

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** B0715A270013 – Strojní inženýrství  
**Studijní specializace:** Stavba energetických strojů a zařízení

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Porovnání návrhů na nový jaderný zdroj v ČR**

**Autor:** Jan HRACH  
**Vedoucí práce:** Ing. Jan ZDEBOR, CSc.

Akademický rok 2022/2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan HRACH**  
Osobní číslo: **S20B0137P**  
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**  
Specializace: **Stavba energetických strojů a zařízení**  
Téma práce: **Porovnání návrhů na nový jaderný zdroj v ČR (Dukovany) z pohledu výkonu, počtu smyček a parogenerátorů včetně jejich typů**  
Zadávající katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

## Zásady pro vypracování

Zpracujte přehled a porovnání projektových řešení nových jaderných elektráren s reaktory PWR generace III+, původně uvažovaných pro výstavbu NJZ v lokalitě JE Dukovany.

Při zpracování práce se zaměřte na:

1. Popis a porovnání jednotlivých projektů z pohledu výkonu JR, počtu smyček I.O. a typů parogenerátorů.
2. Popis a porovnání jednotlivých projektů z pohledu použitých typů kontejnmentů.
3. Porovnání jednotlivých typů podle výše popsaných kritérií a jejich porovnání s doporučeními podle kritérií v European Utility Requirements.
4. Porovnání dopravitelnosti největších komponent I.O. na lokalitu JE Dukovany.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- NUCLEAR POWER REACTORS IN THE WORLD, IAEA, VIENNA, 2020, IAEA-RDS-2/40, ISBN 978-92-0-114820-9, ISSN 1011-2642
- <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx>
- [https://www.researchgate.net/publication/328849953\\_A\\_Comparative\\_Study\\_of\\_Safety\\_Systems\\_from\\_Selected\\_Advanced\\_Nuclear\\_Reactors](https://www.researchgate.net/publication/328849953_A_Comparative_Study_of_Safety_Systems_from_Selected_Advanced_Nuclear_Reactors)
- <http://www.europeanutilityrequirements.org/>
- Přednášky zástupců firem Westinghouse, KHNP a EDP na úvodních konferencích Jaderných dnů v roce 2020, 2021 a 2022, dostupné na <https://www.jadernedny.cz/>

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Zdebor, CSc.**  
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Josef Hejdus**  
ČEZ, a. s.

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Doc. Ing. Václav Dostál, Sc.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 31. října 2022

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Hrach	Jméno Jan	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	B0715A270013 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Zdebor, CSc.	Jméno Jan	
<b>PRACOVÍŠTĚ</b>	ZČU – FST – KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Porovnání návrhů na nový jaderný zdroj v ČR (Dukovany) z pohledu výkonu, počtu smyček a parogenerátorů včetně jejich typů		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2023
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	43	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	31	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	12
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Tato práce se zaměřuje na porovnání návrhů na nový jaderný zdroj plánovaný v těsné blízkosti současné JE Dukovany v České republice. V úvodu práce se popisují principy reaktorů a předvedou se hlavní používané typy reaktorů. Dále je stručně popsána zhoršující se energetická situace v ČR a v souladu plánu na zachování bezemisní energie, do které je podle současných pravidel zahrnuta i jaderná energie, se navrhuje nový blok jaderné elektrárny jako možné řešení. V další části jsou představeni jednotliví kandidáti na výstavbu nového bloku. Práce je završena porovnáním těchto reaktorů a jejich vhodnosti pro účely výstavby nového jaderného zdroje v Dukovanech.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p style="text-align: center;">Jaderná energetika, energetická situace, Nový jaderný zdroj, Česká republika, Dukovany, srovnání, princip reaktoru, typy reaktorů, jaderná bezpečnost</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Hrach	Name Jan		
<b>STUDY PROGRAMME</b>	B0715A270013 Mechanical Engineering			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Zdebor, CSc.	Name Jan		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU – FST – KKE			
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Comparison of designs for the new nuclear power plant in the Czech Republic (Dukovany) in terms of power output, number of loops, and steam generators including their types.			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKE	<b>SUBMITTED IN</b>	2023
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	43	<b>TEXT PART</b>	31	<b>GRAPHICAL PART</b>	12
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This work focuses on comparing designs for a new nuclear power source planned near the current Dukovany NPP, Czech Republic. The introduction describes the principles of reactors and presents the main types of reactors used. Furthermore, the deteriorating energy situation in the Czech Republic is briefly described, and in accordance with the plan to preserve emission-free energy, which includes nuclear energy according to the current rules, a new nuclear energy is proposed as a possible solution. In the next part, individual candidates for the construction of a new block are presented. The work is concluded with a comparison of these reactors and their suitability for the construction of a new nuclear power plant in Dukovany.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p style="text-align: center;">Nuclear energy, energy situation, New nuclear power plant, Czech Republic, Dukovany, comparison, reactor principle, reactor types, nuclear safety</p>

## Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	8
Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	10
Úvod.....	11
1 Jaderná energetika a reaktory .....	12
1.1 Štěpná reakce.....	12
1.2 Základní typy jaderných reaktorů .....	13
1.2.1 Vývojové generace technologie reaktorů.....	13
1.2.2 Základní konstrukční typy komerčních reaktorů .....	16
1.3 Bezpečnostní prvky reaktorů III/III+ generace .....	23
1.4 Princip PWR reaktoru .....	24
2 Energetika v ČR .....	26
2.1 Strategické cíle .....	27
2.2 Strategické priority energetiky ČR.....	27
2.3 Energetický mix ČR.....	28
3 Jaderná elektrárna Dukovany .....	30
4 Projekt NJZ .....	31
4.1 Územní plány .....	31
4.2 Časová osa.....	32
4.2.1 Příprava .....	33
4.2.2 Průběh výběrového řízení.....	33
4.2.3 Realizace .....	33
4.3 Společnosti .....	34
4.3.1 Westinghouse .....	34
4.3.2 KHNP.....	35
4.3.3 EdF .....	35
5 Jaderné reaktory pro Dukovany .....	37
5.1 Stávající typy reaktorů používané v ČR.....	37
5.1.1 VVER 440 (Dukovany).....	37
5.1.2 VVER 1000 (Temelín).....	37

5.2	Nově navrhované typy reaktorů .....	37
5.2.1	AP1000.....	38
5.2.2	APR1000 .....	39
5.2.3	EPR1200.....	41
6	Kritéria porovnávání .....	44
6.1	Výkon.....	44
6.2	Počet smyček.....	44
6.3	Typy parogenerátoru .....	44
6.4	Z pohledu použitého kontejnmentu.....	44
6.5	Z pohledu dopravitelnosti.....	45
6.6	Tavení aktivní zóny .....	45
6.7	CDF .....	45
6.8	LERF .....	46
6.9	European Utility Requirements .....	46
7	Porovnání návrhů .....	48
7.1	Preferovaný projekt .....	51
	Závěr.....	53
	Seznam použitých zdrojů .....	54



## Přehled použitých zkratk a symbolů

ABWR	Advanced Boiling Water Reactor, pokročilý varný reaktor
AGR	Advanced Gas Cooled, pokročilý plynem chlazený reaktor
AP	Advanced Passive, označení amerického tlakovodního reaktoru
APR	Advanced Power Reactor, označení korejského tlakovodního reaktoru
BWR	Boiling Water Reactor, varný reaktor
CANDU	Canada Deuterium-uranium, kanadský energetický jaderný reaktor moderovaný a chlazený těžkou vodou
CDF	Core Damage Frequency, pravděpodobnost, že reaktor utrpí závažné poškození
ČEZ	České energetické závody, český výrobce elektřiny
CGN	China General Nuclear Power Group, čínská státní energetická společnost
E&C	KEPCO Engineering & Construction, jihokorejská projektová a inženýrská společnost
ECCS	Emergency Core Cooling System, systém nouzového odstavení reaktoru
EdF	Électricité de France, francouzská společnost zabývající se výrobou a distribucí elektřiny
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
EPR	European Pressurised Water Reactor, Evropský tlakovodní reaktor
ETE	Jaderná elektrárna Temelín
EUR	European Utility Requirements, evropský projekt, který sdružuje požadavky pro jaderné elektrárny
GCR	Gas Cooled Reactor, plynem chlazený reaktor
GDC	Gravity-Driven Cooling System, pasivní chlazení pomocí gravitace
GFR	Gas-cooled Fast Reactor, plynem chlazený rychlý reaktor
HPR	Hualong Pressurised Reactor, čínský tlakovodní reaktor
HUA	Hlavní oddělovací armatura
HTGR	High-Temperature Gas-Cooled Reactor, vysokoteplotní plynem chlazený reaktor
HTR-PM	High-Temperature Gas-Cooled Reactor – Pebble-bed Module, malý modulární reaktor v Číně
IAEA	International Atomic Energy Agency, mezinárodní agentura pro atomovou energii
IRWST	In-Containment Refueling Water Storage Tank, záložní nádrž s chladicí vodou
KEPCO	Korea Electric Power Corporation, jihokorejská elektrárenská společnost
KHNP	Korea Hydro & Nuclear Power, jihokorejská společnost zabývající se provozem a výstavbou elektráren
KPS	KEPCO Plant Service & Engineering, jihokorejská společnost zabývající se údržbou a projektováním elektráren

LERF	Large Early Release Frequency, pravděpodobnost, že při havárii dojde k úniku radioaktivních látek
LFR	Lead-Cooled Fast Reactor, rychlý reaktor chlazený olovem
LLC	Limited Liability Company, typ společnosti
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
Magnox	Magnesium non-oxidising, typ plynem chlazeného reaktoru
MOX	Mixed Oxide fuel, směsné oxidické palivo jaderných reaktorů
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
MSR	Molten Salt Reactor, reaktor s tavenou solí
NF	KEPCO Nuclear Fuel, jihokorejský poskytovatel jaderného paliva
NJZ	Nový jaderný zdroj
OPR	Optimized Power Reactor, jihokorejský tlakovodní reaktor
PCCS	Passive Containment Cooling System, trvalé chlazení reaktoru pomocí gravitace a kondenzace páry
PCS	Passive Cooling System, systém pasivního ochlazování
PHRS	Passive Heat Removal System, systém pasivního odvodu tepla
PWR	Pressurized water reactor, tlakovodní reaktor
RBMK	Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj, grafitem moderovaný a vodou chlazený varný reaktor
SCWR	Supercritical Water Reactor, superkritický vodní reaktor
SFR	Sodium Fast Reactor, rychlý sodíkem chlazený reaktor
SMR	Small Modular Reactor, malé modulární reaktory
VVER	Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor, ruský tlakovodní reaktor
WENRA	Western European Nuclear Regulators' Association, asociace regulačních orgánů západní Evropy

## Seznam obrázků

Obr. 1.1: Štěpení atomu [3].....	12
Obr. 1.2: Schéma tlakovodního reaktoru PWR [9] .....	17
Obr. 1.3: Schéma varného reaktoru BWR [9].....	18
Obr. 1.4: Schéma těžkovodního reaktoru CANDU [9].....	20
Obr. 1.5: Schéma plynem chlazeného reaktoru Magnox GCR [9] .....	21
Obr. 1.6: Schéma reaktoru typu RBMK [9] .....	22
Obr. 1.7: Schéma rychlého množivého reaktoru FBR [9].....	23
Obr. 1.8: Schéma jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem [3] .....	24
Obr. 2.1: Dlouhodobý vývoj spotřeby elektřiny v ČR [22] .....	26
Obr. 2.2: Podíl zdrojů energie pro rok 2021 [23].....	29
Obr. 4.1: Územní plány NJZ [28] .....	32
Obr. 4.2: Časová osa projektu [29] .....	32
Obr. 4.3: Časová osa realizace [29].....	34
Obr. 5.1: Ilustrativní řez elektrárenským blokem AP1000 [3].....	39
Obr. 5.2: Ilustrativní řez elektrárenským blokem APR1000 [3] .....	41
Obr. 5.3: Ilustrativní řez elektrárenským blokem EPR1200 [3] .....	43

## Seznam tabulek

Tab. 1.1: Základní typy reaktorů [9] .....	16
Tab. 2.1: Procentuální podíl zdrojů energie v České republice [23].....	28
Tab. 7.1: Porovnání navržených reaktorů .....	48
Tab. 7.2: Porovnání velikostí největších komponent [58] .....	50

## Úvod

Elektrická energie produkovaná jadernými elektrárnami v České republice tvoří 40 % celkové elektrické produkce, a to pouze se dvěma elektrárnami. Bohužel, jako všechno, tak i reaktory, které mají omezenou životnost, v těchto elektrárnách stárnou a bude třeba je do budoucna nahradit. Zároveň energetická situace v ČR se zhoršuje, kvůli stále větším nárokům na snížení emisí, a je nutné jí neprodleně řešit. Jaderná energetika se tedy jeví jako jedna z možných řešení této situace. V souladu s novou energetickou koncepcí přišel i návrh na Nový jaderný zdroj, který je do budoucna možným adeptem náhrady výkonu současné elektrárny. Ovšem, je nutno vybrat dodavatele, který tento projekt bude zastupovat s jejich vlastním konceptem jaderného reaktoru. Zároveň se předpokládá, že nový dodavatel, který bude státem vybrán, bude mít možnost realizovat svůj projekt i v jaderné elektrárně Temelín, popřípadě v jiné, nové lokalitě jaderné elektrárny, která z mého pohledu bude do budoucna s největší pravděpodobností nutná.

Cílem práce tedy je porovnat návrhy od společností, které jsou uvedeny v tendru na Nový jaderný zdroj. Zároveň je cílem i poukázat na fakt, že jaderná energetika se v průběhu let vyvinula a je mnohonásobně bezpečnější než kdysi.

Téma jsem si vybral, protože o jadernou energetiku mám zájem a jednou bych chtěl být operátorem největšího stroje v České republice – jaderného reaktoru. Z tohoto důvodu je mi téma blízké, poněvadž eventuelně bych mohl mít možnost ovládat právě třeba jeden z těchto nových bloků v našich jaderných elektrárnách.

Práce se strukturně dělí na několik kapitol, které postupně popisují problematiku až do bodu, kdy je možno si vytvořit vlastní názor na porovnávané projekty.

Na začátku se práce zmiňuje, jak vlastně jaderný reaktor funguje, popíše se štěpná reakce, kterou reaktor využívá k produkci tepla a jeho přeměně na elektrickou energii. Stručně se projde minulost a budoucnost jaderných reaktorů a předvede se ve světě nejpoužívanější typy reaktorů. Nastíní se energetická situace v ČR a proč je nutné uvažovat o jaderné energetice. Navazuje na to popis o Novém jaderném zdroji, který je rozebrán jak z politického hlediska, tak i z hlediska plánování, realizace a celkového průběhu. Jsou představeny společnosti, které se dostaly do tendru, tedy jsou v úvaze na dodavatele jejich vlastního projektu jaderného bloku. Pro pozdější porovnání jsou uvedeny všechny nabízené reaktory a zároveň se práce zmiňuje i o nynějších reaktorech, které jsou v České republice provozované. K hodnocení samotných reaktorů jsou uvedena nutná kritéria, podle kterých se bude hodnotit. V samotném závěru se nachází můj subjektivní názor a preferovaný dodavatel podle srovnání, které v práci proběhlo. Tento reaktor se nemusí shodovat s reaktorem, který Česká republika na konci roku 2024 vybere. Názor by měl spíše jen poukázat na to, jak se nad daným tématem dá uvažovat.

Hlavními zdroji byly dokumenty vydané mezinárodní agenturou pro atomovou energii, nebo samotnými společnostmi nabízejícími své projekty. Veškeré informace o reaktorech nejsou bohužel dostupné, takže pracuji pouze s dostupnými informacemi a ty se porovnávají. Dalším důležitým zdrojem byly oficiální webové stránky ČEZ a dokumentace vydané společností ČEZ s názvy „Zadávací bezpečnostní zpráva pro Nový jaderný zdroj v lokalitě Dukovany“ a „Nový jaderný zdroj v lokalitě Dukovany – Dokumentace vlivů záměru na životní prostředí“.

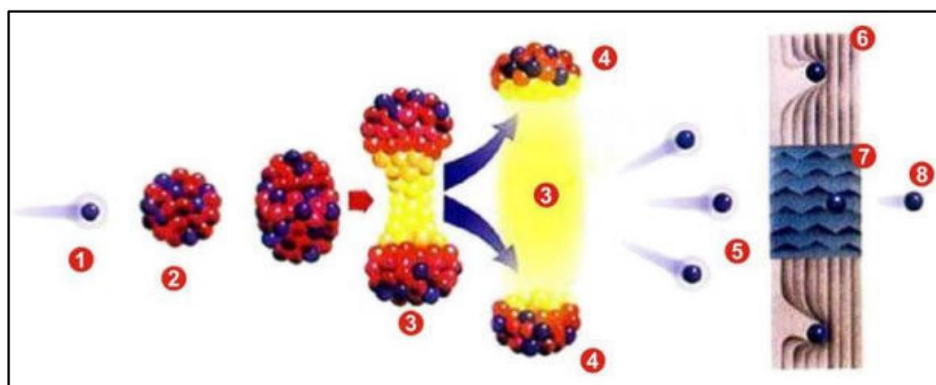
# 1 Jaderná energetika a reaktory

Jaderný reaktor je zařízení, které umožňuje uvolňovat energii z jaderných reakcí. Tuto energii lze následně využít k výrobě elektrické energie či k výrobě tepelné energie pro průmyslové účely. Jaderné reaktory se využívají v jaderných elektrárnách po celém světě a představují významný zdroj čisté energie, která nevypouští emise skleníkových plynů do ovzduší. S rozvojem technologií se v průběhu let vyvinuly různé typy jaderných reaktorů, každý s vlastními charakteristikami a výhodami.

## 1.1 Štěpná reakce

Štěpná reakce je exotermní reakce, při které je jádro atomu rozděleno na dvě menší částice a je uvolněno obrovské množství energie ve formě tepla. V jaderných elektrárnách se využívá štěpné reakce, aby se energie tepla z rozštěpených jader přeměnila na formu elektrické energie [1].

V jaderné elektrárně se štěpná reakce obvykle provádí v reaktoru. Reaktor obsahuje palivové tyče, které obsahují jaderné palivo (nejčastěji uran U-235 a někdy Pu-239) [2]. Když se neutron dostane do jádra atomu paliva, může dojít k jeho absorpci, nebo ke štěpení jádra. Při štěpení se uvolní dvě až tři nové neutrony a obrovské množství energie. Tyto neutrony se mohou navázat na další jádra a vyvolat další štěpení, čímž vzniká řetězová reakce [3]. Obr. 1.1 zobrazuje schéma štěpné reakce.



- |   |                              |   |                 |
|---|------------------------------|---|-----------------|
| 1 | Pomalý neutron               | 5 | Rychlé neutrony |
| 2 | Jádro uranu $^{235}\text{U}$ | 6 | Absorbátor      |
| 3 | Štěpení za vzniku tepla      | 7 | Moderátor       |
| 4 | Štěpné produkty              | 8 | Pomalý neutron  |

Obr. 1.1: Štěpení atomu [3]

Reaktor musí být navržen tak, aby se řetězová reakce udržela na stabilní úrovni. To se dosahuje pomocí řízení množství neutronů v reaktoru. Pokud je množství neutronů příliš velké, může dojít k tzv. jadernému přetopení, což by mohlo vést k havárii [3].

Neutrony, které jsou uvolněny při štěpení, jsou zadržovány v materiálech aktivní zóny reaktoru. Intenzita štěpné řetězové reakce se ovlivňuje změnami v geometrii a složení materiálů aktivní zóny, které slouží k zachycení neutronů. Tyto změny se využívají při úpravě výkonu reaktoru nebo při jeho odstavení. Látka, která se používá ke štěpení, se nazývá jaderné palivo, látka, která zpomaluje rychlé neutrony ze štěpení, se nazývá moderátor, látka, která zachycuje neutrony, se nazývá absorbér, a teplotnosné médium, které odvádí teplo z reaktoru, se nazývá chladivo [3].

Elektrárny, které využívají tlakovodní reaktor (PWR), používají uran jako jaderné palivo, který je obohacen na úroveň až 5 % izotopu uranu U-235. Palivový proutek, což je základní prvek, ve kterém se teplo v reaktoru produkuje, obsahuje tablety oxidu uraničitého (UO<sub>2</sub>), které jsou uzavřené v trubce ze zirkoniové slitiny. Palivové proutky jsou umístěny v palivových souborech, které jsou následně umístěny do aktivní zóny reaktoru. V reaktoru typu PWR se jako chladivo používá demineralizovaná voda s řízeným chemickým režimem, která zároveň slouží jako moderátor a také jako nosič rozpustného absorbéru (kyselina boritá) [3].

Jaderná elektrárna musí být navržena s ohledem na bezpečnost. Palivové tyče jsou umístěny v reaktoru tak, aby minimalizovaly riziko havárie nebo úniku radioaktivních látek. Elektrárna je také vybavena bezpečnostními systémy pro nouzové situace [3].

Výhodou jaderných elektráren je, že produkují velké množství elektrické energie bez emisí skleníkových plynů. Nicméně, štěpná reakce vytváří radioaktivní odpad, který musí být pečlivě skladován a zacházen s ním v souladu s přísnými bezpečnostními normami [4].

