.)

V současné době je vyhořelé jaderné palivo z JE Paks skladováno v meziskladu VJP (Interim Spent Fuel Storage Facility – ISFSF) nacházejícím se v sousedství jaderné elektrárny.

Přestože konečné rozhodnutí o přepracování není k dispozici, výzkumný program a další plánovací činnosti při provádění národního programu by měly být založeny na referenčním scénáři, který v současné době počítá s přímým ukládáním vyhořelého jaderného paliva

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

v domácím hlubinném úložišti, spolu s ostatní vysokoaktivními odpady vznikajícími při provozu a vyřazování JZ.

Program povrchového geologického výzkumu zaměřený na výběr lokality pro umístění budoucího HÚ byl zahájen před více než dvěma desetiletími a vedl k identifikaci potenciálně vhodné geologické formace nacházející se na jihozápadním úpatí pohoří Mecsek – Boda Claystone Formation (BCF).

Tab. 6 Harmonogram vývoje hlubinného ukládání VAO a VJP v Maďarsku [5]

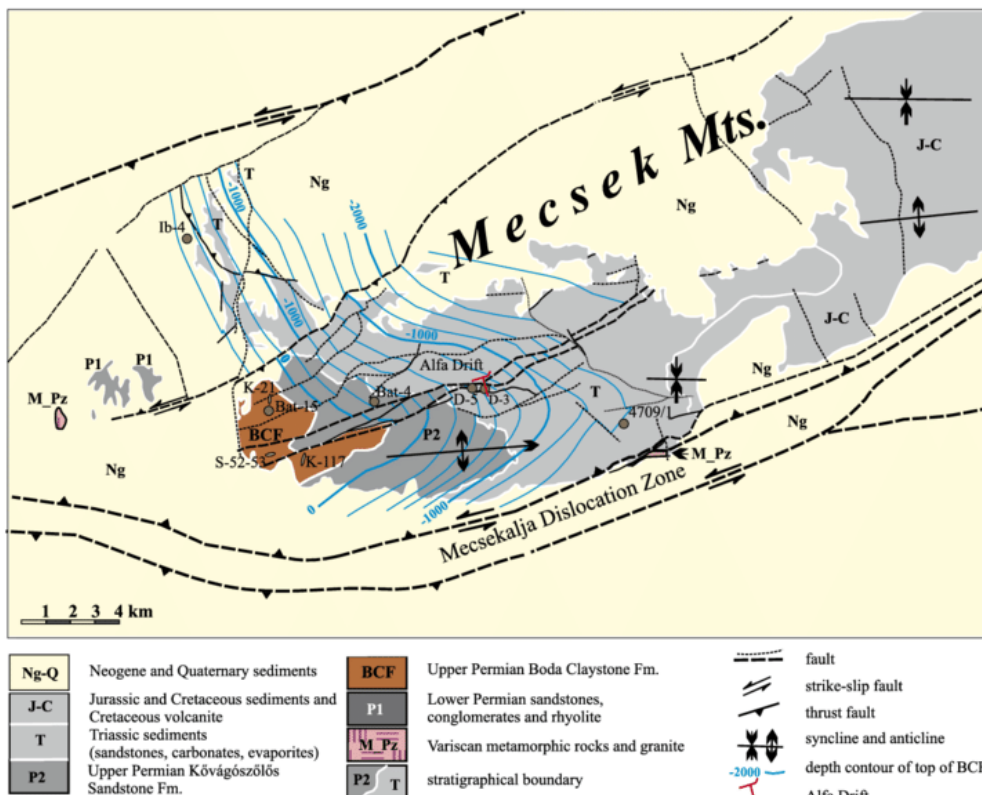
2005-2008	Začátek R&D činností <ul style="list-style-type: none"> • Povrchový průzkum BCF lokality pro výstavbu URL • Příprava předběžné studie o vlivu na životní prostředí • Finalizace a schválení strategie nakládání s VAO
2009-2012	<ul style="list-style-type: none"> • Začátek výstavby URL • Příprava programu výzkumu a vývoje
2013-2032	<ul style="list-style-type: none"> • Výstavba URL • Implementace programu výzkumu a vývoje • Dokončení bezpečnostního hodnocení
2033-2046	Výstavba hlubinného úložiště
2047-2069	1. fáze provozu HÚ <ul style="list-style-type: none"> • Přeprava vyhořelého paliva z meziskladu VJP v Püspökszilágy do hlubinného úložiště
2070-2094	Provoz hlubinného úložiště <ul style="list-style-type: none"> • Čekání na převoz odpadů z vyřazování
2093-2094	Rozšíření kapacity HÚ pro příjem odpadů z vyřazování z provozu
2095-2104	2. fáze provozu HÚ <ul style="list-style-type: none"> • Převoz a ukládání odpadů z jaderné elektrárny Paks do úložiště
2105-2108	Uzavírání úložiště
Od 2108	Dlouhodobý institucionální dohled

8.1.1 Výběr lokality

Pro hlubinné úložiště je posuzována jediná lokalita v blízkosti města Buda, v jihozápadní části pohoří Mecsek. Cílem předběžných průzkumů a výzkumů je vytipovat finální území a zúžit je z nynější rozlohy 87 čtverečních kilometrů až na podstatně menší lokalitu s povrchovou rozlohou cca 1–2 čtvereční kilometry, v níž by se měly v budoucnu uskutečnit důlní práce i stát povrchový areál. Zásah do krajiny by byl tedy minimální.

Další významný rozdíl mezi Českou republikou a Maďarskem je v charakteru horninového masívu. Zatímco v ČR bude úložiště s největší pravděpodobností vybudováno v tvrdých krystalinických horninách, v případě Maďarska se bude jednat o jílovce. Maďaři se inspirovali tzv. švédským modelem dlouhodobého ukládání odpadů. To znamená, že počítají s vertikálním uložením kontejnerů (obalových souborů) v hloubce zhruba 500 metrů

do vyvrtných úložných komor. Boda Claystone Formation (BCF) je geologická formace nacházející se na jihozápadním úpatí pohoří Mecsek – jedná se o skalní masiv pískovcové formace bohaté na uran, který zde byl v minulosti těžen.



Obr. 54 Geologická mapa s hloubkovými obrysy vrcholu pískovcové formace BCF na jihozápadním úpatí pohoří Mecsek. [6]

8.1.2 Koncept ukládání a předběžné posouzení bezpečnosti

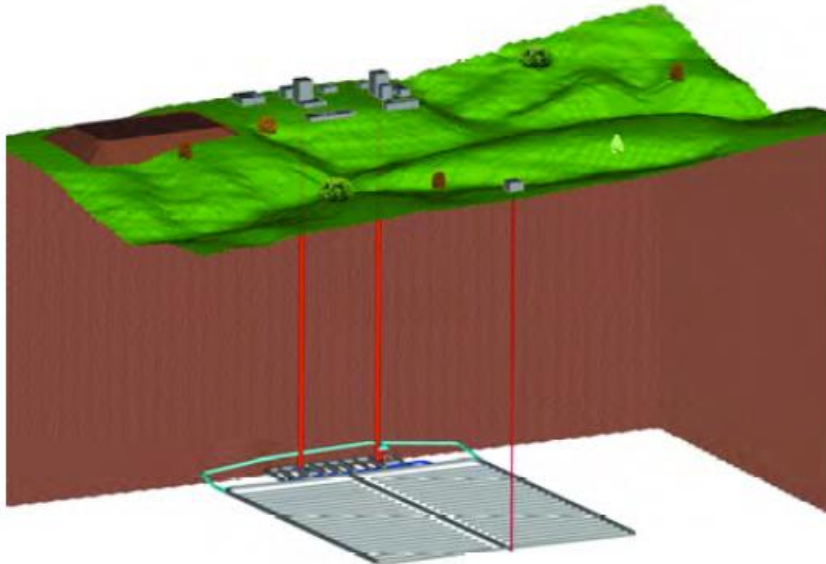
Koncepční návrh hlubinného úložiště byl vyvinut po předběžném posouzení bezpečnosti. V koncepční fázi vývoje úložiště bylo provedeno posouzení inventáře, tepelného zatížení, informací o možných obalových souborech, kritičnosti a radiologie. Koncepční návrh popisuje rozsah inženýrských prací, které mají být provedeny ve vztahu k činnostem otevřeného palivového cyklu. Tato práce zahrnuje vybudování úložiště; posouzení činností v oblasti nakládání s odpady, dopravy a skladování; a odhad nákladů na tyto činnosti.

Současný koncepční návrh ukládání počítá s použitím měděného kontejneru.

Uspořádání úložiště bylo založeno na předpokladu, že ukládání kontejnerů bude probíhat do vertikálních úložných prostor vyvrtných z úložných tunelů vytěžených v geologické formaci BCF (Obr. 55 a Obr. 56).

Tunelový systém úložiště je plánován v hloubce 500–800 m pod povrchem země, spolu s přidruženými povrchovými zařízeními. Podzemní stavební činnosti budou prováděny prostřednictvím vertikálních šachet (dvěma centrálními a jednou diagonálně umístěnou), které budou zajišťovat, kromě samotné výstavby, též průzkum a provozní podmínky v souladu s bezpečnostními požadavky. Ukládací šachty pak budou propojeny navzájem a se servisními prostory pomocí ventilačních potrubí a inženýrských sítí.

Podzemní prostory budou vybudovány pomocí konvenčních metod vrtáním a trhacími pracemi. Předpokládá se, že velké sekce podzemních štol budou vyžadovat použití svorníků a obložení ze stříkaného vláknitého betonu o průměrné tloušťce 10 cm, zatímco u menších částí (včetně samotných úložných prostor) bude postačovat použití svorníků spolu s cca 5 cm ostěním ze stříkaného vláknitého betonu.



Obr. 55 Axonometrické schéma referenčního hlubinného úložiště [1]



Obr. 56 Axonometrické schéma vertikálních ukládacích vrtů [1]

Kvůli četným nejistotám (například neexistence dostatečně definované strategie pro nakládání s vyhořelým palivem (a tedy nejasnosti v očekávané inventarizaci VAO z jaderné energetiky), nebo nejasnosti ohledně přesné lokalizace HÚ, základní geometrie a geologických vlastnosti vybraného místa) bude koncepce úložiště postupně přehodnocována a zpřesňována, a to před každým rozhodovacím bodem (např. před každým rozhodnutím o zúžení výzkumné oblasti, o umístění úložiště, vybudování podzemní laboratoře a/nebo hlubinného úložiště, povolení provozu HÚ). Tyto revize pak mohou vést ke změnám v původním designu.

8.1.3 Předpokládané množství a způsob ukládání odpadu

Předpokládané celkové množství vyhořelého jaderného paliva vznikajícího v Maďarsku z jaderného průmyslu, cvičného a výzkumného reaktoru určeného k uložení do HÚ v případě zvolení přímého ukládání bez přepracování je uvedeno v Tab. 7. [4]

Tab. 7 Množství vyhořelého jaderného paliva v Maďarsku

Zdroj VJP	Množství vznikajícího VJP	
	Množství kazet VJP	Hmotnost těžkých kovů
Provoz JE Paks 1-4	17 716	2 126 t
Provoz JE Paks 5-6	6 100	2 874 t
Celkem		4 999 t
Provoz cvičného reaktoru	56	69 kg
Provoz výzkumného reaktoru v Budapešti	1 062	240 kg
Celkem		309 kg

Do hlubinného úložiště bude též uloženo 600–800 m³ jiného vysokoaktivního odpadu a nízko a středněaktivních odpadů s dlouhým poločasem přeměny.

Podobně jako ve švédském konceptu jsou kanystry obsahující SNF skladovány jeden na druhém ve vertikálních vrtech o velkém průměru vyvrtaných do dna úložné štolky.

Současný koncepční návrh počítá s ukládáním VJP v měděných ukládacích kontejnerech.

Inženýrskou bariérou (pufr) kolem kontejnerů bude čistý prefabrikovaný bentonit ztuhlý při vysokém tlaku, jehož výhodou je to, že se jedná o přírodní minerální materiál schopný bobtnání po absorpci vody, má velmi nízkou permeabilitu a nakládání s předem odlitými prefabrikáty je velmi snadné.

Ostatní radioaktivní odpady budou ukládány v různém uspořádání v ukládacích vrtech v ukládacích obalových souborech z nerezové oceli.

Ukládacích vrty budou po jejich zaplnění a po dokončení nakládek zasypány za použití vhodné směsi bentonitu a vytěžené horniny granulované na vhodnou velikost zrna.

SNF bude tedy ukládán vrtů vyvrtaných v základně ukládacích šachet. Předpokládá se, že tyto vrty vytvoří ukládací systém ve formě pravidelné sítě v oblasti mezi sestupnými vzduchovými šachtami a ventilací, přičemž sestupné vzduchové šachty budou odvádět odpadní vzduch. Z důvodu odděleného nezávislého přívodu vzduchu pro dopravní a ventilační vrty zde budou dva nezávislé ventilační systémy. Pro zahájení zavážení ukládacích kontejnerů s VJP bude stačit vybudování čtyř vrtů v jednom křídle úložného systému. Je plánováno, že v jednom roce bude probíhat zavážení do dvou úložných vrtů v jednom křídle úložného systému, přičemž současně bude moci probíhat vrtání/budování dalších dvou ukládacích vrtů jiném křídle úložného systému. Ukládací činnosti mohou tedy probíhat nezávisle na činnostech spojených s budováním úložného systému. Tímto způsobem může budování ukládacích prostor probíhat požadovanou rychlostí až do celkového počtu cca 42 vrtů.

8.1.4 Základní části plánovaného HÚ

Hlubinné úložiště v sobě zahrnuje centrální servisní část, systém podpůrných zařízení a štol pro operace související s ukládáním, transportní štol/vrty pro přepravu odpadu a osob, odvětrávací šachty a hlavní ventilační šachtu pro přívod vzduchu.

Povrchové a podzemní stavby jsou vzájemně propojeny dvěma centrálními a jedním diagonálně umístěnými svislými šachtami, které zajišťují konstrukční, průzkumné a provozní podmínky v souladu s bezpečnostními požadavky.

