

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE





# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## POUŽITÉ JADERNÉ PALIVO - SOUČASNOST A BUDOUCNOST JEHO VYUŽITÍ

PRESENT AND FUTURE MANAGEMENT AND UTILIZATION OF SPENT NUCLEAR FUEL

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Hruškovič

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karel Katovský, Ph.D.

BRNO 2020





# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Jan Hruškovič

**ID:** 203234

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

## NÁZEV TÉMATU:

### **Použití jaderné palivo - současnost a budoucnost jeho využití**

#### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Definujte použité (vyhořelé) jaderné palivo.
2. Seznamte se s možnostmi nakládání s VJP v současnosti a proveďte rešerši současných trendů pro budoucí využití VJP.
3. Detailně rozeberte přístupy k nakládání s VJP v zemích využívajících jadernou energetiku.

#### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

1. NEA a IAEA reporty
2. Lamarsh: Introduction to Nuclear Engineering, 2014
3. Murray: Nuclear Energy, 2014

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 10.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Karel Katovský, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

#### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.



## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá použitým jaderným palivem a možnostmi s jeho nakládáním. První kapitola se věnuje teoretickému úvodu, kde je vysvětlen jaderný palivový cyklus, popsán radioaktivní odpad a použité jaderné palivo. Dále jsou zde uvedeny možnosti nakládání s použitým jaderným palivem včetně příkladů ze světové praxe. Druhá kapitola je věnována použitému jadernému palivu v České republice. Čtenář je zde v krátkosti seznámen s historií a současností jaderné energetiky v České republice. Následně je zde rozebrán plán výstavby hlubinného úložiště včetně uvedení některých požadavků a kritérií, která je potřeba při plánování a výstavbě splnit a zohlednit. Poslední kapitola je zaměřena na postoj zemí, které jsou významné z hlediska jaderné energetiky, k nakládání s použitým jaderným palivem včetně jejich krátkého úvodu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Použité jaderné palivo; jaderná energie; jaderná elektrárna; hlubinné úložiště

## ABSTRACT

The Bachelor Thesis deals with spent nuclear fuel and possibilities of its management and utilization. The first chapter is focused on theoretical introduction, the nuclear fuel cycle is explained there together with radioactive waste and spent nuclear fuel. Possibilities of its management and utilization are listed, including some examples of practice around the world. The second chapter is focused on spent nuclear fuel in the Czech Republic. The reader is briefly acquainted with the history and present of nuclear energy in Czech Republic. Then the plan for the construction of a deep repository is described, including some requirements and criteria that need to be met and taken into account in planning and construction. The last chapter focuses on the attitude of countries that are significant in terms of nuclear energy to the management of spent nuclear fuel, including their brief introduction.

## KEYWORDS

Spent nuclear fuel; nuclear energy; nuclear power plant; deep repository

HRUŠKOVIČ, Jan. *Použité jaderné palivo - současnost a budoucnost jeho využití*. Brno, 2020, 63 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský, Ph.D.





## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Použití jaderné palivo - současnost a budoucnost jeho využití“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Karlovi Katovskému, Ph.D., za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.



# Obsah

Seznam obrázků	13
Seznam tabulek	15
Seznam symbolů, veličin a zkratk	17
Úvod	19
<b>1 Teoretický úvod</b>	<b>21</b>
1.1 Jaderný palivový cyklus	21
1.2 Radioaktivní odpad	22
1.3 Izotopické složení použitého paliva	22
1.4 Možnosti nakládání s použitým jaderným palivem	26
1.4.1 Mezisklad	26
1.4.2 Hlubinné úložiště	28
1.4.3 Přepřacování	30
<b>2 Použité jaderné palivo v ČR</b>	<b>33</b>
2.1 Koncepce budoucího hlubinného úložiště v ČR	34
2.1.1 Časový plán přípravy a výstavby hlubinného úložiště v ČR	36
<b>3 Použité jaderné palivo ve světě</b>	<b>37</b>
3.1 Slovensko	37
3.2 Maďarsko	38
3.3 Ukrajina	39
3.4 Rusko	40
3.5 Švédsko	41
3.6 Finsko	42
3.7 Švýcarsko	43
3.8 Německo	44
3.9 Francie	44
3.10 Belgie	46
3.11 Velká Británie	47
3.12 USA	48
3.13 Kanada	48
3.14 Japonsko	49
3.15 Čína	50
3.16 Jižní Korea	50
3.17 Indie	51
<b>Závěr</b>	<b>53</b>
<b>Literatura</b>	<b>57</b>



# Seznam obrázků

1.1	Jaderný palivový cyklus . . . . .	21
1.2	Časová závislost měrné aktivity pro použité jaderné palivo z reaktoru typu VVER-400, vyhoření 33 000 MWd/tU . . . . .	24
1.3	Časová závislost vývinu měrného zbytkového tepla pro jednotlivé skupiny izotopů v použitém jaderném palivu z reaktoru VVER-400, vyhoření 33 000 MWd/tU . . . . .	25
1.4	Koncepce hlubinného úložiště . . . . .	30
2.1	Mapa s uvažovanými lokalitami pro hlubinné úložiště v ČR . . . . .	36
3.1	Přeracovatelský závod La Hague ve Francii . . . . .	46





# Seznam tabulek

1.1	Významné izotopy obsažené v použitém jaderném palivu [3] . . . . .	23
1.2	Celková měrná aktivita pro použité jaderné palivo z reaktoru VVER-400, vyhoření 33 000 MWd/tU [Ci/tU] [3] . . . . .	24
1.3	Vývin měrného zbytkového tepla pro jednotlivé skupiny izotopů v použitém jaderném palivu z reaktoru VVER-400, vyhoření 33 000 MWd/tU [W/tU] [3] . . . . .	25
3.1	Shrnutí nakládání s použitým palivem ve světě . . . . .	55



# Seznam symbolů, veličin a zkratek

<b>RAO</b>	Radioaktivní odpady
<b>JE</b>	Jaderná elektrárna
<b>RE</b>	Reaktor
<b>AP</b>	Aktivační produkty
<b>AKT</b>	Aktinidy
<b>ŠP</b>	Štěpné produkty
<b>VVER-440</b>	Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor Typ tlakovodního reaktoru chlazeného a moderovaného lehkou vodou východní koncepce o projektovém hrubém elektrickém výkonu 440 MW
<b>VVER-1000</b>	Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor Typ tlakovodního reaktoru chlazeného a moderovaného lehkou vodou východní koncepce o projektovém hrubém elektrickém výkonu 1 000 MW
<b>BWR</b>	Boiling Water Reactor Typ varného reaktoru chlazeného a moderovaného lehkou vodou
<b>RBMK</b>	Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj Typ varného reaktoru sovětského typu chlazeného lehkou vodou a moderovaného grafitem
<b>LWGR</b>	Light Water Cooled Graphite-moderated Reactor Typ varného reaktoru chlazeného lehkou vodou a moderovaného grafitem
<b>EPR</b>	European Pressurized water Reactor Typ evropského tlakovodního reaktoru generace III+
<b>CANDU</b>	Canada Deuterium-Uranium Typ kanadského tlakovodního reaktoru chlazeného a moderovaného těžkou vodou s horizontálně umístěnými kanály
<b>BN</b>	Typ ruského rychlého množivého reaktoru chlazeného sodíkem
<b>PUREX</b>	Plutonium Uranium Reduction Extraction Metoda přepracování jaderného paliva

<b>MOX</b>	Mixed Oxide Fuel Směsné oxidické palivo
<b>REMIX</b>	Regenerated Mixture Typ přepracovaného paliva
<b>RepU</b>	Reprocessed Uranium Typ přepracovaného uranového paliva
<b>EIA</b>	Environmental Impact Assessment Vyhodnocení vlivů na životní prostředí
<b>SÚRAO</b>	Správa úložišť radioaktivních odpadů
<b>ROSATOM</b>	Federální agentura pro atomovou energii Ruské federace

# Úvod

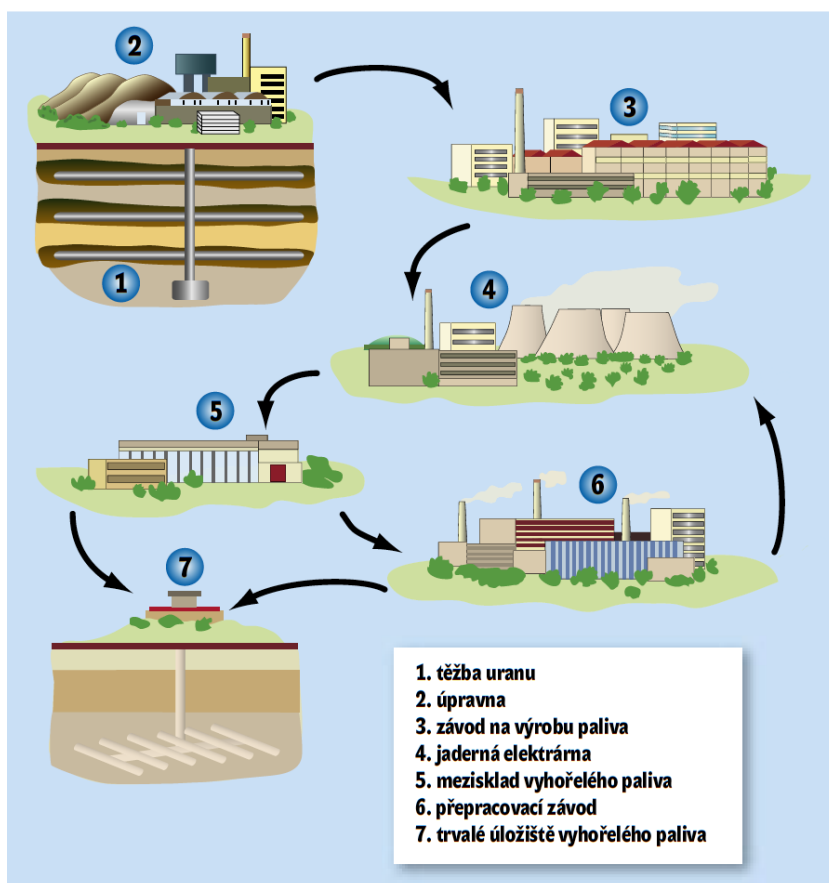
Dostupnost elektrické energie je v současnosti v mnoha zemích jednou ze základních lidských potřeb a málokdo si již dokáže představit život bez ní. Více než polovina elektřiny se ale vyrobí z neobnovitelných zdrojů energie, především uhlí a plynu, což produkuje velké množství emisí, které škodí životnímu prostředí. Navíc, zásoby těchto surovin nejsou nevyčerpatelné, je potřeba tedy najít jiný způsob výroby elektřiny. Jedním z možných způsobů je výroba elektrické energie v jaderných elektrárnách, které fungují na principu štěpení těžkých jader, zejména prvku uranu. Jaderné elektrárny při svém provozu sice neprodukují škodlivé emise, nicméně použité jaderné palivo je díky své intenzivní a dlouhotrvající radioaktivitě nebezpečné, a to jak pro přírodu, tak pro člověka. Tohoto radioaktivního odpadu ale jaderné elektrárny ve srovnání s ostatními nevyprodukují mnoho, a to také zejména proto, že k vyrobení stejného množství elektřiny potřebují řádově menší množství paliva než elektrárny spalující fosilní paliva. Elektřinu pomocí jaderného štěpení vyrábíme od roku 1954, kdy se k energetické síti připojil první blok jaderné elektrárny v Obninsku v tehdejší Sovětské svazu. V současnosti je v provozu 441 energetických reaktorů po celém světě [1], které produkují 10,2 % [2] světové výroby elektřiny, dalších více než 50 reaktorů je pak ve výstavbě. Životnost jaderné elektrárny se pohybuje v desítkách let, je tedy zřejmé, že na světě již existují elektrárny, které nejsou v provozu a probíhá jejich likvidace. Takovýchto reaktorů, které se trvale odstavily, je nyní více než 100, pokud započítáme i výzkumné reaktory, prototypy a další zařízení, které jsou s jadernými elektrárnami spojeny a pracují s radioaktivními látkami, přesáhne jejich počet 300. Vzhledem k tomu, že každý reaktor není stejný, liší se energetické a výzkumné reaktory a i jejich typy, nelze k odstavení všech elektráren a jejich likvidaci přistupovat vždy zcela stejně. Cílem této práce je seznámit se s problematikou použitého jaderného paliva, možnostmi s jeho nakládáním po použití v reaktoru, zmapování a analýza nakládání s použitým palivem ve významných zemích, které jaderné elektrárny provozují a seznámení se s kritérii a plánem pro přípravu hlubinného úložiště v České republice.



# 1 Teoretický úvod

## 1.1 Jaderný palivový cyklus

Jaderným palivovým cyklem se nazývá proces od těžby uranu, přes výrobu a pobyt paliva v reaktoru, až po následné nakládání s použitým jaderným palivem a jeho likvidaci. Tento cyklus se dále dělí na přední a zadní část, kdy přední část tvoří těžba, chemická úprava, konverze, obohacení a fabrikace uranu do podoby jaderného paliva. Zadní část se pak zabývá procesy, které následují po vytažení jaderného paliva z reaktoru, čímž se tak stává použitým palivem. Patří sem transport, skladování, přepracování a trvalého uložení použitého paliva, stejně jako vitrifikace a skladování pevných vysoce aktivních radioaktivních odpadů. Jaderný palivový cyklus se dělí na otevřený a uzavřený. Hlavní podstatou otevřeného cyklu je trvalé uložení použitého paliva v hlubinném úložišti, nadále se nepočítá s jeho využitím. Naopak uzavřený palivový cyklus zahrnuje proces přepracování použitého paliva, kdy se jeho část recykluje a může tak být využita jako nové jaderné palivo [3].