Štěpná reakce může být využita také k výrobě izotopů pro lékařské účely a další aplikace. Například izotop kobaltu Co-60 se používá k léčbě nádorů a izotop cesia Cs-137 k ozařování potravin [2].

## 1.2 Základní typy jaderných reaktorů

Reaktory se dají rozdělit do generací, které závisí na jejich vývoji. Rozdělují se podle jejich vyspělosti, která je především určena jejich bezpečnostními prvky, efektivností a použitými technologiemi, které jsou dalším kritériem rozdělení, zejména z hlediska konstrukčního řešení reaktorů.

### 1.2.1 Vývojové generace technologie reaktorů

Elektrická energie vyráběná ze štěpení uranu a dalších vhodných izotopů má za sebou přibližně 60 let historie, která se odehrála od prvních demonstračních zdrojů. Jaderné reaktory v komerčních jaderných elektrárnách jsou řazeny do kategorií, které se nazývají generace podle stupně technického rozvoje. Každá generace má svou základní charakteristiku. [3]

#### I. Generace

První generace jaderných reaktorů byla vyvinuta v období mezi lety 1950 a 1960. Tyto reaktory byly navrženy pro výrobu elektrické energie, ale také pro výrobu materiálů pro vojenské účely a výzkum jaderné fyziky [3].

První komerčně užitý reaktor I. generace byl Obninsk v Sovětském svazu, který byl poprvé spuštěn v roce 1954. Tento reaktor měl výkon pouze 5 megawattů. Reaktor Obninsk sloužil především k výzkumu a testování nových technologií v jaderné energetice. Reaktory první generace byly raným potvrzením toho, že koncept výroby elektrické energie v jaderných elektrárnách je ověřený a schopný bezpečného provozu [5]. Poslední zbývající komerční jaderná elektrárna Wylfa ve Spojeném království, byla uzavřena 30. prosince 2015 po téměř 45 letech úspěšného a bezpečného provozu [3].

Bezpečnost reaktorů I. generace byla v porovnání s moderními reaktory poměrně nízká. Tyto reaktory byly např. citlivé na poruchy v chlazení, které mohly vést k nadměrnému zahřívání paliva a v horších případech až k výbuchu reaktoru [6].

## II. Generace

Generace II se odkazuje na třídu komerčních reaktorů, které byly hlavně nasazovány v období 70. až 80. let 20. století. Po prokázání, že jaderné reaktory mohou být nasazovány rozumně, inženýři a designéři inovovali a vytvořili ekonomičtější a spolehlivější jaderné elektrárny. Tyto reaktory byly obvykle navrženy tak, aby byly provozovány čtyřicet let [6]. Reaktory II. generace mohou dosahovat výkonů od několika MW až po tisíce MW. Tyto reaktory jsou schopny produkovat dostatečné množství elektrické energie pro většinu běžných potřeb [7].

Pokud jde o technické aspekty, reaktory II. Generace zahrnují zralé kritické komponenty související s bezpečností. Například jsou používány aktivní a pasivní bezpečnostní prvky pro bezpečný provoz reaktorů bez zásahu operátora nebo ztráty pomocného napájení. Mezi reaktory Generace II patří tlakovodní reaktory (PWR), reaktory na bázi deuteria a uranu (CANDU<sup>1</sup>), varné vodní reaktory (BWR), reaktory s pokročilým chlazením plynu (AGR) a reaktory Vodo-Vodyanoi Energetichesky (VVER). Do dneška mají reaktory Generace II největší flotilu na světě, zejména PWR a BWR [6].

I přes vylepšení bezpečnosti došlo k několika vážným haváriím s reaktory II. generace. Nejvýznamnější z nich byla havárie v jaderné elektrárně Three Mile Island v USA v roce 1979 a havárie v jaderné elektrárně Fukušima v Japonsku v roce 2011 [7].

V současnosti jsou reaktory II. generace stávající v provozu v mnoha zemích po celém světě. Některé z nich byly modernizovány, aby splňovaly aktuální bezpečnostní standardy, zatímco jiné byly vypnuty a nahrazeny novějšími reaktory. V některých zemích se však stále staví nové reaktory II. generace [7].

## III. Generace

Třetí generace reaktorů je technologicky podobná reaktorům generace II. Nicméně, do těchto reaktorů jsou přidávány evoluční a modernizační vylepšení, která mají zabránit vzniku nehod podobných havárií ve Fukušimě. Tato vylepšení zahrnují technologické inovace paliv, termální účinnosti, modulární konstrukce, pasivní bezpečnostní systémy a standardizovaný design. Tato vylepšení mají za cíl prodloužit provozní dobu jaderného reaktoru až na šedesát let, aniž by byla ohrožena bezpečnost a zabezpečení jaderných reaktorů [6].

Mezi reaktory III. generace patří projekt Westinghouse 600 MW Advanced PWR (AP-600), Advanced Boiling Water Reactor (ABWR) a Enhanced CANDU 6. Tyto technologie zatím nejsou masivně nasazovány po celém světě [6].

Rozdíly oproti předchozí generaci zahrnují standardizované projekty, které zkracují dobu schvalování a výstavby, zlepšení ekonomiky provozu díky prodloužení doby mezi odstávkami, zvýšení hodnoty vyhoření jaderného paliva a snížení investičních nákladů díky standardizovanému projektu [3].

## III+. Generace

Mezi generacemi III a IV jsou reaktory generace III+ vystupující z reaktorů generace III s významnými zlepšeními účinnosti a bezpečnosti. V současné době nabízejí nejlepší dostupnou technologii pro jaderné elektrárny, která zahrnuje závěry z analýzy havárie jaderné elektrárny Fukušima, jako jsou závěry ze tzv. stress testů<sup>2</sup> a doporučení WENRA<sup>3</sup>. Tato

<sup>1</sup> CANDU – Canada Deuterium-uranium, kanadský reaktor – moderovaný a chlazený těžkou vodou

<sup>2</sup> Stress test – zátěžový test

<sup>3</sup> WENRA – Asociace regulačních orgánů západní Evropy

technologie zahrnuje vyšší odolnost vůči vnějším vlivům, například zemětřesením, záplavám apod., vyšší autonomii, zvýšenou redundanci a diverzitu bezpečnostních systémů pro řešení základních projektových nehod, vícenásobných poruch i těžkých havárií, a také možnost využití mobilních prostředků pro plnění bezpečnostních funkcí [3].

Reaktory generace III+ zahrnují jihokorejský Advanced Power Reactor (APR), francouzský European Power Reactor (EPR), japonský Advanced Pressurized Water Reactor (APWR), ruský VVER-1200 a americký AP-1000 [6].

Všechny projekty uvažované pro NJZ v Dukovanech budou právě III+ generace [3].

Malé a modulární reaktory (dále jen SMR) jsou také jednou z jaderných technologií této kategorie. IAEA<sup>4</sup> definovala SMR na základě výkonu a velikosti reaktorů. SMR obvykle produkuje až 300 MW<sub>e</sub> (Mezinárodní agentura pro atomovou energii, 2014). Nicméně, malá velikost není jedinou výhodou SMR. SMR jsou navrženy jako modulární, což znamená, že reaktor se skládá ze standardizovaných jednotek, které jsou snadno sestavitelné. Důležité je, že každý jednotlivý komponent lze upravit nebo nahradit bez významného vlivu na celkový systém. Modulárnost jaderných reaktorů vyřeší jeden problém: neschopnost standardizovat jakýkoli návrh pro zjednodušení reprodukovatelnosti. Nakonec tato inovace povede k levnějšímu a rychlejšímu stavění jaderných elektráren [6].

#### IV. Generace

Reaktory IV. generace jsou nejnovější vývojovou fází jaderných reaktorů, které jsou navrženy tak, aby byly ještě bezpečnější, účinnější a ekologičtější než jejich předchůdci. Tyto reaktory využívají nejmodernější technologie a inovace. Generace IV nabízí zásadní zlepšení v několika klíčových oblastech: ekonomice, bezpečnosti, udržitelnosti a odolnosti vůči šíření jaderných odpadů [3].

Jednou z hlavních inovací reaktorů IV. generace je použití různých typů chladicích médií a paliv. Mezi tyto chladicí média patří například tekuté kovy, plyny a kapalné soli. Pevné palivo s vyšší hustotou energie a sníženou produkcí radioaktivního odpadu také patří mezi inovace reaktorů IV. generace. Jsou navrženy tak, aby byly mnohem bezpečnější a méně náchylné k nehodám než předchozí generace reaktorů. To je dosaženo díky vylepšeným systémům bezpečnosti, jako jsou například pasivní bezpečnostní systémy, které umožňují, aby reaktor fungoval i v případě výpadku napájení. Reaktory IV. generace mají také potenciál výrazně snížit produkci jaderného odpadu a zlepšit jeho správu [3].

Existuje šest nových jaderných technologií, které mají potenciál tyto cíle splnit a momentálně se vyvíjejí v mnoha zemích. Těmito reaktory jsou reaktor s vysokou teplotou chladiva (HTGR), reaktor rychlého chlazení sodíkem (SFR), reaktor rychlého chlazení plyny (GFR), reaktor rychlého chlazení olovem (LFR), reaktor s tavenou solí (MSR) a reaktor s vysokotlakou vodou ve stavu nadkritické (SCWR). HTGR a MSR jsou přední inovátory mezi reaktory Generace IV. Několik společností a startupů navrhlo mnoho nových jaderných reaktorů, které mají být nasazeny v blízké budoucnosti. Čínský reaktor HTR-PM, 2x210 MW<sub>e</sub> HTGR, již generuje elektřinu od konce roku 2021. To je významný pokrok, který dokazuje, že reaktory Generace IV přijdou dříve či později [6].

---

<sup>4</sup> IAEA – Mezinárodní agentura pro atomovou energii



## 1.2.2 Základní konstrukční typy komerčních reaktorů

Bylo navrženo mnoho různých typů reaktorů a některé z nich byly vyvinuty pouze jako prototypy a některé z nich jsou použity ke komerčním účelům. Vzniklo šest hlavních typů reaktorů (PWR, BWR, GCR, CANDU a RBMK), které slouží jako návrhy používané k výrobě komerční elektřiny po celém světě. Další typ reaktoru, tzv. rychlý reaktor (FBR), byl vyvinut až do fáze plnohodnotného demonstračního zařízení. Tyto různé typy reaktorů budou nyní popsány spolu s aktuálními vývoji a některými prototypovými návrhy [8]. Tabulka níže (Tab. 1.1) zobrazuje základní rozdíly mezi uvedenými typy reaktorů.

Tab. 1.1: Základní typy reaktorů [9]

Typ reaktoru	Palivo	Chladivo	Moderátor
Tlakovodní reaktor (PWR)	obohacený UO <sub>2</sub>	voda	voda
Varný reaktor (BWR)	obohacený UO <sub>2</sub>	voda	voda
Těžkovodní reaktor (PHWR)	přírodní UO <sub>2</sub> ,	těžká voda	těžká voda
Plynem chlazený reaktor (AGR, Magnox)	přírodní (kovový) uran, obohacený UO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	grafit
Lehkovodní grafitový reaktor (RBMK)	obohacený UO <sub>2</sub>	voda	grafit
Rychlý množivý reaktor (FBR)	směs PuO <sub>2</sub> a UO <sub>2</sub>	tekutý sodík	-

### Tlakovodní reaktor (PWR a VVER)

Nejrozšířenějším typem jaderného reaktoru na světě dnes je tlakovodní reaktor PWR<sup>5</sup> a jeho ruský protějšek VVER<sup>6</sup>. Tyto reaktory tvoří přibližně 60 % celkového počtu jaderných reaktorů využívaných k výrobě elektrické energie. Tento typ reaktoru byl původně vyvinut v USA a později převzat i Ruskem. Tyto reaktory se díky své vysoké bezpečnosti používají i k pohonu jaderných ponorek. Palivem v těchto reaktorech jsou tablety obohaceného uranu ve formě oxidu uraničitého (UO<sub>2</sub>), uspořádané do palivových tyčí. Výměna paliva se obvykle provádí při odstaveném reaktoru jednou za 1 až 1,5 roku, během níž se nahradí 1/4 až 1/3 vyhořelých článků, v závislosti na délce provozního cyklu. Tento typ reaktoru využívá jako moderátor i chladivo běžnou vodu, která proudí primárním okruhem pod vysokým tlakem a teplotou přibližně 300 °C. Voda z primárního okruhu ohřívá v parogenerátoru vodu sekundárního okruhu, která se mění v páru a přivádí se na vstup turbíny [9].

PWR reaktory mají řídicí systém, který reguluje průtok vody v chladicím okruhu. Tento systém se používá k udržování teploty v jádře a zajištění, že reakce v jádře probíhají správným způsobem. Řídicí systém také umožňuje řídit výkon reaktoru, což znamená, že je možné měnit množství energie produkované reaktorem [10].

Bezpečnost PWR reaktorů je zajištěna pomocí několika systémů, které fungují jako záložní mechanismy pro případ havárie nebo poruchy. Tyto systémy zahrnují nouzové vypouštění páry, nouzové ochlazování a nouzové odstavení reaktoru. Pokud dojde k narušení jádra, například kvůli prasknutí palivové tyče, může být reaktor rychle odstaven [10].

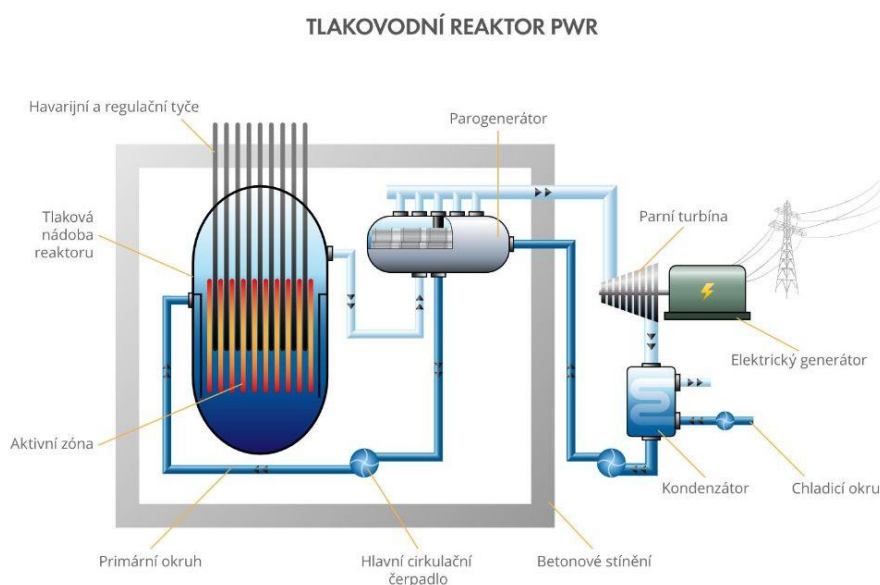
<sup>5</sup> PWR – Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor

<sup>6</sup> VVER – Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor

PWR reaktory mají několik výhod, jako je vysoká účinnost při výrobě elektrické energie, spolehlivost a stabilitu výkonu. Další výhodou je schopnost pracovat na vysoký výkon po dlouhou dobu bez výrazného poklesu výkonu. Další výhodou je, že PWR reaktory produkují malé množství odpadu, což znamená, že je snazší s odpadem nakládat. Na druhé straně mají PWR reaktory také několik nevýhod. Jednou z největších nevýhod je vysoká cena za výstavbu reaktoru a jeho údržbu. Dále PWR reaktory potřebují velké množství vody, což může být problémem v oblastech s omezeným množstvím vodních zdrojů [11].

PWR reaktory jsou nejčastěji používány pro výrobu elektrické energie, ale mohou být také využívány v jiných aplikacích, jako je výroba tepla pro průmyslové účely nebo výroba radioizotopů pro medicínské použití. PWR reaktory jsou také používány v námořních plavidlech, jako jsou letadlové lodě a ponorky. Jsou tedy významným zdrojem elektrické energie a mají širokou škálu použití v průmyslu a vědě. I přes své nevýhody zůstávají jedním z nejbezpečnějších typů jaderných reaktorů a jsou důležitým krokem směrem k udržitelné energetice [12].

Na Obr. 1.2 je znázorněno schéma elektrárny s tlakovodním reaktorem.



Obr. 1.2: Schéma tlakovodního reaktoru PWR [9]

### Varný reaktor (BWR)

Druhým nejrozšířenějším typem komerčních jaderných reaktorů je Varný reaktor BWR<sup>7</sup>. Tyto reaktory tvoří zhruba 18 % celkového počtu světových reaktorů. Palivo je složeno z mírně obohaceného uranu ve formě tablet oxidu uraničitého, uspořádaných v palivových tyčích. Stejně jako u tlakovodního reaktoru, probíhá výměna paliva při odstaveném reaktoru zpravidla jednou za 1 až 1 a půl roku a aktivní zóna je podobná. Moderátorem i chladivem je obyčejná voda, která se ohřívá až do bodu varu přímo v tlakové nádobě. V horní části reaktoru se hromadí ve formě páry, která se zbaví vlhkosti a následně přivádí přímo na vstup turbíny. Stejně jako u PWR reaktorů je palivo v BWR reaktorech zpravidla uloženo v palivových tyčích, které jsou poté umístěny do jádra reaktoru. BWR reaktory jsou obecně méně nákladné než PWR reaktory, protože nepotřebují separátní okruh pro chlazení a přeměnu vody na páru [9].

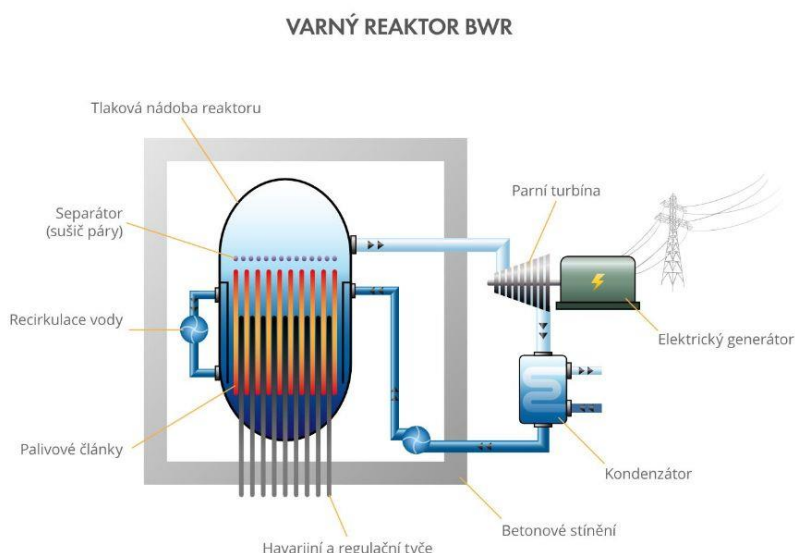
<sup>7</sup> BWR – Boiling Water Reactor

Výhodou BWR reaktorů je jejich relativně nízká cena v porovnání s jinými typy jaderných reaktorů. Většina BWR reaktorů je také navržena tak, aby byla co nejjednodušší a nejefektivnější při výrobě elektrické energie. Tento design umožňuje snížit náklady na výstavbu a provoz. BWR reaktory jsou také poměrně spolehlivé a stabilní v použití. Díky jejich jednoduchému designu a snadné údržbě mají tyto reaktory mnohem nižší riziko poruch a havárií v porovnání s jinými typy reaktorů. Navíc BWR reaktory mohou být relativně snadno a rychle odstaveny z provozu, což zvyšuje jejich flexibilitu a schopnost reagovat na změny v poptávce po elektřině [13].

Nicméně, existují i některé nevýhody spojené s BWR reaktory. Jednou z největších nevýhod je riziko vzniku korozních problémů v důsledku vysoké teploty a tlaku, kterým jsou vystaveny jaderné palivo a chladicí médium. Tyto problémy mohou vést k únikům nebo haváriím, což může mít vážné následky pro životní prostředí a zdraví lidí. Další nevýhodou BWR reaktorů je vysoká spotřeba vody, kterou tyto reaktory potřebují pro svůj provoz. Voda je nezbytná pro chlazení jaderného paliva a vytváření páry pro pohon turbín, což znamená, že BWR reaktory jsou závislé na vodních zdrojích a jejich dostupnosti. Toto může být problém zejména v suchých oblastech, kde může být nedostatek vody nebo kvalita vody může být ovlivněna různými faktory, jako jsou například chemické látky nebo teplota vody [13].

BWR reaktory se používají převážně k výrobě elektrické energie v jaderných elektrárnách. Mohou být také použity pro výrobu radioizotopů pro průmyslové a lékařské účely. V posledních letech byly navrženy různé typy pokročilých BWR reaktorů, které mají řešit některé z výše uvedených nevýhod. Tyto nové reaktory jsou navrženy tak, aby byly bezpečnější, účinnější a šetrnější k životnímu prostředí. Například moderní BWR reaktory mohou být vybaveny automatickými systémy, které detekují poruchy a zajišťují rychlou reakci pro minimalizaci rizik [12].

Na Obr. 1.3 je znázorněno schéma elektrárny s varným reaktorem.