Servisní část sestává z různých funkčních jednotek: nakládací štola pro nákladní dopravu, dopravní šachta pro příjem vybavení/zařízení menších rozměrů, ubytování pro řídicí/kontrolní personál a demonstrační budovy. Kromě toho budou v sekci obsluhy vybudovány velkoprostorové štol pro odvodňovací funkce, elektrické zdroje, údržbu a údržbu strojů, parkování přepravních zařízení a skladovací funkce.

Kromě toho zde budou vybudována štola pro překládku, kde budou přijímány větší části zařízení a strojů a též kontejnery s VJP, které budou přebaleny do vhodných transportních obalů splňujících bezpečnostní požadavky pro přepravu v podzemním zařízení.

Dále budou vybudovány zásobníky pro shromažďování odtěžené horniny během výstavby podzemních částí HÚ. Ze zásobníků bude vytěžená hornina transportována na povrch prostřednictvím níže položené štol a přepravního systému ve svislé šachtě, která bude též využívána pro nákladní dopravu.

Podobným způsobem budou přepravovány rovněž zásypový materiál, který se používá k utěsnění ukládacích vrtů, přeložením do jiného podzemního zásobníku, který je spojen s níže položenou šachtou, kde bude možné zásypový materiál naložit na přepravní zařízení převézt na místo použití do ukládacích vrtů.

Za předpokladu neporušených geologických podmínek, profil štol určených pro strojní zařízení je založený na švédském konceptu s jednopodlažním uspořádáním o celkových rozměrech 700 x 700 m², úložný prostor bude moci pojmout celkem 960 kontejnerů obsahujících VJP. Skutečný počet štol se může lišit v závislosti na geometrii každé z úložných sekcí, v případě, když je délka štol či rozměry klenbové výztuže omezeny nepříznivými geologickými podmínkami. Vzdálenost mezi ukládacími štolami a rozteč drenážních šachet je určována tepelnými parametry hostitelské horniny a ukládacího souboru. Předběžné posouzení tepelných parametrů naznačuje, že pro koncepční návrh bude dostatečná velikost klenbové opěry 25 m a rozteč ukládacích vrtů 10 m. Ukládací šachty jsou vzájemně propojeny a se servisní částí HÚ jsou spojena pomocí ventilačních potrubí a inženýrských sítí.

Kontejnery obsahující VJP jsou ukládány do vertikálních šachet (vrtů) o velkém průměru, které jsou vyvrtány do dna úložných štol. Rozměry vrtu jsou určeny délkou a průměrem ukládacích kontejnerů a konstrukčními rozměry inženýrské bariéry. Hloubka každého vrtu je cca 7 m a jeho průměr cca 1,75 m.

Bentonitové bloky (lomenice) tvořící inženýrskou bariéru, jsou prefabrikovány v povrchovém zařízení a poté transportovány na místo použití. Předpokládá se, na základě výsledků odhadu nákladů, že celková plocha úložiště bude sestávat z cca 42 ukládacích štol, z nichž každá obsahuje 24 kontejnerů s NJF.

Také se předpokládá, že v případě podzemních štol velkého průřezu, bude zapotřebí použít svorníky a ostění ze stříkaného vláknitého betonu o průměrné tloušťce 10 cm; v případě štol a chodeb menších rozměrů je pak počítáno s použitím svorníků a nástřiku z vláknitého betonu o tloušťce 5 cm.

8.1.5 Systém bezpečnostních bariér

VJP – ukládací kontejner s litinovým košem a měděným přebalem.

VAO / dlouhodobé SAO a NAO – ukládací kontejner z nerezové oceli

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

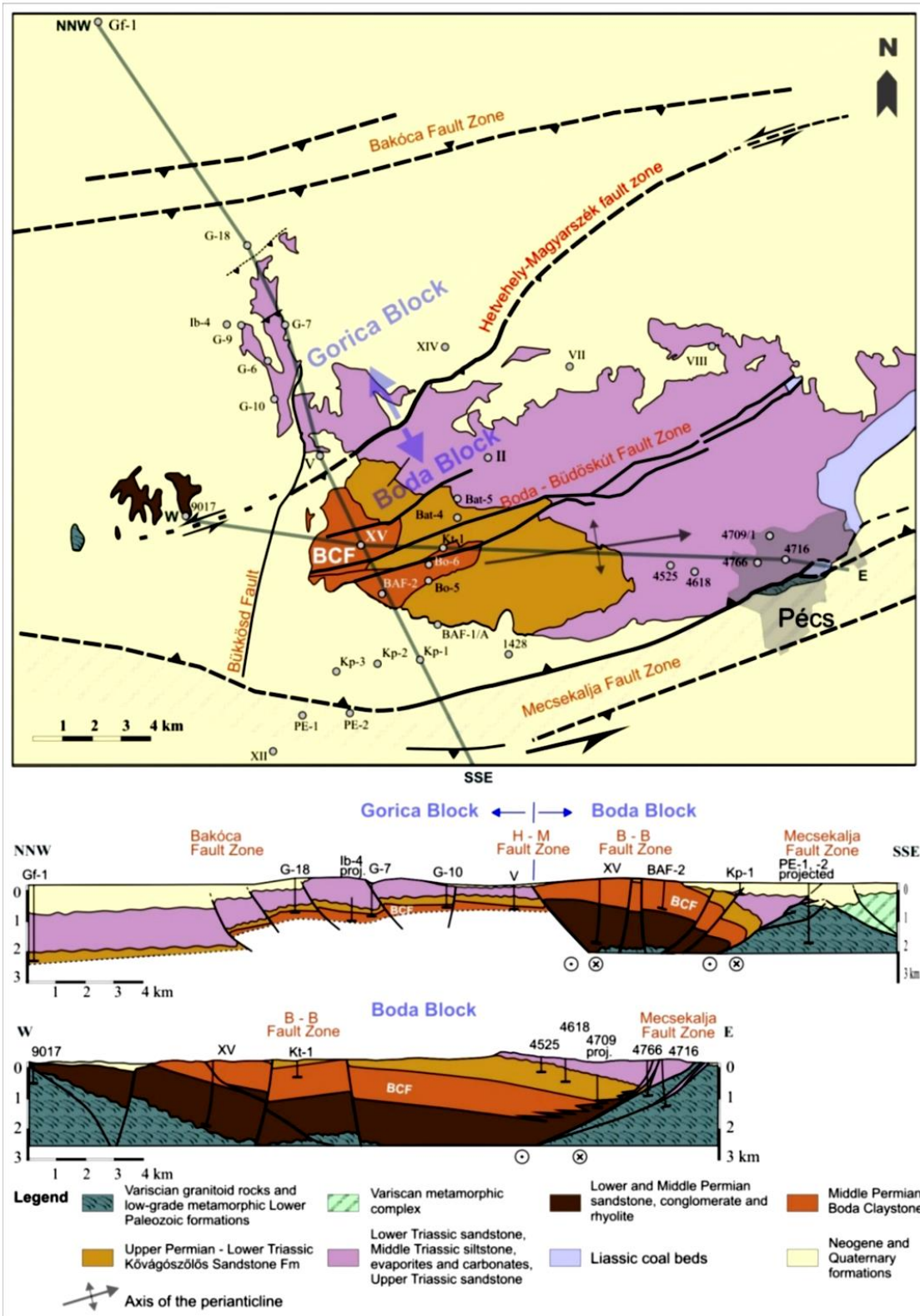
Inženýrská bariéra (pufr) kolem kontejnerů se sestává z prefabrikátů odlitých z čistého bentonitu ztuhlého při vysokém tlaku. Jde o přírodní minerální materiál schopný bobtnání po absorpci vody, má velmi nízkou permeabilitu. Expandující bentonit je tak schopen vyplnit prostory obklopující ukládací obalový soubor a zároveň zabránit styku vody s UOS. V případě netěsnosti ukládacího obalového souboru také zabrání přístupu radioaktivních látek k horninovému podloží. Bentonitová bariéra ochrání také ukládací soubory před mechanickým poškozením v případě možných změn ve skalním podloží. Nakládání s předem odlitými prefabrikáty je velmi snadné.

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

8.2 Geologická oblast

Boda Claystone Formation (BCF) - geologická formace nacházející se na jihozápadním úpatí pohoří Mecsek – jedná se o skalní masiv pískovcové formace bohaté na uran, který zde byl v minulosti těžen.

V roce 1994 byl v uranovém dole Mecsek vykopán průzkumný tunel, který dosáhl až do zvažované formace BCF, a podzemní sběr dat byl zahájen v hloubce cca 1100 m. Samotná formace byla prozkoumána podzemím tunelem zasahujícím cca 500 m do jílovce. Tunel byl použit jako podzemní výzkumná laboratoř (URL), poskytující velké množství lokálních geologických dat. V roce 1998 těžba uranu skončila a důl byl zaplaven, takže skončila i příležitost provádět podzemní průzkumné a výzkumné práce. Nicméně, výsledky výzkumných programů potvrdily potenciální vhodnost BCF s ohledem na jeho rozsah, izolaci a geotechnické schopnosti. Byl navržen další program pro podrobné prozkoumání charakteristik horninového útvaru. Stáří BCF je cca 265 mil. let. Známý plošný rozsah formace je asi 150 km². BCF je součástí permiantriasové sedimentární sekvence, která tvoří západní antikliniku Mecsek (Obr. 57).



Obr. 57 Geologická mapa a řezy antiklinou západní Mecsek, včetně povrchového výchozu BCF [1].

Protože sedimentační podmínky byly téměř konstantní po miliony let, vytvořila se extrémně silná kvazi-homogenní sekrece. Kvůli drobným cyklickým změnám v depozičním prostředí může být formace rozdělena do šesti charakteristických typů hornin, ale hlavní tělo formace (přibližně 90 %) sestává z jednoho typu horniny, albitického jílovce. Tato hostitelská hornina

tvoří jednotku o rozsahu cca 37 km², která byla označena jako vodná pro umístění potenciálního úložiště v hloubkách 500 až 900 m pod povrchem.

Hlavními horninotvornými minerály BCF jsou: tedy jílové minerály (dominantní jsou illit – muskovit a chlorit), autigenní albit, křemen, uhličitanové minerály (kalcit a dolomit) a hematit (Varga a kol. 2005; Varga a kol. 2006). Kromě toho byly ve stopových množstvích identifikovány baritové, anhydritové, autigenní K-živce a detritální složky. Díky své dlouhé tektonické historii má BCF nespojitý charakter. Pukliny a zlomy jsou vyplněny různými jílovými, karbonatickými nebo sulfatickými materiály. V závislosti na hustotě, typu a orientaci diskontinuit se může měřitelná hydraulická vodivost samotného horninového masivu lišit v relativně širokém intervalu (obvykle 10⁻⁹ až 10⁻¹³ m/s, s hodnotami až 10⁻⁸ m/s). BCF je z hydrogeologického hlediska akvitatem jehož hydrologická skladovací kapacita je zvýšena pouze těsně pod povrchem. Ve větších hloubkách mohou mít větší tektonické zóny významné hydrologické zásoby a propustnost. Hydraulická vodivost K zvětralé zóny a tektonické zóny je v rozsahu $K = 10^{-9}$ až 10^{-7} m/s, zatímco zdravá hornina má $K = 10^{-13}$ až 10^{-10} m/s. Objemová pórovitost a hydraulická vodivost neporušené horninové matrice je velmi nízká (0,6–1,4 %; 10^{-15} m/s). Průměrná pevnost v prostém tlaku přesahuje 100 MPa. Vzhledem k tepelné historii BCF se předpokládá, že možné dopady výroby tepla HLW (např. změna jílových minerálů, tepelné změkčení) na tuto formaci budou ve srovnání s mladšími armilárními formacemi omezené [2].


8.3 Odhad nákladů

Na základě zákona o atomové energii byl v lednu 1998 zřízen Centrální jaderný finanční fond (KNPA) pod dohledem Ministerstva národního rozvoje. Fond je určen výhradně pro financování nakládání s radioaktivními odpady, dočasné skladování vyhořelého paliva, uzavření jaderného palivového cyklu a vyřazování jaderných zařízení z provozu.

Hlavní úkoly KNPA – financování nákladů spojených s:

- Meziskladování vyhořelého paliva (7 %),
- Konečná likvidace L (M) LW (8 %),
- Vyhořelé palivo a HLW (48 %),
- Vyřazení zařízení z provozu – bloky 1-4 a ISFS (22 %).

V následující tabulce jsou uvedeny předpokládané náklady v souvislosti s vývojem projektu hlubinného úložiště v Maďarsku v cenové hladině roku 2005. Jsou zde uvedeny náklady pro jednotlivá časová období vývoje HÚ: příprava, výstavby a jednotlivé plánované fáze provozu HÚ včetně postupného uzavírání úložiště [5].

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

Tab. 8 Předpokládané náklady na HÚ v Maďarsku (v cenách roku 2005) [5]

Jednotlivé fáze HÚ	Náklady		Předpokládané období implementace fáze
	[Mil HUF]	[Mil EUR]*	
Příprava HÚ	98 988,1	295,531	2007-2032
Výstavba	45 705,6	136,455	2033-2046
1. Etapa provozu	61 535,1	183,7158	2047-2069
Probíhající provoz (příprava na převoz odpadů z vyřazování)	10 014,1	29,8973	2070-2094
2. Etapa provozu (+ postupné uzavírání)	17 465,1	52,1424	2095-2108
Celkem	233 708	697,74	

*Poznámka: Pro přepočítání byl použit průměrný kurz 1 EUR = 334,95 HUF z roku 2005 (European Central Bank)

Aktuálnější představu ohledně finančních nákladů na vývoj hlubinného ukládání v Maďarsku lze odvodit z požadovaných nákladů na likvidaci vysokoaktivních odpadů uvedených v Maďarském národním programu nakládání s vyhořelým palivem a radioaktivním odpadem z roku 2016 (Hungary's national program for spent fuel and radioactive waste management 2016). Zde je uveden odhad nákladů na likvidaci VAO v cenové hladině roku 2015 [7].