Obr. 1.1: Jaderný palivový cyklus [4], upraveno

## 1.2 Radioaktivní odpad

Radioaktivní odpad je taková věc, která je radioaktivní látkou, předmětem nebo zařízením jí obsahující nebo jí kontaminovanou, pro kterou se již nepředpokládá další využití a která nesplňuje podmínky stanovené atomovým zákonem pro uvolňování radioaktivní látky z pracoviště [5]. Radioaktivní odpady pocházejí z různých odvětví lidské činnosti, zejména však z lékařství, výzkumu, a především z provozu jaderných elektráren. Jaderný palivový cyklus tak produkuje až 90 % všech radioaktivních odpadů. Od prvopočátku se řešilo, co se bude s radioaktivními odpady dělat, jak je bezpečně zneškodňovat a likvidovat. Systematické základy likvidace RAO a použitého jaderného paliva byly formulovány na První mezinárodní konferenci o mírovém využívání jaderné energie v Ženevě roku 1955. Od té doby se postupy a principy obnovují a stále vylepšují [6]. Použitým, respektive vyhořelým, jaderným palivem se dle atomového zákona rozumí ozářené jaderné palivo, které bylo trvale vyjmuté z aktivní zóny jaderného reaktoru [5]. Radioaktivní odpady můžeme klasifikovat dle mnoha hledisek, z hlediska fyzikálního například na pevné, kapalné a plynné, lisovatelné a nelisovatelné, spalitelné a nespalitelné apod. Co se týče jaderných elektráren, z hlediska množství je nejvíce kapalného RAO. Podle radiačních charakteristik můžeme odpady dále dělit například dle doby životnosti, nebo obsahu radionuklidů. Dle doby životnosti radionuklidů pak dělíme RAO na přechodně radioaktivní (s poločasem rozpadu méně než 1 rok), krátkodobé (s poločasem rozpadu od 1 roku do 30 let) a dlouhodobé (s poločasem rozpadu více než 30 let). Obsah radionuklidů pak rozhoduje, jestli se jedná o nízko (do  $10^9$  Bq/m<sup>3</sup>), středně (od  $10^9$  Bq/m<sup>3</sup> do  $10^{14}$  Bq/m<sup>3</sup>), nebo vysoce (nad  $10^{14}$  Bq/m<sup>3</sup>) aktivní odpad [6].

## 1.3 Izotopické složení použitého paliva

Izotopické složení použitého paliva závisí na mnoha faktorech – typu paliva, konstrukci, době a pozici ozařování v aktivní zóně reaktoru. Zastoupeny jsou téměř všechny známé prvky z periodické tabulky, nicméně rozlišujeme tři hlavní skupiny izotopů:

- Aktivační produkty (většinou z konstrukčních materiálů),
- Aktinidy a jejich dceřinné produkty,
- Štěpné produkty a jejich dceřinné produkty.

Z hlediska ekologie jsou významné izotopy, které se vyznačují snadnou šířitelností, vysokou aktivitou, dlouhým poločasem rozpadu nebo radiotoxicitou. Nejvýznamnější z nich jsou uvedeny v následující tabulce:



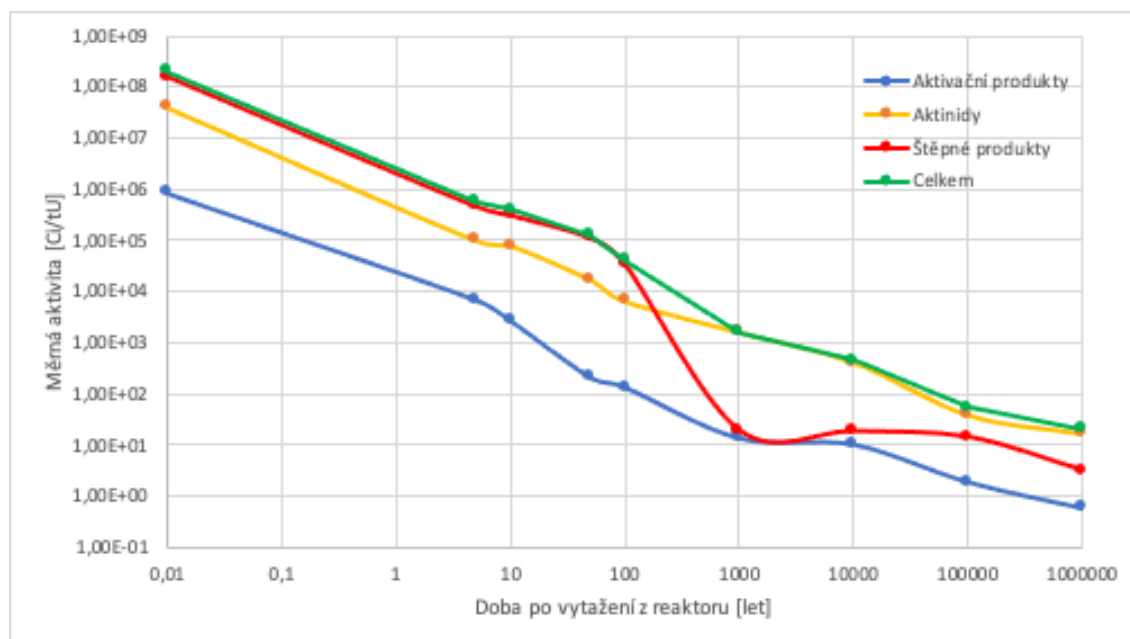
Tab. 1.1: Významné izotopy obsažené v použitém jaderném palivu [3]

Skupiny izotopů	Izotop	Poločas rozpadu
Aktivační produkty	$^{54}\text{Mn}$	312,5 dnů
	$^{55}\text{Fe}$	2,75 let
	$^{59}\text{Fe}$	44,53 dnů
	$^{60}\text{Co}$	5,27 let
	$^{65}\text{Zn}$	243,9 dnů
	$^{93}\text{Zr}$	$1,53 \cdot 10^6$ let
	$^{95}\text{Zr}$	64,09 dnů
	$^{95}\text{Nb}$	35 dnů
	$^3\text{H}$	12,35 let
Aktinidy a dceřinné produkty	$^{237}\text{Np}$	$2,144 \cdot 10^6$ let
	$^{241}\text{Am}$	432 let
	$^{238}\text{Pu}$	87,7 dnů
	$^{239}\text{Pu}$	$2,411 \cdot 10^4$ let
	$^{240}\text{Pu}$	$6,563 \cdot 10^3$ let
	$^{241}\text{Pu}$	14,35 let
	$^{242}\text{Pu}$	$3,735 \cdot 10^5$ let
	$^{242m}\text{Am}$	141 let
	$^{243}\text{Am}$	7 370 let
	$^{242}\text{Cm}$	162,94 dnů
Štěpné produkty a jejich dceřinné produkty	$^{89}\text{Sr}$	50,5 dne
	$^{90}\text{Sr}$	28,7 let
	$^{90}\text{Y}$	64,1 hodin
	$^{99}\text{Mo}$	2,747 dne
	$^{99}\text{Tc}$	$2,111 \cdot 10^5$ let
	$^{103}\text{Ru}$	39,272 dnů
	$^{106}\text{Ru}$	372,6 dnů
	$^{103m}\text{Rh}$	56,1 minut
	$^{106}\text{Rh}$	29,92 sekund
	$^{129m}\text{Te}$	33,6 dnů
	$^{132}\text{Te}$	76,856 hodin
	$^{129}\text{I}$	$1,57 \cdot 10^7$ let
	$^{131}\text{I}$	8,021 dnů
	$^{132}\text{I}$	2,3 hodin
	$^{137}\text{Cs}$	30 let
	$^{137m}\text{Ba}$	2,55 minuty
$^{140}\text{Ba}$	12,751 dnů	
$^{140}\text{La}$	1,6779 dne	
$^{144}\text{Ce}$	284,45 dnů	

Hodnoty měrné aktivity použitého paliva v čase pro jednotlivé skupiny izotopů v reaktoru typu VVER-440 s vyhořením 33 000 MWd/tU jsou uvedeny v následující tabulce a grafu (osy jsou v logaritmickém měřítku):

Tab. 1.2: Celková měrná aktivita pro použité jaderné palivo z reaktoru VVER-400, vyhoření 33 000 MWd/tU [Ci/tU] [3]

		AP	AKT	ŠP	Celkem
Doba po vyvezení z RE [let]	0	$8,42 \cdot 10^5$	$4,05 \cdot 10^7$	$1,61 \cdot 10^8$	$2,03 \cdot 10^8$
	5	$6,93 \cdot 10^3$	$1,01 \cdot 10^5$	$4,60 \cdot 10^5$	$5,68 \cdot 10^5$
	10	$2,75 \cdot 10^3$	$8,11 \cdot 10^4$	$3,09 \cdot 10^5$	$3,93 \cdot 10^5$
	50	$2,15 \cdot 10^2$	$1,73 \cdot 10^4$	$1,11 \cdot 10^5$	$1,28 \cdot 10^5$
	100	$1,38 \cdot 10^2$	$6,58 \cdot 10^3$	$3,44 \cdot 10^4$	$4,11 \cdot 10^4$
	1 000	$1,40 \cdot 10^1$	$1,62 \cdot 10^3$	$1,95 \cdot 10^1$	$1,66 \cdot 10^3$
	10 000	$1,05 \cdot 10^1$	$4,20 \cdot 10^2$	$1,88 \cdot 10^1$	$4,49 \cdot 10^2$
	100 000	1,936	$3,91 \cdot 10^1$	$1,45 \cdot 10^1$	$5,56 \cdot 10^1$
	1 000 000	$6,04 \cdot 10^{-1}$	$1,70 \cdot 10^1$	3,227	$2,08 \cdot 10^1$

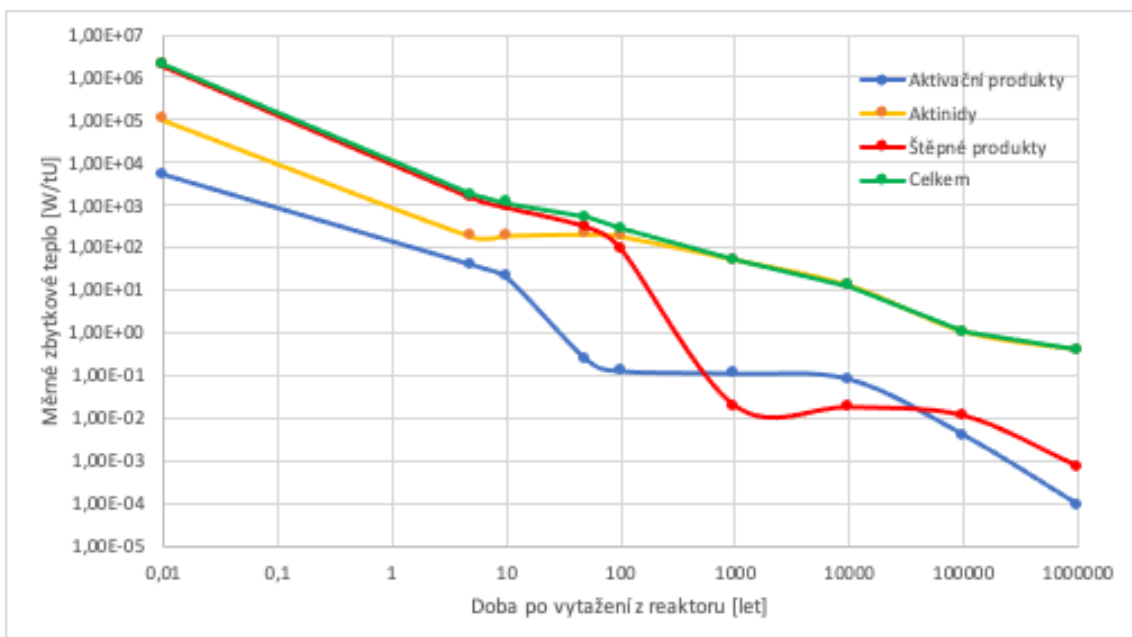


Obr. 1.2: Časová závislost měrné aktivity pro použité jaderné palivo z reaktoru VVER-400, vyhoření 33 000 MWd/tU

Hodnoty měrného zbytkového tepla použitého paliva v čase pro jednotlivé skupiny izotopů v reaktoru VVER-440 s vyhořením 33 000 MWd/tU jsou uvedeny v následující tabulce a grafu (osy jsou v logaritmickém měřítku):

Tab. 1.3: Vývin měrného zbytkového tepla pro jednotlivé skupiny izotopů v použitém jaderném palivu z reaktoru VVER-400, vyhoření 33 000 MWd/tU [W/tU] [3]

		AP	AKT	ŠP	Celkem
Doba po vyvezení z RE [let]	0	$5,35 \cdot 10^3$	$1,04 \cdot 10^5$	$1,92 \cdot 10^6$	$2,03 \cdot 10^6$
	5	$3,96 \cdot 10^1$	$1,82 \cdot 10^2$	$1,53 \cdot 10^3$	$1,75 \cdot 10^3$
	10	$2,05 \cdot 10^1$	$1,92 \cdot 10^2$	$9,08 \cdot 10^2$	$1,12 \cdot 10^3$
	50	$2,37 \cdot 10^{-1}$	$2,06 \cdot 10^2$	$3,15 \cdot 10^2$	$5,22 \cdot 10^2$
	100	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$1,83 \cdot 10^2$	$9,70 \cdot 10^1$	$2,80 \cdot 10^2$
	1 000	$1,09 \cdot 10^{-1}$	$5,19 \cdot 10^1$	$1,94 \cdot 10^{-2}$	$5,20 \cdot 10^1$
	10 000	$8,03 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^1$	$1,84 \cdot 10^{-2}$	$1,29 \cdot 10^1$
	100 000	$3,88 \cdot 10^{-3}$	1,039	$1,15 \cdot 10^{-2}$	1,054
	1000 000	$8,95 \cdot 10^{-5}$	$3,92 \cdot 10^{-1}$	$7,21 \cdot 10^{-4}$	$3,93 \cdot 10^{-1}$



Obr. 1.3: Časová závislost vývinu měrného zbytkového tepla pro jednotlivé skupiny izotopů v použitém jaderném palivu z reaktoru VVER-400, vyhoření 33 000 MWd/tU

Štěpné produkty jsou z hlediska radioaktivity nejvýznamnější částí použitého paliva po jeho vytažení do doby následujících několika set let. Většina těchto prvků je nestabilních a vyzařuje velké spektrum emitovaného záření při jejich rozpadu. Po tom, co tyto krátkodobé a střednědobé štěpné produkty přejdou do stabilních izotopů, se začíná výrazně projevovat aktivita aktinidů a jejich dceřinných produktů. Ty mají poločas rozpadu v řádu tisíců až statisíců let, jsou tedy z dlouhodobého hlediska nebezpečné a zejména díky nim je nutné zajistit dostatečnou kvalitu hlubinných úložišť, aby se nedostaly do životního prostředí a nepoškodily je tak. Co se týče aktivačních produktů, jejich aktivita je pouze malou částí celkové aktivity použitého paliva po vyvezení z reaktoru, nicméně díky ozařování konstrukčních materiálů paliva vznikají některé izotopy s velmi dlouhým poločasem rozpadu, proto je nutné také počítat s jejich vlivem. Aktivita všech těchto izotopů v použitém jaderném palivu je tak vysoká, že při takovém množství radioaktivních přeměn dochází k vzniku velkého množství energie ve formě tzv. zbytkového tepla, které je nutné dlouhodobě odvádět. Z tohoto důvodu je také použité palivo po vyvezení z reaktoru skladováno po dobu několika let v bazénu skladování, protože za tuto dobu značně klesne jejich aktivita a s tím spojený vývin zbytkového tepla. První desítky let jsou zdrojem tepla zejména štěpné produkty, následné již aktinidy [3].