Obr. 1.3: Schéma varného reaktoru BWR [9]

## Těžkovodní reaktor (PHWR)

Těžkovodní reaktory PHWR<sup>8</sup> jsou zastupují třetí největší podíl na světovém trhu jaderných reaktorů s cca 11 % a reprezentují je zejména reaktory CANDU<sup>9</sup>. Tyto reaktory byly původně vyvinuty v Kanadě a následně exportovány do mnoha zemí, jako jsou Indie, Pákistán, Argentina, Korea a Rumunsko. Palivem pro CANDU reaktory je přírodní uran ve formě oxidu uraničitého a chladicím médiem i moderátorem je těžká voda D<sub>2</sub>O<sup>10</sup>. Aktivní zóna je umístěna v nádobě, která má tvar ležícího válce s horizontálními tlakovými trubkami pro průchod vody. Těžká voda z primárního chladicího okruhu předává své teplo obyčejné vodě v parogenerátoru, odkud je vedena pára na vstup turbíny [9].

V PHWR reaktoru se využívá těžká voda, která má vysoký obsah deuteria, což je izotop vodíku s jedním neutronem a jedním protonem. Tento izotop má schopnost moderovat neutrony, což znamená, že pomáhá zpomalovat rychlé neutrony a zvyšovat pravděpodobnost jejich absorpce jadernými palivy. Tento proces umožňuje větší využití přírodního uranu jako paliva a zvyšuje efektivitu výroby elektrické energie [14].

Jedním z hlavních výhod PHWR reaktorů je, že mohou používat přírodní uran jako palivo. To znamená, že není nutné obohacovat uran, což je drahý a energeticky náročný proces. PHWR reaktory jsou také velmi flexibilní a mohou pracovat na různých typech paliv, což umožňuje jejich využití v různých typech energetických mixů. Další výhodou je, že mohou být navrženy jako menší jednotky, které se dají snadno přidávat nebo odebírat, což umožňuje flexibilní řízení výroby elektrické energie. Lze použít recyklaci paliva, což snižuje množství odpadu a zvyšuje využití jaderného paliva [14].

Nicméně, tyto reaktory mají také některé nevýhody. Jedním z hlavních problémů je, že těžká voda, kterou používají jako chladivo, je drahá a energeticky náročná na výrobu. Také existují obavy ohledně bezpečnosti těchto reaktorů, zejména vzhledem k možnosti havárií a úniku radioaktivního materiálu. Další z nich je relativně nízká účinnost reaktoru. I přes možnost recyklace paliva, je stále produkce radioaktivního odpadu vysoká, což vyžaduje složité a drahé postupy pro jeho likvidaci a skladování. Navíc jsou tyto reaktory citlivé na změny vlastností chladicího média, jako je teplota a tlak, což vyžaduje pečlivé monitorování a údržbu [14].

PHWR reaktory se vyskytují v různých velikostech, od malých jednotek o výkonu několika megawattů, až po velké komerční reaktory s výkonem až několik set megawattů. PHWR reaktory jsou v současné době v provozu v několika zemích, včetně Indie, Kanady, Argentiny a Jižní Koreje [15]. Tyto reaktory jsou důležitým zdrojem výroby elektrické energie a mohou být využity jako součást energetického mixu.

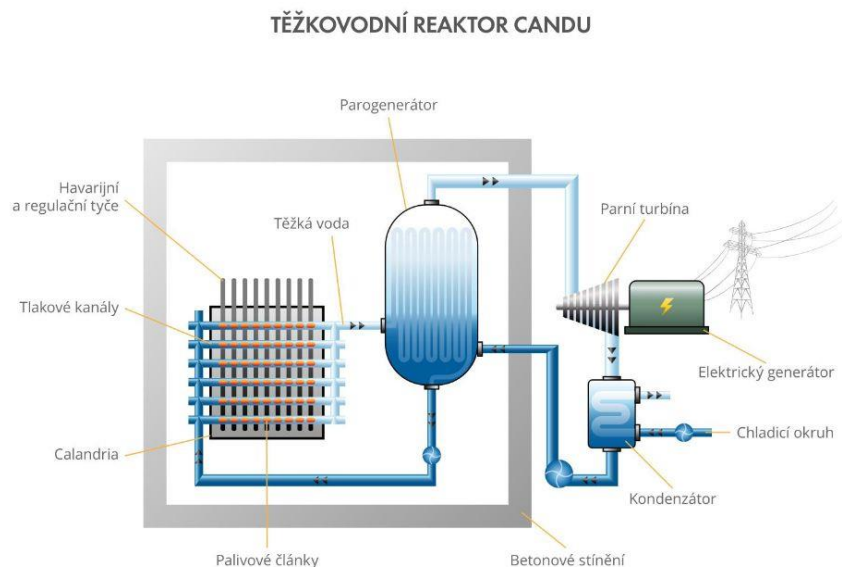
---

<sup>8</sup> PHWR – Pressurised Heavy Water Reactor

<sup>9</sup> CANDU – Canada Deuterium-uranium, kanadský reaktor moderovaný a chlazený těžkou vodou

<sup>10</sup> Těžká voda je voda, jejíž molekuly obsahují místo obou atomů vodíku jeho izotop deuterium

Na Obr. 1.4 je znázorněno schéma elektrárny s těžkovodním reaktorem CANDU.



Obr. 1.4: Schéma těžkovodního reaktoru CANDU [9]

### Plynem chlazený reaktor (GCR, Magnox)

V Británii se dříve především používal reaktor GCR Magnox<sup>11</sup>, který byl chlazen plynem a moderován grafitovými bloky. Palivem byl přírodní uran v tyčích s povlakem z oxidu magnezia, a palivo se vyměňovalo za provozu. Reaktor byl uzavřen v tlakové nádobě s betonovým stíněním. V aktivní zóně se nacházely grafitové bloky, které sloužily jako moderátor a kterými procházely kanály s palivovými tyčemi. Oxid uhličitý sloužil jako chladivo, které procházelo parogenerátorem, kde ohřívalo vodu v sekundárním okruhu, a poté byla pára vedena do turbíny [9].

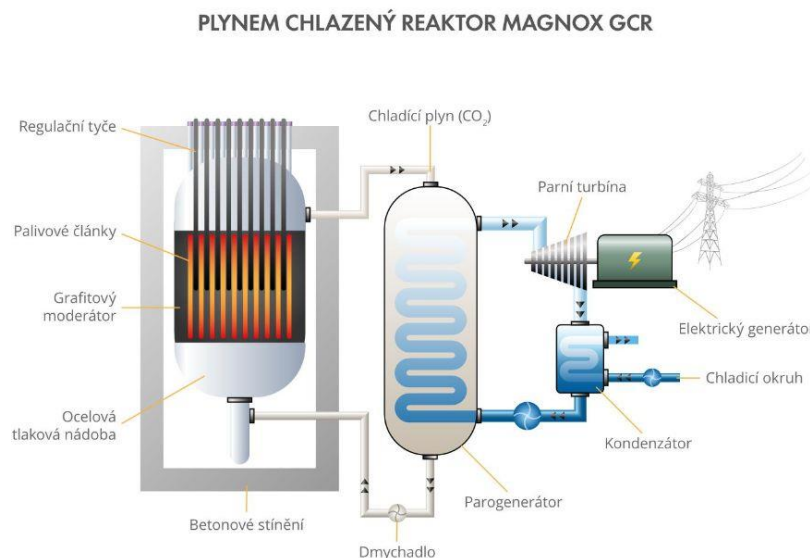
Jednou z hlavních výhod GCR reaktorů je, že mohou fungovat na přírodní uran, což znamená, že není nutné provádět jeho obohacování. To vede k menším nákladům na výrobu jaderného paliva. Další výhodou je, že plynové chlazení umožňuje dosáhnout vysokých teplot a vysoké účinnosti reaktoru. Nicméně, mají také několik nevýhod. Jednou z nich je, že plyn musí být pod vysokým tlakem, což zvyšuje náklady na zařízení a způsobuje větší nebezpečí poruchy. Další nevýhodou je, že palivo v GCR reaktorech se zahřívá na velmi vysoké teploty, což způsobuje, že palivové prvky jsou velmi náchylné k poruchám a degradaci [16].

GCR reaktory se používají v několika zemích, včetně Spojeného království a Francie, kde jsou stále v provozu. Nicméně většina nových jaderných elektráren se v současné době staví s využitím jiných typů reaktorů, jako jsou PWR nebo BWR reaktory. Ovšem tyto reaktory také nabízejí potenciál pro další výzkum a vývoj, zejména v oblasti pokročilých materiálů a nových technologií chlazení. Nyní je v Británii v provozu pokročilejší reaktor AGR<sup>12</sup>, který má podobné vlastnosti jako Magnox, ale používá obohacený uran a oxid uhličitý jako chladivo. Elektrárna s tímto reaktorem je také dvouokruhová [17].

<sup>11</sup> GCR – Gas Cooled Graphite Moderated Reactor, Magnox – Magnesium non-oxidising

<sup>12</sup> AGR – Advanced Gas Cooled, pokročilý plynem chlazený reaktor

Na Obr. 1.5 je znázorněno schéma elektrárny s plynem chlazeným reaktorem Magnox GCR.



Obr. 1.5: Schéma plynem chlazeného reaktoru Magnox GCR [9]

## RBMK

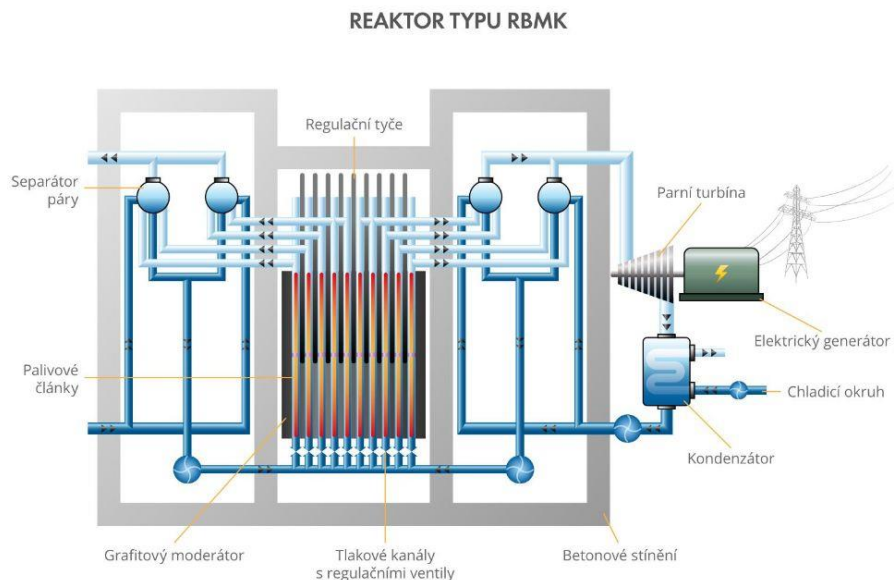
Reaktor RBMK<sup>13</sup> se provozuje pouze na území bývalého SSSR a byl použit v první sovětské jaderné elektrárně v Obninsku a také v Černobylské jaderné elektrárně. V současné době se již další RBMK reaktory nebudují a plánována není ani jejich výstavba. Jako palivo se používá přírodní nebo nízcce obohacený uran ve formě oxidu uraničitého, které je vkládáno do palivových tyčí, které jsou umístěny v tlakových kanálech spolu s obyčejnou vodou jako chladivem. Pára se vytváří přímo v tlakových kanálech a po separaci vlhkosti je vedena do turbíny. Elektrárna tedy funguje jako jednookruhová a moderátorem je grafit obklopující technologické kanály [9].

RBMK reaktory mají několik unikátních vlastností, které je odlišují od jiných typů reaktorů. Jsou velmi velké a mohou produkovat velké množství elektrické energie. Dosahují vysoké účinnosti využití paliva, díky čemuž mohou produkovat velké množství elektřiny. Mají nízké náklady na výstavbu a provoz v porovnání s jinými typy reaktorů, což je činí přitažlivými pro země s omezenými finančními prostředky. Bohužel, jsou také méně bezpečné než jiné typy reaktorů. Jedním z hlavních problémů je jejich vysoká reaktivita a pomalá kontrola reakce. Toto může vést k nekontrolovatelnému zvyšování teploty a tlaku, což může vést k výbuchu. Tento problém se projevil v katastrofě v Černobylu, kdy nedostatečná kontrola výkonu reaktoru vedla k přehřátí paliva a následnému výbuchu reaktoru. Dalším problémem je vysoké množství radioaktivního odpadu, který produkují. RBMK reaktory produkují mnohem více radioaktivního odpadu než jiné typy reaktorů, což je důsledek použití grafitu jako moderátoru a použití paliva s nižším stupněm obohacení [18].

<sup>13</sup> RBMK – Reaktor Bolšoj Moščnosti Kanalnyj

Vzhledem k výše uvedeným rizikům byly RBMK reaktory postupně nahrazovány jinými typy reaktorů. V současné době je v provozu jen několik RBMK reaktorů, převážně v Rusku [18].

Na Obr. 1.6 je znázorněno schéma elektrárny s reaktorem typu RBMK.



Obr. 1.6: Schéma reaktoru typu RBMK [9]

### Rychlý množivý reaktor (FBR)

Rychlý množivý reaktor FBR<sup>14</sup> je poslední z popisovaných typů reaktorů. Palivem v tomto reaktoru je směs oxidu plutoničitého (PuO<sub>2</sub>) a uraničitého (UO<sub>2</sub>), což umožňuje výrobu nového plutonia během provozu. Pro provoz využívá reaktor tzv. rychlých neutronů. Moderátor tedy v tomto reaktoru není přítomen. Aktivní zóna je tvořena svazky palivových tyčí, které jsou obklopeny "plodícím" pláštěm z uranu. Chladivem je tekutý sodík, který obklopuje aktivní zónu, a taktéž slouží k vedení tepla do sekundárního chladicího okruhu. Sekundární okruh také využívá roztaveného sodíku a je připojen k parogenerátoru, kde se vyrábí pára do terciárního okruhu, který následně pohání turbínu [9].

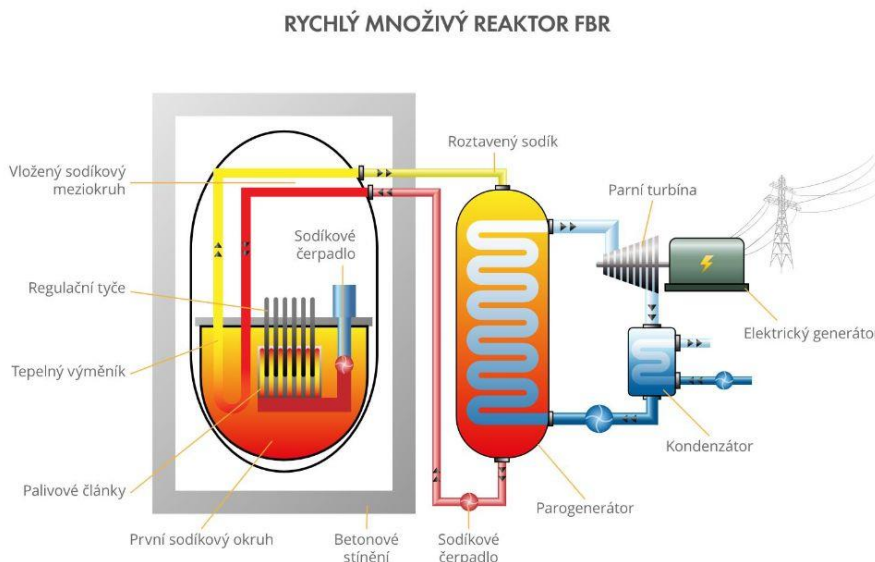
FBR reaktory mají několik výhod oproti konvenčním jaderným reaktorům. Hlavní výhodou je vysoká účinnost využití jaderného paliva, což znamená, že dokážou vyrábět více elektrické energie z množství paliva, které mají k dispozici. Další výhodou je výroba menšího množství radioaktivního odpadu, protože dokážou využít i jiné druhy paliva a transmutovat odpadní materiál na další palivo. Nicméně, FBR reaktory mají i své nevýhody. Největší nevýhodou je vysoká cena jejich výstavby a provozu. FBR reaktory jsou také technicky náročnější na provozování a údržbu, což zvyšuje riziko nehod a havárií. Další nevýhodou je riziko šíření jaderných materiálů a technologií, které mohou být využity pro výrobu jaderných zbraní [19].

FBR reaktory se používají v několika zemích, jako například v Japonsku, Rusku, Indii a Francii. V Japonsku byl v roce 2016 spuštěn první komerční FBR reaktor s názvem Monju.

<sup>14</sup> FBR – Fast Breeder Reactor

Rusko má také dlouholetou zkušenost s provozem FBR reaktorů, zatímco Indie plánuje výstavbu několika nových FBR reaktorů v nadcházejících letech [19].

Na Obr. 1.7 je znázorněno schéma elektrárny s rychlým množivým reaktorem FBR.



Obr. 1.7: Schéma rychlého množivého reaktoru FBR [9]

### 1.3 Bezpečnostní prvky reaktorů III/III+ generace

Reaktory III. generace a novější, jako jsou III+. a IV. generace, byly navrženy s cílem zvýšit bezpečnost a spolehlivost provozu v porovnání s předchozími generacemi.

**Mezi klíčové bezpečnostní prvky patří:**

Reaktory III/III+. generace využívají standardizovaný projekt, díky kterému se sníží doba nutná k licencování elektrárny a tím se sníží náklady i nutná doba na výstavbu [3].

Obsahují pasivní bezpečnostní prvky, které umožňují kontrolu reakce i v případě, že vypoví službu aktivní systém, například v důsledku poruchy. Pasivní prvky zahrnují například systémy, které umožňují regulaci průtoku chladiva v reaktoru. Reaktory III/III+. generace jsou vybaveny pasivními chladicími systémy, které umožňují odvod tepla a udržení chladicího okruhu i v případě, že selže aktivní chladicí systém. Jsou navrženy tak, aby zohledňovaly vlivy přírodních živlů, jako jsou zemětřesení, povodně nebo hurikány. Jsou umístěny na základě analýzy seismických rizik a jsou postaveny z odolných materiálů [20].

Celkově lze říci, že reaktory III/III+. generace jsou navrženy s ohledem na nejmodernější technologie a poznatky v oblasti jaderné energetiky a mají bezpečnostní prvky, které minimalizují riziko havárií a zlepšují ochranu lidí a životního prostředí [20].



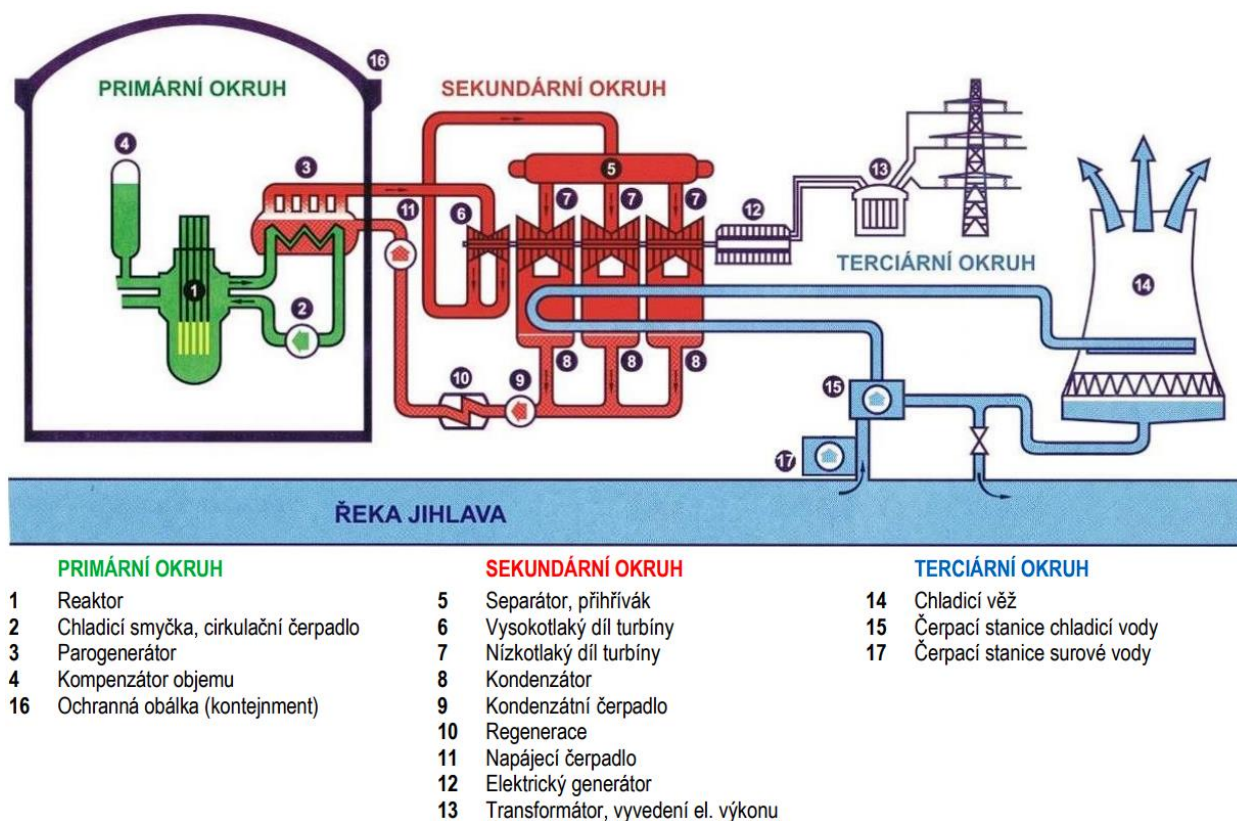
### Mezi další bezpečnostní prvky, které využívají principy reaktorů PWR, patří:

Druhý okruh je izolován od prvního okruhu, což znamená, že voda v druhém okruhu neobsahuje žádné nebo minimální množství radioaktivních látek a tím se minimalizuje riziko úniku radionuklidů do životního prostředí. Také umožňují kontrolu reakce pomocí řízení průtoku chladiva. Když se průtok sníží, dochází k ochlazení reakce a k zpomalení reakce [20].