Tab. 9 Předpokládané náklady na likvidaci vysokoaktivních odpadů v cenové relaci roku 2015 [7]


Fáze vývoje HÚ	Požadované náklady	
	[Mil HUF]	[Mil EUR]*
Příprava	58 130,0	187,52
Výstavba	293 568,1	946,99
Provoz	326 164,2	1052,14
Uzavírání a institucionální kontrola	67 416,2	217,47
Celkem	745 278,5	2404,12

*Poznámka: Pro přepočítání byl použit průměrný kurz 1 EUR = 310,00 HUF z roku 2015 (European Central Bank)

Inflace v r. 2015 byla -0,89 %

8.4 Použitá dokumentace

- [1] P. A. Witherspoon and G. S. Bodvarsson (eds.) 2006: International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation – Fourth Worldwide Review, Chapter 11 – Hungary, United States. doi:10.2172/1353043, <https://eesa.lbl.gov/worldwide-review/>
- [2] B. Faybishenko, J. Birkholzer, D. Sassani, and P. Swift, Peter (eds.) 2016: International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation – Fifth Worldwide Review, Chapter 10 –

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

- Hungary, United States. doi:10.2172/1353043., April 2017,
<https://www.osti.gov/servlets/purl/1353043>
- [3] Radioactive Waste Management Programmes in OECD/NEA Member Countries – Hungary, National Energy context, 2017
- [4] National policy of spent fuel management for MVM Paks NPP reactors, International Nuclear Engineering Department MVM Paks Nuclear Power Plant Ltd. Hungary, Public Dialogue-Forum and Exhibition AtomEco 2017
- [5] Comparison among different decommissioning funds methodologies for nuclear installations – Country Report Hungary on behalf of the European Commission Directorate-General Energy and Transport, H2 Service Contract TREN/05/NUCL/S07.55436,
https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/2600/file/2600_EUDecommFunds_HU.pdf
- [6] G. Konrád, K. Sebe, A. Halász, E. Babinszki 2010: Sedimentology of a Permian playa lake: the Boda Claystone Formation, Hungary, *Geologos*, 2010, 16 (1): 27–41, doi: 10.2478/v10118-010-0002-1, <https://www.researchgate.net/publication/250167415>
- [7] Hungary's national program for spent fuel and radioactive waste management (2016):
<http://www.rhk.hu/en/documents/2018/11/29/hungarys-national-program-spent-fuel-radioactive-waste-management/>

9 Projekt hlubinného úložiště v Kanadě

Zodpovědnost za nakládání s vyhořelým jaderným palivem a řešení jeho konečného uložení nese v Kanadě společnost Nuclear Waste Management Organization (NWMO). Plán pro nakládání s vyhořelým jaderným palivem, který obsahuje i výstavbu konečného úložiště vyhořelého jaderného paliva produkovaných kanadskými těžkovodními reaktory je označován zkratkou APM (Adaptive Phased Management). APM je multigenerační projekt, který bude realizován v několika fázích. Jedná se o tyto fáze:

- Výběr lokality a její schválení dozorným orgánem,
- Výstavba,
- Provoz,
- Post-provozní monitoring,
- Vyřazování z provozu a uzavření,
- Monitoring po ukončení provozu.

Výběr lokality a její schválení bude trvat přibližně 15 let, následuje výstavba v celkové délce trvání 10 let. Ukládání vyhořelého paliva do úložiště by mělo probíhat v průběhu dalších 40 let. Následně bude úložiště delší dobu monitorováno, před jeho vyřazením z provozu a uzavřením, po ukončení těchto etap bude probíhat další monitoring.

Implementace APM projektu by měla představovat investici v rozsahu 16 až 24 miliard dolarů financovanou vlastníky odpadu prostřednictvím oddělených fondů, které jsou vyžadovány v souladu se zákonem o jaderném odpadu. Klíčovými zařízeními, která jsou zahrnuta do projektu, jsou:

- Hlubinné úložiště,
- Závod na výrobu obalových souborů pro vyhořelé jaderné palivo,
- Závod na umístování vyhořelého jaderného paliva do kontejnerů,
- Závod na produkci materiálů sloužících k uzavírání ukládacích prostor úložiště,
- Národní centrum excelence,
- Závod na výrobu kontejnerů pro přepravu vyhořelého jaderného paliva,
- Transportní systémy pro vyhořelé jaderné palivo, včetně vývoje a údržby vozidel a pomocných zařízení.

9.1 Základní charakteristika úložiště

APM projekt by měl vyústit v samostatný komplex, který bude zahrnovat hlubinné úložiště pro dlouhodobé nakládání s vyhořelým jaderným palivem v Kanadě a řadu povrchových zařízení, která budou sloužit k umístování, návrhu, konstrukci a provozu úložiště [1], [2].

Hlubinné úložiště je navrženo jako multibariérový systém tak, aby bezpečně pojmul a izoloval vyhořelé jaderné palivo po dostatečně dlouhou dobu. V závislosti na konkrétních geologických podmínkách a podrobné charakteristice lokality bude úložiště vybudováno v hloubce cca 500 m. Vyhořelé jaderné palivo by mělo být umístěno do speciálních

transportních kontejnerů v místě vzniku (tj. v jaderných elektrárnách) a následně transportováno do úložiště.

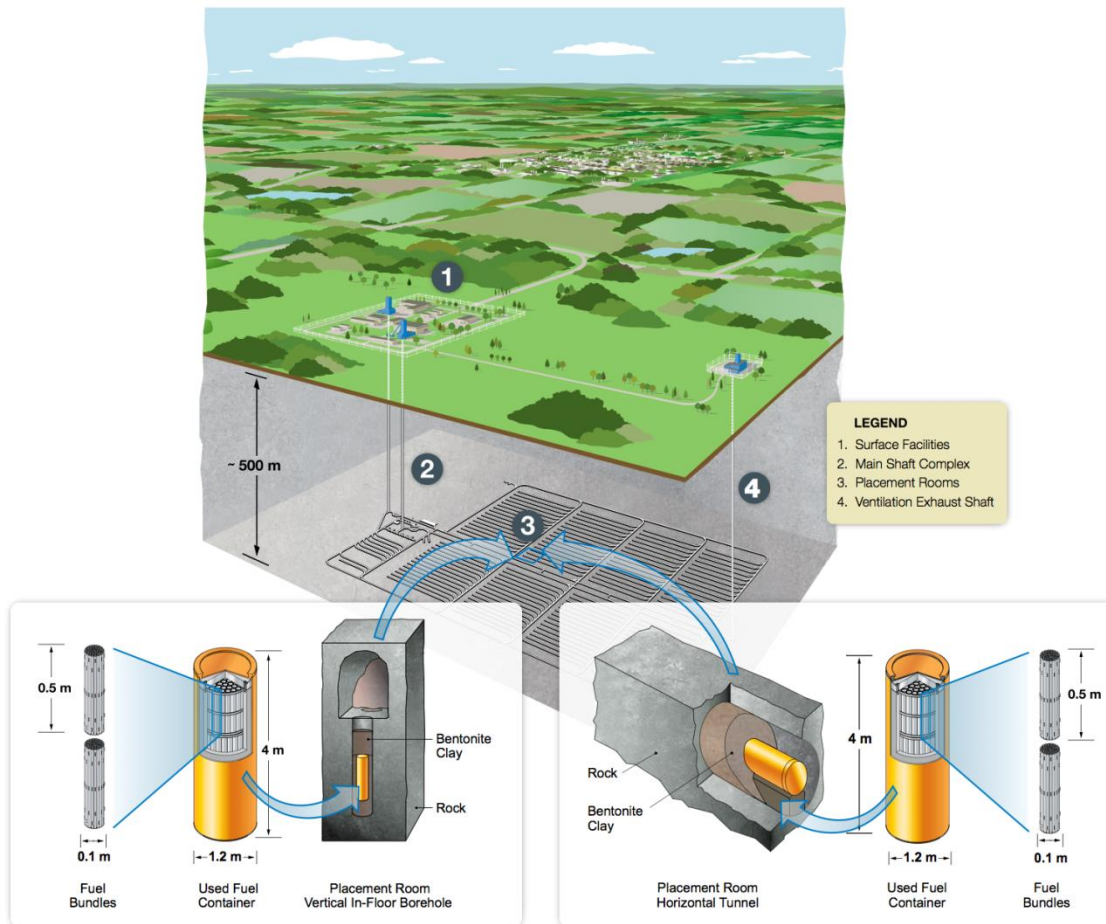
Povrchová zařízení v místě úložiště, která budou sloužit k manipulaci s palivem, jsou navržena tak, aby pracoval s cca 120 000 palivovými soubory typu CANDU za rok. Jejich primární funkcí bude přijmout palivo přepravené z meziskladů umístěných na jaderných elektrárnách, přemístit jej do trvanlivých, korozi-odolných kontejnerů a přemístit kontejnery do podzemního úložiště.

Kontejnery budou přemístěny dolů pomocí šachty nebo rampy a transportovány do podzemí do jedné z řady ukládacích prostor pomocí sítě přístupových tunelů a šachet. Kontejnery budou uloženy do vertikálních jímek vyražených na dně ukládacích prostor. Alternativou jsou také horizontální jímky ve stěnách ukládacích prostor. Vyhlobené prostory budou následně utěsněny bentonitovým jílem a dalšími těsnícími materiály. Dále bude instalován monitorovací systém, který zajistí kontrolu nad stavem a chováním úložiště.

Kontejnery na vyhořelé palivo jsou významnou složkou multibariérového systému, musí být navrženy tak, aby dlouhodobě pojmuly a izolovaly vyhořelé jaderné palivo. Smyslem izolačních systémů je poskytnout stabilní fyzikální a chemické prostředí omezující mobilitu radionuklidů, které by se mohly uvolnit za podmínek odchylovajících se od podmínek založených na hodnocení úložiště.

Po uložení vyhořelého jaderného paliva do úložiště, bude úložiště nadále monitorováno pro dostatečně dlouhou dobu tak, aby byla potvrzena bezpečnost celého systému. Doba trvání této kontroly bude určena na základě komunikace provozovatele a dozorného orgánu. Jakmile bude rozhodnuto o uzavření úložiště, vydá NWMO příslušná rozhodnutí před zahájením vyřazovaná z provozu. V rámci uzavření úložiště budou přístupové tunely a šachty zaplněny a utěsněny a ostatní zařízení budou odstraněna. Způsob a doba monitorování po uzavření úložiště budou určeny na základě konsenzu mezi komunitou žijící v oblasti úložiště a dozorným orgánem. Příklad koncepčního řešení úložiště je znázorněn na Obr. 14. Jak vyplývá z obrázku, úložiště obsahuje tyto součásti:

1. Nadzemní zařízení – jedná se o zařízení, která slouží k příjmu a přemístění vyhořelého paliva do korozi-odolných kontejnerů, které lze umístit do úložiště. Projekt bude vyžadovat plochu o rozměrech 600 x 500 m pro zařízení, která se budou nacházet nad zemí a přibližně plochu o rozměrech 100 x 100 m pro ventilační šachtu.
2. Hlavní šachta komplexu – hlavní a servisní šachta budou používány k dopravě kontejnerů s vyhořelým palivem, zařízení, personálu a materiálů sloužících k uzavírání ukládacích prostor do úložiště.
3. Ukládací prostory – podzemí úložiště se skládá z přístupových tunelů a ukládacích prostor o celkové rozloze přibližně 2,7 x 2,2 km a hloubce 500 metrů.
4. Ventilační šachta.



Obr. 58 Návrh řešení hlubinného úložiště pro ukládání vyhořelého paliva v Kanadě.

9.1.1 Výběr lokality

Státní organizace Nuclear Waste Management Organisation (NWMO), kanadská obdoba SÚJB, hledá vhodné místo pro úložiště prostřednictvím již výše zmiňovaného dlouhodobého procesu nazvaného Adaptive Phase Management, který byl zahájen v roce 2010. Proces postupně eliminuje vytipované oblasti ze seznamu registrovaných komunit. Do prvotního vyhodnocení bylo vybráno 21 oblastí v Ontariu a Saskatchewanu. Patnáct z těchto oblastí bylo vyřazeno a již nejsou dále zkoumány. Důvodem vyřazení bylo v naprosté většině nesplnění základních podmínek na úložiště a v jednom případě (Nipigonu, Ontario) došlo ke stáhnutí nabídky ze strany komunity. Studie tak nyní pokračují v šesti zbývajících oblastech. Všechny se nacházejí v provincii Ontario a jedná se o:

- Blind River a Elliotské jezero,
- Hornepayne,
- Huron-Kinloss,
- Ignace,
- Manitouwadge,
- Jižní Bruce.

NWMO prozatím neupřednostňuje žádnou z oblastí. Proces výběru se postupně pokračuje a očekává se, že preferované místo pro podrobnou charakterizaci lokality by mělo být vybráno do roku 2023. Preferované místo musí být ve vhodném skalním masivu a musí

kromě technických podmínek splňovat i společenskou přijatelnost. Projekt se proto musí rozvíjet v partnerství s okolní komunitou, původními obyvateli (First Nations) a obyvateli Métis.

9.2 Povrchová zařízení

Povrchová zařízení hlubinného úložiště jsou navržena tak, aby umožnila činnosti a poskytla zařízení pro příjem a přemístění vyhořelého jaderného paliva do ukládacích souborů a jejich transport do hlubinného úložiště. Uspořádání jednotlivých zařízení je znázorněno na Obr. 59 a jejich popis je podán v Tab. 10 a Tab. 11. Povrchová zařízení budou vyžadovat plochu o rozloze 600 x 550 m pro hlavní budovy a cca 100 x 100 m pro odvětrávací šachty.

Kromě výše uvedeného, bude potřeba plocha pro zpracování vytěžené horniny a skály. Uskladnění tohoto materiálu v průběhu provozu úložiště bude vyžadovat plochu cca 700 x 700 m, přičemž se předpokládá skladování do výšky mezi 3 až 6 m. Zároveň se bude v této oblasti nacházet nádrž pro dešťovou a odpadní vodu. Předpokládá se, že zařízení pro zpracování vytěžené horniny a skály bude umístěno mimo úložiště.