## 1.4 Možnosti nakládání s použitým jaderným palivem

Jaderné palivo se stává použitým v okamžiku jeho vyvezení z aktivní zóny reaktoru, čímž vzniká problém, jak s ním nakládat a kam ho uložit. Nejprve se použité palivo umístí do bazénu skladování zpravidla vedle reaktoru, kde zůstává po dobu několika let v prostředí vody s rozpuštěnou kyselinou boritou, aby se zajistila jeho podkritičnost a dostatečné chlazení. Dále se použité palivo transportuje nejčastěji do meziskladu použitého paliva, jehož doba životnosti je desítky let, a je tak vytvořen dostatečný časový prostor pro následné finální naložení, tedy buďto uložení do hlubinné úložiště, nebo přepracování [3].

### 1.4.1 Mezisklad

Mezisklad slouží pro dočasné uložení použitého jaderného paliva. Jedná se jaderné zařízení, jsou na něj tedy kladeny přísné požadavky, a to jak na jejich výstavbu a volbu lokality, provoz, tak i likvidaci. Součástí přípravy výstavby je i posouzení vlivu meziskladu na životní prostředí, aby nedošlo k ohrožení bezpečnosti obyvatel a znečištění životního prostředí. Také je potřeba udělat opatření, která povedou právě k minimalizaci účinků meziskladu na prostředí, posouzení možnosti vzniku havárií včetně preventivních opatření a zhotovení monitorovacího systému v okolí

meziskladu. Základními požadavky na mezisklad použitého paliva jsou podkritičnost, stínění, těsnost a odvod tepla. Podkritičnost musí být zajištěna při všech provozních i abnormálních stavech, a to včetně dostatečné rezervy. Nesmí tak být překročena hodnota koeficientu násobení 0,95, aby byla zajištěna dostatečná podkritičnost. V úvahu se berou i geometrické a materiálové struktury paliva a materiálů meziskladu, stejně jako vliv uspořádání použitého paliva a jeho manipulace. Dostatečná těsnost musí zamezit nežádoucímu úniku radioaktivních látek do prostředí. Stínění musí minimalizovat dávkový příkon v prostorech meziskladu a jeho okolí. Také musí být zajištěn dostatečný odvod tepla, aby nebyla překročena limitní hodnota maximální teploty pro daný typ paliva. Samotné mezisklady se pak dělí dle způsobu skladování na mokré a suché [3, 7].

### **Mokrý mezisklad**

Světově nejrozšířenějším typem je právě mokrý mezisklad, ve kterém se použité palivo skladuje v bazénech. Podkritičnost je zajištěna geometrickým uspořádáním, vyšší hustota kapacity může být zajištěna například použitím oceli s příměsí boru. Bazény jsou sice naplněné vodou s příměsí kyseliny borité, nicméně musí být počítáno i se stavem, kdy dojde k úplné ztrátě tohoto média. I za této situace musí být zajištěna podkritičnost. Vrstva vody také slouží k odstínění záření gama a neutronů. Poškozené palivové články pak musí být umístěny do speciálních, hermeticky uzavřených pouzder nebo kontejnerů, aby se tak zajistila jejich těsnost. Velkými výhodami mokrých meziskladů je dobré chlazení, stínění, snadná vizuální kontrola a přístupnost skladovaných souborů. Nevýhodami pak jsou technická náročnost, zejména aktivních systémů sloužících pro čerpání, chlazení a chemickou úpravu použitého média, dále také produkce radioaktivních odpadů a finanční náročnost výstavby [3, 7]. Takovýto mezisklad je například v provozu od roku 1987 v Jaslovských Bohunicích na Slovensku. Použité palivo je skladováno v bazénech, které jsou propojeny manipulačním kanálem. Jako chladivo a jeden z prvků zajišťující stínění je použita demineralizovaná voda [8].

### **Suchý mezisklad**

Suché mezisklady lze ještě dále dělit na kontejnerové, kobkové a sila, nicméně konkrétní mezisklad může být typově smíšenou variantou některých z těchto meziskladů.

**Kontejnerový mezisklad** Co se týče kontejnerových meziskladů, použité palivo je uloženo ve speciálních skladovacích kontejnerech s tlustými stěnami, zajišťující stínění, těsnost a mechanickou odolnost. Podkritičnost je zajištěna použitím vhodných materiálů s příměsí boru a také geometrickým uspořádáním. Kontejnery jsou

naplněny inertním plynem, který zajišťuje jednak chlazení a také má funkci bezpečnostní, jelikož jeho molekuly jsou dostatečně malé, takže při sebemenší netěsnosti a následném úniku plynu do okolí můžeme jednoduše detekovat netěsnost. Samotný kontejner pak má na svém vnějším povrchu žebrování, které zajišťuje dostatečný odvod tepla do okolí. Použité palivo se do kontejnerů naplňuje pod vodou, následně je kontejner vysušen. Kontejnery lze umístit buď do budov, jako je tomu například v meziskladech v českých JE v Dukovanech a Temelíně, nebo mohou být umístěny na volné prostranství, což je častým řešením například v USA. Výhodou skladování použitého paliva v kontejnerech je ochrana před okolními vlivy, mechanická odolnost a stínění. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady včetně opatření proti případným haváriím a vysoké náklady na provoz, zejména údržbu [3]. V JE Dukovany se nachází dva mezisklady použitého paliva, jeden s kapacitou 60 kontejnerů, který je již zcela zaplněn, a druhý s kapacitou 133 kontejnerů. Kontejnery jsou typu CASTOR 440/84 a CASTOR 440/84M, kde číslo 440 značí typ reaktoru VVER-440 a číslo 84 pak počet palivových souborů, které lze do kontejneru umístit [9, 7].

**Kobkový mezisklad** Kobkový mezisklad je podobný suchému meziskladu, použité palivo se ale skladuje samostatně v uzavřených kovových trubkách, které jsou naplněny zpravidla inertním plynem. Tyto trubky jsou uloženy v betonových zásobnících s dutinami, které lze snadno dále rozšiřovat dle potřeby. Chlazení je zajištěno přirozeným prouděním okolního vzduchu, nebo může být zajištěno systémem s nuceným oběhem chladicího média. Výhodou je právě modulárnost, relativně nízké náklady a také nižší teplota skladovaných souborů oproti suchému meziskladu. Nevýhodami jsou pak obtížná manipulace a přístup ke skladovaným souborům. Kobkový mezisklad najdeme například v blízkosti JE Paks v Maďarsku [3].

**Silo** Jedná se o podobný systém jako v případě kobkového meziskladu s tím rozdílem, že použité palivo je skladováno v ocelových pouzdrech, která jsou umístěna v betonových schránkách. Chlazení je u tohoto typu meziskladu zajišťováno pasivně [3].

## 1.4.2 Hlubinné úložiště

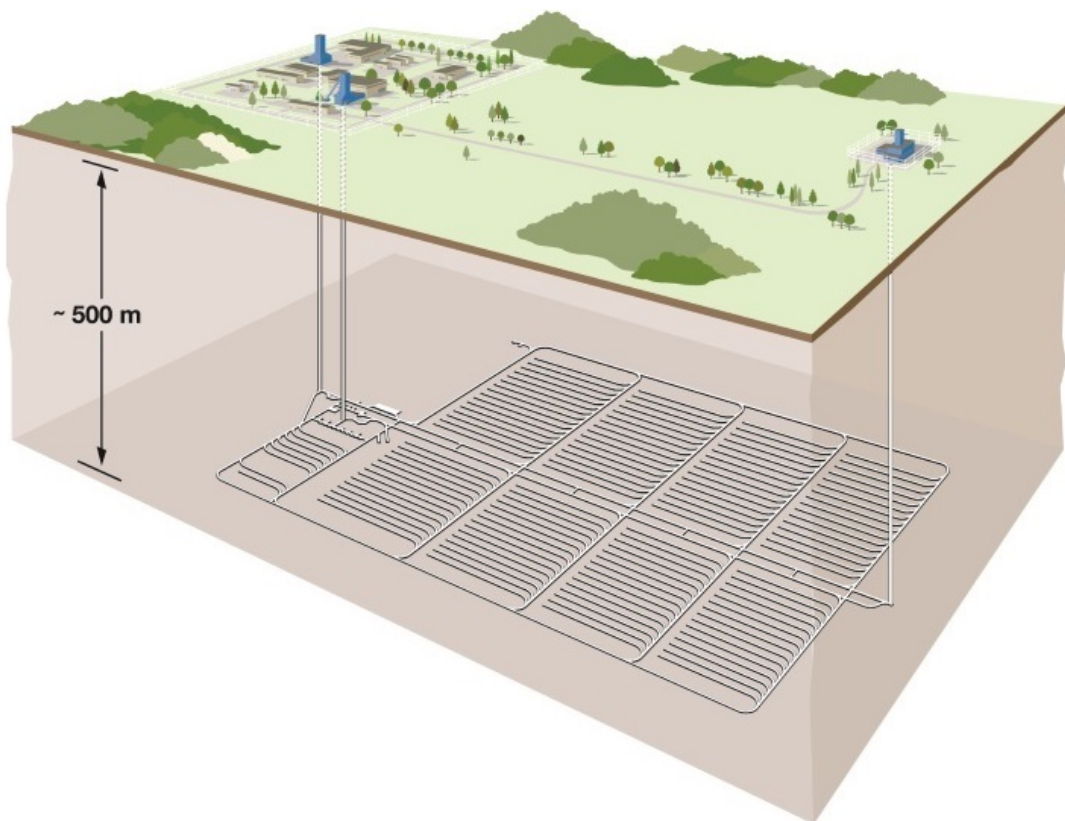
Hlubinné úložiště zajišťuje trvalé uložení vysoce aktivních odpadů a použitého jaderného paliva. Jedná se o systém, jehož cílem je zajištění trvalé izolace skladovaných materiálů od životního prostředí. Vlivem poklesu radioaktivity těchto radioaktivních odpadů v čase nastane okamžik, kdy měrná aktivita skladovaných materiálů dosáhne původní hodnoty před jejich použitím. To se stane přibližně za 10 000 let, nicméně je třeba započítat rezervu, jelikož tato doba je různá pro různá paliva, a proto se

uvažuje časový horizont 100 000 let za přijatelnou délku, během které je potřeba skladované materiály oddělit od životního prostředí. Výstavba hlubinného úložiště je ale velmi časově a finančně náročná, proto se palivo po vytažení z aktivní zóny reaktoru prvně skladuje v meziskladech, aby byl zaručen dostatečný časový prostor pro jeho výstavbu. Samotné hlubinné úložiště se pak buduje v hloubkách přibližně 500 m pod zemským povrchem, čímž je mimo jiné zajištěno dostatečné stínění díky přírodním a inženýrským bariérám. Vývoj hlubinného úložiště je pak rozdělen do několika etap:

- Plánovací a přípravné stádium,
- Výstavba,
- Provoz,
- Ukončení provozu,
- Institucionální dohled.