Dalšími prvky jsou senzory, které monitorují teplotu v reaktoru a umožňují přesnou kontrolu reakce v reálném čase. Dále jsou vybaveny bezpečnostními systémy, jako jsou nouzové chladicí systémy, nouzové vypínání reakce a systémy pro odvod vody, které minimalizují riziko havárií a chrání personál a životní prostředí [20].

## 1.4 Princip PWR reaktoru

Princip jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem je založen na využití štěpné energie atomů uranu, která je uvolňována při jejich rozštěpení v reaktoru. Elektrárna se skládá z několika hlavních částí, včetně reaktoru, chladicího systému, parogenerátoru, turbínového generátoru a dalších důležitých komponent [3] (Obr. 1.8).



Obr. 1.8: Schéma jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem [3]

Reaktor je centrální částí jaderné elektrárny a slouží k řízení štěpné řetězové reakce. V reaktoru jsou umístěny palivové tyče, které obsahují tablety zoxidovaného uranu a zirkoniové trubky, v nichž jsou tablety umístěny. Palivové soubory v reaktoru obsahují oxid uraničitý (UO<sub>2</sub>), který slouží jako jaderné palivo. Urany jsou obvykle obohaceny na úroveň 3-5 % izotopu U-235, který je schopen udržovat štěpnou řetězovou reakci. Při rozštěpení atomu uranu se uvolňuje velké množství energie, která se používá k ohřevu vody v parogenerátoru [3].

Chladicí systém zajišťuje odvod tepelné energie z reaktoru. Demineralizovaná voda, která zároveň slouží i jako moderátor a také jako nosič rozpustného absorbátoru (kyselina boritá), se během průchodu reaktorem zahřívá a následně prochází několika chladicími smyčkami, ve kterých je čerpána pomocí cirkulačních čerpadel. Poté putuje přes primární stranu parogenerátorů, kde přes teplosměnné plochy předává své teplo vodě na sekundární straně, a nakonec se vrací zpět do reaktoru. Tento okruh se nazývá primární okruh a je udržován pod vysokým tlakem, aby voda zůstala kapalná i při vysokých teplotách nad 300°C. To je také důvod, proč se tento typ reaktoru nazývá tlakovodní reaktor [3].

Parogenerátor je zařízení, které přeměňuje vodu z reaktoru na páru, která se používá k pohonu turbínového generátoru. Parogenerátor se skládá z několika set vrstev trubek, které jsou ovinuty sekundárním okruhem, kterým protéká voda zvenčí. Teplota vody v sekundárním okruhu dosahuje až 300 °C, což způsobuje vznik páry v trubicích primárního okruhu. Pára následně odchází z parogenerátoru a pohání turbínu, která je spojena s generátorem a vytváří tak elektrickou energii [3].

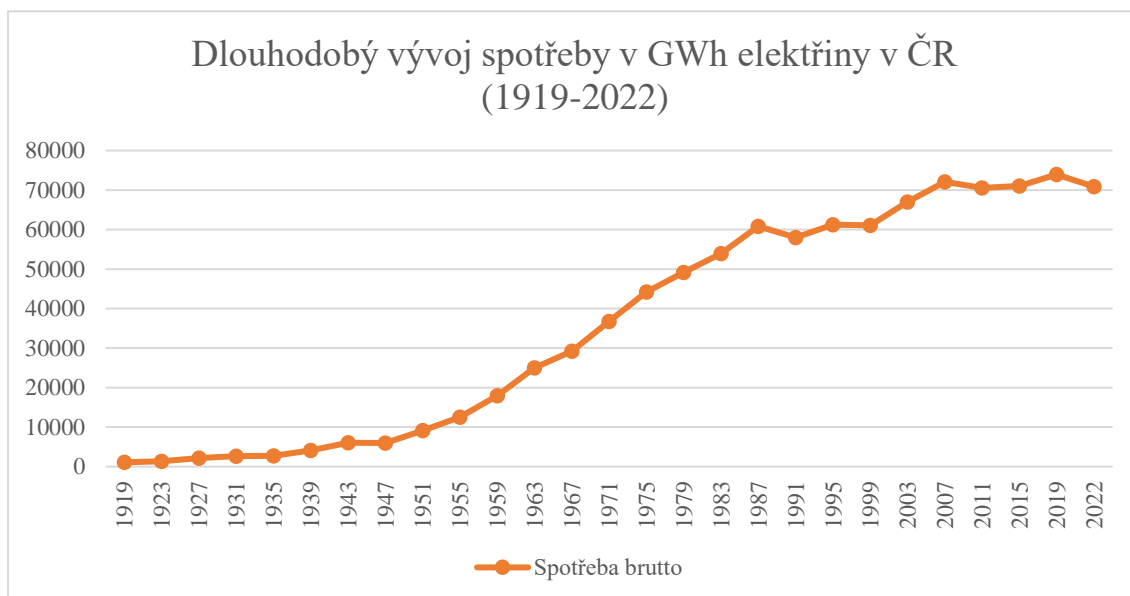
Po opuštění turbíny se pára ochlazuje a kondenzuje se zpět na vodu v chladicím zařízení, tzv. kondenzátoru, který se nachází mimo primární okruh. V kondenzátoru je použita voda z okolí elektrárny, jako je například řeka nebo jezero. Voda se v kondenzátoru ochlazuje, aby se opět mohla vrátit do parogenerátoru v sekundárním okruhu a cyklus se může opakovat [3].

Kromě parogenerátoru a turbíny se v jaderné elektrárně s PWR reaktorem také nachází další důležité systémy a zařízení, které zajišťují bezpečnost a řízení provozu.

## 2 Energetika v ČR

Současná energetická situace v České republice se vyvíjí nepříznivě. Tlak ze strany Evropské unie na výrobu energie bez uhlíkové stopy celou situaci jenom zhoršuje. Uhlé elektrárny a teplárny se postupně ruší nebo se přestavují na jiné palivo, které je šetrnější k životnímu prostředí a na území ČR nelze, kvůli přírodním podmínkám, získat dostatek energie z obnovitelných zdrojů, aby byly uspokojeny potřeby obyvatelstva a průmyslu. Česká republika by se tedy stala silně závislá na okolních zemích, pro které platí od EU stejné podmínky, tudíž pro ně bude hlavní prioritou pokrytí vlastních energetických potřeb. Z tohoto důvodu je třeba zabezpečit soběstačnost i pro následující roky tak, aby ČR nebyla závislá na importu energie ze zahraničí [21].

Spotřeba elektrické energie v České republice se za posledních 100 let postupně zvyšovala a stále roste [22] (Obr. 2.1). Spotřeba je ovlivněna různými faktory, jako jsou průmyslová výroba, klimatické podmínky, počet obyvatel, hospodářský růst a technologický pokrok. Navíc se s rozvojem elektromobility a rostoucím zájmem o energetickou účinnost očekává další změna v trendech spotřeby elektrické energie v budoucnosti [23].



Obr. 2.1: Dlouhodobý vývoj spotřeby elektřiny v ČR [22]

V České republice tvoří domácí zdroje zhruba 50 % hlavní spotřeby energie. V současné době je ČR z pohledu výroby elektrické energie soběstačná a je dokonce i jejím vývozcem. To se může ale do budoucna změnit. Index energetické závislosti České republiky na dovozu energie, který zohledňuje jaderné palivo, tak dosahuje zhruba 50 %, čímž se řadí k nejnižším v celé EU. Průměr EU je kolem 60 %. Vzhledem k rozsáhlému využívání domácího hnědého a černého uhlí při výrobě elektřiny tvoří domácí zdroje energie i nadále většinu celkových primárních zdrojů. Na českém energetickém trhu dominují uhelné elektrárny. Poskytují téměř 60 % základního zatížení země a významnou část dálkového vytápění [23].

Jaderná energetika je v České republice druhým největším energetickým zdrojem a v současné době je nejvíce využívána k výrobě elektřiny. V současnosti jaderné elektrárny poskytují více než 40 % vyrobené elektřiny [23]. Za účelem výroby elektřiny v základním zatížení se jaderné elektrárny obvykle staví mimo hustě obydlené oblasti. Jaderné zdroje mají obvykle dlouhou životnost, vysokou míru využití, spolehlivost, cenovou dostupnost a předvídatelnost provozu. Vysoká koncentrace paliva na rozdíl od všech ostatních zdrojů

umožňuje vybudovat strategické zásoby na několik let provozu, což je značná výhoda. Jakmile však uplyne doba návratnosti původní investice na výstavbu elektrárny, jsou nízké náklady na palivo v jaderné energii nepopíratelnou cenovou výhodou. Jaderná energetika využívá velmi sofistikované technologie. Kvůli tomu je nutná delší doba výstavby, vysoce kvalifikovaný personál pro projektování, výstavbu a provoz, a především nezávislý státní jaderný dozor. Jaderná bezpečnost musí být zaručena po celou dobu provozu nejen stavem techniky, ale i odborností pracovníků z důvodu nebezpečí spojených s vysokou koncentrací energie v jaderném zdroji a radiačním ohrožením [24].

V České republice jsou v provozu dvě jaderné elektrárny: Dukovany a Temelín. Vývoj jaderných zdrojů je mimořádně nákladný a závisí především na politické a ekonomické stabilitě, o kterou Česká republika usiluje pomocí aktualizované Státní energetické koncepce na dalších 25 let. Vzhledem k předpovědi SEK o výrobě a spotřebě energie, bude třeba do roku 2035 dostavba dalších jaderných bloků o výrobní kapacitě cca 20 TWh. Dále bude třeba prodloužit provozní životnost stávajících čtyř bloků na elektrárně Dukovany a případná výstavba dalšího bloku, kvůli vyřazování nynějších fungujících bloků z provozu. Dlouhodobá výroba elektřiny z jaderné energie by mohla překročit 50 %, čímž výrazně nahradí uhelné zdroje [24].

## 2.1 Strategické cíle

- Bezpečnost dodávek energie – zajištění dostupnosti dodávek energie pro spotřebitele v případě náhlé změny vnějších podmínek (výpadky dodávek primárních zdrojů, změny cen na trzích, poruchy a útoky) v rámci EU
- Konkurenceschopnost (energetiky a sociální přijatelnost) – finální ceny elektřiny pro podniky a domácnosti odpovídající cenám v daném regionu a dalším přímým konkurentům + poskytovatelé energie schopní dlouhodobě přidávat ekonomickou hodnotu
- Udržitelnost (udržitelný rozvoj) – struktura energetiky je dlouhodobě udržitelná z hlediska životního prostředí (nezhoršování kvality životního prostředí), finančního a ekonomického (finanční stabilita energetických společností a schopnost zajistit potřebné zdroje do obnovy a rozvoje), lidských zdrojů (vzdělávání) a sociální dopady (zaměstnanost) a primárních zdrojů (dostupnost) [24]

## 2.2 Strategické priority energetiky ČR

Následujícím hlavním prioritám je třeba věnovat zvláštní pozornost, má-li obyvatelstvo a ekonomika České republiky získat konzistentní, bezpečné a ekologické dodávky energií za rozumné a přijatelné ceny:

- Vývoj, výzkum a inovace: Podpora vzdělávání se zaměřením na potřebu generační obměny a zvyšování úrovně technické inteligence v energetice, dále podpora výzkumu, vývoje a inovací zajišťujících konkurenceschopnost české energetiky
- Infrastruktura a mezinárodní spolupráce: Rozšíření síťové infrastruktury ČR ve vztahu k ostatním střeoevropským státům, podpora globální spolupráce, integrace regionálních trhů s plynem a elektřinou a také pomoc při formulaci praktické a proveditelné jednotné energetické politiky EU
- Účinnost a úspory: Úspora energie a zlepšená energetická účinnost v celém energetickém řetězci ekonomiky i v jednotlivých domácnostech. Dosažení úrovně energetické

účinnosti, které jsou alespoň na úrovni průměru EU27<sup>15</sup>, a dosažení strategických cílů snižování spotřeby EU.

- Energetická bezpečnost: Zvýšení energetické bezpečnosti a odolnosti země, jakož i její schopnosti udržovat požadované dodávky energie v případě četných útoků na infrastrukturu, kumulativních poruch a vleklých problémů s dodávkami paliva.
- Vyvážený energetický mix: Je nutné zajistit pestrou paletu primárních energetických zdrojů a zdrojů pro výrobu elektřiny, efektivní využití všech domácích energetických zdrojů a pokrytí spotřeby ČR s jistotou dostatku rezerv pro výrobu elektřiny do ES. Udržování snadno dostupných strategických zásob domácí energie. [24]

## 2.3 Energetický mix ČR

Jakýkoli podíl primárních a sekundárních zdrojů energie využívaných k výrobě elektřiny se označuje jako energetický mix. Provozně nelze složení energetického mixu měnit. V průběhu několika let by se jednotlivé složky energetického mixu měly měnit maximálně o 1 %. Proto je důležité neustále aktualizovat složení energetického mixu a definovat cíle, kterých chce konkrétní vláda v průběhu desetiletí dosáhnout, aby zohlednila změny ve struktuře výroby elektřiny [23]. Níže (Tab. 2.1) lze vidět podíl různých typů zdrojů energie v průběhu let od roku 2013 do roku 2021.

Tab. 2.1: Procentuální podíl zdrojů energie v České republice [23]

Zdroje energie	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Obnovitelné zdroje – Celkem</b>	<b>5,68%</b>	<b>10,95%</b>	<b>11,77%</b>	<b>10,11%</b>	<b>7,60%</b>	<b>6,17%</b>	<b>3,90%</b>	<b>6,75%</b>	<b>5,56%</b>
- Sluneční	1,96%	2,63%	2,88%	2,77%	2,14%	2,07%	1,66%	2,27%	1,65%
- Větrné	0,47%	0,57%	0,71%	0,63%	0,45%	0,22%	0,00%	0,43%	0,00%
- Vodní	1,93%	2,56%	2,67%	1,15%	1,43%	0,77%	0,44%	0,65%	0,61%
- Geotermální	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
- Biomasa	1,33%	2,19%	2,34%	5,57%	3,58%	3,11%	1,81%	3,40%	3,31%
- Ostatní	0,00%	2,99%	3,17%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
<b>Fosilní zdroje – Celkem</b>	<b>57,65%</b>	<b>52,77%</b>	<b>55,10%</b>	<b>59,53%</b>	<b>57,40%</b>	<b>56,95%</b>	<b>57,01%</b>	<b>52,50%</b>	<b>54,03%</b>
- Hnědé uhlí	40,71%	41,27%	42,15%	43,91%	43,77%	44,63%	46,18%	40,00%	43,89%
- Černé uhlí	6,11%	5,78%	6,31%	6,97%	5,38%	4,18%	2,84%	2,66%	0,00%
- Zemní plyn	8,30%	5,52%	6,41%	8,40%	5,45%	5,80%	7,74%	9,61%	9,89%
- Ropa a ropné produkty	0,01%	0,06%	0,05%	0,05%	0,06%	0,04%	0,15%	0,11%	0,12%
- Druhotné zdroje a ostatní	2,52%	0,14%	0,18%	0,20%	2,73%	2,30%	0,10%	0,12%	0,12%
<b>Jaderné zdroje – Celkem</b>	<b>36,67%</b>	<b>36,28%</b>	<b>33,13%</b>	<b>30,36%</b>	<b>35,01%</b>	<b>36,88%</b>	<b>39,09%</b>	<b>40,75%</b>	<b>40,41%</b>

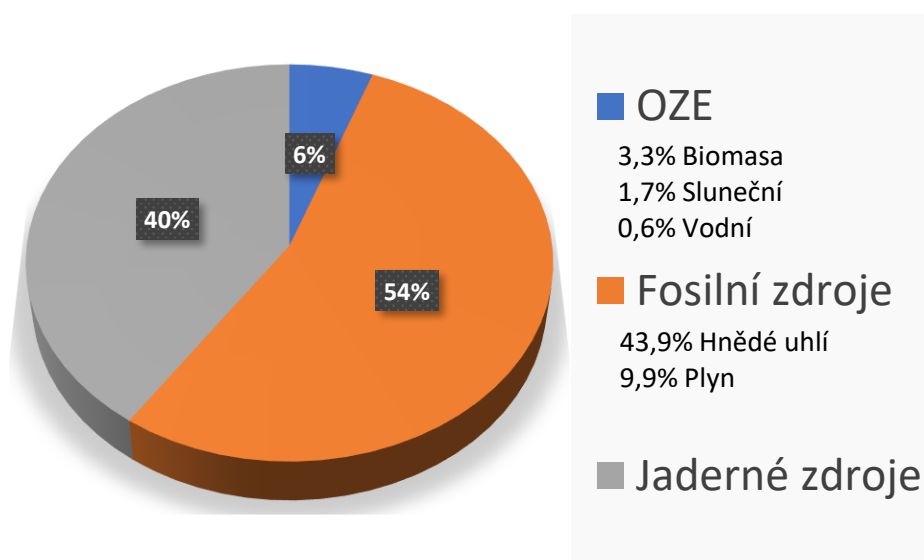
K roku 2021 se na energetickém mixu České republiky nejvíce podílela energie vyráběná fosilními palivy a to z 54 %. Největší podíl na tom má hnědé uhlí s celkovým podílem necelých 44 %. Černé uhlí se úplně přestalo spalovat, právě kvůli snižování emisí nařízené EU. Nyní nemá žádný podíl na výrobě energie, ale před 8 lety se tento podíl pohyboval okolo 6 %.

<sup>15</sup> EU27 - 27 stávajících zemí v Evropské unii

Dalším fosilním palivem je zemní plyn, který měl zastoupení necelými 10 %. Ropné produkty a ostatní druhotné zdroje mají velice malý podíl maximálně do 1 %. Dalším hlavním zdrojem energie jsou obnovitelné zdroje s celkovým podílem necelých 6 %. U nás se využívají hlavně biomasy, sluneční a vodní zdroje. [23]

Spotřeba energie strmě stoupá od začátku 60. let [22]. V důsledku toho bylo nutno vystavět spousty elektráren, které byly poháněné převážně fosilními palivy. Postupem času a rozvojem technologií začaly do našeho energetického mixu přicházet i jiné způsoby výroby energie, včetně obnovitelných zdrojů a hlavně jádra. Jaderné elektrárny mají podíl na výrobě elektřiny k roku 2021 okolo 40 %. První jaderná elektrárna byla spuštěna do provozu v roce 1972 v Jaslovských Bohunicích na území dnešního Slovenska. Dalšími elektrárnami, které byly již vystavěny na území ČR, byly Dukovany a Temelín. První blok byl v Dukovanech byl uveden do provozu roku 1985, druhý a třetí blok v roce 1986 a čtvrtý blok v roce 1987. Temelín byl dokončen v roce 2002. Od té doby prošly elektrárny několika modernizacemi ke zlepšení bezpečnosti, efektivnosti a také k významnému zvýšení výkonu [25].

Koláčový graf (Obr. 2.2) zobrazuje podíl zdrojů energie pro rok 2021 vyjmutých z tabulky na předchozí straně (Tab. 2.1).



Obr. 2.2: Podíl zdrojů energie pro rok 2021 [23]

Kvůli rušení elektráren na fosilní paliva a neustálému stárnutí nynějších jaderných reaktorů, se zároveň budou muset vystavět nové bloky v již vystavěných jaderných elektrárnách anebo postavit úplně nové elektrárny. Důvodem je zachování energetické soběstačnosti země. Prvním průkopníkem by měl být projekt na výstavbu nového bloku v jaderné elektrárně Dukovany. To by mělo přispět k energetickému mixu a posunout jádro na nejvyšší podíl výroby energie v ČR [24].

### 3 Jaderná elektrárna Dukovany

První jadernou elektrárnou postavenou v České republice je Jaderná elektrárna Dukovany (Dále EDU). Nachází se na hranici kraje Vysočina a Jihomoravského kraje poblíž vesnice Dukovany a vodní nádrže Mohelno, která elektrárně zajišťuje chladící vodu. Tato lokalita je přibližně 25 kilometrů jihovýchodně od Třebíče. Elektrárna má čtyři výrobní bloky s tlakovodními reaktory VVER<sup>16</sup> 440. Instalovaný výkon byl v rámci zvyšování účinnosti a využívání výkonových rezerv rozšířen z původních 4x440 MW<sub>e</sub> na současných 4x510 MW<sub>e</sub>. Navíc se zde nachází i přečerpávací vodní elektrárna Dalešice na řece Jihlavě, která má instalovaný výkon 480 megawattů, což posiluje energetickou síť zejména v ranních a odpoledních špičkách [26].