Klíčová zařízení budou chráněna oplocením, přičemž zařízení uvnitř oplocení budou dále rozdělena do dvou pásem:

1. Ochranné pásmo – jedná se o oblast s vysokým stupněm ochrany,
2. Ostatní pásma – jedná se o oblasti obsahující zařízení nevyžadující vysoký stupeň ochrany.

Hlavní zařízení uvnitř ochranného pásma jsou závod na umístování vyhořelého jaderného paliva do ukládacích kontejnerů (Used Fuel Packaging Plant - UFPP), budova hlavní a servisní šachty, pomocné budovy, oddělení kontroly kvality, laboratoře, zařízení pro nakládání s radioaktivním odpadem, elektrárna, rozvodna a trafostanice.

Všechny činnosti související s přijímáním, balením a skladováním vyhořelého paliva se provádí v UFPP. Provoz UFPP bude vyžadovat přibližně 95 zaměstnanců ročně po celou dobu provozu úložiště, která by měla být 40 let a více. Pomocné budovy budou zahrnovat management provozu, zasedací místnosti, místnost první pomoci, převlékárny a prádelny. Pro tyto provozy se očekává požadavek na 60 zaměstnanců ročně po dobu 40 let a více.

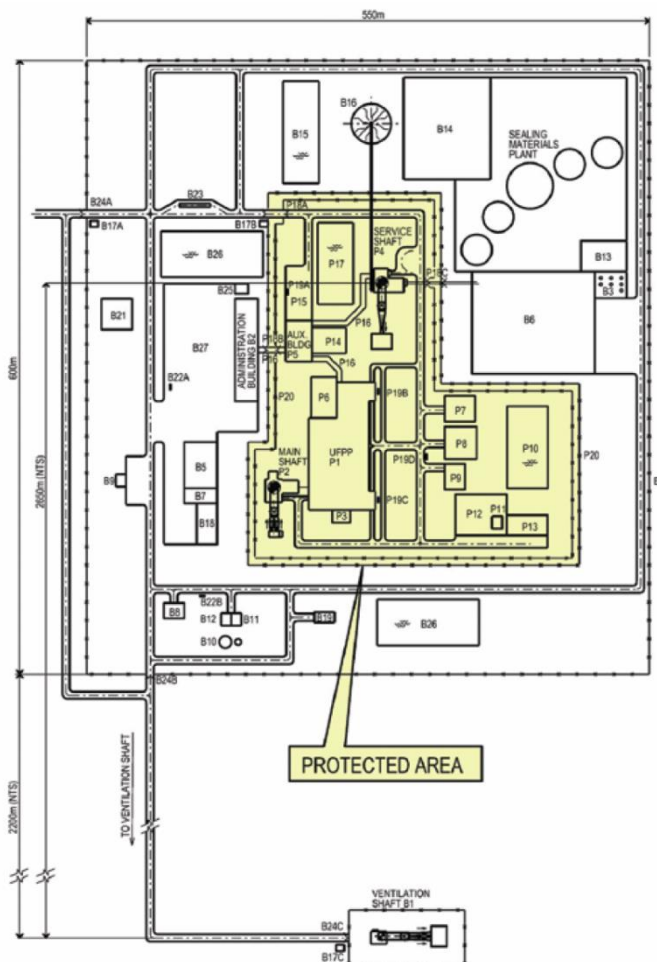
Ostatní pásma zahrnují administrativní budovu, požární stanici, budovu větrací šachty, taktéž pomocná zařízení jako je jídelna, garáže, sklad, úpravnu vody a čistírnu odpadních vod, heliport atd. Administrativní budovou budou vstupovat do areálu jak zaměstnanci, tak i návštěvníci, proto by měla poskytnout prostor alespoň pro 200 zaměstnanců. Sklady pohonných hmot a nádrže na vodu se budou nacházet také v tomto pásmu, stejně jako závod na drcení kameniva, betonárna a závod na hutnění těsnících materiálů.

Závod na drcení kameniva bude produkovat materiál pro betonárnu a závod na hutnění těsnících materiálů. Betonárna bude produkovat betonové směsi různého typu, které budou potřeba pro specifické potřeby úložiště. Závod na hutnění těsnících materiálů bude zpracovávat jak materiál ze závodu na drcení kameniva, tak i materiály z externích zdrojů, jako je jíla a bentonit. Tyto materiály budou míchány a hutněny a budou z nich vyráběny

bloky o vysoké a nízké hustotě, lehké výplňové a kompaktní bentonitové bloky a výplňové materiály pro ukládací jímky a uzavírání ukládacích prostor v úložišti.

Elektro rozvodna a trafostanice bude poskytovat elektrickou energii APM zařízením. Celkový elektrický příkon se očekává v oblasti 32 MW a bude zajištěn pomocí dvou snížovacích transformátorů, každý se schopností zpracovat 20 MW. Dále zde bude budova s nouzovými generátory a souvisejícím příslušenstvím. Celkem tři 1,5 MW diesel generátory budou poskytovat nouzově energii pro APM zařízení. Rozvod vody by měl poskytovat okolo 200 m³ vody denně, která bude upravena do kvality pitné vody.


Plánuje se vybudování samostatného pracoviště, které poskytne prostory pro nocleh, kuchyň, jídelnu, prádelnu, lékařská a rekreační zařízení pro více než 600 pracovníků, kteří se budou podílet na výstavbě APM zařízení. Toto pracoviště se bude nacházet mimo hlavní APM komplex. Klíčová zařízení a komponenty úložiště jsou blíže popsána v dalších kapitolách.



Obr. 59 Konceptní rozložení povrchových zařízení hlubinného úložiště.

Tab. 10 Budovy a komplexy nalézající se v ochranném pásmu

P1	Závod na umístování vyhořelého jaderného paliva do ukládacích kontejnerů	P11	Elektro rozvodna
P2	Komplex hlavní šachty	P12	Trafostanice
P3	Skládka	P13	Elektrárna
P4	Komplex servisní šachty	P14	Oddělení kontroly kvality a laboratoře
P5	Pomocná budova	P15	Parkoviště
P6	Zařízení pro manipulace s aktivním pevným odpadem	P16	Kryté chodby/pěší trasy
P7	Oblast zpracování odpadu	P17	Odkaliště
P8	Budova pro zpracování aktivního kapalného odpadu	P18	Kontrolní stanoviště
P9	Oblast skladování nízkoaktivního kapalného odpadu	P19	Autobusové zastávky
P10	Retenční nádrž pro dešťovou vodu	P20	Dvojitý bezpečnostní plot

	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

Tab. 11 Budovy a komplexy nalézající se v ostatních pásmech

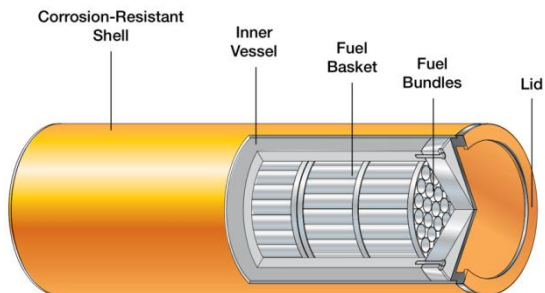
B1	Komplex ventilační šachty	B15	Odkaliště zpracovatelských vod
B2	Administrativní budova, včetně požární stanice a jídelny	B16	Skladování hlušiny
B3	Skládka těsnících materiálů	B17	Strážnice
B4	Oplocení	B18	Skladovací dvůr
B5	Garáže	B19	Čistírna odpadních vod
B6	Závod na hutnění těsnících materiálů	B20	Nevyužitá oblast
B7	Sklad a budova skladování nebezpečných materiálů	B21	Heliport
B8	Kompresorovna	B22	Autobusové zastávky
B9	Nádrže pro skladování pohonných hmot	B23	Váha
B10	Nádrže pro skladování vody	B24	Kontrolní stanoviště
B11	Úpravna vody	B25	Místnost bezpečnostní kontroly
B12	Budova čerpadel	B26	Retenční nádrž pro dešťovou vodu
B13	Betonárna	B27	Parkoviště
B14	Zařízení na drcení kamene		

9.2.1 Kontejner na vyhořelé jaderné palivo a závod na výrobu ukládacích kontejnerů

Kontejner na vyhořelé jaderné palivo je jednou z hlavních inženýrských bariér v multibariérovém systému hlubinného úložiště. Základními vlastnostmi kontejneru musí být odolnost korozi, mechanická odolnost, vhodná geometrie, dostatečná kapacita a kompatibilita s obklopujícími materiály, jako je bentonitový jííl.

Referenční návrh kontejneru spojuje vnější korozi-odolný materiál a vnitřní nosný materiál. Kontejner je navržen tak, aby odolal mechanickým a hydraulickým tlakům až do výše 45 MPa, včetně působení ledovcové masy (3 km ledu) v kombinaci s lito-statickými zatíženími v hloubce 500 m a tlaky způsobenými bobtnáním bentonitu. V současnosti NWMO zkoumá několik návrhů kontejnerů pro hlubinné úložiště a předpokládá se, že budou tyto návrhy v průběhu času dále zdokonalovány.

Pro hlubinné úložiště bude potřeba několik tisíc ukládacích kontejnerů na vyhořelé jaderné palivo v průběhu jeho provozu. Tyto kontejnery včetně nosných komponent budou vyráběny a sestavovány v závodě na výrobu kontejnerů. Závod se bude pravděpodobně nacházet v oblasti blízké úložišti. Závod by měl pro každý rok provozu úložiště vyrábět a dodávat stovky kontejnerů. Ukázka řešení kontejneru je znázorněna na Obr. 60.



Obr. 60 Schéma ukládacího kontejneru.

9.2.2 Závod pro přemísťování vyhořelého jaderného paliva do ukládacích kontejnerů

Závod pro přemísťování vyhořelého jaderného paliva do ukládacích kontejnerů bude jedno z klíčových zařízení v celém procesu ukládání. Musí být navržen tak, aby byl schopen přijímat vyhořelé palivo a zároveň je umísťovat a uzavírat do ukládacích kontejnerů. Závod bude v sobě zahrnovat všechny důležité oblasti, které souvisí s přijímáním kontejnerů s vyhořelým jaderným palivem z meziskladů, přijímáním prázdných ukládacích kontejnerů, naplněním ukládacích kontejnerů vyhořelým jaderným palivem, jejich uzavřením, kontrolou a přemístěním do úložiště. Samozřejmě zde bude i vybavení na znovuotevření a vyprázdnění ukládacích kontejnerů naplněných palivem, v případě že neprojdou nedestruktivním testováním a všemi zkouškami.

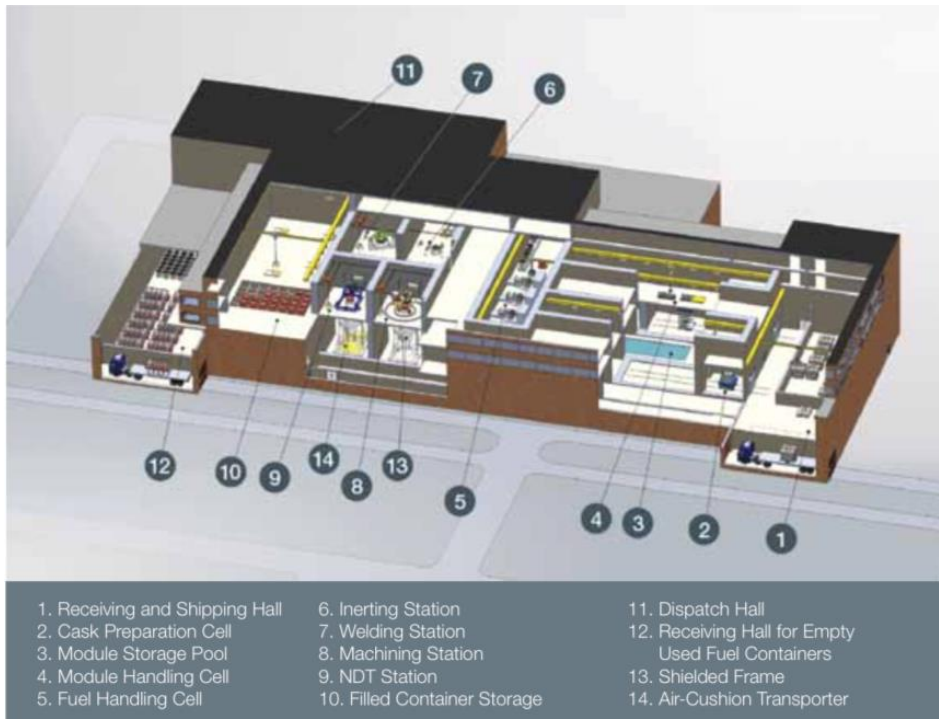
Aby byly zajištěny spolehlivé a kontinuální dodávky naplněných ukládacích kontejnerů do úložiště, bude závod obsahovat skladovací prostory pro vyhořelé palivo, prázdné a zaplněné kontejnery. Nicméně se předpokládá, že vyhořelé palivo bude umístěno do ukládacích kontejnerů ihned po jeho příjmu, tak aby se minimalizovala doba jeho skladování v závodě.

Koncept uspořádání závodu pro přemísťování vyhořelého jaderného paliva do ukládacích kontejnerů je zobrazen na Obr. 61.

Závod by měl být tvořen železobetonovou konstrukcí o rozměrech 125 x 65 metrů. Jeho kapacita je navržena na umístění přibližně 120 000 vyhořelých palivových souborů do ukládacích kontejnerů za rok. Závod by měl zahrnovat následující klíčové provozy, tak jak vyplývá z Obr. 61:

- Přijímací a přepravní halu pro transportní kontejnery a transportní přívěsy.
- Moduly s komorami pro vykládání paliva a jejich umístění do skladovacích modulů.
- Komory pro přemísťování paliva ze skladovacích modulů do ukládacích košů a umístění paliva v koších do kontejnerů.
- Transportéry pro přesuny kontejnerů s vyhořelým palivem uvnitř závodu za účelem jejich dalšího zpracování.
- Čtyři zpracovávací stanice:
 - stanice sloužící k uzavření kontejneru víkem a neplnění inertním plynem,
 - stanice sloužící k přivaření víka kontejneru,

- stanice pro obrábění a úpravu sváru,
 - stanice pro nedestruktivní testování zkoušky kontejnerů, zda splňují kritéria pro jejich uložení do úložiště.
- Modul pro skladování ukládacích kontejnerů s vyhořelým jaderným palivem.
 - Halu pro přesun kontejnerů do úložiště.