Součástí přípravných prací je volba koncepce, lokality a zhotovení podkladů pro územní řízení. Současně také probíhá výzkum a demonstrační činnost, které zahrnují experimenty v podzemních laboratořích a studium přírodních a umělých činitelů majících vliv na samotné úložiště. Tímto způsobem se ověří interakce mezi horninou, inženýrskými bariérami a skladovanými odpady tak, že současně s tím se testují modely plánované technologie. Co se týče výběru lokality, hlavním parametrem je vhodné geologické prostředí, možnostmi jsou magmatity (granitoidy a bazaltoidy), jíla a soli. Výběr lokality probíhá zúžením prvotních možností tak, aby byla splněna všechna kritéria. Zejména musí být zajištěna příznivá konfigurace horninového masivu (plošný a hloubkový rozsah), schopnost popsat horninový masiv (co nejmenší pukliny a nerovnoměrnosti, nulový výskyt jiných ložisek), předpoklad dlouhodobé stability (bez tektonické činnosti, mimo seismicky aktivní oblast), příznivé geotechnické podmínky (stabilita a celistvost horniny při ražbě úložiště), jednoduchá hydrologie (malá propustnost) a příznivé hydrochemické podmínky (chemická rovnováha, pH). Z hlediska technického je úložiště rozděleno do tří částí – vlastní úložné prostory (slouží pro skladování odpadů), povrchová pomocná zařízení (slouží pro příjem, úpravu, přebalení odpadů včetně laboratoří, kanceláří, dílen apod.) a přístupové cesty k úložným prostorům (šachty a chodby). Pro uložení radioaktivních odpadů do hlubinného úložiště slouží kontejnery vyrobené z nerezivějícího materiálu, tedy z mědi, hliníku, oceli, titanu, případně slitin. Tyto obalové soubory zajišťují jak mechanickou odolnost, zároveň také slouží jako bariéra proti vodě, která by se mohla do prostor úložiště dostat. Po umístění těchto kontejnerů na finální místo v hlubinném úložišti je potřeba vyplnit prostor okolo kontejneru tlumícím materiálem, který má za úkol mechanicky upevnit kontejner v daném místě a minimalizovat množství podzemních vod. Nejčastěji uvažovaným prvkem je bentonit, což je typ jílu, který v kontaktu s vodou bobtná a zaplní tak dutiny. Tento materiál také nesmí měnit

své vlastnosti působením zbytkového tepla, které radioaktivní odpady produkují. Pokud je úložiště v solném masivu, samotná sůl slouží jako tlumicí materiál. Dalšími materiály, kterými se následně utěsní místa s kontejnery a oddělí se tak od chodeb, jsou například jíla, beton, či bitumen [6, 7]. Zajímavostí je, že v lokalitě Oklo v Africe fungoval před zhruba dvěma miliardami let přírodní reaktor. Vědci na to přišli díky odlišnému obohacení zdejšího uranu oproti standardním hodnotám. Díky vhodné konfiguraci uranového ložiska a přítomnosti vody jakožto moderátoru takto mohla fungovat řízená štěpná řetězová reakce. Přírodní reaktor se nacházel ve skalním masivu, podobném těm, ve kterých se plánují stavět hlubinná úložiště. Tento přírodní úkaz tak může sloužit jako jeden z důkazů, že radioaktivní odpad je schopen se udržet v místě skalního masivu téměř nehybně i po statisíce až miliony let [10].



Obr. 1.4: Koncept hlubinného úložiště [11]

### 1.4.3 Přepřacování

Štěpný materiál, který je součástí jaderného paliva, není po jeho využití v jaderném reaktoru zcela spotřebován. Při jaderných reakcích navíc vznikají sekundární štěpné



materiály, zejména plutonium  $^{239}\text{Pu}$ . Použité palivo dále obsahuje tzv. neutronové jedy a strusky, což jsou izotopy, které absorbují neutrony a brzdí tak štěpnou reakci. Přepřacování použitého paliva je proces, při kterém se oddělí jednotlivé složky, získají se tedy užitečné štěpné materiály a odstraní se tyto jedy a strusky. Jedná se o technologicky velmi složitý proces, který je sice na mnoha místech světa využíván, nicméně je velmi nákladný a musí se počítat i s následným konečným uložením vysoce aktivních odpadů, které při přepřacování vznikají. Jednou z nejrozšířenějších metod používaných při přepřacování, je metoda PUREX, která spočívá v nastříhání použitého jaderného paliva, jeho rozpuštění v kyselině dusičné a separaci štěpných produktů díky separaci za využití rozpouštědel [3]. Takto vzniká palivo MOX (Mixed Oxide Fuel), jehož principem je smíchání přepřacovaného plutonia s uranem. Novým typem přepřacovaného paliva je ruské palivo REMIX (Regenerated Mixture), které ale zatím není komerčně používáno [12]. Při přepřacování je možné také recyklovat pouze nespoteřovaný uran, přičemž plutonium je uloženo pro pozdější uložení. Takové palivo se nazývá RepU. Obsahuje cca 1 % uranu  $^{235}\text{U}$  a pro další použití musí být tedy buď doobohaceno (což je velmi komplikované kvůli radioaktivitě recyklátu), nebo smícháno s obohacným palivem [13]. Přepřacováním použitého paliva ale vzniká nemalé množství vysoce aktivního odpadu, který je potřeba zlikvidovat. Aby mohl být tento, pro životní prostředí velmi nebezpečný odpad trvale uložen, je potřeba ho vitrifikovat. Vitrifikace spočívá ve smíchání a následném tavení vysoce aktivního odpadu spolu se sklotvornými přísadami (křemičitými písky). Tavení probíhá při teplotách přibližně  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vitrifikovaný odpad takto získá vysokou odolnost vůči rozpuštění ve vodě, dobrou tepelnou vodivost a mechanickou odolnost [14].



## 2 Použité jaderné palivo v ČR

V České republice je v provozu celkem 6 energetických reaktorů ve dvou jaderných elektrárnách – Dukovany a Temelín, které pokrývají 35 % výroby elektřiny v ČR [15]. V JE Dukovany se nacházejí celkem 4 bloky s reaktory typu VVER-440, které byly uváděny do provozu v letech 1985-1987. V JE Temelín jsou 2 bloky s reaktory typu VVER-1000, uváděnými do provozu v letech 2000 a 2002. Během provozu byly zvyšovány výkony všech těchto bloků díky využití projektových rezerv výměnou některých komponent, zejména v sekundární části a změnou parametrů paliva. Co se týče těžby uranu, pro účely paliva v těchto elektrárnách byl velmi významný důl Rožná v Dolní Rožince na Vysočině, který byl schopen produkovat až 2 500 tun uranu za rok, nicméně po pádu komunistického režimu byla těžba postupně utlumována, až byla začátkem roku 2017 definitivně ukončena. Jednalo se o poslední funkční uranový důl ve střední Evropě. V současnosti se v obou JE používá jaderné palivo fabrikované v Ruské federaci. V JE Temelín bylo původně používáno palivo dodávané americkou firmou Westinghouse, které ale nahradilo ruské palivo v roce 2010 s tím, že Westinghouse v současnosti dodal 6 palivových souborů, které se nyní testují v reaktoru při nominálním provozu. Radioaktivní odpady obecně má na starosti Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO), která byla založena v roce 1997 a je zodpovědná za všechny radioaktivní odpad v České republice. Než je ale použité palivo považováno za odpad a předáno do rukou SÚRAO, je za jeho nakládání odpovědná firma provozující obě jaderné elektrárny – ČEZ, a.s., jakožto jeho původce. V současnosti se použité jaderné palivo skladuje v prostorách jednotlivých elektráren. V JE Dukovany se nacházejí dva suché mezisklady použitého paliva, ve kterých se použité palivo skladuje ve speciálních kontejnerech CASTOR, z nichž ten první byl uveden do provozu v roce 1995. I na JE Temelín se použité palivo skladuje v kontejnerech CASTOR v meziskladu použitého paliva, který je jeden a byl uveden do provozu v roce 2010. Původně bylo dukovanské použité palivo odváženo do slovenských Jaslovských Bohunic, kde bylo uskladněno v mokřém meziskladu. Nicméně po rozpadu Československa v roce 1993 muselo být palivo převezeno zpět do České republiky, aby se nacházelo v zemi původu [16]. Použité jaderné palivo produkuje také výzkumný reaktor LVR-15 patřící pod Centrum výzkumu Řež, nicméně jeho množství je ve srovnání s jadernými elektrárnami velmi malé a skladuje se v místním mokřém zásobníku (meziskladu) [17]. Nyní je v plánu výstavba hlubinného trvalého úložiště, které má na starosti státní organizace SÚRAO. Jeho výstavba a provoz by byl financován z tzv. jaderného účtu, v jehož prospěch musí mimo jiné ČEZ, a.s. jakožto provozovatel jaderných elektráren, od roku 2002 za každou vyrobenou MWh v těchto JE odvádět poplatek, nyní ve výši 55 Kč [18]. Předpokládané náklady jsou zhruba 111,4 miliard Kč. V současnosti je vybráno devět potenciálních lokalit pro

výstavbu, jedná se o lokality Horka, Hrádek, Čihadlo, Magdaléna, Březový potok, Čertovka, Janoch, Kraví Hora a Na Skalním, z nichž by se měla zvolit jedna finální a jedna záložní lokalita do roku 2025. Začátek výstavby je pak naplánován na rok 2050 se spuštěním v roce 2065 [19]. Jaderné elektrárny krom použitého paliva produkují i nízko a středně radioaktivní odpady, které se natrvalo ukládají v úložišti radioaktivních odpadů na území JE Dukovany. Toto úložiště spravuje SÚRAO, jeho kapacita je 55 000 m<sup>3</sup> a bylo otevřeno roku 1995. Pro jaderné odpady, které nepocházejí z provozu jaderných elektráren, jsou k dispozici dvě úložiště – Richard a Bratrství [16].

## 2.1 Koncepce budoucího hlubinného úložiště v ČR

Česká republika do budoucna počítá s otevřeným palivovým cyklem, tedy konečným uložením použitého paliva do hlubinného úložiště umístěné 500 m pod zemským povrchem. Již samotná příprava hlubinného úložiště zahrnuje komplexní proces zpracování mnoha požadavků, vlivů a kritérií. Jedním z nejdůležitějších kritérií je volba území tak, aby se úložiště nacházelo v mechanicky stabilním prostředí, například v nějaké hornině. Z hlediska mechanické stability podzemních prostor úložiště musí být posuzovány tyto jevy:

- pukliny
- zlomy
- zvětrávání horniny
- tepelná vodivost horniny
- tepelná roztažnost vedoucí k napětí v hornině
- přítomnost vody

Co se týče vody, z hlediska hydraulických charakteristik jsou stanovena kritéria na přítomnost podzemních vod, rychlost proudění vody v úložišti a propustnost horninového masivu a dále umístění drenáží, do kterých by směřovaly radionuklidy z úložiště. Také se musí zohlednit výskyt krasových formací, hlubinných dolů, nebo čerpacích vrtů. Samozřejmostí je také posouzení obtížnosti razících prací v dané lokalitě a materiálu. Z dlouhodobého hlediska musí být následně hodnoceny:

- seismická
- povodně a oběh podzemních vod
- projevy vulkanické a postvulkanické činnosti
- svahové pohyby
- propady a deformace povrchu území
- nepříznivé vlastnosti základových půd
- větrná eroze
- zdroje prachových částic a úlomků hornin

- klimatické a meteorologické jevy
- biologické jevy
- požáry a výbuchy
- pád letadla a jiných objektů
- přítomnost jiných jaderných a průmyslových zařízení

Dále je z dlouhodobého hlediska nutné počítat s vlivy těchto vlastností:

- tepelné
- hydraulické
- mechanické
- chemické
- mikrobiologické
- plynopropustnost

Z hlediska infrastruktury jsou pak velmi důležitými parametry:

- železniční a silniční síť
- elektrická rozvodná síť
- povrchová a pitná voda
- splašková a dešťová kanalizace
- plynové rozvody
- možnosti skládky
- pokrytí mobilním signálem
- dojezdová vzdálenost složek záchranného systému a báňské záchranné služby
- vzdálenost od původců RAO
- nutnost úprav stávající dopravní infrastruktury

Systém inženýrských bariér musí být fyzikálně a chemicky kompatibilní s horninovým prostředím, aby byla zajištěna bezpečnost po celou dobu životnosti úložiště. To znamená, že skladovaný odpad musí být ve formě, ze které se radionuklidy uvolňují jen velmi pomalu, ukládací a obalové soubory musí mít minimální životnost 10 000 let a průměrnou životnost minimálně 100 000 let a musí být zajištěn tlumící, výplňový a těsnící materiál, například ve formě bentonitu. Krom výše zmíněných kritérií se navíc zohledňují ochranná pásma, chráněná území a zóny havarijního plánování jiného jaderného zařízení. Dále pak narušení úložiště budoucími aktivitami člověka, a to jak s cílem získat uložené použité palivo jako sekundární surovinu, kdy se bude předem vědět, co úložiště obsahuje, a budou dostupné technické a finanční prostředky, tak i s cílem využít dostupné zdroje v území po ztrátě informace o existenci úložiště. V první řadě je ale důležité zvolit takové řešení, které bude z hlediska bezpečnosti dostatečně robustní a ekonomicky proveditelné. Neboli musí se zvolit takové řešení, které je s přiměřenou mírou konzervativnosti po bezpečnostní i technické stránce vyhovující, ale ekonomicky optimální [20]. Hlavním cílem takového opatření je zejména ochrana životního prostředí, tedy minimalizování úniku

radioaktivních látek do okolí [20, 21].

### 2.1.1 Časový plán přípravy a výstavby hlubinného úložiště v ČR

V následujícím přehledu jsou uvedeny významné události z časového plánu přípravy a výstavby hlubinného úložiště:

- 2020 - výběr dvou lokalit z devíti pro budoucí úložiště
- 2025 - výběr finální lokality
- 2026 - zahájení procesu EIA pro výzkumnou laboratoř
- 2035 - zahájení procesu EIA pro samotné hlubinné úložiště
- 2040 - předložení dokumentace dotčeným institucím k povolení výstavby
- 2045 - předložení dokumentace k udělení stavebního povolení
- 2050 - 2064 - výstavba hlubinného úložiště
- 2065 - zahájení provozu

Výběr lokalit má na starost SÚRAO, počítá se s výstavbou v horninovém prostředí, uložením RAO do ocelových kontejnerů a utěsnění pomocí bentonitu [22].



Obr. 2.1: Mapa s uvažovanými lokalitami pro hlubinné úložiště v ČR [23], upraveno

## 3 Použité jaderné palivo ve světě

Celosvětově existuje několik typů jaderných reaktorů o různých výkonech a s jiným jaderným palivem. Ač se podobné typy reaktorů mohou nacházet v několika různých zemích, nakládání s použitým palivem se v těchto zemích může lišit. Záleží zejména na přírodních, technických a finančních možnostech a zkušenostech každé země. V následujícím přehledu jsou uvedeny významné země z hlediska jaderné energetiky a jejich koncepce nakládání s použitým palivem.