Všechny čtyři výrobní bloky byly v provozu od července 1987. První reaktorový blok byl spuštěn v květnu 1985. Aby elektrárna splňovala veškeré současné normy pro provoz jaderných elektráren, musejí být bezpečnostní systémy, výrobní zařízení elektrárny a technologie neustále modernizovány. Díky tomu byly v letech 2016–2017 uděleny nové provozní licence pro všechny čtyři bloky elektrárny na dobu neurčitou, které s sebou přinesly řadu dalších provozních požadavků. Předpokládá se, že elektrárna bude v provozu do roku 2037 s možným prodloužením do roku 2047 [26].

Elektrárna slouží jako základ energetické soustavy, která celkovou spotřebu energie v České republice dlouhodobě pokrývá asi 20 % a významně přispívá k energetické bezpečnosti a soběstačnosti. Za dobu svého provozu vyrobila více než 433 miliard kWh elektrické energie, což je více než dost na napájení všech domácností po více než 28 let [26].

Ačkoliv je samotný projekt ruského původu, tak veškerá zařízení v EDU jsou z více než 80 % vyrobená v České republice. Reaktory vyrobila Škoda Plzeň, parogenerátory Vítkovice a turbogenerátory Škoda Plzeň. Hlavním dodavatelem pro stavbu byly Průmyslové stavby Brno a pro technologie Škoda Praha [26].

---

<sup>16</sup> VVER – Ruský tlakovodní reaktor

## 4 Projekt NJZ

Nový jaderný zdroj (dále jen NJZ) s čistým elektrickým výkonem až 2400 MW<sub>e</sub> se plánuje vystavět v EDU. Bude tvořen jedním blokem s možností rozšíření na dva bloky s maximálním čistým výkonem 2x1200 MW<sub>e</sub> [27].

Hlavní motivací realizace NJZ je stárnutí a nahrazování stávajících uhelných elektráren, které v současné době slouží jako páteř české energetiky a jejichž výkon bude nutné nahradit nízkouhlíkovými zdroji. Podle očekávání bude nutné k roku 2035 pokrýt až 4400 MW<sub>e</sub> a k roku 2040 dokonce 8200 MW<sub>e</sub>, kvůli odstavování elektráren na fosilní paliva [3].

Pokračování získávání energie v EDU je významným faktorem při rozhodování o realizaci NJZ. V následujících desetiletích doslouží čtyři současné bloky jaderné elektrárny Dukovany (Dále jen EDU1-4) s kombinovaným elektrickým výkonem 4x510 MW<sub>e</sub> a bude nutné je vyměnit. Navíc lokalita Dukovany disponuje všemi potřebnými vazbami, včetně příslušných vodohospodářských a elektrických napojení. Poslední bod je ten nejdůležitější. Prostřednictvím partnerských podniků a dalších přidružených aktivit slouží EDU1-4 jako významný regionální zaměstnavatel (přímo i nepřímo, kvůli spolupracujícím firmám a jiným činnostem na elektrárně), zlepšuje socioekonomické postavení oblasti a přináší značné výnosy. Proto je žádoucí zachovat provoz velkého průmyslového podniku a tomu odpovídající sociální, ekonomické, demografické a kulturní vazby a vztahy [3].

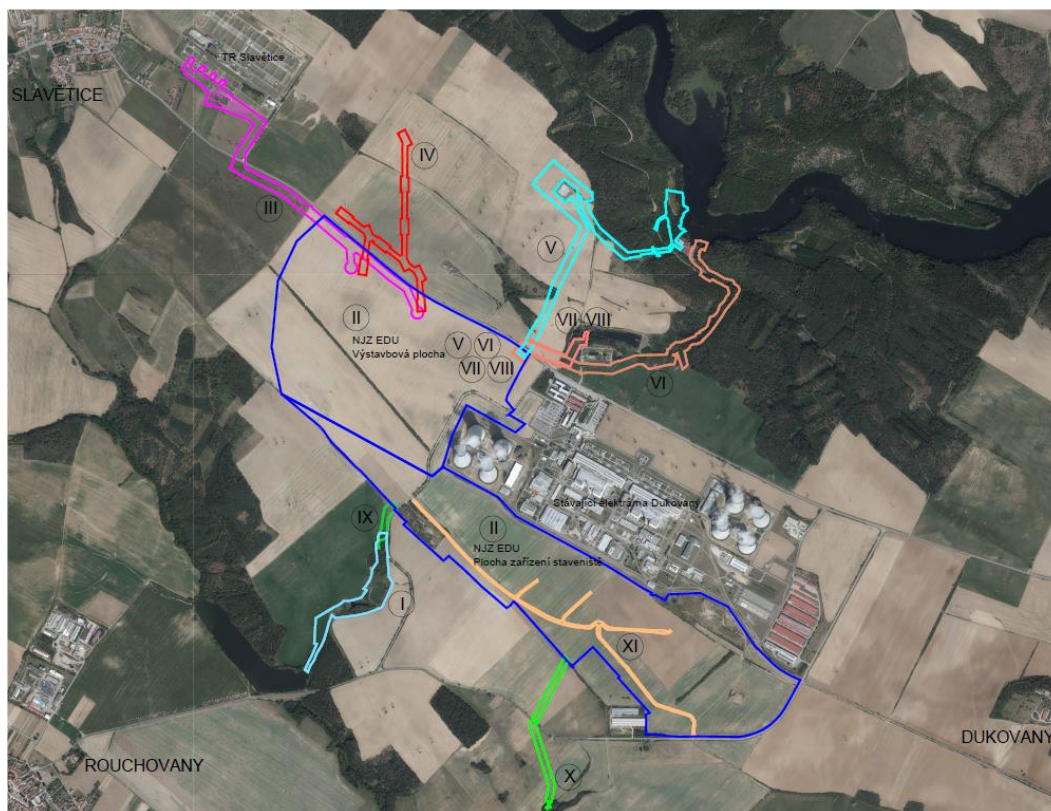
V různých alternativních lokalitách se záměr nebere v úvahu. NJZ je v Dukovanech realizován v souladu se strategickými energetickými dokumenty ČR, zejména národním akčním plánem rozvoje jaderné energetiky a státní energetickou koncepcí. V lokalitě Temelín se v současné době připravuje obdobný nový jaderný zdroj a Česká republika v nynější době nepřipravuje jinou lokalitu pro umístění nového jaderného zdroje [21].

Zprovoznění prvního bloku NJZ se předpokládá v roce 2036 a druhý blok bude brán v úvahu až po ukončení provozu současných bloků EDU1-4. U jednoho bloku NJZ se předpokládá celková doba výstavby až 10 let od zahájení prací až po uvedení do provozu. Dokončení většiny stavebních prací, respektive samotné stavby, by mělo trvat zhruba 7 let [21].

### 4.1 Územní plány

NJZ bude situován v prostoru navazujících na areál současné EDU1-4 (Obr. 4.1). Navrhovaná plocha pro umístění záměru NJZ vychází ze zjištění studie proveditelnosti a vyhodnocení dalších tří lokalit, které se současnou lokalitou EDU1-4 navazují v severozápadním, jižním a jihovýchodním směru. Po zvážení řady faktorů byla jako lokalita vybrána oblast severozápadně od současného území EDU1-4 (plocha II – Výstavbová plocha), především z důvodu vhodnosti pro infrastrukturu (zásobování surovou vodou z řeky Jihlavy, splaškové vody do řeky Jihlavy a výstup elektrické energie do rozvodny Slavětice) a její geologické a hydrogeologické poměry. NJZ se ve zvoleném území nejefektivněji napojí na stávající areál EDU1-4 a minimalizuje se jeho vliv na okolní prostředí. Vzhledem k méně ideálním základovým podmínkám a také náročnějším řešením zásobování surovou vodou a vyvedení elektrického výkonu byla jako základní plocha pro staveniště zvolena oblast jižně od oblasti EDU1-4 (oblast II – Plocha zařízení staveniště) [28].

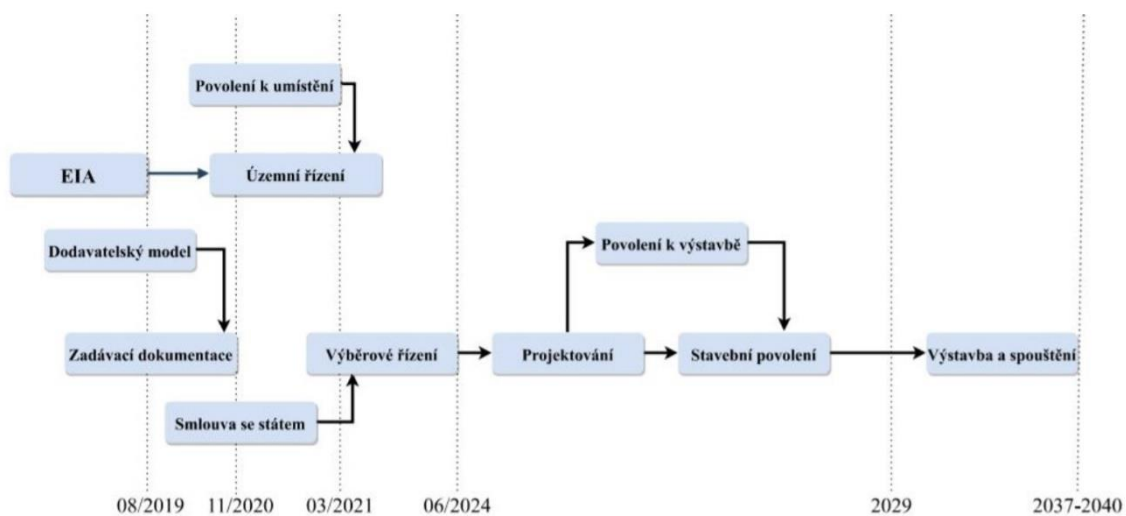




Obr. 4.1: Územní plány NJZ [28]

## 4.2 Časová osa

Projekt se časově rozděluje na čtyři části (Obr. 4.2). První je přípravná část, po níž následuje výběr dodavatelů nového jaderného zdroje. Další částí je byrokratická část, ve které se bude jednat o potvrzování, licencování a projektování. Následně poté navazují samotné stavební práce zakončené zkušebním provozem reaktoru a samotným komerčním spuštěním [29].



Obr. 4.2: Časová osa projektu [29]

#### 4.2.1 Příprava

Projektová společnost Elektrárna Dukovany II, a.s. (dále EDU II) vznikla koncem roku 2015 v reakci na „Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky“ (schválený vládou v červnu 2015) [27].

Stát, ČEZ a EDU II podepsali Rámcovou smlouvu a První prováděcí smlouvu v červenci 2020. Ministerstvo průmyslu a obchodu (dále jen MPO) potvrdilo zahrnutí bezpečnostních požadavků do poptávkové dokumentace a dokončení bezpečnostního posouzení uchazečů dne 17. března 2022, zároveň společnost EDU II zahájila výběrové řízení poskytnutím poptávkové dokumentace uchazečům. (V souladu s požadavky a usneseními vlády byly zařazeny do hodnocení bezpečnosti dne 21. června 2021 společnosti Westinghouse, KHNP a EdF.) [29]

Na základě požadavku MPO byl do poptávkové dokumentace doplněn požadavek na nezávazné opce na šestý jaderný blok EDU 6 do Dukovan a zároveň i třetí a čtvrtý blok ETE 3,4 do Jaderné elektrárny Temelín [29].

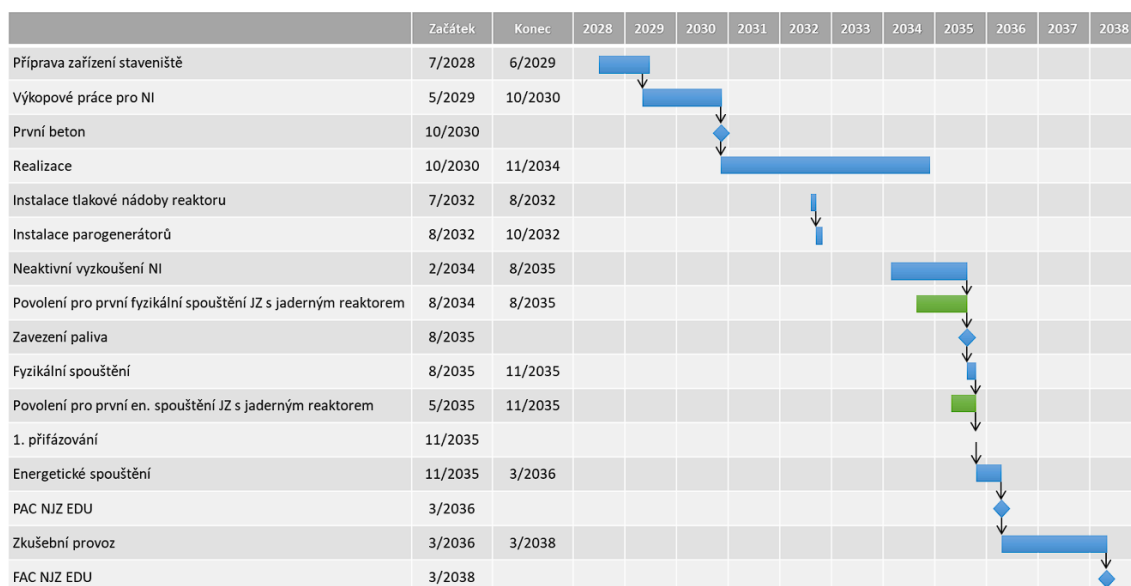
Stát má právo sdělovat EDU II jakékoli požadavky nebo zpětnou vazbu k zadávací dokumentaci k výběrovému řízení. Dále má pravomoc informovat prostřednictvím MPO o nových bezpečnostních potřebách na základě usnesení vlády. EDU II a ČEZ jsou povinny umožnit plnou kontrolu a zajištění základních bezpečnostních zájmů České republiky, zejména zaručením přístupu ke všem relevantním datům. Podle vládního rozhodnutí přijatého prostřednictvím MPO má stát možnost diskvalifikovat nebo odmítnout jakéhokoli kandidáta v průběhu výběrového řízení z bezpečnostních důvodů [29].

#### 4.2.2 Průběh výběrového řízení

Zahájení výběrového řízení začalo 17. března roku 2022. Osm měsíců poté společnost ČEZ obdržela nabídky od uchazečů o stavbu NJZ. V průběhu roku 2023 by mělo probíhat vyhodnocování nabídek a jednání s ucházejícími se společnostmi a tím i případná aktualizace nabídek. Do konce roku 2023 by ČEZ a EDU II měly předložit vyhodnocené nabídky státu. V případě souhlasu státu se v roce 2024 bude jednat s preferovaným dodavatelem o jejich nabídce a smlouva by měla být podepsána do konce téhož roku. Až do roku 2029, kdy by měly začít samotné stavební práce, budou probíhat různá projektování, licencování a povolování [29].

#### 4.2.3 Realizace

Příprava stavebních prací a zařízení stanoviště začne, dle předběžného plánu, již v červenci v roce 2028 a bude trvat zhruba rok. Navazovat na to budou výkopové práce, kdy by se mělo ke konci roku 2030 vylít první beton. Od té doby bude probíhat samotná realizace, která by měla být ukončena na konci roku 2034. Samotná realizace zahrnuje instalaci tlakové nádoby reaktoru a instalaci parogenerátorů. V letech poté budou probíhat zkoušky reaktoru a generátorů. Rok 2036 bude rokem, kdy dojde ke spuštění dvouletého zkušebního provozu jaderného bloku a od 2038 by 5. reaktor již měl být spuštěn ke komerčnímu užití [29]. Detailnější časová osa realizace je zobrazena níže (Obr. 4.3).



Obr. 4.3: Časová osa realizace [29]

### 4.3 Společnosti

Výběr dodavatele pro NJZ je velice důležitý, protože od stejného dodavatele by na základě opce mohla probíhat i výstavba 6. bloku v Dukovanech a také výstavba 3. a 4. bloku v Jaderné elektrárně Temelín [29].

Několik světových výrobců je schopno poskytnout elektrárnu s tlakovodním reaktorem generace III+. Následující reaktory jsou brány v úvahu jako reference v projektech procesu posuzování vlivů na životní prostředí a budou použity jako komerčně dostupné bloky od renomovaných dodavatelů: [27]

- AP1000 – Westinghouse Electric Company LLC (USA)
- APR1000 – KHNP (Jižní Korea)
- EPR1200 – EDF (Francie)

Dále byly z projektu vyřazeny z bezpečnostních důvodů ruský Rosatom (VVER 1200E) a čínský CGN Power Group<sup>17</sup> (HPR1000) [30].

Poskytovatel NJZ bude vybrán do konce roku 2024. Pro všechny typy reaktorů platí stejné ekologické a bezpečnostní normy a hodnocení zohledňuje vlivy v jejich maximální možné míře. To znamená, že parametry použité pro vyhodnocení vlivů bezpečně zahrnují všechny parametry zařízení při zohlednění výše uvedených dodavatelů. Dodavatelem NJZ tedy by mohl být každý výrobce, jehož projekt bude splňovat všechny zákonné požadavky (zejména nutné pro jaderná zařízení) a zároveň splňovat obálková kritéria používaná pro posuzování vlivů na životní prostředí [29].

#### 4.3.1 Westinghouse

Společnost Westinghouse je severoamerická společnost zabývající se jadernou energetikou. George Westinghouse, rodák ze Spojených států amerických, založil v průběhu svého života několik společností. Jedna z těchto společností byla Westinghouse Electric Company se vznikem roku 1886. Westinghouse prosazoval budování elektrických sítí

<sup>17</sup> CGN – China General Nuclear Power Group, čínská státní energetická společnost

střídavého proudu. V opozici jim stáli zastánci stejnosměrného proudu v čele s Thomasem Edisonem. Ale po několika letech, díky vynálezům Nikoly Tesly, se přišlo na hodnotu střídavého proudu a společnost Westinghouse jenom prosperovala [31].

Společnost Westinghouse vystavěl první komerční tlakovodní reaktor (PWR) na světě v roce 1957 v Shippingportu v Pensylvánii. Dnes je po celém světě v provozu více než 430 jaderných reaktorů s čistým instalovaným výkonem okolo 370 000 MW<sub>e</sub>, ze kterých přibližně na polovině z nich podílela společnost Westinghouse, díky čemuž byli největší dodavatelé reaktorů na světě. Po vyčlenění jaderné divize od původní společnosti v roce 1999 firma nabízí jaderné produkty a služby společně v mezinárodním měřítku, včetně jaderného paliva, servisu a údržby, přístrojového vybavení, řízení a projektování jaderných elektráren [31].

Společnost několikrát vyhlásila bankrot a v nynější době je stoprocentním vlastníkem mezinárodní korporace Brookfield Business Partners [32].

Pro nový jaderný zdroj pro Českou republiku byl navržen reaktor tlakovodní koncepce AP1000 [27].

#### 4.3.2 KHNP

Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) je dceřiná společnost společnosti Korea Electric Power Company (KEPCO), která v Koreji vlastní a provozuje 25 jaderných reaktorů s celkovou výrobní kapacitou okolo 25 000 MW<sub>e</sub>. Dále provozují ještě 27 vodních elektráren. Většina těchto reaktorů jsou tlakovodní. V horizontu 8 let by měly být spuštěny další 3 reaktory [33].

Společnost Kepco, která byla založena již roku 1898 pod názvem Hansung Electric Company, byla jediným jihokorejským poskytovatelem elektrické energie od roku 1961 do dubna 2001. Původně byla založena jako vládní společnost. Energetická část KEPCO byla následně rozdělena do šesti subjektů, přičemž KHNP se stala největším z nich. Celá jeho jaderná výrobní kapacita a malé množství vodních elektráren se staly její součástí. Další dceřinou společností KEPCO je KEPCO E&C, která se zaměřuje na strojírenství. KEPCO NF vyrábí jaderné palivo a KEPCO KPS zajišťuje údržbu [33].

Jejich první spuštěná jaderná elektrárna byla uvedena do provozu roku 1978 a první reaktor i několik dalších byly poskytnuty americkým Westinghousem a francouzským Framatomem. Díky těmto reaktorům začali vyvíjet své vlastní reaktory pod názvem OPR. Z těchto reaktorů se dále vyvíjely jejich komerční reaktory III+ generace s názvem APR. Pro Evropu mají v nabídce reaktor APR1400, který je základem pro navrhovaný reaktor na nový jaderný zdroj v České republice [33].

#### 4.3.3 EdF

Électricité de France je francouzská nadnárodní energetická společnost, z velké části vlastněná francouzským státem. Energetický mix ve Francii tvoří ze 70 % jaderná energetika. Jenom ve Francii se nachází 56 stále fungujících reaktorů rozmístěných v 18 jaderných elektrárnách s celkovou výrobní kapacitou okolo 62 000 MW<sub>e</sub>. Zahrnují 32 reaktorů o výkonu 900 MW<sub>e</sub>, 20 reaktorů o výkonu 1 300 MW<sub>e</sub> a 4 reaktory o výkonu 1 450 MW<sub>e</sub>, všechny PWR. První jaderné elektrárny ve Francii začaly vznikat v 70. letech 20. století. V roce 2009 byla EDF největším světovým výrobcem elektřiny a je jím dodnes. Zároveň nezanechávají skoro žádnou uhlíkovou stopu [34].