Obr. 61 Závod pro přemísťování vyhořelého jaderného paliva do ukládacích kontejnerů.

Příklad stanice sloužící k uzavírání kontejnerů a jejich plnění inertním plynem, svařování, obrábění a nedestruktivnímu testování je znázorněn na Obr. 62.

V případě, že nedestruktivní testy nebo vizuální kontrola odhalí nějaké defekty nebo znaky, které nejsou přijatelné pro umístění ukládacích kontejnerů s vyhořelým jaderným palivem do úložiště, je vadný kontejner přemístěn zpátky do závodu ve stíněném rámu. Zde je kontejner otevřen a vyjmut koš s vyhořelým palivem. Vadný kontejner pak dekontaminován a následně recyklován.



Obr. 62 Stanice sloužící k uzavírání kontejnerů, jejich plnění inertním plynem, svařování, obrábění a nedestruktivnímu testování.

9.2.3 Závod na produkci těsnících a ukládacích materiálů

Tento závod by měl produkovat inženýrské bariéry založené na jílovitých a cementových materiálech, které budou sloužit k uzavírání a utěsnění ukládacích a vytěžených prostor úložiště. Jejich úkolem bude zabraňovat pohybu podzemní vody, mikrobiální aktivitě a transportu radionuklidů v oblasti, která obklopuje kontejnery s vyhořelým jaderným palivem. Materiály připravované v závodě budou zahrnovat následující formy:

- Vysoce zhutněná tlumící směs: bentonitové disky a prstence.
- Hustá zásypová směs složená z bentonitu, jílu a kameniva.
- Lehká zásypová směs složená z bentonitu a písku.
- Standardní zásypová směs složená z bentonitových granulí.
- Směs pro utěsnění šachet složená z bentonitu a písku.
- Vysokohodnotný beton.

Závod zpracuje část vytěžené horniny z úložiště k výrobě drceného kamene a písku k výrobě zásypových materiálů a betonu. Tyto materiály budou skladovány přímo na lokalitě úložiště, kde budou použity k přípravě těsnících disků, prstenců a hutných bloků. Výroba těchto produktů se bude provádět pomocí vysokotlakých lisů.

9.2.4 Šachty a výtahy

Referenční návrh úložiště obsahuje tři šachty, které zajišťují přesun horniny, stavebního materiálu, zařízení a pracovníků mezi povrchovými zařízeními a podzemními ukládacími prostory.

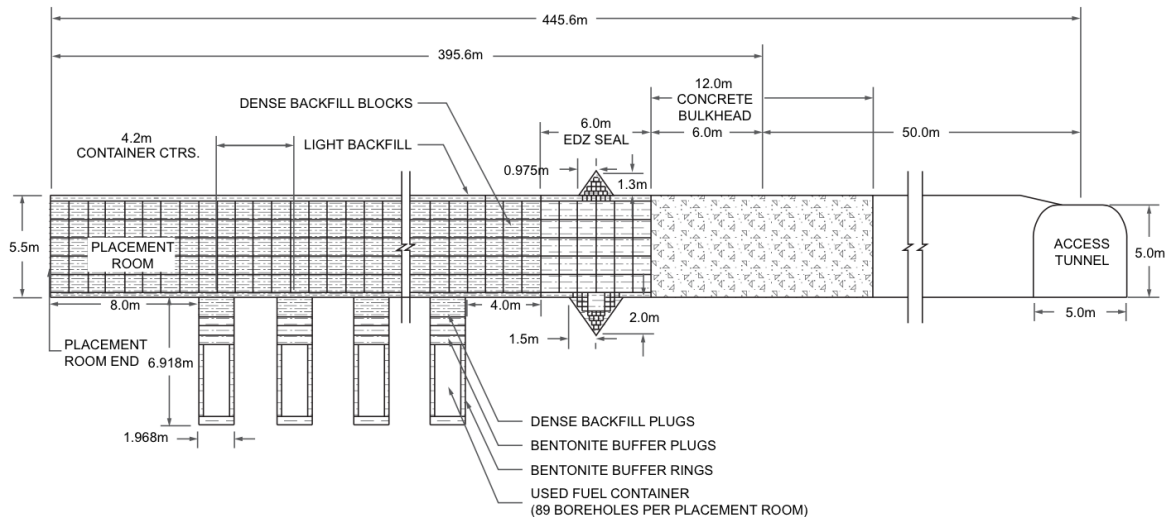
- **Hlavní šachta.** Hlavní šachta bude mít průměr 7 m a bude přepravovat kontejnery s vyhořelým jaderným palivem uvnitř stínícího transportního kontejneru. Součástí šachty bude zdviž s užitečným zatížením 63,5 t.
- **Servisní šachta.** Servisní šachta bude mít průměr 6,5 m a bude přepravovat personál, vybavení, vytěženou horninu, těsnící materiál jako je např. bentonit. Součástí šachty bude bubnový výtah s užitečným zatížením 10 t a možností nést až 50 osob.
- **Ventilační šachta.** Ventilační šachta bude mít průměr 6,5 m a bude zajišťovat odvětrávání úložiště. V případě nouze bude také schopna podporovat záchranné nebo evakuační práce. Větrací šachta bude opatřena také zdviží s užitečným zatížením 1,6t.

9.3 Podzemní prostory

Hlubinné úložiště bude tvořeno sítí podzemních tunelů, přístupových chodeb a ukládacích prostor pro ukládací kontejnery s vyhořelým jaderným palivem, podpůrnou infrastrukturou a zařízeními nezbytnými pro ukládací technologii. Úložiště by mělo být postaveno v hloubce okolo 500 m především s využitím vrtacích metod.

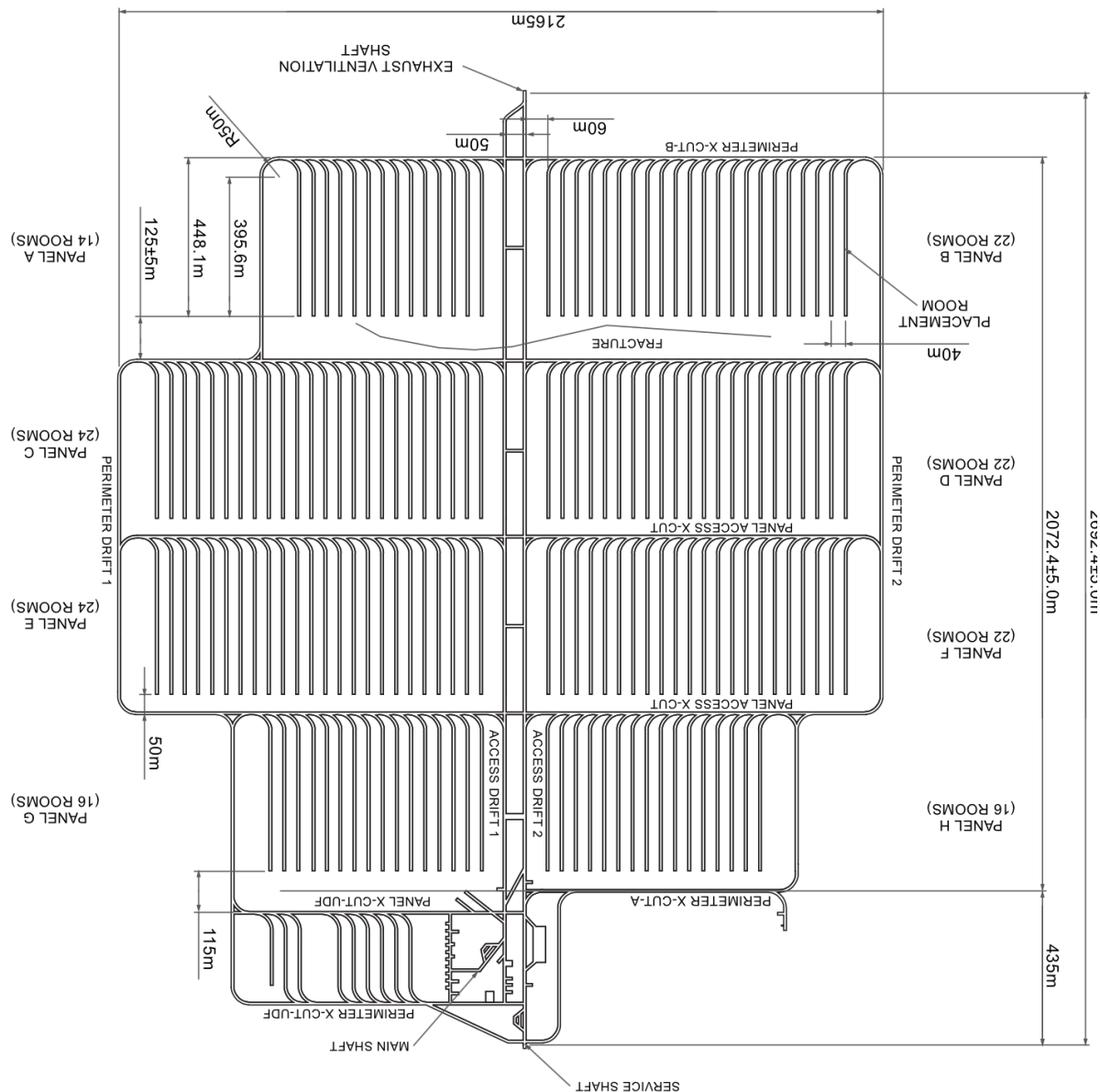
Příklad konstrukce a uspořádání úložiště s umístěním kontejnerů v jímkách na dně tunelů je znázorněno na Obr. 63. Toto řešení vychází z projektů úložišť ve Švédsku (SKB) a Finsku (Posiva). Každá z ukládacích prostor je 5,5 m vysoká a 396 m dlouhá. Rozteč od středu ke středu mezi jednotlivými prostory bude 40 m (viz Obr. 64). Ukládací jímky se budou nacházet na dně ukládacích prostor, budou mít průměr 2 m a jejich rozteč od středu ke středu bude 4,2 m.

V každé jímce bude uložen ukládací kontejner s vyhořelým jaderným palivem, který bude obklopen bentonitovými disky a prstenci a zbylý prostor bude vyplněn bentonitovými granulemi. Ukládací prostora nad jímkami bude vyplněna zásypovým materiálem, kterým bude bentonit a směs bentonitu a písku a dalšími těsnícími materiály. Každá skupina ukládacích prostor bude potřebovat k vybudování tři až čtyři roky a bude budována současně s umístěním kontejnerů.



Obr. 63 Ukázka návrhu ukládacího tunelu s jímkami pro ukládání kontejnerů s vyhořelým jaderným palivem.

Očekává se, že úložiště bude mít pravoúhlý tvar se dvěma centrálními přístupovými štolami a dvěma obvodovými přístupovými štolami, spojených kolnými tunely, které zajišťují přístup do ukládacích prostor. Ukládací prostory jsou seskupeny do skupin tak, jak je znázorněno na Obr. 64. Poloměr ohybu chodeb bude cca 50 m s cílem usnadnit pohyb transportních kontejnerů a souvisejících systémů. Jakmile budou jímky ukládací prostory zaplněny, prostora bude vyplněna vysoko-hustotními bloky. Intersticiální prostor mezi bloky bude vyplněn lehkým zásypovým materiálem, který bude uvnitř postupně zhutňován, tak aby se vyplnil také prostor mezi bloky a skálou. 6 metrů silné těsnění z bentonitu a 10 až 12 metrů silná betonová přepážka bude sloužit k uzavření vstupu do ukládacího prostoru. Zároveň zde budou umístěny monitorovací systémy, které umožní kontrolu na stavu uzavřených prostor i pro rozšířené monitorovací období. Uspořádání celého úložiště je zřejmé z Obr. 64.




Obr. 64 Rozvržení hlubinného úložiště.

9.4 Odhad nákladů

Odhad nákladů byl proveden pro předpokládané uložení 3,6 milionů vyhořelých palivových souborů z CANDU reaktorů provozovaných v Kanadě, odpovídající ekvivalentu cca 72 000 t TK. Hodnoty uvedené v tabulce vycházejí z odhadů z roku 2010 [3].

Tab. 12 Předpokládané náklady v mil. CAD na hlubinné úložiště v Kanadě dle jeho jednotlivých implementačních fází [3].

Fáze	Předpokládané období implementace fáze	Náklady [mlrd. CAD]
Umístování	2010 – 2024	1,5
Výstavba	2025 – 2034	3,4

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

Provoz	2035 – 2064	10,5
Rozšířené monitorování	2065 – 2134	1,5
Vyřazování z provozu a uzavírání	2135 – 2164	1,0
Celkem		17,9

Celkové náklady uvedené v tabulce lze přepočítat dle kursu CAD/EUR v 2014 na hodnotu cca 12 511 mil EUR.

Podrobné informace specifikující jednotlivé náklady, a především vstupní hodnoty pro odhad těchto nákladů lze naléznout ve zprávě [4].

9.5 Použitá dokumentace

- [1] NWMO: Description of Canada's Repository for Used Nuclear Fuel and Centre of Expertise, 2012.
- [2] NWMO: APM Conceptual Design and Cost Estimate Update Deep Geological Repository Design Report Crystalline Rock Environment Copper Used Fuel Container, APM-REP-00440-0001, 2011.
- [3] NWMO: APM Conceptual Design and Cost Estimate for a Deep Geological Repository in Crystalline Rock, Summary report, APM-REP-00440-0011, 2011.
- [4] NWMO: APM Conceptual Design and Cost Estimate Update Deep Geological Repository in Crystalline Rock - NWMO Input to Cost Estimate, APM-REP-00440-0009, 2011.

10 Porovnání projektů – souhrn

V této kapitole jsou souhrnně uvedeny klíčové údaje pro porovnání popsaných projektů. Samostatně jsou shrnuty technické charakteristiky a následně pak samostatně finanční (cenové, nákladové).