### 3.1 Slovensko

Se Slovenskem, jakožto s dlouholetým spojencem v rámci Československa, měla Česká republika částečně společný jaderný program. V roce 1958 se rozhodlo vybudovat první československou jadernou elektrárnu v Jaslovských Bohunicích, označovanou jako A1. Byl použitý těžkovodní, plynem chlazený reaktor. Elektrárna se uvedla do provozu roku 1972 a po dvou haváriích byla nakonec po 5 letech zcela odstavena. V Jaslovských Bohunicích se dále postavily dva bloky s reaktory VVER-440, nicméně staršího typu V-230 s nižší odolností pouze na malou projektovou havárii. Tyto bloky, označované jako V1, byly uváděny do provozu v letech 1978 a 1980 a i přes značné modernizace se mimo jiné v rámci podmínek pro vstup Slovenska do Evropské unie v letech 2006 a 2008 taktéž odstavily. Další dva bloky v JE Jaslovské Bohunice, označované jako V2, byly uvedeny do provozu v letech 1984 a 1985, jednalo se o novější typ reaktoru VVER-440 V-213, tedy stejné bloky jako v české JE Dukovany. Elektrárna V2 je stále v provozu. Stejně bloky jako v elektrárně V2 se postavily v JE Mochovce, jednalo se taktéž o dva bloky, které zahájily provoz v letech 1998 a 1999. Původně byly v plánu celkem čtyři bloky VVER-440, nicméně výstavba zbývajících dvou byla počátkem 90. let minulého století pozastavena. Roku 2009 se rozhodlo s výstavbou bloků 3 a 4 pokračovat, nicméně i když je elektrárna téměř připravena ke spuštění, ostrý provoz dosud zahájen nebyl. Celkově jsou tedy na Slovensku v provozu 4 bloky a pokrývají 54 % výroby elektřiny [24]. Podobně jako v ČR existuje SÚRAO, na Slovensku funguje organizace JAVYS, která má na starosti nakládání s radioaktivním odpadem a vyřazování reaktorů z provozu. Tato organizace vznikla transformací subdivize společnosti Slovenské elektrárne, která provozuje jaderné elektrárny na Slovensku. V areálu JE Jaslovské Bohunice se nachází mokrý mezisklad použitého paliva, který má kapacitu 1680 tun a slouží pro obě slovenské jaderné elektrárny. Tento mezisklad byl otevřen v roce 1987 a funguje pod správou JAVYS [8]. Část použitého paliva byla také odvezena do Ruské federace k přepracování s tím, že si Rusko výsledné přepracované palivo již ponechá pro své účely. Slovensko, podobně jako Česká republika, taktéž zahájilo výběr lokality pro

hlubinné úložiště. Mezi roky 1996 a 2001 se vybralo 5 vhodných lokalit, další práce na přípravách hlubinného úložiště se ale do roku 2017 pozastavily. Následně bylo Ministerstvem hospodářství stanoveno na roky 2017 až 2023 udělat další průzkum a vybrat dvě nejvhodnější lokality [25]. Podobně jako jaderný účet v ČR, Slovensko má národní jaderný fond, ze kterého se bude platit nakládání s použitým palivem a likvidace odstavených elektráren. Co se týče vyřazování elektrárny A1 z provozu, probíhá od roku 1999, použité palivo bylo vráceno do Ruska a likvidace financovaná z jaderného fondu nadále pokračuje, je rozdělena do 5 etap s plánovaným dokončením v roce 2033. Vyřazování dvou bloků elektrárny V1 je ve fázi druhé etapy ze dvou, předpokládaná doba likvidace je 13 let s dokončením v roce 2025 a cena přes jednu miliardu EUR [26]. Ukončení provozu elektrárny V1 skončilo v momentě vyvezení paliva z bazénu skladování do meziskladu použitého paliva v roce 2011 [27]. Následně proběhla do konce roku 2014 první etapa, která zahrnovala odstranění neaktivních systémů a demolici objektů, úpravu stavebních objektů a přípravu dokumentace k druhé etapě [28]. Nyní od roku 2015 probíhá druhá část, která zahrnuje vyřazení objektů jaderné části elektrárny (reaktoru, parogenerátorů) a všech ostatních objektů, které nebyly vyřazené v rámci první etapy [29]. Na likvidaci elektrárny V1 se kromě jaderného fondu podílí také mezinárodní fond pro likvidaci této elektrárny, který financuje evropská banka [30].

## 3.2 Maďarsko

Maďarsko má v provozu 4 bloky VVER-440, stejné jako provozuje ČR v Dukovanech, byly spouštěny v letech 1982-1987 a produkují polovinu výroby elektřiny v Maďarsku [31]. V současné době nemá Maďarsko uranový důl v provozu, jeden byl v roce 1997 uzavřen a i přes snahy důl znovu otevřít bylo roku 2014 rozhodnuto s tímto nepokračovat. S přepracováním se nepočítá, historicky byly některé palivové soubory převezeny zpět do Ruska k dodavateli k přepracování, nicméně bez vrácení přepracovaného paliva zpět. Použité palivo by se mělo trvale uložit s tím, že od roku 1998 se odvádí peníze na centrální jaderný finanční fond, ke konci roku 2015 jeho zůstatek činil 807 mil EUR. Radioaktivní odpady má v Maďarsku na starost agentura PURAM. Použité jaderné palivo z elektrárny Paks se nejprve skladuje 5 let v bazénu skladování, následně se palivo přeloží do suchého kobkového meziskladu s kapacitou přes 9 000 palivových článků s možným rozšířením do budoucna. Co se týče nízké a středně aktivních odpadů, v provozu bylo úložiště mezi roky 1977 a 2005, kde se mimo jiné skladovaly i odpady z JE Paks. Nové úložiště bylo otevřeno roku 2008 v lokalitě Bátaapáti a má kapacitu 40 000 m<sup>3</sup>. Co se týče vysoce radioaktivních odpadů, předpokládá se výstavba v jihozápadní části Maďarska v horách s plánem spuštění trvalého úložiště po roce 2065 [32].



### 3.3 Ukrajina

Ukrajina je a historicky byla zemí velmi závislou na výrobě elektřiny z jaderných elektráren. Současně je v provozu 15 bloků, které pokrývají 53 % výroby elektřiny [33]. Převažují bloky VVER-1000, dva pak VVER-440. Ukrajina nemá v plánu použít jaderné palivo přepracovat, počítá se s trvalým uložením. Použité palivo se zpravidla skladuje v meziskladech v areálu elektráren, některé palivo z reaktorů VVER-440 bylo odesláno do Ruska k přepracování. Palivo z reaktorů VVER-1000 se pak z velké části posílá do Ruska pro uskladnění, což Ukrajinu stojí přibližně 100 milionů dolarů každý rok. Dále je od roku 2001 také v provozu suchý mezisklad pro použité palivo v lokalitě Zaporozhe. Společnost Energoatom, která provozuje všechny jaderné elektrárny na Ukrajině, podepsala roku 2005 dohodu o výstavbě centrálního meziskladu použitého paliva pro reaktory typu VVER. To zahrnuje suché úložiště pro více než 12 000 palivových článků VVER-1000 a více než 4 500 článků VVER-440 s tím, že toto úložiště se bude nacházet v zakázané zóně poblíž Černobylu (ačkoliv černobylské palivo zde nebude uskladněno) a bude skladováno v dvoustěnných kontejnerech. Co se pak týká použitého paliva z Černobylské elektrárny, palivo z bloků 1-3 bylo postupně uskladněno v mokřém skladu ISF-1 a počítá se s přeskladem do suchého meziskladu v novém úložišti ISF-2 nedaleko Černobylu. Toto přeskladem bude zahrnovat rozdělení více než 21 000 palivových článků do 42 000 palivových svazků v horkých komorách, které se umístí až na 100 let do horizontálně umístěných ocelových kontejnerů naplněných inertním plynem. Po tomto přemístění se původní mokřý mezisklad ISF-1 odstraní. Dále je v lokalitě Černobyl komplex pro pevné radioaktivní odpady, který byl zprovozněn roku 2009, slouží pro uskladnění nízko a středně aktivních odpadů především z provozu a následné vyřazování bloků 1-3 z provozu. Výsoce aktivní odpad se pak třídí pro uložení do dočasného meziskladu a jedno úložiště pro nízko aktivní odpad je vybudováno přibližně 17 km nedaleko Černobylu. Od roku 2015 je také v provozu továrna pro zpracování více než 35 000 m<sup>3</sup> tekutých nízko a středně aktivních odpadů do pevné formy pro uložení. Všechny čtyři černobylské reaktory, které byly v provozu a dva nedostavěné jsou v současnosti vyřazovány z provozu a likvidovány, celý proces se však naplno rozběhne po otevření úložiště ISF-2. Blok 4, který byl po havárii roku 1986 zničen, je uzavřen v novém velkém sarkofágu od roku 2016. Tento sarkofág je dlouhý 257 metrů a vysoký 110 m, jeho výstavba byla umožněna mimo jiné i díky finančním darům zemí po celém světě, náklady se vyšplhaly přes 2 miliardy EUR. Poslední (třetí) černobylský blok byl odstaven až v roce 2000 a v průběhu roku 2001 přebrala nová firma SSE ChNPP nakládání s radioaktivními odpady a vyřazování elektráren z provozu místo Energoatomu, a to i včetně budoucích vyřazování současně provozovaných elektráren. V plánu je také hlubinné úložiště s možností uložení

i použitého paliva a radioaktivních odpadů z Černobylu [34, 35].

## 3.4 Rusko

Rusko, jakožto jaderná velmoc, je od samého začátku užívání jaderné energie jedním ze světových lídrů tohoto oboru. Jaderná elektrárna v Obninsku, spuštěná v roce 1954, byla vůbec první jadernou elektrárnou na světě, která dodávala elektřinu do sítě. Postupem času se v Rusku spustilo mnoho jaderných elektráren různých typů a výkonů, jednalo se zejména o elektrárny s reaktory typu VVER a RBMK. V současnosti je v provozu celkem 38 bloků s celkovým instalovaným výkonem 29 GWe pokrývající zhruba 18 % výroby [36, 37]. Ruský jaderný program má za cíl co nejvíce palivo přepracovat a použít zejména plutonium pro MOX palivo zejména v sodíkem chlazených rychlých reaktorech typu BN. Nicméně i přes tuto snahu se cíl plní jen z části, v roce 2011 se asi 16 % použitého paliva přepracovalo, především z reaktorů VVER-440, BN-600, námořních a výzkumných a je používáno převážně pro reaktory RBMK. Použité palivo z reaktorů RBMK a VVER-1000 se nyní skladuje a není v plánu je přepracovávat v nejbližších letech. Komerční provoz přepracovávání začal v Rusku roku 1977 a snahou ruského ROSATOMu je do roku 2030 přepracovávat všechno vyprodukované použité palivo. Hlavním cílem je tak snížit náklady, snížit produkci radioaktivního odpadu, recyklace aktinidů a separace plutonia. Pokročilejším typem přepracovaného paliva je REMIX (Regenerated Mixture), které má oproti palivu MOX několik výhod. Jeho výrobou se neakumuluje znovu přepracovaný uran a neseparuje se plutonium. V porovnání s novým palivem  $UO_2$  je REMIX asi o 25-30 % dražší. Toto palivo bylo zatím použito jenom ve zkušebním režimu ve výzkumných reaktorech a od roku 2016 v elektrárně Balakovo ve formě třech palivových souborů. Závod Mayak v Ozersku, označený RT-1, slouží pro přepracování paliva od roku 1971. Další přepracovatelský závod RT-2 se staví v Železnogorsku na Sibiři. Nakládání s radioaktivními odpady má na starost národní organizace NO RAO. Mezisklady použitého paliva se nacházejí v Ozersku (mokrý) a Železnogorsku (mokrý i suchý). Rusko má také v plánu postavit hlubinné úložiště pro vysoce a středně aktivní odpad v lokalitě Krasnogorsk s otevřením v roce 2035, a do roku 2030 je v plánu postavit několik úložišť pro nízko a středně aktivní odpady. Celkem 8 reaktorů je vyřazováno z provozu, mezi ně patří i první energetický reaktor v Obninsku, tři bloky VVER-440 v Novovoroneži, dva bloky LWGR v Bělojarsku, jeden blok RBMK v Leningradu a jeden blok LWGR v Bilbinu. Použité palivo se nachází jednak v prostorách samotných elektráren, nebo bylo převezeno do Železnogorsku k uskladnění před přepracováním. Použité palivo z Bělojarsku je stále skladováno v prostorách elektrárny, protože ještě není dostupná technologie

pro jeho přepracování, elektrárna samotná je rozebírána s plánem dokončení v roce 2032. [34, 38].