Společnost EDF vznikla 8. dubna 1946 sloučením různých rozdělených aktérů. Od roku 1958 spolupracují se společností Framatome, která se zaměřuje na výrobu jaderných reaktorů a technologií. Tato firma se několikrát v průběhu let rozdělila na více částí, která se každá zaměřovala na konkrétní výrobu. K dnešnímu dni existují tyto společnosti dvě. Jedna z nich je Orano, která se zaměřuje na palivo a jeho cyklus. A ta druhá je znovu Framatome, zabývající se pouze vývojem a výstavbou jaderných zařízení [34].

Ve spolupráci s německým Siemensem vznikl jejich typ PWR reaktoru III+ generace s názvem EPR, jehož verze s výkonem 1200 MW<sub>e</sub> je nabídnuta pro nový jaderný zdroj pro Českou republiku [3].

## 5 Jaderné reaktory pro Dukovany

V této kapitole jsou popsány návrhy, které jsou uvažovány pro NJZ v Dukovanech. Zároveň pro porovnání jsou zde uvedeny i stávající reaktory, které jsou nyní v České republice v provozu.

### 5.1 Stávající typy reaktorů používané v ČR

V České republice se nacházejí dvě jaderné elektrárny – Temelín a Dukovany. Obě elektrárny využívají tlakovodní reaktory sovětského typu. Tyto reaktory mají maximální životnost 60 let a bude nutné je v budoucnu nahradit novějšími technologiemi.

#### 5.1.1 VVER 440 (Dukovany)

Dukovanská jaderná elektrárna využívá celkem 4 tlakovodní reaktory sovětského typu VVER-440/213, které byly uvedeny do provozu postupně v letech 1985 až 1987. Tyto reaktory měly výkon 440 MW<sub>e</sub> a každý z nich obsahuje přibližně 42 tun jaderného paliva [35]. Po modernizaci disponuje každý z reaktorů elektrickým výkonem 510 MW<sub>e</sub> [26].

Reaktory VVER-440/213 byly vyvinuty v bývalém Sovětském svazu v 70. a 80. letech 20. století a jsou variantou reaktoru VVER-440, který byl poprvé uveden do provozu v roce 1972. Tento typ reaktoru se vyskytuje v mnoha jaderných elektrárnách v Rusku a v dalších zemích. Ve světě je k roku 2022 v provozu 48 těchto jaderných reaktorů. Tyto reaktory využívají jako chladicí médium běžnou vodu a jako moderátor grafit [36].

Každý z reaktorů Dukovan má tři hlavní okruhy: primární okruh, sekundární okruh a okruh chlazení kondenzátoru

Reaktory VVER 440 mají řadu bezpečnostních mechanismů, jako jsou nouzové vypínání reaktoru, nouzové chlazení a oddělovací systém HUA<sup>18</sup>, který uzavře poškozenou smyčku, aby zamezil radioaktivního úniku [37].

#### 5.1.2 VVER 1000 (Temelín)

Tlakovodní reaktory VVER-1000/320 v Temelínské jaderné elektrárně mají výkon 1000 MW<sub>e</sub> a každý z nich obsahuje přibližně 92 tun jaderného paliva [38]. Tyto reaktory byly postaveny na základě designu vyvinutého v bývalém Sovětském svazu, a jsou momentálně nejmodernější a nejvýkonnější v České republice [39].

Podobně jako u Dukovanských reaktorů, i Temelínské reaktory mají tři hlavní okruhy: primární okruh, sekundární okruh a okruh chlazení kondenzátoru.

Temelínské reaktory VVER-1000 jsou vybaveny také různými bezpečnostními mechanismy, které zahrnují nouzové vypnutí reaktoru, nouzové chlazení a systémy pro oddělení okruhů v případě havarijní situace. Tyto bezpečnostní mechanismy jsou důležité pro udržení vysoké úrovně bezpečnosti a minimalizaci rizika jaderné havárie [37].

## 5.2 Nově navrhované typy reaktorů

Veškeré navrhované reaktory pro Nový jaderný zdroj v Dukovanech patří do III+. generace reaktorů a klasifikují se jako tlakovodní (PWR) reaktory. Do tendru vstoupili 3 světové společnosti, každý se svým vlastním prototypem reaktoru. Americká společnost

---

<sup>18</sup> HUA – hlavní uzavírací armatura

Westinghouse nabízí svůj reaktor AP1000, jihokorejský KHNP svůj APR1000 a francouzská společnost EdF EPR1200, vycházející ze svého osvědčeného prototypu EPR2. Tyto reaktory by měly produkovat elektrický výkon do 1200 MW<sub>e</sub>. V následující kapitolách jsou návrhy popsány [27].

### 5.2.1 AP1000

Reaktor AP<sup>19</sup>1000 je moderní jaderný reaktor III+. generace, který byl vyvinut společností Westinghouse Electric Company. Tento reaktor je navržen tak, aby byl co nejbezpečnější a co nejefektivnější, a byl vyvinut s ohledem na předcházející havárie jaderných elektráren, jako byly havárie v Černobylu, Fukušimě a Three Miles Island [40].

Reaktor AP1000 byl vyvinut z konceptu staršího projektu reaktoru AP600 a je schopen produkovat okolo 1115 MW elektrické energie. Tento reaktor využívá pokročilé technologie a vlastnosti, které zlepšují jeho bezpečnost, efektivitu a výkon. Má jednoduchou konstrukci, která zahrnuje mnoho inovativních prvků, které zvyšují jeho bezpečnost a efektivitu [41].

Primární okruh reaktoru AP1000 se skládá ze dvou smyček hlavního cirkulačního potrubí připojených k reaktor. Na každé smyčce se nachází jeden parogenerátor. Ke každému ze dvou parogenerátorů vede jedna horká větev a od něj dvě studené zpět do reaktoru. Kromě toho je součástí primárního okruhu i kompenzátor objemu [3].

Tento reaktor obsahuje například pasivní systémy, které jsou navrženy tak, aby fungovaly bez nutnosti připojení k napájecímu zdroji nebo k externímu zdroji vody, což zvyšuje jeho spolehlivost. Mezi další bezpečnostní vlastnosti patří čtyři nezávislé systémy na odvedení tepla, částečně dvojitý plášť, který chrání před únikem radioaktivních látek a integrovaný systém ochlazování, který zlepšuje odvádění tepla v případě nehody. Chladivo v primárním okruhu prochází tepelným výměníkem umístěným v nádrži s vysokou kapacitou uvnitř ochranného obalu [41].

Jednou z výhod reaktoru AP1000 je také jeho schopnost reagovat na nouzové situace. V případě vypnutí napájení se tento reaktor automaticky přepne na pasivní chlazení pomocí gravitace, což znamená, že systémy na odvedení tepla budou fungovat i bez napájecího zdroje. Tento systém se nazývá GDC<sup>20</sup>. Tím se zajišťuje trvalé chlazení jaderného reaktoru i v případě, že aktivní chladicí systém selže. Dalším bezpečnostním mechanismem, který umožňuje chladicímu systému pracovat i bez aktivního zásahu personálu se nazývá IRWST<sup>21</sup>. Je to nádrž s chladicí vodou, která je umístěna v hlavním kontejnmentu reaktoru. Tato nádrž slouží jako záložní zdroj chladicí vody v případě havarijní situace, jako je například ztráta chladicí vody. Další významnou součástí bezpečnostního systému reaktoru AP1000 jsou pasivní tlumiče tlaku. Tyto tlumiče se aktivují automaticky v případě, že dojde k havarijnímu zvýšení tlaku v kontejnmentu reaktoru. Tlumiče obsahují vodu, která se vypouští do kontejnmentu a snižuje tak tlak v případě havarijní situace [41].

Reaktor AP1000 využívá konvenční jaderné palivo, které se skládá z uranu-235. Kromě bezpečnostních mechanismů je reaktor AP1000 také navržen tak, aby minimalizoval množství radioaktivního materiálu, který by mohl uniknout v případě havárie. Reaktor využívá systému PCCS<sup>22</sup>, který umožňuje trvalé chlazení kontejnmentu reaktoru pomocí gravitace a kondenzace

---

<sup>19</sup> AP – Advanced Passive

<sup>20</sup> GDC – Gravity-driven cooling system

<sup>21</sup> IRWST – In-containment refueling water storage tank

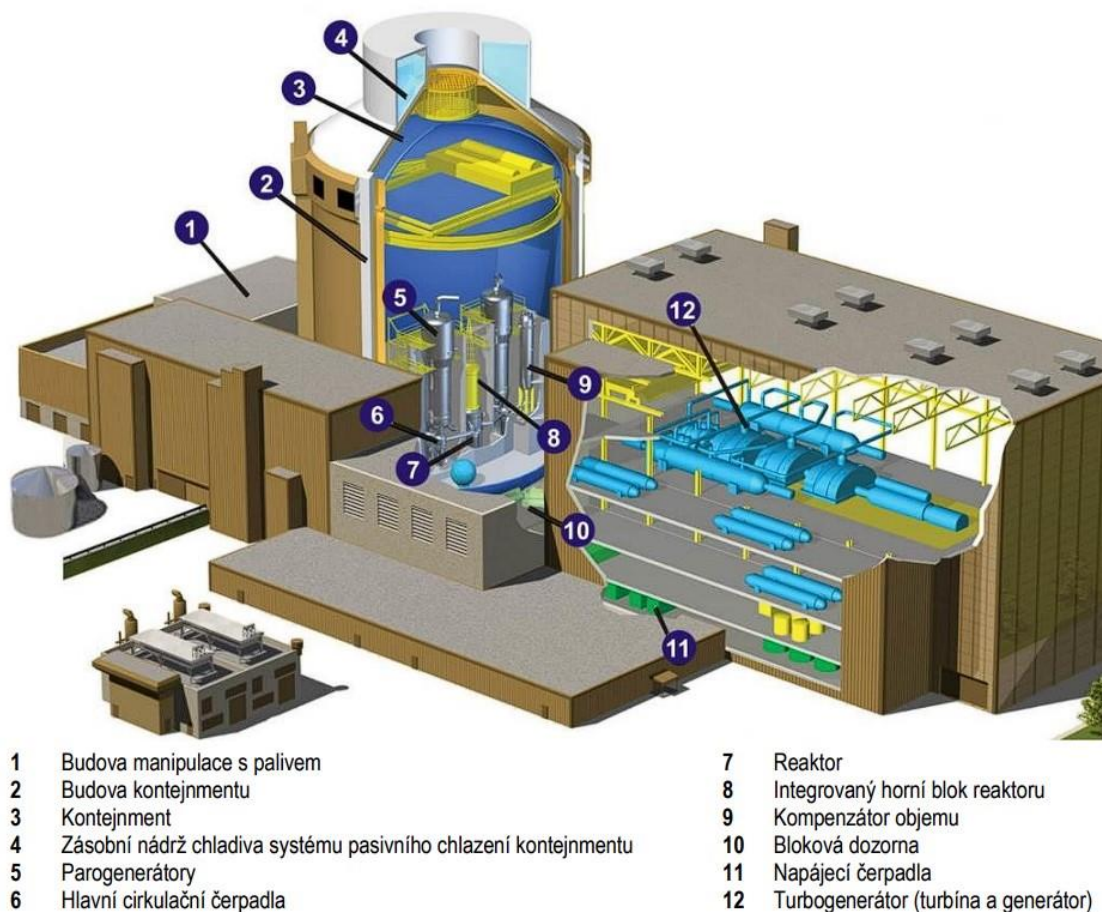
<sup>22</sup> PCCS – Passive containment cooling system

páry. Tento systém minimalizuje riziko uvolnění radioaktivního materiálu do okolí v případě havárie [41].

Celkově lze tedy říct, že reaktor AP1000 je vysoce bezpečný jaderný zdroj, který využívá pasivní bezpečnostní mechanismy pro minimalizaci rizika havarijních situací a uvolnění radioaktivního materiálu. Díky svému výkonu a bezpečnostním vlastnostem je reaktor AP1000 vhodným kandidátem pro výstavbu nových jaderných elektráren po celém světě. Jeho schopnost efektivně a bezpečně dodávat elektrickou energii do sítě, a přitom minimalizovat dopad na životní prostředí ho činí atraktivním zdrojem energie pro země, které se snaží snížit svou závislost na fosilních palivech a zároveň splnit své energetické potřeby.

Tento reaktor byl již vystavěn a je provozován v Číně [42]. Mezi další země, které plánují využití reaktoru AP1000, patří například USA [43] nebo Ukrajina [44].

Na Obr. 5.1 je znázorněn ilustrativní řez elektrárenským blokem AP1000.



Obr. 5.1: Ilustrativní řez elektrárenským blokem AP1000 [3]

### 5.2.2 APR1000

Reaktor APR<sup>23</sup>1000 je jaderný reaktor III+. generace vyvinutý společností KEPCO<sup>24</sup> a poskytuje vylepšenou verzi reaktoru typu OPR<sup>25</sup>1000. Reaktor APR1000 je navržen tak, aby

<sup>23</sup> APR – Advanced Power Reactor

<sup>24</sup> KEPCO – Korea Electric Power Corporation

<sup>25</sup> OPR – Optimized Power Reactor



maximalizoval výkon, zvýšil efektivitu a minimalizoval rizika související s provozem jaderného reaktoru. Je výsledkem více než 20 let výzkumu a vývoje, který KEPCO věnovala vývoji reaktoru třetí generace [3].

Reaktor APR1000 v Dukovanech by byl navržen tak, aby splňoval nejpřísnější mezinárodní bezpečnostní standardy a podporoval rozvoj jaderné energetiky v České republice. Mezi hlavní vlastnosti reaktoru APR1000 patří jeho schopnost minimalizovat dopad na životní prostředí, vysoká úroveň bezpečnosti, ekonomická efektivita a vysoká energetická účinnost [45].

Primární okruh se skládá ze dvou smyček hlavního cirkulačního potrubí, kde každá obsahuje jeden parogenerátor, dvě hlavní cirkulační čerpadla, dvě studené a jednu horkou větev pro cirkulaci chladiva reaktoru. Dále je součástí primárního okruhu kompenzátor objemu [3].

APR1000 je tlakovodní reaktor, který využívá obvyklou směs vody a boru jako chladivo a moderátor. Reaktor je navržen tak, aby dosáhl vysoké úrovně bezpečnosti a minimalizoval riziko havárie. Obsahuje několik bezpečnostních mechanismů, které ho chrání před možnými haváriemi. Patří mezi ně systém nouzového odstavení reaktoru ECCS<sup>26</sup>, systém pasivního ochlazování PCS<sup>27</sup>, systém pasivního odvodu tepla PHRS<sup>28</sup> a systém izolace primárního okruhu. Systém nouzového odstavení reaktoru ECCS je navržen tak, aby chránil reaktor před haváriemi tím, že automaticky vypne reaktor v případě, že dojde k poruše primárního okruhu. Systém ECCS je napojen na rezervoár vody, který se v případě potřeby automaticky vypouští do primárního okruhu. Systém pasivního ochlazování je navržen tak, aby udržel teplotu primárního okruhu na bezpečné úrovni v případě, že dojde k výpadku napájení. Tento systém využívá principy parního kondenzátoru. Pokud dojde k výpadku napájení, voda v primárním okruhu se zahřeje a začne vytvářet páru. Tato pára pak stoupá do sekundárního okruhu a kondenzuje se na chladicích trubicích, což uvolňuje teplo do okolního prostředí. Tento cyklus se opakuje, dokud se teplota v primárním okruhu neklesne na bezpečnou úroveň [45].

Bezpečnost reaktoru APR1000 je tedy zajištěna pomocí pasivních i aktivních bezpečnostních mechanismů. Mezi pasivní bezpečnostní mechanismy patří systémy pasivního ochlazování a pasivního uvolnění tlaku, které minimalizují riziko havarijních situací a uvolnění radioaktivního materiálu. Aktivní bezpečnostní mechanismy zahrnují systémy automatického řízení výkonu, které umožňují rychlou a přesnou kontrolu reaktoru v případě potřeby [45].

Další významnou vlastností reaktoru APR1000 je jeho vysoká účinnost využití paliva. Reaktor je navržen tak, aby maximalizoval energetický výkon. To se děje pomocí pokročilých konstrukčních prvků, jako jsou palivové tyče s vysokou hustotou paliva, které umožňují, aby reaktor mohl pracovat delší dobu bez nutnosti výměny paliva. Díky svým vlastnostem se reaktor APR1000 hodí pro různé typy provozu, jako je základní tak i střední zatížení pokrytí spotřeby elektrické energie. Reaktor je také vhodný pro využití v regionech s omezenými zdroji vody, protože používá menší množství chladicí vody než některé jiné typy reaktorů. Další bezpečnostní mechanismy reaktoru APR1000 zahrnují například systémy automatického vypnutí, které umožňují rychlé a bezpečné odstavení reaktoru v případě potřeby, stejně jako protipožární systémy a ochranné obaly reaktoru. Reaktor APR1000 také využívá moderní technologie, jako jsou digitální řídicí systémy, které zvyšují spolehlivost a bezpečnost provozu reaktoru [46].

<sup>26</sup> ECCS – Emergency Core Cooling System

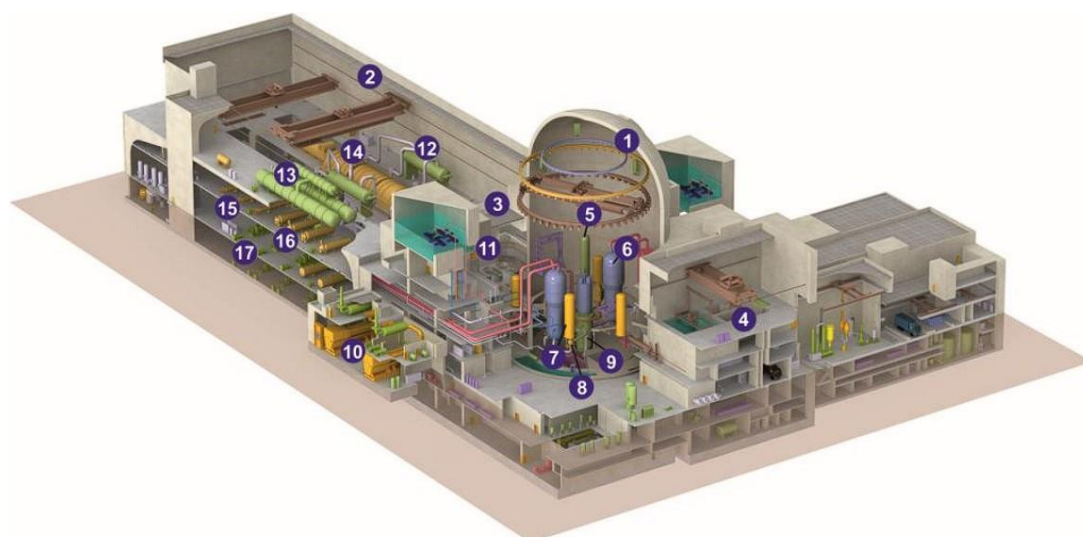
<sup>27</sup> PCS – Passive Cooling System

<sup>28</sup> PHRS – Passive Heat Removal System

Reaktor APR1000 vychází z projektů reaktorů APR+ a APR1400, které jsou již licencované a APR1400 je již v Jižní Koreji v provozu [47]. Jeho bezpečnostní vlastnosti jsou na podobné úrovni jako u reaktoru AP1000, což svědčí o jeho kvalitě a bezpečnosti. Díky tomu splňuje nejvyšší standardy bezpečnosti stanovené Mezinárodní agenturou pro atomovou energii<sup>29</sup>. Jeho bezpečnostní záznamy jsou také podporovány bezpečnostními simulacemi, které ukazují, že reaktor je schopen úspěšně odolat různým typům havarijních situací [46].

Reaktor je schopen dosáhnout okolo 1050 MW elektrického výkonu, což umožňuje dodávat elektřinu pro statisíce domácností a průmyslových podniků. Vzhledem k vysokým standardům bezpečnosti a výkonu reaktoru APR1000 je považován za konkurenceschopného kandidáta pro využití v Dukovanech. Navíc, jako designově vylepšená verze reaktoru typu PWR, má potenciál snížit náklady na výstavbu a provoz v porovnání s jinými jadernými zdroji [46].

Na Obr. 5.2 je znázorněn ilustrativní řez elektrárenským blokem APR1000.



- |   |                                  |    |                                |
|---|----------------------------------|----|--------------------------------|
| 1 | Budova kontejmentu               | 10 | Dieselgenerátory               |
| 2 | Strojovna                        | 11 | Bloková dozorna                |
| 3 | Pomocná budova                   | 12 | Separátor vlhkosti a přehřívák |
| 4 | Bazén skladování VJP             | 13 | Odplyňovák                     |
| 5 | Kompenzátor objemu               | 14 | Turbína                        |
| 6 | Parogenerátor                    | 15 | Nízkotlaké ohříváky            |
| 7 | Nádrž bezpečnostního vstřikování | 16 | Vysokotlaké ohříváky           |
| 8 | Hlavní cirkulační čerpadlo       | 17 | Turbonapájecí čerpadla         |
| 9 | Reaktorová nádoba                |    |                                |

Obr. 5.2: Ilustrativní řez elektrárenským blokem APR1000 [3]

### 5.2.3 EPR1200

Reaktor EPR<sup>30</sup>1200 je moderní reaktor III+. generace, který je v návrhu na NJZ v Dukovanech. Tento reaktor byl vyvinut francouzskou společností EDF.