10.1 Technická charakteristika projektů


Pro porovnání technického řešení popsaných projektů jsou použita tato kritéria a jejich popis a význam:

- Ukládaný odpad – VJP bez přepracování /s přepracováním (VAO z přepracování), kombinace obojího, ostatní VAO a SAO s dlouhým poločasem přeměny
- Geologické prostředí
- Řešení přebalovacího závodu – podzemní, nadzemní, mimo areál
- Ukládací (úložný) obalový soubor – materiál, vnější, vnitřní
- Způsob zavážení – svislá šachta, svážnice (rampa)
- Způsob ukládání obalových souborů – horizontální, vertikální.

Parametry jednotlivých technických kritérií jsou souhrnně uvedeny v tabulce

Tab. 13 Základní technické parametry projektů HÚ

	Finsko	Kanada	Švýcarsko	Švédsko	Francie	Česko	Slovensko	Maďarsko
Forma VJP	bez přepracování	bez přepracování	bez přepracování a HLW po přepracování	bez přepracování	HLW po přepracování	bez přepracování	bez přepracování	není doposud rozhodnuto
Ostatní VAO/SAO	NE	NE	ANO vitrifikované VAO z přepracování	NE	ANO odpady po přepracování	ANO	ANO	ANO
Geologické prostředí	migmatitová rula	granit	jílovitá břidlice	metagranit	jílovitá skála	granit	granitoidy jílové horniny	pískovec
Přebalovací závod	v lokalitě, nadzemní	v lokalitě, nadzemní	v lokalitě, nadzemní	mimo lokalitu	v lokalitě, nadzemní	v lokalitě, podzemní	v lokalitě, podzemní	v lokalitě
Ukládací obalový soubor	vnější měděný, vnitřní litinový	vnější měděný, vnitřní litinový	ocelový	vnější měděný, vnitřní litinový	ocelový	ocelový	ocelový	vnější měděný, vnitřní litinový
Způsob zavážení	vertikální šachta	vertikální šachta	svážnice (rampa)	svážnice (rampa)	svážnice (rampa)	svážnice (rampa)	svážnice (rampa) – granit vertikální šachta – jíly	vertikální šachta
Způsob ukládání obalů	vertikální	vertikální	horizontální	vertikální	horizontální	Horizontáln / vertikální	horizontální	vertikální


 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

10.2 Finanční charakteristika projektů

Pro porovnání finanční náročnosti popsaných projektů bylo potřebné nejdříve cenové údaje uvedené v kapitolách 2 až 9 přepočítat na cenovou hladinu roku 2014.^{2,3} Kde nebylo z primárních zdrojů známo rozdělení na investiční, provozní a ukončovací složku nákladů, byl použit průměr získaný ze známých projektů. Rovněž tak pro výpočet měrných fixních a variabilních nákladů byl použit odhad vycházející z rozdělení těchto nákladů pro český a slovenský projekt. Cenové údaje přepočtené k roku 2014 jsou pak vyjádřeny v měrné jednotce – na tunu těžkého kovu. V případě údaje o množství ukládaného vyhořelého jaderného paliva v tunách těžkého kovu bylo nutné si v některých případech pomoci odborným odhadem. Rovněž odhad byl použit pro stanovení podílu nákladů na část HÚ určenou pro ukládání vyhořelého jaderného paliva, resp. HLW (Francie – ve francouzském projektu představují ILW nezanedbatelnou část ukládaných odpadů). Finanční charakteristiky jednotlivých projektů jsou uvedeny v tabulce 9. Odhadnuté hodnoty jsou vyznačeny.

² Použité inflační koeficienty pro náklady uvedené v primárních zdrojích: Finsko 12,13 %, Kanada 5,92 %, Švýcarsko -0,6 %, Švédsko 2,93 %, Francie 15,54 (pro dolní) resp. 1,61 % (pro horní) mez rozpětí, Česko 5,37 % (Eurostat, resp. canadianinflation.com), Maďarsko -0,85 % (Inflation calculator – Hungarian Forints)

³ Kurzy 2014 použité pro přepočet: CZK/EUR = 27,53, SEK/EUR = 9,10, CHF/EUR = 0,8233, HUF/EUR = 310


 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

Tab. 14 Finanční charakteristika projektů HÚ v cenové hladině 2014

	Finsko	Kanada	Švýcarsko	Švédsko	Francie	Česko	Slovensko	Maďarsko
Množství VJP [t TK]	5 500	72 000*	4 340	11 700	64 150	9 910	4 150	4 999,3
Celkové přepočtené náklady [mil. EUR]	3 722,7	13 251,6	4 878,9	2 992,9	10 572 až 11 363**	3 504,6 až 4 020,9	3 725,3 až 4 419,3	2 435,6
Z toho								
výstavba	781,7	3 578,0	1 146,5	1 672,8	2 841***	1 114	1 818,8	1 149,4*****
provoz	2 717,6	8 878,6	3 547,0	1 035,1	7 954***	2 371,5 až	1 906,5 až	1 065,9
uzavření	223,4	795,0	185,4	285,0	568***	2 887,8****	2 600,5****	220,3*****
[mil. EUR]								
Měrné náklady [mil. EUR/ t TK]	0,677	0,184	1,124	0,255	0,164 až 0,177	0,354 až 0,406	0,898 až 1,065	0,487
Měrné fixní náklady † [mil. EUR/ t TK]	0,253	0,070	0,407	0,114	0,066	0,148	0,406	0,181
Měrné variabilní náklady † [mil. EUR/ t TK]	0,424	0,114	0,717	0,141	0,111	0,258	0,659	0,306

* odborný odhad pro 3,6 mil. palivových článků CANDU

** odborný odhad nákladů poměrné části úložiště příslušející HLW

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

*** odhad v poměru 25:70:5 z vyšší částky

**** včetně nákladů na uzavření

***** včetně přípravy HÚ

***** včetně institucionální kontroly

† ČR a Slovensko dle známého rozpočtu, ostatní země odborný odhad (z vyšších částek), viz dále poznámka pod čarou č. 9.

11 ZÁVĚR

V rámci předkládané zprávy byla provedena rešerše veřejných zdrojů informací o projektech hlubinného úložiště ve světě. Konkrétně byly vyhledány podklady k projektům hlubinných úložišť ve Finsku, Kanadě, Švýcarsku, Švédsku, Francii na Slovensku a v Maďarsku, na jejichž základě lze získat představu o technickém i provozním řešení daného úložiště. Ze získaných materiálů byly tedy popsány základní charakteristiky úložiště (geologická formace a ochranné bariéry), jeho technické řešení (ukládací kontejner, povrchová zařízení, způsob ukládání apod.) a odhad nákladů na jednotlivé implementační fáze úložiště (tj. umístění, výstavba, provoz, vyřazování z provozu a uzavření úložiště). Na konci každé kapitoly, která se věnuje projektu konkrétního hlubinného úložiště, je uveden přehled dokumentace, z níž bylo v této zprávě čerpáno. V následujícím textu jsou shrnuty nejdůležitější poznatky získané o jednotlivých projektech hlubinného úložiště.


Výše zmíněné země budou ukládat buď jak nepřepřacované vyhořelé jaderné palivo, tak jako v případě Švýcarska souběžně také určité množství HLW, který vznikl přepracováním části vyhořelého jaderného paliva ve Francii a ve velké Británii, tak HLW vzniklý prakticky kompletním přepracováním vyhořelého jaderného paliva (Francie). V případě Maďarska pak otázka přepracování či přímého ukládání doposud nebyla vyřešena.

Co se týká geologického prostředí, tak v případě lokality ve Finsku se jedná o migmatitovou rulu, v Kanadě a Švédsku předpokládají umístit úložiště do oblasti, kde se nacházejí krystalické horniny podobné granitické rule (Švédsko v metagranitu s vysokým obsahem křemene). Český projekt předpokládá umístění v granitu. Ve Švýcarsku se jedná především o formace obsahující jílovitou břidlici. V Maďarsku tělo zvažované formace sestává hlavně z albitického jílovce. Obdobně ve Francii jde jílovitou skálu s vrstvami vápence a slínu v nadloží.

Skladba nadzemních zařízení je u všech projektů velmi podobná. Většina projektů předpokládá vybudovat v areálu úložiště nadzemní závod pro přebalování vyhořelého jaderného paliva /HLW do ukládacích obalových souborů a jejich uzavření (tzv. přebalovací závod). V České republice je dnes rozpracovávána alternativní varianta umístění závodu v podzemí, přičemž tato možnost je navrhována i pro Slovensko. Pouze ve Švédsku bude obdobný přebalovací závod umístěn ve zcela jiné lokalitě.

Ukládací obalový soubor bude v případě finského, švédského, maďarského a pravděpodobně i kanadského projektu tvořen měděným pláštěm s vnitřním nosným kontejnerem z litiny. Švýcarský projekt předpokládá umístění palivových souborů nebo vitrifikovaného HLW odpadu do ukládacích obalových souborů z oceli, nicméně měděný plášť s ocelovou vložkou je uvažovanou alternativou. V českém projektu se předpokládá využití ocelového ukládacího obalu, který je v současnosti ve fázi vývoje. HLW ve francouzském projektu budou baleny do kontejnerů z nerezové oceli.

Finský a kanadský model úložiště je založen na zavážení ukládacích obalových souborů do podzemí pomocí výtahu ve vertikální šachtě spojující nadzemní prostory s podzemními. Obdobně je tomu i u Maďarského modelu úložiště. U švýcarského, švédského, českého a francouzského řešení úložiště by měly být ukládací obalové soubory dopravovány do podzemních prostor pomocí přístupové rampy (úpadnice, svážnice, šroubovice). Ve

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

švýcarském a francouzském konceptu se počítá s využitím kolejového dopravního systému (lanovka).

Jak finský, tak i švédský, maďarský a kanadský koncept úložiště navrhuje umístit obalové soubory do vertikálních ukládacích jímek, avšak souběžně je intenzivně studována a posuzována varianta horizontálního umístění. V případě švýcarského a francouzského modelu úložiště je preferováno ukládacích obalových souborů do horizontálních tunelů, ale i zde je souběžně analyzována možnost vertikálního umístění těchto souborů. Český projekt v aktualizaci projektu byl uveden koncept horizontálního ukládání, nicméně je nyní opět zvažován i koncept vertikálního ukládání. Finský, švédský, kanadský a český projekt počítají s obklopením ukládacích obalových souborů umístěných v ukládací šachtě zhutněnými bentonitovými těsnícími prefabrikáty. Francouzský projekt předpokládá, že obalové soubory s HLW, opatřené keramickými vodícími prvky, budou ukládány natěsně do horizontálních šachet s kovovou výstelkou (kovový tubus) bez další izolace. Švýcarský projekt předpokládá uložení ukládacích obalů do šachty v hostitelské skále s drátěným obalem ukládacího pouzdra na podstavci z bentonitu, přičemž prostor mezi skálou a obalem bude vysypán bentonitovým granulátem.

Všechny projekty předpokládají postupné uzavírání jednotlivých ukládacích prostor a budování dalších potřebných ukládacích sekcí v průběhu provozu úložiště. Taktéž bude po uzavření úložiště prováděn monitoring.

Na základě získaných informací o nákladech na hlubinné úložiště lze konstatovat, že se jejich struktura v rámci jednotlivých projektů příliš neliší. V cenové hladině roku 2014 jsou náklady na porovnávané projekty hlubinného úložiště odhadovány takto:

• Finsko	celkem 3 722,7 mil. EUR	poměrně 0,677 mil. EUR/t TK
• Kanada	celkem 13 251,6 mil. EUR	poměrně 0,184 mil. EUR/t TK
• Švýcarsko	celkem 4 918,3 mil. EUR	poměrně 1,124 mil. EUR/t TK
• Švédsko	celkem 2 992,9 mil. EUR	poměrně 0,255 mil. EUR/t TK
• Francie ⁴	celkem 11 363,0 mil. EUR	poměrně 0,177 mil. EUR/t TK
• ČR ⁵	celkem 4 020,9 mil. EUR	poměrně 0,406 mil. EUR/t TK
• Slovensko ⁵	celkem 4 419,3 mil. EUR	poměrně 1,065 mil. EUR/t TK
• Maďarsko	celkem 2 434,7 mil. EUR	poměrně 0,487 mil. EUR/t TK

Rozdělení celkových nákladů hlubinného úložiště se v průměru pohybuje na úrovni zhruba 25 % za výstavbu, 70 % za provoz a 5 % za uzavření úložiště⁶. Rozdělení nákladů u českého projektu tomuto poměru rovněž odpovídá. Poněkud odlišný poměr vychází pro Švédsko (55 % výstavba, 36 % provoz, 9 % uzavření), což lze přisoudit faktu, že přebalovací závod bude umístěn ve zcela jiné lokalitě a jeho náklady na výstavbu a provoz (včetně výroby kontejnerů) nejsou do nákladů samotného úložiště započteny. To je hlavní důvod v rozdílu celkových i měrných nákladů švédského úložiště oproti ostatním (rozsahem srovnatelným⁷) projektům.

^{4,6} Francie, ČR a Slovensko horní odhady

⁶ Průměr za finský, kanadský a švýcarský projekt vychází přesně 24:71:5.

⁷ Finský, švédský, český, slovenský a švýcarský

Pokud bychom k ceně švédského projektu připočetli cenu finského přebalovacího závodu, vyjdou měrné náklady švédského projektu 0,370 mil. EUR/t TK. V nákladech švédského (a pravděpodobně též finského) projektu zřejmě také nejsou v plné výši zohledněny minulé náklady na výzkum a vývoj dlouhodobě probíhající před zpracováním finálních rozpočtů projektů samotného úložiště (včetně podzemní laboratoře). Podobné rozdělení celkových nákladů na hlubinné úložiště jako ve Švédsku vychází též v případě Maďarska, a to následující 47% výstavba, 44% provoz a 9% uzavírání a institucionální kontrola. V tomto případě jsou do nákladů na výstavbu započteny též náklady na předchozí vývoj a přípravu hlubinného úložiště.

Pro stanovení fixních a variabilních měrných nákladů byl, vyjma slovenského a českého projektu, použit odhad skladby fixních a variabilních nákladů vycházející z poměrů u českého a slovenského projektu⁸ (jejichž náklady jsou dovozeny obdobnou metodikou).