### 3.5 Švédsko

Švédsko má v provozu celkem 7 jaderných bloků, které pokrývají 34 % výroby elektřiny [39]. Palivo se do Švédska dováží, sice zde jsou lokality, kde by se uran mohl těžit, nicméně se zde žádné doly nenacházejí. Co se týče jaderného odpadu, je spravován Švédskou společností pro jaderné palivo a nakládání s jaderným odpadem (SKB). Tuto společnost vlastní energetické firmy, poplatek za každou vyrobenou MWh v jaderných elektrárnách pak činí přibližně 5 EUR a spoří se na účet podobný českému jadernému účtu. Nízko aktivní odpady jsou uloženy jak v prostorách samotných JE, tak v úložišti v lokalitě Nyköping. Dále je v provozu trvalé úložiště poblíž JE Forsmark, které funguje od roku 1988, je v hloubce 50 m pod mořem a má kapacitu 63 000 m<sup>3</sup>, každoročně se zaplní asi 1 000 m<sup>3</sup> odpadu. Specialitou Švédska je speciální loď Sigrid, která slouží k převážení použitého paliva z jaderných elektráren do centrálního meziskladu CLAB, a má několiknásobné záložní systémy. Všechny jaderné elektrárny ve Švédsku mají vlastní přístav, pomocí kterého je možné nejen použité palivo transportovat pomocí lodí [40]. Použité jaderné palivo, jakožto vysoce aktivní jaderný odpad, se skladuje v společném meziskladu CLAB poblíž JE Oskarshamn, které je v provozu od roku 1985 a jeho kapacita narostla z původních 5 000 tun na současných 8 000 tun s možným rozšířením až na 11 000 tun. Roční náklady na skladování se pohybují okolo 15 milionů EUR. Palivo se zde skladuje mokrou metodou pod osmimetrovou vrstvou vody v podzemní jeskyni s plánem uložení na 50 let [41]. Poté bude použité palivo transportováno do kontejnerů z mědi a litiny a uloženo v hlubinném trvalém úložišti. V roce 2009 bylo rozhodnuto, že hlubinné úložiště bude postaveno v lokalitě Söderviken blízko JE Fosmark. Po mnoha letech různých povolení je začátek výstavby naplánován na rok 2020. Jeho kapacita bude 12 000 tun a bude uloženo v 500 metrové hloubce v 1,9 miliardy let starém granitu. Úložiště bude tvořit více než 60 km různých tunelů s celkovou plochou přes 4 km<sup>2</sup> a kapacitou pro uložení 6 000 kontejnerů pro použité jaderné palivo. Každý z těchto kontejnerů, o hmotnosti 25 tun a délce 5 metrů, bude obsahovat zhruba 2 tony použitého paliva a bude obklopen bentonitem, který bude mít za úkol pohltnout případnou vlhkost [42]. Dále bylo necelých 5 tun použitého paliva z výzkumného reaktoru R1 převezeno do závodu Sellafield ve Velké Británii pro přepracování, jelikož toto palivo není možné bezpečně dlouhodobě skladovat. Plutonium z tohoto paliva bude ve formě MOX paliva buďto vráceno zpět, nebo využito ve Velké Británii. Švédsko má také již 6 bloků, které se vyřazují z provozu,

jedná se o bloky s varnými reaktory a jeden blok s tlakovodním reaktorem. Celkem 6 reaktorů je nyní vyřazováno z provozu, výzkumný reaktor R1 se likviduje. [34, 43].

## 3.6 Finsko

Finsko má v provozu celkem 4 bloky, 2 bloky VVER-440 v lokalitě Loviisa a 2 typu BWR v lokalitě Olkiluoto, všechny tyto bloky byly uvedeny do provozu koncem 70. let minulého století, jeden blok v lokalitě Olkiluoto s reaktorem typu EPR je od roku 2005 ve výstavbě s plánem spuštění v roce 2020. Jaderné elektrárny pak v současnosti pokrývají 35 % výroby elektřiny ve Finsku [44]. Podobně jako Švédsko, ani Finsko nemá vlastní uranové doly a palivo se tak dováží. Původní myšlenka nakládání s použitým palivem byla pokud možno palivo exportovat, případně přepracovat. To se v 80. letech minulého století změnilo s cílem použité palivo trvale uložit. Provozovatelé JE ve Finsku, jakožto původci použitého jaderného paliva, jsou za nakládání s ním zodpovědní, a to včetně jeho uložení. Je to podmínka pro obdržení licence k dalšímu provozu současných bloků. Nakládání s radioaktivními odpady se projednává od roku 1983, preferuje se varianta hlubinného úložiště. Společnosti provozující JE jsou zodpovědné za vyřazování elektráren z provozu a nakládání s odpady separátně, a to až do doby trvalého uložení, související plány se každých 5 let aktualizují. Finsko má také svůj národní účet pro nakládání s jaderných odpadem, koncem roku 2014 na něm bylo naspořeno 2,38 miliard EUR a je dotován provozovateli JE, kde zhruba 10 % ceny vyrobené elektřiny jde právě ve prospěch tohoto účtu. Částka je vždy přesně stanovena každoročně vládou na základě hodnocení provozovatelů a má pokrýt jak případné vyřazování bloků z provozu, tak výstavbu a provoz hlubinného úložiště. V lokalitě JE Olkiluoto se nachází bazénový sklad použitého paliva, který je v provozu od roku 1987 a má kapacitu 1270 tun pro skladování použitého paliva po dobu 50 let. Každá z JE má pak svoje trvalé úložiště nízko a středně radioaktivních odpadů. Hlubinné úložiště má na starost společnost Posiva Oy, která byla založena roku 1995 a je vlastněna oběma provozovateli jaderných elektráren ve Finsku. Posiva Oy má pokročilý plán pro hlubinné úložiště, a to v lokalitě Olkiluoto, 400 m pod zemí v 2 miliardy let starém skalním masivu. Toto úložiště má být složeno z několika bariér s využitím systému KBS-3 vyvinutého švédskou společností SKB. Použité palivo má být skladováno vertikálně, nicméně je posuzována i možnost horizontálního uložení [45]. První práce na hlubinném úložišti započaly v roce 2004, otevření pro účely uskladnění použitého jaderného paliva je plánováno po roce 2023. Zpočátku má být kapacita 6 500 tun s možností rozšíření kapacity až na 12 000 tun [34, 46].

## 3.7 Švýcarsko

Švýcarsko má nyní v provozu 4 bloky, z toho jeden varný a tři tlakovodní, pokrývají přibližně 38 % výroby elektřiny [47]. Jedná se o bloky uvedené do provozu mezi koncem 60. a začátkem 80. let minulého století s plánem odstavení kolem roku 2030. Švýcarsko nadále nemá zájem pokračovat v jaderném programu, co se týče výroby elektřiny. Uran pro účely paliva se dováží, a to z různých zemí a od různých dodavatelů. Radioaktivní odpad má na starosti společnost Nagra, kterou vlastní provozovatelé jaderných elektráren. Použité palivo se od roku 2001 skladuje v suchém meziskladu Zwilag ve Würenlingenu. Nachází se zde i spalovna a sklad pro nízko a středně radioaktivní odpady. Použité palivo se do roku 2003 nechávalo ve Francii a Velké Británii přepracovávat, aby se využilo separovatelné plutonium v palivu MOX, a to na základě dohod jednotlivých provozovatelů. V roce 2006 se rozhodlo, že se přepracování nebude používat, původně bylo rozhodnutí platné na dobu 10 let, nyní je to ale na dobu neurčitou. V současnosti se použité palivo skladuje 5 až 10 let vedle reaktoru, pak se uloží buď přímo v areálu samotných elektráren, nebo v dočasném skladu ve Würenlingenu. Do budoucna se počítá s trvalým hlubinným úložištěm, proces je nyní ve stádiu příprav, vybírá se vhodná lokalita. Hlubinné úložiště má na starosti společnost Nagra, kterou založila vláda společně s provozovateli jaderných elektráren a pod kterou mimo jiné spadá podzemní výzkumná laboratoř pro likvidaci vysoce radioaktivních odpadů poblíž Bernu. V současnosti se vybraly tři možné lokality, u kterých se posuzovalo pouze hledisko vědecké a technické, společenské a politické aspekty se nebraly v potaz. Okolo roku 2030 se očekává definitivní výběr jedné z těchto lokalit, pro nízko a středně aktivní odpady by se úložiště zprovoznilo k roku 2050 a pro vysoce aktivní odpady, tedy i použité jaderné palivo, pak o 10 let později [48]. Nízko a středně aktivní odpady se nyní zpracují do formy vhodné pro uskladnění a jsou uloženy buď v místě samotné elektrárny, nebo v úložišti použitého paliva ve Würenlingenu. Provozovatelé jaderných elektráren platí každoročně od roku 2002 poplatek na národní účet pro uložení radioaktivního odpadu, dále potom od roku 1984 také na účet pro vyřazování jaderných elektráren z provozu. Poplatek činí zhruba 1 EUR za vyrobenou MWh pro oba účty, byly zde vládní snahy zvýšit tento poplatek, ale v letech 2011 a 2016 bylo přezkoumáno, že výše poplatku dostačuje k pokrytí všech budoucích závazků. Co se týče odstavování bloků z provozu, koncem roku 2019 byla odstavena elektrárna Mühleberg po 47 letech provozu. Předpokládané náklady na likvidaci činí v přepočtu více než 700 milionů EUR s plánem dokončení v roce 2031. Dalších asi 1,2 miliard EUR je pak naplánováno pro uložení radioaktivních odpadů z této elektrárny, provozovatel, firma BKW, má v současnosti naspořeno přibližně 850 milionů EUR. Použité palivo se kompletně přesune do meziskladu ve Würenlingenu k roku 2024 a následně i odhadovaných

4 000 tun kontaminovaného materiálu určeného k čištění a recyklaci [34, 49].

### 3.8 Německo

Německo v současnosti provozuje 6 bloků pokrývajících necelých 12 % výroby elektřiny, do začátku roku 2011 to bylo 17 bloků, které pokrývaly zhruba čtvrtinu výroby. Cílem Německa je do roku 2022 ukončit provoz všech jaderných elektráren a pokrýt výrobu z jiných zdrojů, nyní zejména spalováním uhlí, které pokrývá 30 % výroby. Nyní je odstaveno a vyřazováno z provozu celkem 30 bloků [50]. Mezi léty 1946 a 1990 se ve Východním Německu těžil uran nejenom pro potřeby Německa, ale i pro potřeby Sovětského svazu a východní Evropy. Po roce 1992 se tyto doly zcela uzavřely a vyřadily z provozu. V Západním Německu byl funkční menší uranový důl v letech 1960-1989. V současnosti se uran dováží, a to především z Kanady, Austrálie, Ruska a dalších zemí, v součtu asi 3 800 tun uranu ročně. Použité jaderné palivo se ukládá ve společném meziskladu v Ahaus a Gorleben, konečné úložiště je v rukou státu. Část paliva byla odeslána do Francie a Velké Británie k přepracování, velká část tohoto paliva se má teprve vrátit zpět do Německa. Nízko a středně aktivní odpady se ukládaly do roku 1998 v úložišti v Morslebenu, které se nyní vyřazuje z provozu, uložené radioaktivní odpady zde ale zůstanou. Největším úložištěm je původně důl na železnou rudu Konrad v Salzgitteru, kde se má skladovat většina radioaktivního odpadu s nejmenším množstvím radioaktivity. Dalším úložištěm byl původně solný důl v Asse, který byl v provozu v letech 1967 až 1978 a je nyní uzavřen, kvůli neudělení licence bude nejspíše radioaktivní odpad převezen do úložiště Konrad. Potenciální lokalitou vhodnou pro trvalé úložiště vysoce radioaktivního odpadu je lokalita Gorleben, kde by k otevření konečného úložiště mohlo dojít již po roce 2025 a celkové náklady mají být asi 1,6 miliardy EUR. Po odstavení funkčních bloků zbylo i několik set nepoužitých palivových souborů, které se prodaly do JE Paks v Maďarsku. Mnoho bloků je již rozebráno, některé se rozebírají, dalším jsou již trvale odstaveny. Likvidace všech těchto bloků bude stát odhadem několik desítek miliard EUR, což bude hrazeno ze společného účtu, na který přispívají všichni čtyři provozovatelé jaderných elektráren. V současnosti je na tomto účtu necelých 40 miliard EUR [34, 51, 52].

### 3.9 Francie

Francie má celosvětově největší podíl výroby elektřiny z jaderných elektráren, necelých 71 % na celkem 57 blocích [53], navíc asi 17 % elektřiny pochází z recyklovaného

paliva. Vláda stanovila plán do roku 2035 snížit výrobu na 50 %. Všechny v současnosti provozované reaktory jsou typu PWR a jsou dle výkonu rozděleny do tří kategorií – 900 MW, 1 300 MW, 1 450 MW. I přes takto velkou výrobu nemá Francie svoje uranové doly, uran se dováží z několika světových lokalit v rámci dlouhodobých smluv, nejvíce pak z Kanady, Nigeru, Austrálie, Kazachstánu, Ruska a dalších. Co se týče konverze a obohacení paliva, výroby paliva, přepracování paliva, tyto fáze již probíhají ve Francii. Francie se rozhodla jít cestou uzavřeného palivového cyklu již od počátku svého jaderného programu, tedy formou přepracování, a to jednak kvůli využití uranu a plutonia z použitého paliva a za druhé kvůli snížení množství vysoce aktivního radioaktivního odpadu. Francie je takto schopna vytěžit z paliva ještě o 30 % energie více, i když náklady na přepracování jsou vysoké. Roku 2011 bylo 70 % použitého paliva uloženo v mokřích meziskladech, většina v La Hague, 19 % v suchých meziskladech a 11 % se přepracovalo. První fáze přepracování probíhá v přepracovacím závodu La Hague v Normandii pod vedením společnosti Orano SA (dříve COGEMA) od roku 1990, přepracovává se zde kromě místního francouzského paliva i palivo z jiných zemí. Kapacita dostačuje k ročnímu přepracování 1 700 tun použitého paliva a je tak možno touto cestou vyextrahovat až 99,9 % plutonia a uranu pro recyklaci, po které zbyde 3 % vysoce aktivního odpadu, který se vitrifikuje a uloží. Plutonium se po vyseparování okamžitě převáží do závodu Melox u Marcoule s kapacitou 195 tun za rok (reálně se zpracuje 150 tun za rok), kde se okamžitě zpracovává v palivo MOX, které se pak používá v 900 MWe reaktorech. Uran se zpracovává na palivo RepU, které se konvertuje v závodu Comurhex v Pierrelatte na  $U_3O_8$  pro uložení a na  $UF_6$ , který se obohacuje na centrifugách v Rusku (kvůli specifickému izotopickému složení, zejména uranu 232 a 236, které generují vyšší množství gama záření). Po přepracování tak zbyde pětkrát méně jaderného odpadu o desetkrát menší radiotoxicitě. Obohacený uran se dále zpracuje v závodu Romans společností CERCA a FBFC a výsledné palivo se používá taktéž v 900 MWe reaktorech. V Evropě je od počátku celkem 38 reaktorů, které MOX palivo používají (22 ve Francii, 10 v Německu, 3 ve Švýcarsku, 2 v Belgii a 1 v Nizozemsku) [54]. Z ročních 1 050 tun se použije asi 10,5 tun plutonia a 1 000 tun uranu pro účely těchto paliv. Použité MOX a RepU palivo se dále nevyužívá a skladuje se pro budoucí použití v rychlých reaktorech IV. generace. Nízko a středně aktivní odpady se skladují pod záštitou národní agentury pro nakládání s radioaktivním odpadem (ANDRA) v úložišti The Centre de l’Aube v Soulaines-Dhuys od roku 1992, do roku 1994 pak v úložišti The Manche u La Hague s kapacitou 527 000 m<sup>3</sup>. Úložiště La Manche je zaplněné, zakryté travnatým porostem a od roku 2003 je pouze ve fázi dohledu. ANDRA dále vybrala lokalitu pro trvalé úložiště vitrifikovaných vysoce aktivních a středně aktivních odpadů v Bure. Tato lokalita byla příslušnými institucemi schválena, zahájení stavby úložiště je v roce 2020 s termínem otevření

od roku 2025. Poplatek za nakládání s radioaktivními odpady a vyřazování bloků z provozu je 1,4 EUR za vyrobenou MWh, předpokládané náklady jsou 75 miliard EUR. Nakládání s radioaktivními odpady má na starost agentura ANDRA, národní plán pro nakládání s radioaktivními materiály a odpadem se aktualizuje každé tři roky. Celkem 13 reaktorů se nyní vyřazuje z provozu, patří mezi ně jak výzkumné reaktory, tak reaktory první generace typově podobné reaktorům GCR ve Velké Británii. Francie je, co se týče vyřazování z provozu velmi pokročilá, za vzor se dává postup při likvidaci bloku Chooz A, kde práce probíhají dle plánu (jak časového, tak finančního) s cílem dokončení v roce 2022 [34, 55].