Jedním z hlavních cílů při návrhu reaktoru EPR1200 byla bezpečnost. Reaktor by měl mít mnoho aktivních a pasivních systémů pro minimalizaci rizika havarijních situací a jejich

<sup>29</sup> IAEA – Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE)

<sup>30</sup> EPR – European Pressurized Reactor

následků. Mezi tyto systémy patří například systémy kontroly teploty, tlaku a chladicího média, které by měly být navrženy tak, aby v případě potřeby umožnily snadný přechod do pasivního režimu [48].

Rozdíl mezi ostatními reaktory v návrhu je v počtu smyček. EPR1200 má primární okruh složený ze tří smyček hlavního cirkulačního potrubí, kde každá smyčka má parogenerátor, hlavní cirkulační čerpadlo a jednu horkou a studenou větev pro cirkulaci chladiva v reaktoru [49]. Kromě toho je součástí primárního okruhu i kompenzátor objemu [3].

Podobně jako reaktory AP1000 a APR1000, i reaktor EPR1200 je vybaven pasivními bezpečnostními mechanismy, které minimalizují riziko havarijních situací a zabráňují uvolnění radioaktivního materiálu. Tento reaktor by měl mít také robustní systém chlazení, který by zajišťoval udržení nízké teploty primárního okruhu v případě výpadku napájení [3].

Systém ochlazování by měl být schopen udržet nízkou teplotu v reaktoru i v případě, že dojde k výpadku napájení. Tento systém by měl být navržen tak, aby byl pasivní a spolehlivý, aby minimalizoval riziko havarijních situací. Dalším bezpečnostním prvkem je tzv. kontejnment, což je oblast kolem reaktoru, která je navržena tak, aby udržela uvnitř veškeré uvolněné radioaktivní materiály v případě havárie. Kontejnment by měl být navržen tak, aby vydržel různé druhy útoků, včetně zemětřesení, požáru nebo úderu letadla [49].

Reaktor EPR1200 by měl být také navržen tak, aby minimalizoval množství radioaktivního odpadu. Například palivové tyče by měly být navrženy tak, aby bylo možné z nich získat co nejvíce energie při co nejnižší spotřebě paliva. Reaktor by také měl být schopen recyklace použitého paliva, aby bylo možné využít co nejvíce jeho energie a minimalizovat množství radioaktivního odpadu. Reaktor EPR1200 by také měl být vybaven systémy na monitorování a kontrolu emisí, aby byly splněny nejvyšší standardy bezpečnosti a ochrany životního prostředí. Systémy na zachycování emisí by měly minimalizovat emise oxidů dusíku, oxidů síry a oxidů uhelnatého [50].

Kromě vysoké úrovně bezpečnosti by měl reaktor EPR1200 také mít vysokou účinnost a spolehlivost. Dále by měl být schopen produkovat až 1200 MW elektrické energie [49]. Systém řízení paliva je navržen tak, aby minimalizoval spotřebu paliva a zvyšoval výkon reaktoru. Palivo je vyrobeno z oxidu uraničitého ( $UO_2$ ) a je uloženo v palivových tyčích, které jsou vloženy do palivových kazet. Palivové kazety jsou umístěny v palivových modulech, které jsou následně vloženy do reaktoru. Reaktor disponuje také systémem kontroly množství boru, který se používá k řízení reaktivity reaktoru [50].

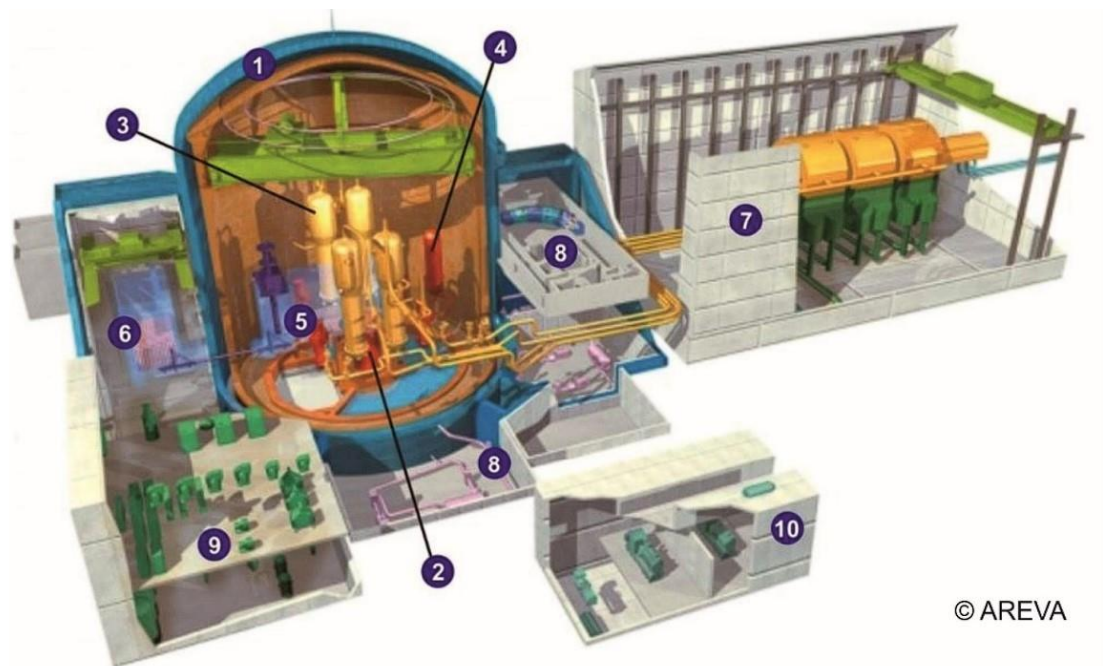
Další významnou vlastností reaktoru EPR1200 je jeho schopnost pracovat na různých typech paliva. V současné době se palivo pro reaktor vyrábí s využitím uranu obohaceného na 4,5 % nebo 5 %. Avšak, reaktor EPR1200 je navržen tak, aby byl schopen pracovat i s jinými druhy paliva, jako je například  $MOX^{31}$  palivo [51].

Reaktor EPR1200 je navrhován a vyvíjen společnostmi EDF. Tyto společnosti mají již dlouholeté zkušenosti s vývojem jaderných technologií a stavbou jaderných elektráren. Reaktor EPR2, ze kterého EPR1200 vychází, byl již schválen pro použití v několika zemích, včetně Francie, Finska a Číny. Celkově lze tedy říct, že reaktor EPR1200 je moderní a vysoce bezpečný jaderný zdroj, který splňuje nejvyšší standardy bezpečnosti a výkonu. Jeho technické vlastnosti a účinnost jej činí vhodným kandidátem pro modernizaci jaderného zdroje v Dukovanech a zajištění spolehlivého a bezpečného zdroje energie pro Českou republiku [49].

---

<sup>31</sup> MOX - směs oxidu uraničitého a oxidu plutoničitého

Na Obr. 5.3 je znázorněn ilustrativní řez elektrárenským blokem EPR1200.



- |   |                            |    |                               |
|---|----------------------------|----|-------------------------------|
| 1 | Budova kontejnmentu        | 6  | Bazén skladování VJP          |
| 2 | Reaktor                    | 7  | Strojovna                     |
| 3 | Parogenerátory             | 8  | Budova bezpečnostních systémů |
| 4 | Kompenzátor objemu         | 9  | Budova pomocných provozů      |
| 5 | Hlavní cirkulační čerpadlo | 10 | Dieselgenerátory              |

Obr. 5.3: Ilustrativní řez elektrárenským blokem EPR1200 [3]

## 6 Kritéria porovnávání

### 6.1 Výkon

Výkon jaderné elektrárny je množství elektrické energie, kterou je schopna vyprodukovat za určitý časový úsek. Obvykle se udává v jednotkách wattů (W) nebo megawattů (MW). Jedna megawatthodina ( $MW_h$ ) je množství energie, kterou jaderná elektrárna produkuje za jednu hodinu při výkonu jednoho megawattu.

Výkon jaderné elektrárny je důležitým faktorem pro její účinnost a hospodárnost. Vyšší výkon znamená větší množství vyrobené elektrické energie za stejnou dobu, což může snižovat náklady na výrobu energie. Nicméně vyšší výkon také znamená vyšší náklady na výstavbu a údržbu elektrárny.

### 6.2 Počet smyček

Jaderný reaktor může mít různý počet smyček, v závislosti na jeho konstrukci a účelu. Smyčka je uzavřený okruh, který obvykle obsahuje chladivo a palivo a slouží k přemístování tepla vznikajícího při jaderné reakci [3].

V jaderných elektrárnách se nejčastěji používají reaktory s jednou nebo více smyčkami. Reaktor s jednou smyčkou obsahuje jeden uzavřený okruh, kterým cirkuluje chladivo a přenáší teplo z reaktoru do parogenerátoru, kde se voda přeměňuje na páru a pohání turbíny. Reaktory s více smyčkami mají několik oddělených okruhů, které mohou být například paralelní, sériové nebo kombinované.

Počet smyček v reaktoru může být určen mnoha faktory, jako jsou požadavky na výkon, účinnost, bezpečnost, náklady na výstavbu a provoz a možnosti úprav v průběhu životnosti reaktoru. Například moderní reaktory typu VVER, které se používají v jaderné elektrárně Temelín v České republice, mají čtyři smyčky a v Dukovanech dokonce 6 [52]. V jaderných ponorkách se obvykle používají reaktory s jednou smyčkou, protože jsou menší a méně náročné na údržbu a provoz.

### 6.3 Typy parogenerátoru

Parogenerátor je válcová nádoba, která může být vertikální nebo horizontální, sloužící jako tepelný výměník mezi primárním a sekundárním okruhem v jaderném reaktoru. Jeho úkolem je generovat sytou páru pro pohon turbíny. Teplo z ohřátého chladiva z primárního okruhu je předáváno do teplosměnného trubkového svazku, kterým protéká napájecí voda sekundárního okruhu, a následně je chladivo vráceno zpět do primárního okruhu. Napájecí voda je přiváděna do parogenerátoru přes přívodní a rozdělovací systém. Pára, která vystupuje z odpařovací plochy parogenerátoru, je následně separována od vlhkosti. Poté je pára vedena do parního potrubí a dále k turbíně pro generování elektrické energie [20].

Každý typ parogenerátoru má své výhody a nevýhody a volba konkrétního typu závisí na mnoha faktorech, jako jsou požadavky na bezpečnost, výkon, účinnost a náklady.

### 6.4 Z pohledu použitého kontejnmentu

Kontejnment je ochranný obal okolo primárního jaderného reaktoru, který slouží k zabránění úniku radioaktivních látek do okolí v případě havárie nebo poruchy. Kontejnment je jednou z důležitých bezpečnostních funkcí jaderného reaktoru a je navržen tak, aby udržel

radioaktivní látky uvnitř a minimalizoval jejich uvolnění do životního prostředí a také aby poškození jaderného reaktoru z vnějšku [20].

## 6.5 Z pohledu dopravitelnosti

Největší komponenty nového jaderného zdroje budou tlakové nádoby a parogenerátory. Dopravitelnost těchto komponent do Dukovan bude záviset na jejich rozměrech a hmotnosti. Například tlaková nádoba má obvykle průměr okolo 5 metrů, výšku cca 12 m a váhu několik stovek tun, zatímco parogenerátory mají typicky průměr také do 5 metrů, délku okolo 15 metrů a hmotnost přibližně 500 tun.

Pro dopravu největších komponent na stavenišťe jaderného zdroje v Dukovanech bude pravděpodobně využita kombinace různých dopravních prostředků, jako jsou silniční nákladní automobily, železniční vagony a lodě. Například tlaková nádoba by mohla být dopravena lodí po řece z Hamburku po Labi, dále přepravena po silnici nebo po železnici. Parogenerátory by mohly být přepravovány silničními nákladními automobily nebo po železnici [53].

Je však důležité zdůraznit, že doprava největších komponent je velmi náročná na technickou přípravu, a všechny dopravní operace budou muset být pečlivě naplánovány a koordinovány. Toto bude zahrnovat všechny aspekty jako jsou zabezpečení nákladu, silniční, železniční nebo vodní infrastrukturu, průjezdnost cest, ochranu před poškozením, bezpečnost a mnoho dalších faktorů. Dopravní cesty jsou stále ve stádiu přípravy a výstavby. Samozřejmě, že v případě, když reaktor bude mít největší součásti menší než ostatní, tak bude doprava jednodušší.

## 6.6 Tavení aktivní zóny

Jednou z nejzávažnějších havárií je rozpad aktivní zóny, který představuje vysoké riziko roztavení paliva a zničení tlakové nádoby reaktoru. Klíčovým faktorem při řešení této situace je udržení integrity a hermetičnosti kontejmentu. V případě mimoprojektové havárie může roztavené palivo proniknout skrz tlakovou nádobu reaktoru, kontejment a dále se šířit. Tím může postoupit až ke spodním vodám a způsobit jejich kontaminaci [54].

V případě úniku roztaveného paliva z reaktorové nádoby by došlo k interakci této horké a chemicky agresivní taveniny s betonovou šachtou reaktoru. Tato situace představuje značné nebezpečí, neboť při tomto procesu dochází k uvolňování velkého množství vodíku a dalších plynných těkavých produktů. Kromě toho unikají i netěkavé a silně radioaktivní složky taveniny [54].

K tomuto problému lze přistoupit dvěma způsoby, nebo jejich kombinací. Prvním je zajištění spolehlivého chladičového systému, který by udržel palivo dostatečně chladné a zabránil jeho průniku z reaktorové nádoby. Druhou možností je instalace tzv. lapače aktivní zóny, což je zařízení určené k zachycení ven z nádoby unikající aktivní zóny. Jeho účelem není pouze zachytit pevné a roztavené částice aktivní zóny, včetně zařízení a materiálu uvnitř reaktorové nádoby, ale také zajistit jejich ochlazení [54].

## 6.7 CDF

Core Damage Frequency je termín, který se používá v jaderné energetice k určení pravděpodobnosti, že aktivní zóna reaktoru utrpí závažné poškození. Jedná se o důležitý faktor, který se používá k posuzování bezpečnosti jaderných elektráren. Obvykle se vyjadřuje jako počet nežádoucích událostí na rok, které by mohly vést k poškození jádra reaktoru. Tyto

události mohou zahrnovat selhání kritických systémů, selhání bezpečnostních opatření, lidskou chybu, přírodní katastrofy nebo útoky [55].

Výpočet CDF zahrnuje hodnocení různých scénářů nežádoucích událostí a posouzení pravděpodobnosti, že každý scénář se může vyskytnout. Výsledná CDF hodnota se poté porovnává s bezpečnostními kritérii stanovenými regulačními orgány, aby se zjistilo, zda je reaktor dostatečně bezpečný. Výpočet je složitý proces, který zahrnuje mnoho faktorů a závisí na mnoha proměnných. Nicméně, přesně určit CDF je klíčové pro zajištění bezpečnosti jaderných elektráren a minimalizování rizika pro životní prostředí a veřejnost [55].

## 6.8 LERF

Large Early Release Frequency je termín, který se používá v jaderné energetice k určení pravděpodobnosti, že by v případě závažné havárie došlo k významnému uvolnění radioaktivních látek do okolí. Obvykle se vyjadřuje jako počet nežádoucích událostí na rok, které by mohly vést k velkému uvolnění radioaktivních látek. Tyto události mohou zahrnovat selhání kritických systémů, selhání bezpečnostních opatření, lidskou chybu, přírodní katastrofy nebo útoky [55].

Výpočet LERF zahrnuje hodnocení různých scénářů nežádoucích událostí a posouzení pravděpodobnosti, že každý scénář by mohl vést k významnému uvolnění radioaktivních látek. Výsledná LERF hodnota se poté porovnává s bezpečnostními kritérii stanovenými regulačními orgány, aby se zjistilo, zda je reaktor dostatečně bezpečný. Výpočet je složitý proces, který zahrnuje mnoho faktorů a závisí na mnoha proměnných. Nicméně, přesné určení LERF je klíčové pro zajištění bezpečnosti jaderných elektráren a minimalizování rizika pro životní prostředí a veřejnost v případě závažné havárie [55].

## 6.9 European Utility Requirements

European Utility Requirements (dále jen EUR) je projekt, který vznikl za účelem vytvoření společných požadavků pro jaderné elektrárny v Evropě. Projekt je řízen organizací EUR System, která sdružuje evropské energetické společnosti [56].

**Mezi doporučená kritéria jaderných elektráren dle EUR patří [56]:**

- **Bezpečnost:** Jaderná elektrárna musí být navržena tak, aby byla maximálně bezpečná pro obyvatele a životní prostředí. To zahrnuje ochranu před radiací, minimální riziko havárie a úniku radioaktivních látek, a zabezpečení jaderného paliva.
- **Spolehlivost:** Jaderná elektrárna musí být navržena tak, aby byla spolehlivá a schopná fungovat bez významného narušení provozu. To zahrnuje odolnost vůči extrémním povětrnostním podmínkám, výpadkům napájení a technickým závadám.
- **Účinnost:** Jaderná elektrárna musí být navržena tak, aby byla co nejúčinnější využití paliva a zdrojů. To zahrnuje maximální využití tepla z jaderné reakce a minimalizaci odpadů.
- **Životní prostředí:** Jaderná elektrárna musí být navržena tak, aby měla co nejmenší negativní dopad na životní prostředí. To zahrnuje minimalizaci emisí, ochranu přírodních zdrojů a minimalizaci rizik pro životní prostředí.
- **Ekonomická efektivita:** Jaderná elektrárna musí být navržena tak, aby byla ekonomicky efektivní a konkurenceschopná s jinými zdroji energie. To zahrnuje minimalizaci nákladů na výstavbu, provoz a údržbu, a maximalizaci výkonu a využití paliva.

- Doporučená kritéria jaderných elektráren dle EUR jsou významným zdrojem informací pro návrh a provoz jaderných elektráren v Evropě, a slouží jako standard pro vysoké nároky na bezpečnost a výkon jaderných elektráren.

Všechny 3 mnou sledované projekty tato kritéria, podle informací, které jsou volně dostupné, naplňují.



## 7 Porovnání návrhů

V této kapitole se blíže podíváme na přímé porovnání návrhů reaktorů, a to zejména z pohledu výkonů, počtu smyček, typu parogenerátoru, kontejnmentu a z bezpečnostních hledisek jako je CDF a LERF. Veškeré názory jsou subjektivní a preferovaný návrh se nemusí shodovat s finálně vybraným reaktorem na výstavbu NJZ. Tab. 7.1 ukazuje přehledně uspořádané porovnání těchto reaktorů. Dále bude uveden detailnější rozbor porovnání.

Tab. 7.1: Porovnání navržených reaktorů

Kritérium	AP1000 [41]	APR1000 [45]	EPR1200 [57]
Elektrický výkon [ $MW_e$ ]	1115	1050	1200
Termický výkon [ $MW_t$ ]	3415	2825	3300
Počet smyček	2	2	3
Typ parogenerátoru	Vertikální s U-trubkami	Vertikální s U-trubkami	Vertikální s U-trubkami
Kontejnment	Částečně 2plášťový (Otevřený)	2plášťový	2plášťový
Tavení aktivní zóny	Chlazení v tlakové nádobě	Lapač coria <sup>32</sup>	Lapač coria
CDF	2.41E-7/Ry	1E-5/Ry	1E-6/Ry
LERF	1.95E-8/Ry	1E-6/Ry	1E-7/Ry

### Výkon

Pro NJZ jednotlivé reaktory budou mít maximální jmenovitý tepelný výkon kolem 3500  $MW_t$ , který bude odpovídat příslušnému čistému elektrickému výkonu o hodnotě do 1200  $MW_e$ .

Všechny reaktory navržené pro NJZ tato kritéria splňují s tím, že reaktor EPR1200 s výkonem 1200  $MW_e$  je nejvýkonnější. Následuje za ním reaktor AP1000 s výkonem 1115  $MW_e$ . Nejnižší elektrický výkon disponuje reaktor APR1000 s výkonem okolo 1050  $MW_e$ . Co se týče tepelného výkonu, tak zde převládá reaktor AP1000 s tepelným výkonem 3415  $MW_t$ . Za ním následuje EPR1200 s 3300  $MW_t$  a jako poslední, stejně jako u elektrického výkonu, se umístil reaktor APR1000 s tepelným výkonem pouhých 2825  $MW_t$ .

Výkony reaktorů nejsou přesně dané. Velice záleží na konkrétním projektu a vývoji reaktoru. To znamená, že uváděné hodnoty jsou pouze přibližné. Výkony by ovšem neměly přesahovat požadavek, ale zároveň by měly být co největší. S vyšším výkonem ovšem stoupají nároky na konstrukci a bezpečnost.

Z hlediska výkonu je tedy pomyslným vítězem reaktor EPR1200, který přesně splňuje limit elektrického výkonu daný Českou republikou. Za ním se umístil reaktor AP1000 a na posledním místě skončil APR1000.

### Počet smyček

Reaktory navrhované pro NJZ budou mít 2 smyčky s výjimkou EPR1200, který bude mít o jednu smyčku navíc. Ten vystupuje z návrhu svého osvědčeného reaktoru EPR2, který

<sup>32</sup> Lávovitá směs štěpeného materiálu vzniklého v jádře jaderného reaktoru při přehřátí jádra

má smyčky celkem 4, ale také vyšší výkon. Aby tedy reaktor splnil výkonové omezení, odebrala se jedna smyčka.