Nižší měrné náklady českého projektu (proti finskému, který lze považovat pro účely porovnání za měřítko) lze přisoudit rozdílu v ceně materiálu ukládacího souboru (měď vs. ocel). Naopak švýcarský koncept vychází relativně nejdražší; část rozdílu jde jistě na vrub malému množství odpadů, které má být uloženo. Významný rozdíl se však v ceně švýcarského projektu (oproti finskému) jeví v položkách umístování (cca 362 mil. EUR) a výstavba laboratoře (cca 759 mil. EUR). V případě odečtu těchto položek od ceny projektu vychází měrný náklad 0,866 mil. EUR/t TK, což už lze považovat s finským projektem za srovnatelné. V případě Maďarska pak vycházejí měrné náklady velmi podobně jako je tomu u českého projektu, a to je cca 0,406 mil. EUR/t TK.

V případě kanadského a francouzského projektu lze nízké měrné náklady přisoudit úspoře z množství, nikoliv jednoduchosti řešení. Měrné náklady na francouzský projekt vycházejí nízké, i když jsou celkové náklady na projekt HÚ vztaženy pouze k ukládanému palivu (HLW) a není tak zohledněn vysoký podíl části HÚ příslušející středně aktivním odpadům (náklady vycházejí 0,261 mil.⁹ EUR/t TK).

Provést porovnání v dělbě nákladů na fixní a variabilní složku je rovněž obtížné. Vyjma Česka a Slovenska je dělba celkových, resp. výstavbových a provozních nákladů na fixní a variabilní složku pouze naším odborným odhadem. Z porovnání těchto údajů rovněž lze pouze potvrdit obecný závěr, že s množstvím ukládaného paliva měrné náklady klesají.

Pokud porovnáme zjištěné skutečnosti s výsledky Studie nákladů na HÚ v České republice lze konstatovat:

- Předpokládané technické řešení HÚ v České republice je velmi blízké konceptům švédskému, resp. finskému a slovenskému; ve skutečnosti tyto koncepty ze sebe v uvedeném pořadí postupně vycházejí. Slovenský koncept neobsahuje žádné atypické řešení. V konceptu samotném jsou některé významné nejistoty, které se mohou projevit na celkové ceně oběma směry: volba materiálu pro ÚOS a nehomogenity prostředí HÚ, které se projeví až při samotné výstavbě a nelze je průzkumem stanovit předem.

⁸ Fixní náklady byly odhadnuty jako součet 45 % nákladů výstavby, 30 % nákladů na provoz a náklady na uzavření HÚ. Variabilní náklady byly odhadnuty jako 55 % nákladů na výstavbu a 70 % nákladů na provoz.

⁹ 16 500 mil. EUR * inflace 1,0161 /64 150 = 0,261 mil. EUR /t TK

- Celkové náklady na české hlubinné úložiště jsou srovnatelné s náklady vycházejícími pro Finsko, přičemž jsou cca o 8 % vyšší; Nejnižší celkové náklady pak vycházejí pro maďarský projekt HÚ a druhé nejnižší náklady pak připadají Švédku.
- Měrné náklady ukazují, že jsou závislé na množství ukládaného paliva; s množstvím paliva významně klesají. Množstvím ukládaného paliva je České republice blízké jen Švédsko. Pokud bychom k ceně švédského projektu připočetli cenu přebalovacího závodu, vyjdou měrné náklady švédského projektu 0,370 mil. EUR/t TK a blížily by se tak poměrným nákladům českého projektu 0,364-0,406 EUR/t TK. České a švédské úložiště jsou koncipována na více než dvojnásobné množství uloženého paliva a jejich měrné náklady tak už vycházejí nižší, pravděpodobně bez vazby na jiné faktory. Závislost měrných nákladů na množství ukládaného VJP lze velmi dobře demonstrovat také na případu České a Slovenské republiky, kdy odhady celkových nákladů na HÚ jsou téměř srovnatelné, nicméně měrné náklady na slovenské úložiště jsou více než dvojnásobné, a to v důsledku méně než polovičního množství ukládaného vyhořelého jaderného paliva na Slovensku oproti předpokládanému množství v ČR.
- Pro porovnání nákladů (práce a cen výrobků) by bylo rovněž nutné vzít v úvahu komparativní cenový index (comparative prices index, OECD Stat¹⁰). Zohlednění tohoto indexu je nad možností a zadání této práce. Hodnota indexu pro Švýcarsko však může pomoci vysvětlit, proč jsou měrné náklady švýcarského HÚ výrazně nejvyšší. Rozdíly v cenách, resp. měrných nákladech ostatních HÚ však tímto indexem už vysvětlit nelze.
- Rovněž je nutné vzít v úvahu, že vývoj HÚ v uvedených porovnávaných zemích probíhá dlouhodobě a tímto vývojem procházejí i údaje a znalosti o těchto úložištích včetně zpřesňování nejistot a odhadu nákladů. Například koncept hlubinného úložiště v Maďarsku či na Slovensku je z tohoto pohledu v počáteční fázi a je zatížen všemi počátečními nejistotami. Rozpracování a precizace technického řešení HÚ se bude zajisté i nadále opírat o mezinárodní zkušenosti. Souběžně s tím poroste míra detailu a znalosti o řešení nejistot, se kterými budou odhady nákladů zpřesňovány.

¹⁰ http://stats.oecd.org/OECDStat_Metadata, při základu Česká republika = 100 % je pro další porovnávané země cenový index následující: Kanada 165, Finsko 177, Francie 156, Maďarsko 89, Slovensko 98, Švédsko 176, Švýcarsko 208 (počítáno z průměrných hodnot za rok 2018).

PŘÍLOHA 1

Očekávaný politický vývoj v oblasti hlubinného ukládání v zemích EU

Experti z celého světa a mezinárodní organizace, jako je například Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE) či Agentura pro jadernou energii při Organizaci pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD/NEA), se obecně shodují na tom, že prakticky jediným správným, technicky a ekonomicky proveditelným řešením dlouhodobého ukládání VAO a VJP je v současné době jejich ukládání do hlubinného úložiště (HÚ). Téměř všechny země s jaderným programem tedy intenzivně pracují na přípravě hlubinného úložiště, a to i přes paralelní výzkum v oblasti transmutačních technologií. Komplexní problematiku vývoje a realizace hlubinného úložiště lze rozdělit na aspekty geologické, environmentální, bezpečnostní, technologické či ekonomické. V posledních letech, vystupují do popředí také aspekty komunikační, politické a etické, zvláště pak v souvislosti s procesem výběru vhodné lokality pro umístění HÚ.

Jako hostitelské prostředí hlubinného úložiště byly ve světě zkoumány horninové formace různého typu, jako jsou krystalické horniny (např. žula) a usazeniny (jíly a solná ložiska). Ve všech těchto horninových prostředích byla ověřena možnost výstavby hlubinného úložiště a byla prokázána jeho bezpečnost.

Podmínkou zdárného vývoje a následné implementace projektu hlubinného úložiště je také existence pevného legislativního rámce.

Mezinárodní společenství, zejména prostřednictvím MAAE, vytvořilo celou řadu všeobecně platných principů a standardů pro bezpečné využívání jaderné energie a ionizujícího záření, které se vztahují i na oblast nakládání s RAO a VJP [1]. Tyto standardy jsou postupně aktualizovány. Jejich poslední aktualizace proběhla v roce 2006, kdy MAAE ve spolupráci s Evropským společenstvím pro atomovou energii (Euratom), OECD/NEA a dalšími mezinárodními organizacemi vypracovala a zveřejnila tzv. „Základní zásady bezpečnosti“ [2]. Tyto základní principy lze implementovat ve všech zemích a na všechny typy RAO včetně VJP, přičemž nezáleží na jejich fyzikální nebo chemické charakteristice ani na jejich původu. Mezi obecné, základní principy formulované MAAE patří zejména tyto [1][2]:

1. Odpovědnost za bezpečnost – primární odpovědnost za bezpečnost má osoba nebo organizace, která odpovídá za zařízení nebo činnosti s radiačními riziky.
2. Úloha vlády – musí být ustanoven a udržován efektivní právní a vládní rámec zajišťující bezpečnost, včetně nezávislého státního dozoru.
3. Řízení a zajištění bezpečnosti – efektivní řízení a zajištění bezpečnosti musí být zavedeno a udržováno v organizacích, které mají vztah k zařízením a činnostem, které představují radiační rizika.
4. Zdůvodnění zařízení a činností – zařízení a činnosti s radiačními riziky musí přinášet celkový prospěch.
5. Optimalizace ochrany – ochrana musí být optimalizována k zajištění nejvyšší úrovně bezpečnosti, která může být rozumným způsobem dosažena.

6. Omezení rizika jednotlivců – opatření pro kontrolu radiačního rizika musí zajistit, že žádný jednatel neponese neakceptovatelné riziko újmy.
7. Ochrana současné generace i generací budoucích – lidé a životní prostředí musí být chráněni před radiačními riziky nyní i v budoucnu.
8. Předcházení nehodám – musí být prováděna veškerá praktická opatření pro předcházení jaderným nebo radiačním nehodám.
9. Havarijní připravenost – pro případ jaderné nebo radiační nehody musí být zajištěna havarijní připravenost.
10. Ochranná opatření k omezení existujících nebo neregulovaných radiačních rizik – ochranná opatření k omezení existujících nebo neregulovaných radiačních rizik musí být zdůvodněná a optimalizovaná.

Mezi další neméně důležité požadavky patří také:

11. Účast veřejnosti při rozhodování – rozhodnutí, která mohou mít potenciální vliv na zdraví, společnost nebo životní prostředí, by měla být prováděna s těmi, kterých se dotýkají.
12. Udržitelný rozvoj – vzhledem k dlouhému času, po který musí být s radioaktivním odpadem bezpečně nakládáno, je nutné brát v úvahu aspekty udržitelnosti. Mělo by být tedy zajištěno, aby potřeby současné generace byly naplňovány, ale neomezovaly se možnosti budoucích generací naplňovat jejich potřeby.

Klíčovým dokumentem na poli evropského práva v oblasti nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem, týkající se také hlubinného ukládání, je Směrnice Rady 2011/70 Euratom ze dne 19. července 2011, kterou se stanoví rámec společenství pro odpovědné a bezpečné nakládání s vyhořelým jaderným palivem a radioaktivním odpadem [3]. Směrnice Rady 2011/70 Euratom definuje závazné požadavky plynoucí z obecných principů uvedených v dokumentech MAAE, které by měly členské země EU implementovat do svého vnitrostátního programu / politiky nakládání s RAO a VJP:

- 1) Konečná odpovědnost za bezpečnost při nakládání s VJP a RAO spočívá na jednotlivých členských státech EU.
- 2) Členské státy musí zajistit, aby byly k dispozici náležitě finanční prostředky pro nakládání s VJP a RAO.
- 3) Skladování VJP a RAO, včetně dlouhodobého skladování, je dočasným řešením, nikoli alternativou k jeho uložení. Nejbezpečnější a nejudržitelnější alternativou v konečné fázi nakládání s VAO a VJP je hloubkové geologické ukládání.
- 4) Členské státy mají morální povinnost zabránit nepřiměřenému zatížení budoucích generací v souvislosti s VJP a RAO.
- 5) Je uplatňována politika transparentnosti – zajištění transparentnosti prostřednictvím informování a spoluúčasti veřejnosti do procesu rozhodování.
- 6) Vývoz RAO a VJP lze realizovat pouze za velice přísných podmínek.

- 7) Vznik RAO má být omezen na nejnižší možnou úroveň, a to ve smyslu jak aktivity, tak i objemu, pomocí vhodných konstrukčních opatření a postupů při provozu zařízení a jeho vyřazování z provozu, včetně recyklace a opětovného použití materiálů.
- 8) Je zohledněna vzájemná provázanost všech kroků během vzniku vyhořelého paliva a radioaktivního odpadu a nakládání s nimi.
- 9) S VJP a RAO se nakládá bezpečným způsobem, a to i v dlouhodobém měřítku za pomoci prvků pasivní bezpečnosti.
- 10) Opatření jsou prováděna za použití odstupňovaného přístupu.
- 11) Náklady spojené s nakládáním s VJP a RAO nesou ti, kteří tyto materiály vytvořili.
- 12) Ve všech fázích nakládání s VJP a RAO se použije proces rozhodování založený na důkazech a dokumentaci.
- 13) Je třeba určit klíčové ukazatele pro sledování pokroku při plnění vnitrostátního programu nakládání s RAO a VJP.
- 14) Je třeba zajistit činnosti výzkumu, vývoje a prokazování, které jsou nutné k provádění řešení pro nakládání s VJP a RAO.

Směrnice Rady 2011/70 Euratom ukládá členským státům povinnost stanovit a udržovat vnitrostátní rámec pro nakládání s VJP a RAO. Všechny členské státy EU s jaderným programem tak měly Evropské komisi (EK) do 23. srpna 2015 předložit své národní plány pro nakládání a uskladnění radioaktivního odpadu respektující normy vytvořené v rámci Mezinárodní agentury pro atomovou energii (MAAE). Evropská komise tyto národní plány pro nakládání s jaderným odpadem vyhodnotí a bude mít také právo je vetovat. Státy musí ve svých plánech řešit nejen nakládání s vyhořelým palivem, ale také udělování licencí, provádění kontrol a inspekcí, vymahatelnost, zajištění transparentnosti a informování veřejnosti, způsob financování nebo vytvoření nezávislého dozorčího orgánu. Vnitrostátní programy jednotlivých členských zemí musí tedy obsahovat následující základní informace:

- a) celkové cíle vnitrostátního programu /politiky členských států, pokud jde o nakládání s VJP a RAO;
- b) významné mezníky a jasné časové harmonogramy pro dosažení těchto mezníků s ohledem na všeobecné cíle vnitrostátních programů;
- c) soupis inventáře veškerého VJP a RAO včetně odhadu budoucího množství VJP a RAO a odpadu vzniklého při vyřazování jaderných zařízení z provozu; inventář by měl také obsahovat údaje o umístění VJP a RAO, jejich charakterizaci a rozřídění v souladu s odpovídající klasifikací RAO;
- d) koncepce nebo plány a technická řešení pro nakládání s VJP a RAO od jejich vzniku až po jejich uložení;
- e) koncepce nebo plány pro fázi životnosti úložiště po jeho uzavření včetně doby, po kterou bude prováděn odpovídající monitoring, a způsobů dlouhodobého uchovávání znalostí o daném úložišti;
- f) činnosti v oblasti výzkumu, vývoje a prokazování, které jsou nutné k provádění řešení pro nakládání s VJP a RAO
- g) povinnosti v souvislosti s prováděním vnitrostátního programu a klíčové ukazatele výkonnosti pro sledování pokroku při jeho naplňování;

- h) posouzení nákladů na vnitrostátní program a podklady a hypotézy pro toto posouzení včetně časového profilu;
- i) platný režim či režimy financování programu;
- j) strategie či způsoby zajištění transparentnosti dle článku 10 Směrnice Rady 2011/70 Euratom;
- k) případnou dohodu či dohody uzavřené s některým členským státem či třetí zemí ohledně nakládání s VJP a RAO včetně využívání úložišť (v případě mezinárodní spolupráce při přepracování/zpracování VJP či existence mezinárodního/regionálního úložiště).