Obr. 3.1: Přepřacovatelský závod La Hague ve Francii [56]

### 3.10 Belgie

V Belgii je momentálně v provozu celkem 7 bloků typu PWR, které byly spouštěny mezi roky 1974 a 1985 a nyní pokrývají 39 % výroby elektřiny [57]. Původní rozhodnutí vládní komise z roku 2000 usneslo, že jaderná energie je pro Belii důležitá, doporučila její další rozvoj a stanovila limit provozu bloků na 40 let. Nicméně díky následnému politickému rozhodnutí z roku 2003 se zakázala výstavba dalších jaderných bloků. Toto rozhodnutí bylo roku 2007 kritizováno zejména proto, že jaderné





nicméně stále je ve stádiu příprav a předpokládaný výběr lokality je v roce 2025, nejspíše v Severním Irsku, spuštění je pak naplánováno na rok 2040 [61]. Provozovatelé elektráren odvádí poplatek na účet, ze kterého se bude platit odstavování bloků z provozu, výstavba hlubinného úložiště pak bude financována vládou. Celkem 22 jaderných reaktorů typu Magnox je nyní vyřazováno z provozu [34, 62].

### 3.12 USA

Spojené Státy Americké mají v provozu 96 bloků, které pokrývají přibližně 19 % výroby a jsou tak světově největším provozovatelem jaderných elektráren [63]. Těžba uranu v současnosti nedostačuje a krom svých zásob nakupují Spojené Státy uran také z Kanady, Austrálie a Ruska. Co se týče použitého paliva, roku 1977 bylo rozhodnuto nepřepřacovat palivo a jít cestou uložení. Historicky se přepřacovalo v rámci vojenského programu, byly postaveny tři přepřacovatelské závody, z nichž první byl v provozu 6 let, druhý nebyl schopen provozu kvůli nefunkčnosti a třetí nebyl nikdy otevřen. Pro uložení nízko aktivních odpadů slouží několik úložišť. Nyní je 37 reaktorů vyřazeno z provozu, některé, jako například Shippingport, Fort St Vrain, Big Rock Point a Shoreham byly již kompletně rozebrány. Použité palivo se skladuje povětšinou v suchých, ale i mokřích meziskladech celkem v 35 lokalitách. Suchý mezisklad je často proveden tak, že betonové kontejnery s použitým palivem jsou uloženy povrchově na střeženém území, nikoliv v budově. Senát v roce 2002 schválil výstavbu hlubinného úložiště v Yucca Mountains, nicméně tento plán byl později vetován. V roce 2012 byla vládě doporučena výstavba centrálního hlubinného úložiště právě v této lokalitě, jednalo by se o hlubinné úložiště uložené 300 m pod zemským povrchem [34, 64, 65].

### 3.13 Kanada

Kanada má v provozu 19 bloků pokrývajících necelých 15 % výroby elektřiny [66]. Všechny reaktory jsou typu CANDU, což je typ reaktoru vyvinutý přímo v Kanadě. Kanada je dlouhodobě jedním ze světových lídrů v produkci uranu, pokrývá až 22 % světové produkce. Použité jaderné palivo se po vytažení z reaktoru skladuje 5-10 let u reaktoru a následně se přemístí do suchých meziskladů, které jsou v prostorách samotných elektráren. V plánu je výstavba hlubinného trvalého úložiště, postupně se redukuje výčet vhodných lokalit, z původních 21 jsou nyní přezkoumávány pouze dvě, otevření úložiště se plánuje na rok 2035. Také je v plánu hlubinné úložiště pro nízko a středně aktivní odpady 680 metrů pod zemí v blízkosti jaderné elektrárny Bruce. Vyřazování bloků z provozu a následná likvidace se financují z účtu, na který

přispívají provozovatelé jaderných elektráren. V současnosti se vyřazují z provozu 4 bloky, předpokládaná doba dokončení likvidace je 30 let od začátku vyřazování. Hlavní organizací, která má na starosti výběr možností pro uložení a nakládání s radioaktivním odpadem je Organizace pro nakládání s jaderným odpadem (NWMO). Nízko a středně aktivní odpady se momentálně skladují povrchově, v procesu je výstavba hlubinného úložiště pro tyto odpady, které bude mít na starost taktéž NWMO [34, 67].

### 3.14 Japonsko

Japonsko má momentálně v provozu 33 bloků, z nichž 17 čeká na znovuspuštění po situaci v roce 2011, kdy se stala na JE ve Fukušimě havárie [68]. Japonsko je na jaderné energetice velmi závislé, první reaktor byl spuštěn roku 1966 a elektřina vyrobená z jádra byla strategickou prioritou od roku 1973, jelikož Japonsko jakožto ostrovní stát nemá mnoho možností, jak elektřinu dovážet. Do roku 2011 Japonsko generovalo 30 % elektřiny z jaderných elektráren s původním plánem do roku 2017 zvýšit zastoupení na minimálně 40 %. Po fukušimské havárii se plán změnil na alespoň 20 % k roku 2030 [69]. Co se týče dodávky uranu, Japonsko své zásoby nemá, přibližně 8 000 tun uranu ročně se tak dováží především z Austrálie, Kazachstánu a Kanady. Zpracování uranu pak probíhá již přímo v Japonsku a tento proces je zde velmi dobře zvládnut. Použité palivo se pak skladuje v suchých a mokřích meziskladech přímo v jaderných elektrárnách. Japonsko se rozhodlo použité palivo přepracovat a využít tak ještě 25-30 % energie z použitého paliva. Hlavní přepracovatelský závod je od roku 1993 v lokalitě Rokkasho-Mura, s kapacitou 800 tun uranu za rok, což stačí pro přepracování použitého paliva z čtyřiceti elektráren o výkonu 1 000 MWe [70]. V minulosti si Japonsko použité palivo nechávalo přepracovávat v Evropě. V plánu je použití použitého plutonia v rámci paliva MOX ve všech japonských reaktorech. V lokalitě Rokkasho-Mura se také nachází úložiště nízko aktivního odpadu a také dočasné úložiště pro vysoce aktivní odpad vitrifikovaný po přepracování. V současné době je odstaveno 27 bloků, které se vyřazují z provozu. Co se pak týká havárií poškozených bloků ve Fukušimě, provozovatel, firma Tepco, založil společnost pro dekontaminaci a likvidaci této elektrárny. V lokalitě Fukušima je celkem 6 bloků, bloky 1-4 byly havárií zasaženy, zbývající nikoliv, nicméně přesto bylo rozhodnuto i tyto bloky vyřadit [34, 71].

### 3.15 Čína

Čína provozuje celkem 4 bloků, které ale pokrývají pouze zhruba 4 % výroby elektřiny, dalších 10 bloků je pak ve výstavbě [72]. Většina palivového cyklu probíhá přímo v Číně, třetinu uranu si těží sama, zbytek dováží. V plánu je uzavřený palivový cyklus, tedy přepracování. Vitrifikované vysoce aktivní odpady je pak v plánu uložit v hlubinném úložišti, jehož lokalita se vybírá již od roku 1986 a má být vybrána v roce 2020 s plánem otevření kolem roku 2050. Úložiště se má nacházet 500 metrů hluboko v granitu, ve stejném místě se má od roku 2020 stavět výzkumná laboratoř. Použité palivo se skladuje většinou v mokřích meziskladech, suchý mezisklad je jediný v lokalitě Qinshan, a některé použité palivo se přepravuje do centrálního meziskladu v lokalitě Gansu. Hlavní přepracovatelský závod je pak v provozu od roku 2010 také v lokalitě Gansu. Další přepracovatelský závod s možností výroby MOX paliva je pak v plánu v lokalitě Lianyungang poblíž jaderné elektrárny Tianwan, výstavba je naplánována na rok 2020. Nízko a středně aktivní odpady se skladují v lokalitách Xibai, Beilong center a Feifeng Mountain. Co se týče vyřazování bloků z provozu, momentálně žádný takový není, pouze malý výzkumný reaktor, který byl v provozu od roku 1958, se vyřadil z provozu roku 2007 a byl již zlikvidován [34, 73].

### 3.16 Jižní Korea

Jaderné elektrárny v Jižní Koreji pokrývají necelých 24 % výroby elektrické energie svými 24 bloky v provozu, jedná se o tlakovodní reaktory, čtyři z nich z nich chlazené těžkou vodou [74]. Jižní Korea patří mezi světovou špičku v jaderných technologiích, které dodává i do světa. Uran se dováží, a to z Kazachstánu, Kanady, Austrálie, Nigeru a dalších zemí s tím, že s přepracováním použitého paliva se už od počátku nepočítá, jedinou možností je otevřený palivový cyklus, tedy trvalé uložení. Nakládání s radioaktivními odpady má na starost Korejská korporace pro nakládání s radioaktivními odpady (KRMC), která byla založena roku 2009 a roku 2013 se změnila na agenturu. Nízko a středně aktivní odpady jsou skladovány v lokalitách jednotlivých elektráren, stejně jako použité jaderné palivo, a to jak v suchých, tak mokřích meziskladech. Počítá se s výstavbou centrálního meziskladu použitého paliva s kapacitou 20 000 tun a otevřením v roce 2035. Hlubinné úložiště je zatím ve fázi příprav, finální lokalita má být zvolena v roce 2028, následně se má postavit podzemní laboratoř, výstavba samotného úložiště má trvat deset let s plánem otevření kolem roku 2055. Odstavené reaktory jsou zatím pouze dva, vyřazování z provozu začlo roku 2017, respektive 2018 [75].

### 3.17 Indie

V Indii je v provozu 22 bloků, které pokrývají přibližně 3 % výroby elektřiny, dalších 7 bloků je pak ve výstavbě [76]. Indie těží uran, který pokrývá asi 40 % spotřeby, zbytek se dováží z Kazachstánu, Kanady a Ruska. Použité palivo se přepracovává, s tím, že Indie nepodepsala smlouvu o nešíření jaderných zbraní a teoreticky tak může přepracováním získat materiál pro jaderné zbraně. Přepracovatelské závody se nachází v lokalitách Trombay (v provozu od roku 1964), Tarapur a Kalpakkam, všechny založené na technologii PUREX, která zajišťuje výtěžnost až 99,5 % [77]. Další závod je ve výstavbě poblíž centra jaderného výzkumu Bhabha. Vysoce aktivní odpad je plánován uložit v hlubinném úložišti, nicméně zatím je toto úložiště ve fázi příprav, vybírá se vhodná lokalita [34, 78].



# Závěr

Cílem této práce je seznámit se s problematikou použitého jaderného paliva a možnostmi s jeho nakládáním, včetně srovnání přístupů zemí významných z hlediska jaderné energetiky. Jedná se o velmi aktuální téma, jelikož v blízké budoucnosti se bude celosvětově odstavovat z provozu nemalé množství jaderných elektráren, a tedy bude potřeba s tímto použitým palivem a radioaktivními odpady naložit tak, aby byly bezpečně uloženy a měly co nejmenší vliv na životní prostředí.

V práci je vysvětlen jaderný palivový cyklus, zejména jeho zadní část, tedy způsoby nakládání s použitým palivem. Jsou zde popsány možnosti uložení do meziskladů, trvalého úložiště nebo přepracování použitého paliva. Také je zde popsán radioaktivní odpad a použité jaderné palivo, zejména z hlediska významných izotopů obsažených v použitém palivu a s tím související časová závislost měrné aktivity a zbytkového tepla.

Práce se následně zabývá nakládáním s použitým palivem v České republice, kde jeho producentem jsou dvě jaderné elektrárny – Dukovany a Temelín a rovněž výzkumný reaktor LVR-15 v Centru výzkumu Řež. V obou těchto jaderných elektrárnách se nachází suché mezisklady použitého paliva, do budoucna se plánuje použité palivo trvale uložit do hlubinného úložiště. Rovněž jsou zde uvedena významná kritéria a požadavky na hlubinné úložiště, a to například z hlediska dlouhodobé bezpečnosti nebo infrastruktury. Také je tu uveden časový plán přípravy a výstavby tohoto úložiště. Nyní se uvažuje o devíti lokalitách pro jeho umístění, z nichž mají být v roce 2020 vybrány dvě a následně v roce 2025 jedna finální lokalita. Úložiště by se dle plánu mělo začít stavět od roku 2050 a zahájení provozu je naplánováno na rok 2065.