Evropská unie již dlouhá léta podporuje také iniciativy některých členských zemí EU týkající se vývoje společného mezinárodního/regionálního hlubinného úložiště. Evropská unie například podpořila vznik Evropské organizace pro vývoj úložiště (European Repository Development Organisation – ERDO) [4], jejíž pracovní skupina byla založena z iniciativy čtrnácti evropských zemí v návaznosti na závěry evropského projektu SAPIERR II financovaného EK [5]. V únoru 2009 se konalo první zasedání Nadnárodní pracovní skupiny ERDO (ERDO-WG), jejíž členové jsou nominováni příslušnými organizacemi na úrovni vlády. V této organizaci jsou však pouze menší země, které buď vůbec neprovozují jaderné elektrárny, nebo je jejich program vývoje HÚ zatím ve velmi rané fázi. Současnými členy ERDO-WG jsou země jako je Rakousko, Irsko, Nizozemsko, Polsko, Slovensko, Bulharsko, Itálie, Litva, Rumunsko a Slovinsko. Cílem této pracovní skupiny je sdílení informací a zkušeností z oblasti vývoje HÚ a prozkoumání možností vzniku Vývojové organizace ERDO, která by se zabývala vývojem jednoho nebo více sdílených hlubinných úložišť v Evropě. ERDO-WG vypracovala dva klíčové dokumenty shrnující výhody společného postupu při vývoji mezinárodního HÚ ve dvou rovinách – je zde předložen plán vzniku a možný způsob podílového vlastnictví budoucí nadnárodní vývojové organizace ERDO [6] a dále pak jsou zde představeny základní možné modely struktury ERDO, její pracovní náplně a financování [7].

Také Směrnice Rady 2011/70 Euratom počítá s možností výstavby společných/mezinárodních úložišť, na kterých se může dohodnout více států. Konečné uložení v zahraničí bude možné pouze v případě, že bude existovat platná mezistátní smlouva se zemí, ve které má být jaderný odpad uložen. Kromě toho musí být dodrženy normy Evropské unie pro kontrolu jaderného odpadu. Evropská unie tak v principu povolila vývoz jaderného odpadu do zemí, které budou mít v době transportu k dispozici konečné úložiště radioaktivních odpadů s vysokými bezpečnostními parametry [1]. Podobné podmínky budou platit také pro odvoz RAO a VJP do států mimo Evropskou unii. Dle této směrnice bude vývoz do třetí země povolen pouze tehdy, budou-li splněny následující podmínky:

1. Hlubinné úložiště je již v provozu před vývozem VJP a VAO;
2. Daná země má smlouvu s EU nebo je signatářem smlouvy MAAE o nakládání s VJP a RAO (Joint Convention on the Safety of Spent Nuclear Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management) [8];
3. Úložiště splňuje všechny bezpečnostní požadavky v souladu se směrnicí Rady 2011/70/EURATOM.


Myšlenka mezinárodního úložiště je z ekonomického hlediska velmi výhodná, nicméně v současné době naráží na politické a společenské překážky. Vzniku společného mezinárodního úložiště rovněž brání legislativa řady zemí zakazující dovoz radioaktivních odpadů. Dle dosavadních zkušeností se také zdá, že postoj dotčené veřejnosti k vybudování společného úložiště, které by přijímalo odpady i z jiných zemí, by byl velmi negativní. Zásadním problémem tedy je nalezení vhodné lokality, která by byla dlouhodobě stabilní, splňovala by vysoké standardy jaderné bezpečnosti, přičemž místní politici a obyvatelstvo by souhlasilo s mezinárodním HÚ. Varianta uložení vyhořelého jaderného paliva a vysokoaktivních odpadů do mezinárodního úložiště se tedy prozatím jeví jako nereálná. Jediným státem, který v současnosti uvažuje o dovozu radioaktivních odpadů ke konečné likvidaci, je Rusko.

Velmi důležitým aspektem výzkumu a vývoje v oblasti přípravy hlubinného úložiště je mezinárodní spolupráce. Hlavními nositeli informací, iniciátory legislativních a regulačních aktivit a koordinátory většiny akcí v oblasti nakládání s radioaktivními odpady jsou Evropská komise, MAAE a OECD/NEA. Významné bylo ustanovení Evropské technologické platformy pro vývoj hlubinného ukládání IGD-TP (Implementing Geological Disposal – Technology Platform), která identifikovala strategické prioritní oblasti pro výzkum a vývoj v dané oblasti. Hlavním přínosem platformy je, že zlepšuje strukturu a koordinaci výzkumných prací, usnadňuje sdílení finančních zdrojů mezi partnerskými organizacemi a vytváří společnou strategii pro vývoj daných technologií [9]. V oblasti mezinárodní spolupráce při řešení společenských a politických aspektů nakládání s radioaktivním odpadem, hraje velmi důležitou roli také Mezinárodní fórum o důvěře zainteresovaných stran - FSC (Forum on Stakeholder Confidence). Fórum bylo zřízeno pod NEA-OECD s cílem usnadnit výměnu informací a sdílení zkušeností v této oblasti. Zkoumá způsoby, jak zajistit účinný dialog s veřejností a ostatními zainteresovanými stranami s cílem posílit důvěru v rozhodovacích procesech [10].

Mezinárodní spolupráce probíhá také prostřednictvím projektů financovaných Evropskou komisí v rámci různých R&D programů. Jedním z nejvýznamnějších projektů řešených v této oblasti je projekt DOPAS (FP7 Euratom), dále je zde také řada jiných projektů v rámci programu HORIZON 2025: SITEX II, PETRUS III, MODERN 2020, CEBAMA, MIND apod. Politické a společenské aspekty pak řeší např. projekt PLATENSO (FP7 Euratom) [11].

Země rozvíjející projekty HÚ lze rozdělit do tří skupin podle stádia vývoje, ve kterém se nyní nacházejí. Do první skupiny patří země, kde lze očekávat uvedení HÚ do provozu v horizontu 20-25 let (např. Finsko, Švédsko, Francie), druhou skupinu tvoří země ve stádiu výběru vhodné lokality (např. Belgie, Česká republika, Maďarsko, Slovensko či Španělsko) a třetí skupinou jsou země, které zvolily cestu vyčkávání, kdy budují dočasné skladovací kapacity s životností kolem 100 let a výstavbu trvalého úložiště odkládají na později (např. Nizozemsko, částečně Velká Británie – zde probíhá výběr lokality, ale zahájení provozu HÚ se předpokládá až ve 22. století).

První zemí na světě, která rozhodla o finálním řešení otázky vyhořelého jaderného paliva a o vybudování hlubinného úložiště, bylo Finsko. V roce 2004 byla v lokalitě Olkiluoto zahájena výstavba podzemní laboratoře jako první krok k výstavbě budoucího hlubinného úložiště,

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

přičemž uvedení hlubinného úložiště do provozu se předpokládá v roce 2020 [12]. Ukládání radioaktivních odpadů má ve Finsku na starosti organizace POSIVA[12].

Daleko s vývojem HÚ je také Švédsko. Za nakládání s radioaktivními odpady je zde zodpovědná organizace SKB, která v roce 2011 podala žádost o povolení výstavby v lokalitě Östhammar (v žulovém masívu). Nyní probíhá licenční proces, přičemž rozhodnutí o udělení povolení k výstavbě se neočekává dříve než po roce 2016. Výstavba HÚ by měla začít v roce 2019 a v provozu by mělo být od roku 2029 [13].

Za ukládání radioaktivních odpadů ve Francii je zodpovědná společnost ANDRA. V oblasti Bure se nachází podzemní laboratoř, kde společnost ANDRA zkoumá vhodné jílové formace pro budoucí možné hlubinné úložiště pro ukládání dlouhodobých vysokoaktivních a středněaktivních odpadů. Francie předpokládá vybudování hlubinného úložiště okolo roku 2025 [13].

V Belgii je nakládáním s radioaktivními odpady pověřena organizace ONDRAF/NIRAS, většinu výzkumných a vývojových činností však provádí SCK-CEN. Očekává se, že do roku 2015 by měla být vybrána vhodná lokalita a na ní provedeny ověřovací zkoušky. V r. 2025, by mělo proběhnout schvalování záměru. Provoz HÚ by měl být zahájen v roce 2030 [14].

V Maďarsku je za bezpečné ukládání radioaktivních odpadů zodpovědná státní organizace RHK (anglická zkratka PURAM). V současnosti probíhají průzkumy lokality s jílovým podložím v blízkosti města Buda, v jihozápadní části pohoří Mecsek. Proběhla bezpečnostní analýza. Provoz se předpokládá po roce 2060 [15].

Ve Švýcarsku se nakládáním s radioaktivními odpady se zabývá národní společnost NAGRA. Horninové prostředí švýcarského úložiště je situováno do pevných jílovců. NAGRA v lednu 2015 zúžila počet zájmových lokalit pro výstavbu hlubinného úložiště ze šesti na dvě (Jura Ost a a Zürich Nordost). Definitivní výběr lokality se očekává kolem roku 2027. Zahájení provozu HÚ se očekává kolem roku 2060 [13].

Poznámka:

Směrnice Rady 2014/87/Euratom ze dne 8. července 2014, kterou se mění směrnice 2009/71/Euratom, kterou se stanoví rámec společenství pro jadernou bezpečnost jaderných zařízení, se nevztahuje na hlubinná úložiště.


Vyplývá to z kapitoly 1 CÍLE, OBLAST PŮSOBNOSTI A DEFINICE směrnice 2009/71/Euratom v aktuálním znění směrnice 2014/87/Euratom:

Článek 2 Oblast působnosti,

odst. 1. Tato směrnice se vztahuje na každé civilní jaderné zařízení podléhající povolení

Článek 3 Definice

Pro účely této směrnice se rozumí

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019


1) „jaderným zařízením“

- a) *jaderná elektrárna, obohacovací závod, závod na výrobu jaderného paliva, závod na přepracování, výzkumný reaktor, sklad vyhořelého jaderného paliva a*
b) *sklad radioaktivního odpadu, který se nachází na tomtéž místě jako jaderné zařízení uvedené v písmenu a) a je s ním přímo spojen;*

Úložiště RAO a VJP tu zmíněny nejsou a tudíž se jich tato směrnice netýká.

Použitá dokumentace

- [1] International Atomic Energy Agency, Principles of Radioactive Waste management, Safety Fundamentals, Safety Series No. 111-F, IAEA, Vienna, 1995.
- [2] International Atomic Energy Agency, Fundamentals Safety Principles, Safety Fundamentals, No. SF-1, IAEA, Vienna, 2006.
- [3] Směrnice rady 2011/70 Euratom ze dne 19. července 2011, kterou se stanoví rámec společenství pro odpovědné a bezpečné nakládání s vyhořelým jaderným palivem a radioaktivním odpadem.
- [4] Webové stránky ERDO-WG: <http://www.erdo-wg.eu/Home.html>
- [5] Support Action: Pilot Initiative for European Regional Repositories - SAPIERR, Final Report: http://cordis.europa.eu/publication/rcn/7399_en.html
- [6] ERDO working group: ERDO Strategy Document - SHARED SOLUTIONS FOR SPENT FUEL AND RADIOACTIVE WASTES responding to EC Directive 2011/70/EURATOM,
http://www.erdo-wg.eu/Documents_files/ERDO%20Strategy%20Document.pdf
- [7] ERDO working group: EUROPEAN REPOSITORY DEVELOPMENT ORGANISATION – Model, Structure and Plan,
http://www.erdo-wg.eu/Documents_files/ERDO%20Model.pdf
- [8] Joint Convention on the Safety of Spent Nuclear Fuel Management and on the Safety of Radioactive waste Management,
<https://www.iaea.org/Publications/Documents/Conventions/jointconv.html>
- [9] Webové stránky IGD-TP (Implementing Geological Disposal – Technology Platform):
<http://www.igdtp.eu/>.
- [10] Webové stránky FSC (Forum on Stakeholder Confidence):
<https://www.oecd-nea.org/rwm/fsc/>
- [11] Community Research and Development Information Servis (CORDIS):
http://cordis.europa.eu/projects/home_en.html
- [12] World Nuclear Association:
<http://www.world-nuclear.org/info/Country-Profiles/Countries-A-F/Finland/>

 SÚRAO	Porovnání projektů HÚ ve vybraných vyspělých zemích	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 410/2019

- [13] Nuclear Decommissioning Authority: Geological Disposal - Overview of international siting processes, September 2013, www.nda.gov.uk
- [14] Van Marcke Ph., Van Humbeeck H., Van Cotthem A. - The Belgian R&D feasibility programme for the geological disposal of high-level and long-lived radioactive waste (2012), WM2012 conference paper # 12338
<http://www.wmsym.org/archives/2012/papers/12338.pdf>
- [15] Zprávy ze Správy č. 10, září 2014: http://www.surao.cz/cze/Media/Files/ZzS_c10

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

Tel.: 221 421 511, E-mail: info@surao.cz

www.surao.cz