Podstatná část práce mapuje různé koncepce nakládání s použitým jaderným palivem v zemích, které jsou významné z hlediska jaderné energetiky. V úvodu popisu každé země jsou uvedeny základní informace pro seznámení se s historií a současným stavem jaderné energetiky v dané zemi. Dále jsou zde popsány současné možnosti ukládání radioaktivních odpadů a použitého jaderného paliva, včetně postoje k finálnímu nakládání s použitým palivem, tedy buď uložení do hlubinného úložiště, nebo přepracování. Přestože některé země mají velmi podobný jaderný program a provozují stejné typy reaktorů, dočasné ukládání v meziskladech se liší. Příkladem může být Česká republika, Slovensko a Maďarsko – všechny tyto země mají v provozu reaktory typu VVER-440, nicméně Česká republika skladuje použité palivo v suchých kontejnerových meziskladech, Slovensko v mokřém bazénovém meziskladu a Maďarsko v suchém kobkovém meziskladu.

V tabulce 3.1 jsou uvedeny všechny země, které byly v souvislosti s použitým jaderným palivem zmíněny v této práci. Tabulka obsahuje počet reaktorů v provozu, odstavených a ve výstavbě, následně pro srovnání dostupná data o poplatku za provoz jaderných elektráren pro účely likvidace elektrárny po odstavení a právě nakládání s použitým palivem. Poslední sloupec uvádí variantu, kterou si daná země zvolila jako finální pro nakládání s použitým palivem, tedy buď hlubinné úložiště, nebo přepracování.

Ukládání použitého paliva do hlubinného úložiště je právě tou nejčastější možností, kterou si země do budoucna zvolily. Jedním z důvodů mohou být například extrémně vysoké náklady na přepracování, což si v současnosti mohou dovolit zejména ekonomicky silné země, jako je například Francie nebo Rusko. Pro přepracování může hovořit i potřeba zachovat know-how v této oblasti nebo využít palivo typu MOX pro rychlé reaktory. Momentálně ale není na světě v provozu žádné hlubinné úložiště, přestože existují podzemní laboratoře, kde se hlubinné ukládání zkoumá. Nejpokročilejší zemí je v tomto ohledu Finsko, kde se již hlubinné úložiště staví a jeho otevření je plánováno na rok 2023. Finsko tak bude světově první zemí, která použité jaderné palivo trvale uloží do hlubinného úložiště a může se tak stát příkladem pro ostatní země, které tuto možnost uložení mají ve svém plánu.



Tab. 3.1: Shrnutí nakládání s použitým palivem ve světě

Země	RE v provozu	RE odstavených	RE ve výstavbě	Poplatek (EUR)	Varianta
Česká republika	6	0	0	2 za vyrobenou MWh	Hlubinné úložiště
Slovensko	4	3	2	3,21 za vyrobenou MWh	Hlubinné úložiště
Maďarsko	4	0	0	neuveдено	Hlubinné úložiště
Ukrajina	15	4	2	neuveдено	Hlubinné úložiště
Rusko	38	8	4	neuveдено	Přepřacování
Švédsko	7	6	0	5 za vyrobenou MWh	Hlubinné úložiště
Finsko	4	0	1	10 % z ceny výroby	Hlubinné úložiště
Švýcarsko	4	2	0	1 za vyrobenou MWh	Hlubinné úložiště
Německo	6	30	0	neuveдено	Hlubinné úložiště
Francie	57	13	1	1,4 za vyrobenou MWh	Přepřacování
Belgie	7	1	0	5 za vyrobenou MWh	Hlubinné úložiště
Velká Británie	15	30	2	neuveдено	Hlubinné úložiště
USA	96	37	2	1 za vyrobenou MWh	Hlubinné úložiště
Kanada	19	6	0	neuveдено	Hlubinné úložiště
Japonsko	33	27	2	4 za vyrobenou MWh	Přepřacování
Čína	48	0	10	3,4 za vyrobenou MWh	Přepřacování
Jižní Korea	24	2	4	650 za kg použitého paliva	Hlubinné úložiště
Indie	22	0	7	neuveдено	Přepřacování



## Literatura

- [1] Power Reactor Information System. *Power Reactor Information System* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>
- [2] Nuclear Power in the World Today. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
- [3] MATĚJKA, Karel. *Vyhořelé jaderné palivo*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. Phare. ISBN 80-707-8352-4.
- [4] Odpady z palivového cyklu jaderných elektráren: Zdokonalování technologií, zpřísnování dozoru a osvěta. *Vesmír* [online]. 2005 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2005/cislo-9/odpady-z-palivoveho-cyklu-jadernych-elektraren.html#&gid=1&pid=1>
- [5] *Zákon č. 263/2016 sb., atomový zákon* [online]. 2017 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/263-2016.pdf>
- [6] DLOUHÝ, Zdeněk. *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3629-9.
- [7] ŠTAMBERG, Karel. *Technologie jaderných paliv II*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2017. ISBN 978-80-01-06077-3.
- [8] Medzisklad vyhoretého paliva. *JAVYS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.javys.sk/sk/jadrove-zariadenia/medzisklad-vyhoreteho-paliva/medzisklad-vyhoreteho-paliva>
- [9] Mezisklad vyhořelého paliva Dukovany. *SÚJB* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost/jaderna-zarizeni/sklady-vyhoreleho-jaderneho-paliva/mezisklad-vyhoreleho-paliva-dukovany/>
- [10] Meet Oklo, the Earth's Two-billion-year-old only Known Natural Nuclear Reactor. *IAEA* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/newscenter/news/meet-oklo-the-earths-two-billion-year-old-only-known-natural-nuclear-reactor>
- [11] Environment North fights against nuclear waste site. *DrydenNow* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.drydennow.com/local/environment-north-fights-against-nuclear-waste-site>

- [12] Mixed Oxide (MOX) Fuel. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx>
- [13] Processing of Used Nuclear Fuel. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclear-fuel.aspx>
- [14] Vitrifikace radioaktivního odpadu nově. *Třípól* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/1798-vitrifikace-radioaktivniho-odpadu-nove>
- [15] Czech Republic. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CZ>
- [16] Nuclear Power in Czech Republic. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/czech-republic.aspx>
- [17] Reaktor LVR-15. *Centrum výzkumu Řež* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <http://reaktory.cvrez.cz/reaktor-lvr-15/>
- [18] Financování. *SÚRAO* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/o-nas/financovani/>
- [19] *Výběr lokality pro hlubinné úložiště* [online]. 2019, , 2 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: [https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/04/presskit\\_20190423\\_vyber-lokality.pdf](https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/04/presskit_20190423_vyber-lokality.pdf)
- [20] *POŽADAVKY, INDIKÁTORY VHODNOSTI A KRITÉRIA VÝBĚRU LOKALIT PRO UMÍSTĚNÍ HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ: Metodické pokyny* [online]. In: . SÚRAO, 2017 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/wp-content/uploads/2019/02/kriteria.pdf>
- [21] *POŽADAVKY, INDIKÁTORY VHODNOSTI A KRITÉRIA VÝBĚRU LOKALIT PRO UMÍSTĚNÍ HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ* [online]. In: . SÚRAO, 2015 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [https://www.pacejov.cz/oupacejov/user/deska/2015/7-2015\\_kriteria\\_vyberu\\_lokality.pdf](https://www.pacejov.cz/oupacejov/user/deska/2015/7-2015_kriteria_vyberu_lokality.pdf)

- [22] *DGR DEVELOPMENT IN THE CZECH REPUBLIC: ACTION PLAN 2017-2025* [online]. In: . SÚRAO, 2015 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [http://www.nechcemeuloziste.cz/cs/dokumenty/odborne-studie/akcni-plan-vyberu-mista-pro-hlubinneho-uloziste-v-cr-pro-roky-2017-2025/\\_files/strategic-action-plan-2017-2025.pdf](http://www.nechcemeuloziste.cz/cs/dokumenty/odborne-studie/akcni-plan-vyberu-mista-pro-hlubinneho-uloziste-v-cr-pro-roky-2017-2025/_files/strategic-action-plan-2017-2025.pdf)
- [23] Bojíme se znečištění vody i radioaktivity, říkají obce, ve kterých může vzniknout úložiště jaderného odpadu. *Hospodářské noviny* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://archiv.ihned.cz/c1-66453170-kam-s-jadrem-rozhoduje-se-kde-vznikne-hlubinne-uloziste-odpadu-z-elektren-pruzkum-byl-povrchni-varuji-experti>
- [24] Slovak Republic. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=SK>
- [25] Vývoj hlbinného úložiska. *JAVYS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.javys.sk/sk/cinnosti-spolocnosti/nakladanie-s-vjp-nakladanie-s-vyhoretym-jadrovym-palivom/vyvoj-hlbinneho-uloziska>
- [26] Vyradovanie JE V1. *JAVYS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.javys.sk/sk/cinnosti-spolocnosti/vyradovanie-je-v1>
- [27] Ukončovanie prevádzky a príprava na vyradovanie. *JAVYS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.javys.sk/sk/cinnosti-spolocnosti/vyradovanie-je-v1/ukoncovanie-prevadzky-a-priprava-na-vyradovanie>
- [28] Prvá etapa vyradovania. *JAVYS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.javys.sk/sk/cinnosti-spolocnosti/vyradovanie-je-v1/prva-etapa-vyradovania>
- [29] Druhá etapa vyradovania. *JAVYS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.javys.sk/sk/cinnosti-spolocnosti/vyradovanie-je-v1/druha-etapa-vyradovania>
- [30] Nuclear Power in Slovakia. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/slovakia.aspx>
- [31] Hungary. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=HU>

- [32] Nuclear Power in Hungary. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/hungary.aspx>
- [33] Ukraine. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=UA>
- [34] National Policies and Funding. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/appendices/radioactive-waste-management-appendix-2-national-p.aspx>
- [35] Nuclear Power in Ukraine. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/ukraine.aspx>
- [36] Nuclear Power in Russia. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-power.aspx>
- [37] Russian Federation. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=RU>
- [38] Russia's Nuclear Fuel Cycle. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russia-nuclear-fuel-cycle.aspx>
- [39] Sweden. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=SE>
- [40] Safe transport by sea. *SKB* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.skb.com/our-operations/transport-by-sea/>
- [41] Clab – Central Interim Storage Facility for Spent Nuclear Fuel. *SKB* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.skb.com/our-operations/clab/>
- [42] Our method of final disposal. *SKB* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.skb.com/future-projects/the-spent-fuel-repository/our-methodology/>
- [43] Nuclear Power in Sweden. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/sweden.aspx>

- [44] Finland. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=FI>
- [45] Multiple barriers helps to ensure that no nuclear waste will be released to living nature. *Posiva Oy* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: [http://www.posiva.fi/en/final\\_disposal/basics\\_of\\_the\\_final\\_disposal#.XonkAC\\_\\_RTY](http://www.posiva.fi/en/final_disposal/basics_of_the_final_disposal#.XonkAC__RTY)
- [46] Nuclear Power in Finland. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/finland.aspx>
- [47] Switzerland. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CH>
- [48] Timetable. *NAGRA* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.nagra.ch/en/timetable.htm>
- [49] Nuclear Power in Switzerland. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/switzerland.aspx>
- [50] Germany. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=DE>
- [51] Residues and waste management. *Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: [https://www.base.bund.de/EN/ns/decommissioning/waste-management/waste-management\\_node.html](https://www.base.bund.de/EN/ns/decommissioning/waste-management/waste-management_node.html)
- [52] Nuclear Power in Germany. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspx>
- [53] France. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=FR>
- [54] The world leader in recycling used nuclear fuels. *Orano* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://orano.group/en/expertise/from-exploration-to-recycling/world-leader-in-recycling-used-nuclear-fuels>
- [55] Nuclear Power in France. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>

- [56] Orano la Hague : dégagement de fumée dans le bâtiment d'entreposage du linge. *Actu* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: [https://actu.fr/faits-divers/orano-hague-degagement-fumee-dans-batiment-dentreposage-linge\\_31516269.html](https://actu.fr/faits-divers/orano-hague-degagement-fumee-dans-batiment-dentreposage-linge_31516269.html)
- [57] Belgium. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=BE>
- [58] TEMPORARY STORAGE OF CONDITIONED BELGIAN RADIOACTIVE WASTE. *Belgoprocess* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.belgoprocess.be/eng/TempStorage.htm>
- [59] Nuclear Power in Belgium. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/belgium.aspx>
- [60] United Kingdom. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=GB>
- [61] Learn about the UK's mission to deal with radioactive waste. *HM Government* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://geologicaldisposal.campaign.gov.uk>
- [62] Nuclear Power in United Kingdom. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-kingdom.aspx>
- [63] United States of America. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=US>
- [64] Disposal of High-Level Nuclear Waste. *U.S. Government Accountability Office* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: [https://www.gao.gov/key\\_issues/disposal\\_of\\_highlevel\\_nuclear\\_waste/issue\\_summary](https://www.gao.gov/key_issues/disposal_of_highlevel_nuclear_waste/issue_summary)
- [65] US Nuclear Fuel Cycle. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/usa-nuclear-fuel-cycle.aspx>
- [66] Canada. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CA>
- [67] Nuclear Power in Canada. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/canada-nuclear-power.aspx>



- [68] Japan. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=JP>
- [69] Nuclear Power in Japan. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>
- [70] Reprocessing. *Japan nuclear fuel limited* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://www.jnfl.co.jp/en/business/reprocessing/>
- [71] Japan's Nuclear Fuel Cycle. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-fuel-cycle.aspx>
- [72] China, People's Republic of. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=CN>
- [73] China's Nuclear Fuel Cycle. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-fuel-cycle.aspx>
- [74] Korea, Republic of. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=KR>
- [75] Nuclear Power in South Korea. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/south-korea.aspx>
- [76] India. *PRIS* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/CountryDetails.aspx?current=IN>
- [77] INDIAN PROGRAMME ON REPROCESSING. *Bhabha Atomic Research Centre* [online]. , 3 [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <http://www.barc.gov.in/publications/eb/golden/nfc/toc/Chapter%206/6.pdf>
- [78] Nuclear Power in India. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2019-12-07]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/india.aspx>