Větší počet smyček znamená, že reaktor může předávat více tepla v parogenerátorech, tedy se zvýší výkon. Ovšem toto znamená, že je nutné vystavět více parogenerátorů, které jsou velmi drahé. Cena je obrovský faktor při výběru dodavatele reaktoru a počet smyček bezpečnost celého řešení zdaleka nijak zvlášť neovlivní.

Z tohoto hlediska se tedy jeví vítězem reaktor AP1000, který s pomocí dvou smyček zvládá vyprodukovat výkon 1115 MW<sub>e</sub>. APR1000 a EPR1200 bych umístil víceméně na stejné místo. První z reaktorů sice má o smyčku méně, ale úbytek výkonu je již poměrně velký, a tedy kompenzuje třetí smyčku, kterou obsahuje reaktor EPR1200.

### **Typ parogenerátoru**

Všechny reaktory sdílí stejný design parogenerátorů, tj. vertikální typ s U-trubkami. Jsou umístěny ve středu primárního okruhu a obsahují U-trubky, které přenášejí teplo z primárního okruhu na sekundární okruh, kde je generována pára. Na každém chladicím okruhu je pouze jeden parogenerátor. Tedy k reaktorům AP1000 a APR1000 náleží dva parogenerátory, zatímco k reaktoru EPR1200 přibude ještě jeden parogenerátor. Výhodou tohoto reaktoru je okolnost, že díky smyčce navíc mohou být parogenerátory menší a jednodušší a tím i levnější na servis.

Při komplexnější konstrukci a náročnějšímu provozu parogenerátoru bude úměrně cena stoupat. Také počtem parogenerátorů cena stoupá, ale zároveň stoupá výkon celku. Instalace komplexnějšího zařízení bude dražší a počet parogenerátorů cenu a dobu výstavby také nepříznivě ovlivní. Přihlídnutím těchto okolností udávám všechny reaktory na stejné místo.

### **Kontejnment**

Kontejnment reaktoru AP1000 je navržen jako dělená dvouplášťová betonová struktura. Vnější vrstva je otevřená pro umožnění cirkulace vzduchu. Skutečnost, že je vnější vrstva kontejnmentu otevřená, představuje bezpečnostní riziko vnějšími vlivy.

U reaktoru APR1000 je kombinovanou konstrukcí betonového pláště a ocelové kónické střechy. Betonový plášť slouží k ochraně proti vnějším vlivům, zatímco ocelová střecha slouží k ochraně proti únikům radioaktivních látek v případě poruchy reaktoru. Kontejnment reaktoru EPR1200 je navržen podobně jako APR1000 [3].

AP1000 a APR1000 mají kontejnmenty s tlakovým odlehčením, což umožňuje kontrolované uvolnění přetlaku a snížení nároků na tlakovou odolnost, zatímco EPR1200 má kontejnment s přetlakovým zabezpečením, který umožňuje udržovat vysoký tlak v kontejnmentu při havárii. Také mají AP1000 a APR1000 kontejnmenty s integrovanými systémy chlazení a odsávání, zatímco EPR1200 má oddělený systém pro chlazení a odsávání. Dále mají AP1000 a APR1000 kontejnmenty s nižší hmotností a menšími rozměry než EPR1200, což zjednodušuje jejich konstrukci a instalaci. EPR1200 má výrazně větší obsah vody v kontejnmentu než AP1000 a APR1000, což umožňuje větší kapacitu pro ukládání radioaktivních aerosolů a jiných kontaminantů [3].

Tyto rozdíly mohou mít vliv na bezpečnost, účinnost a náklady na konstrukci a provoz těchto reaktorů. Všechny tři kontejnmenty jsou navrženy tak, aby minimalizovaly dopad případného úniku radioaktivních látek na okolní prostředí a zajistily vysokou odolnost proti vnějším vlivům, jako jsou například povětrnostní podmínky, zemětřesení a útoky.

Z hlediska bezpečnosti je jednoznačným vítězem EPR1200, ale kompenzuje se to zvýšenou investicí. Ovšem bych řekl, že bezpečnost je důležitější a vyšší investice se do budoucna určitě vyplatí. Na druhém místě nastejno skončily oba zbylé reaktory.

## Dopravitelnost

Dopravitelnost hodně záleží na velikosti největších komponent. Vzhledem k tomu, že přímo k EDU nelze dopravit komponenty lodí, budou zřejmě muset být přepraveny po silnicích, které na to musí být dostatečně dimenzované. Proto platí pravidlo, že čím menší rozměry a hmotnost, tím bude dopravitelnost snadnější. Tab. 7.2 zobrazuje hmotnosti a rozměry tlakových nádob a parogenerátorů jednotlivých reaktorů.

Tab. 7.2: Porovnání velikostí největších komponent [58]

Projekt	Rozměry tlakové nádoby	Rozměry parogenerátoru
AP1000	ø4,4x12,06 / 295,5 t	ø5,6x22,5 / 663,7 t
APR1000	ø4,17x14,6 / 417 t	ø6,2x20,8 / 537 t
EPR1200	ø4,25x12,4 / 400 t	ø5,2x12,06 / 530 t

Vzhledem k tomu, že parogenerátor je rozměrnější a těžší než tlaková nádoba, a také jich musí být dopraveno větší množství, tak se s porovnáním budu hlavně zaměřovat právě na rozměry parogenerátorů. Jak je z tabulky zřejmé, tak reaktor EPR1200 má nejmenší parogenerátor, a proto bude jeho doprava snadnější než u druhých reaktorů. Ovšem bude nutno dopravit o jeden parogenerátor více. Jako nejrozměrnější se jeví parogenerátor reaktoru AP1000. Ten je ovšem kompenzován dopravitelností tlakové nádoby, protože má zdaleka nejlehčí tlakovou nádobu a zároveň rozměrově podobnou s reaktorem EPR1200. Největší a nejtěžší tlakovou nádobu obsahuje jihokorejský APR1000. V této kategorii tedy vítězí reaktor EPR1200 a za ním se podobně umístily zbylé dva reaktory.

## Lapač aktivní zóny

U reaktoru APR1000 je lapač aktivní zóny umístěn v prostoru pod reaktorovou nádobou a je vyložen vrstvou obětního materiálu z betonu. Pod tímto materiálem je shromážděno chladivo, které odebírá teplo z taveniny a přenáší ho do výstelky z uhlíkové oceli pod betonem. Chladicí kanály přivádějí chladivo z nádrže IRWST<sup>33</sup> a objemové nádrže. Chladicí systém se skládá ze dvou oddělených linek, z nichž každá je schopná ochladit taveninu. Poté je tavenina opláchnuta sprchováním. Důležitou vlastností dutiny je její povrchová velikost, která zvyšuje svůj plošný rozsah a usnadňuje tak její ochlazování [45].

Reaktor EPR1200 obsahuje lapač pod reaktorem podobně jako jihokorejský reaktor. Betonem obalené kovové kanálky vedou do lapače [57]. V betonové podlahové vrstvě budovy jsou také integrovány chladicí kanálky s vodou pro odvod tepla. Důležitým prvkem je ocelové víko, umístěné v kanálu pod reaktorovou nádobou. Když dojde k roztavení nádoby, tavenina je zachycena v kanálu a odtéká do lapače poté, co se roztaví ocelové víko. Tavenina je následně ponořena do chladiva a opláchnuta vodou, také z nádrže IRWST. V lapači tavenina tuhne do několika dnů [50].

U reaktoru AP1000 není lapač roztavené aktivní zóny součástí kontejnmentu, na rozdíl od jiných projektů. Tavenina je zachycena uvnitř reaktorové nádoby a poté je chlazená zvenčí. V případě havárie se otevře armatura nádrže IRWST, což způsobí zaplavení šachty, ve které se

<sup>33</sup> In-Containment Refueling Water Storage, záložní nádrž s chladicí vodou

nachází reaktor. Ten je ochlazován vodou, která je přímo v kontaktu s taveninou. Pokud je primární okruh nedotčen, vzniklá pára z chladiva cirkuluje do kompenzátoru objemu a poté do kontejnmentu. Pokud je však primární okruh poškozen, pára uniká netěsnostmi do kontejnmentu, kde kondenzuje. Voda zevnitř kontejnmentu ochlazuje reaktor a stoupá, až se zahřeje natolik, že se začne odpařovat. Kondenzace vzniklé páry probíhá na povrchu ocelového pláště kontejnmentu a kondenzát se poté vrací zpět do nádrže IRWST. Chladicí systém reaktoru je navržen tak, aby nedošlo k poškození ocelové vrstvy reaktoru a zabránilo se pronikání taveniny do kontejnmentu, čímž se předchází úniku radioaktivních látek. Součástí tohoto projektu jsou také vodíkové spalovače, které slouží k spalování vodíku vzniklého při přehřátí zirkoniového povlaku paliva a zajišťují zachování integrity ochranné obálky reaktoru [41].

V případě, že by se u amerického reaktoru AP1000 nepovedlo taveninu uvnitř nádoby uchladiť, by mohlo vzniknout značné bezpečnostní riziko, vzhledem k tomu, že reaktor neobsahuje žádný lapač. Ovšem i tak obsahuje důmyslný systém chlazení, který by neměl tuto skutečnost dovolit [41]. I přes to se mi jeví jako bezpečnější řešení reaktor s lapačem umístěným pod nádobou. Proto v této kategorii se reaktor AP1000 umístí na posledním místě a dva zbylé reaktory vyjdou na společném místě.

### **Bezpečnost CDF a LERF**

CDF a LERF jsou indikátory bezpečnosti jaderných reaktorů, které vyjadřují pravděpodobnost výskytu jednotlivých událostí v reaktoru, jako je poškození aktivní zóny nebo velký únik radioaktivních látek. Tyto ukazatele jsou určeny na základě pravděpodobnosti a jsou využívány k posouzení bezpečnosti jaderných reaktorů. Čím menší číslo z výpočtu jednotlivých reaktorů vystoupí, tím menší pravděpodobnost vzniku nehody.

Dle výzkumu se jako nejbezpečnější návrh reaktoru jeví AP1000. Jako druhý se umístí EPR1200 a na posledním místě skončí APR1000. Tyto informace ovšem nemusí být zcela přesné, protože tyto hodnoty jsou součástí bezpečnostních analýz a studií, které provádí jaderné energetické společnosti a regulační orgány a jsou považovány za citlivé informace, které jsou chráněny podle zákona.

CDF a LERF jsou klíčovými faktory, které se při návrhu jaderné elektrárny zvažují a zohledňují se při hodnocení její bezpečnosti a všechny jaderné elektrárny musí splňovat přísné bezpečnostní normy a kritéria stanovená regulačními orgány a musí být schváleny před uvedením do provozu.

### **Reference**

Jako posledním hodnotícím kritériem, které je určitě důležité, jsou reference z ostatních zemích, které dané reaktory již na svém území úspěšně vystavěly a jsou plně funkční.

Například reaktor AP1000 již byl spuštěn v Číně a v dalších zemích probíhá anebo se plánuje jeho výstavba [42]. Na druhou stranu reaktor APR1000 zatím nikde vystavěn nebyl ani jeho výstavba zatím neprobíhá. EPR1200 také ještě nebyl vystavěn. To činí reaktor AP1000 jako vítěze v této kategorii.

## **7.1 Preferovaný projekt**

Ve výše uvedených hodnoceních se v každé kategorii jednotlivé projekty ukázaly jako dominantní. Osobně si myslím, že bychom měli dbát hlavně na bezpečnost a cenu jako takovou, řešit až na druhém místě. Reaktory AP1000 a APR1000 se ukázaly být velmi podobné. To je hlavně dáno tím, že jihokorejský APR1000 vystupuje z projektu AP1000. Zde se APR1000 jeví

jako horší varianta mezi těmito dvěma projekty. Řekl bych, že APR1000 bude asi nejhorší řešení, co se týče bezpečnosti a produkovaného výkonu. Ovšem pravděpodobně ve finále si získá své místo až po zjištění cen, které do jednotlivých projektů bude třeba investovat. Myslím si totiž, že bude nejlevnější. Mé hlavní kritérium je ale bezpečnost, tudíž tento projekt vyřazují.

Mezi dvěma zbylými soupeři zbývá americký AP1000 a evropský EPR1200. Dle bezpečnostních CDF a LERF indikátorů vychází vítězně reaktor AP1000. To však nemusí nic znamenat, protože reaktor EPR1200 ještě není nikde vystavěn a hodnoty nemusí být zcela pravdivé. Dle konstrukce se EPR1200 zdá být robustnější a zároveň produkuje větší výkon. Zároveň na rozdíl od AP1000 obsahuje i lapač aktivní zóny, který v případě těžké havárie bude určitě výhodnější. S největší pravděpodobností bude tento reaktor i nejdražší. Z hlediska bezpečnosti se tedy tyto reaktory mohou téměř rovnat s tím, že bych řekl, že lehce vede EPR1200. Zároveň tento reaktor je dílem země Evropy, a tím pádem bychom mohli kladně přispět ekonomice EU. Mým výběrem a pomyslným vítězem je tedy reaktor EPR1200 od francouzské společnosti EdF.

Při rozhodování také hraje roli i procento využití domácích společností při výstavbě. To ovšem není v nynější době známo a nelze tedy z hlediska tohoto kritéria hodnotit. Můj názor se může lišit s finálním rozhodnutím České republiky a také v době psaní této práce nebyly všechny informace veřejně dostupné, a tudíž by zveřejnění těchto informací mohlo ve finále změnit celkový výsledek.

## Závěr

V reakci na závěry a doporučení Národního akčního plánu rozvoje jaderné energetiky vznikl projekt Nový jaderný zdroj pro Českou republiku v lokalitě Dukovany. Tento plán se snaží najít správnou náhradu za stárnoucí jaderné reaktory, které se v jaderné elektrárně Dukovany nacházejí. Je nutné nahradit jejich stávající výkon a zároveň je důležité přihlížet i na stále rostoucí spotřebu elektrické energie. Aby Česká republika byla do budoucna energeticky soběstačná, je nutno nový zdroj vystavět do roku 2036. Nový blok by měl produkovat maximální elektrický výkon o hodnotě 1200 MW.

Vítěz tendru by měl i v budoucnu být hlavním představitelem při výstavbě dalších bloků, jako například v naší druhé elektrárně Temelín nebo v nových jaderných elektrárnách, které s rostoucí spotřebou energie budou s největší pravděpodobností potřeba. Výběr správného dodavatele pro Nový jaderný zdroj je tedy klíčový. Při výběru dodavatele je třeba zohlednit široké spektrum kritérií včetně jaderné a státní bezpečnosti a spolupráce s domácím průmyslem.

Jaderná energetika zaznamenala významný pokrok od svého vzniku. Nukleární katastrofy měly klíčový vliv na vývoj jaderných elektráren a vedly ke zlepšení jaderné bezpečnosti po celém světě. Projekty reaktorů, které jsou uvažovány, se liší technickým řešením a způsobem zajištění jaderné bezpečnosti. Všechny reaktory jsou III+. generace a jsou schopny předejít nebezpečným haváriím i bez přísunu elektrické energie. Obsahují aktivní i pasivní prvky důležité k bezpečnému chodu elektrárny a všechny disponují evropskou certifikací.

Cílem bakalářské práce bylo porovnat návrhy od jednotlivých společností, které jsou uvedeny v tendru na Nový jaderný zdroj. Byly vysvětleny podmínky a kritéria, která byla použita při vyhodnocování návrhů. V samotném závěru byl vybrán mnou preferovaný dodavatel podle srovnání, které v práci proběhlo. Zároveň bylo cílem seznámit čtenáře s problematikou jaderné energetiky a poukázat i na fakt, že se v průběhu let vyvinula a je mnohonásobně bezpečnější než kdysi.

Vzhledem k tomu, že nejsou dostupné přesné informace o nových projektech a jejich úpravách pro běžnou veřejnost, lze předpokládat, že by bylo možné práci do budoucna rozšířit právě o nové fakty a tím pádem by mohl být ovlivněn i výsledek mé práce.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] ULMER-SCHOLLE, Dana S. *The Basics of Nuclear Energy – An Overview*. New Mexico Bureau of Geology & Mineral Resources [online]. New Mexico: New Mexico Institute of Mining & Technology, 2022 [cit. 2023-01-24]. Dostupné z: <https://geoinfo.nmt.edu/resources/uranium/basics.html>
- [2] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika*. AstroNuklFyzika [online]. Ostrava, Nedatováno [cit. 2023-01-24]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika.htm>
- [3] MYNÁŘ, Petr et al. *Nový jaderný zdroj v Lokalitě Dukovany, Dokumentace vlivů záměru na životní prostředí*. Skupina ČEZ [online]. Brno: Amec Foster Wheeler, 2017 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/2021/05/dokumentace-vlivu-noveho-jaderneho-zdroje-v-lokalite-dukovany-na-zivotni-prostredi.pdf>
- [4] ORÁLKOVÁ, Jitka. *Pozitiva výroby jaderné energie*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 32 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/10541>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav inženýrství ochrany živ. prostředí. Vedoucí práce Vondruška, Milan.
- [5] *From Obninsk Beyond: Nuclear Power Conference Looks to Future*. International Atomic Energy Agency [online]. 2004 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/newscenter/news/obninsk-beyond-nuclear-power-conference-looks-future>
- [6] ARDIANSYAH, Harun. *The Case for Nuclear Energy* [online]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2022 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://penerbit.brin.go.id/press/catalog/download/562/479/11500?inline=1>
- [7] Generation II Reactors. *Radioactivity* [online]. [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: [https://radioactivity.eu.com/nuclearenergy/generation\\_ii\\_reactors](https://radioactivity.eu.com/nuclearenergy/generation_ii_reactors)
- [8] *Nuclear Reactor Types* [online]. London: The Institution of Electrical Engineers, 1993 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: [http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/kallman1/docs/nuclear\\_reactors.pdf](http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/kallman1/docs/nuclear_reactors.pdf)
- [9] *Základní typy jaderných reaktorů* [online]. Skupina ČEZ [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>
- [10] *Pressurized Water Reactor (PWR) Systems* [online]. USNRC Technical Training Center [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/04.pdf>
- [11] SHAW, Sydney. *Advantages of Pressurized Water Reactors (PWR)* [online]. Stanford University, 2017 [cit. 2023-03-18]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2017/ph241/shaw-s1/>
- [12] *Nuclear Reactors* [online]. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <http://nupex.eu/index.php?g=textcontent/nuclearenergy/nuclearreactors&lang=bg>

- [13] *Boiling Water Reactor Technology* [online]. London: National Nuclear Laboratory [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: [https://www.nnl.co.uk/wp-content/uploads/2019/01/bwr\\_position\\_paper\\_-\\_final\\_-\\_web.pdf](https://www.nnl.co.uk/wp-content/uploads/2019/01/bwr_position_paper_-_final_-_web.pdf)
- [14] *CANDU Fundamentals* [online]. CANDU [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://canteach.candu.org/content%20library/20040700.pdf>
- [15] NUCLEAR POWER REACTORS IN THE WORLD, IAEA, VIENNA, 2020, IAEA-RDS-2/40, ISBN 978-92-0-114820-9, ISSN 1011-2642
- [16] DEEPAKKUMAR, Yadav. *The Gas Cooled Reactors (GCR) and its Advantages and Disadvantages* [online]. 2022 [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.deepakkumaryadav.in/2022/01/the-gas-cooled-reactors-gcr-and-its.html>
- [17] *Other Designs of Nuclear Power Stations* [online]. IAEA [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: [https://nucleus.iaea.org/sites/graphiteknowledgebase/wiki/Guide\\_to\\_Graphite/Other%20Designs%20of%20Nuclear%20Power%20Stations.aspx](https://nucleus.iaea.org/sites/graphiteknowledgebase/wiki/Guide_to_Graphite/Other%20Designs%20of%20Nuclear%20Power%20Stations.aspx)
- [18] *Russian RBMK Reactor Design Information* [online]. Moscow: Nuclear Safety Institute, 1993 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/25/028/25028966.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/25/028/25028966.pdf)
- [19] KHODAREV, Eduard. *Liquid Metal Fast Breeder Reactors* [online]. IAEA [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull20-6/20604782938.pdf>
- [20] *Zadávací bezpečnostní zpráva pro nový jaderný zdroj v lokalitě Dukovany* [online]. Skupina ČEZ, 2022 [cit. 2023-03-16]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/2021/03/zadavaci-bezpecnostni-zprava-pro-novy-jaderny-zdroj-v-lokalite-dukovany\\_compressed.pdf](https://www.cez.cz/webpublic/file/edee/2021/03/zadavaci-bezpecnostni-zprava-pro-novy-jaderny-zdroj-v-lokalite-dukovany_compressed.pdf)
- [21] ŠOTOLA, Pavel. *Revitalizace Jaderné energetiky v ČR* [online]. MPO, 2022 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.jadernedny.cz/data/folders/01%20-%20REVITALIZACE%20JADERN%C3%89%20ENERGETIKY-f216.pdf>
- [22] *Energetika v ČR* [online]. Skupina ČEZ, 2022 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/cisla-a-statistiky/energetika-v-cr>
- [23] *Národní energetický mix* [online]. MPO, 2021 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument158059.html>, <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/narodni-energeticky-mix>
- [24] *Státní energetická koncepce* [online]. Praha: MPO, 2014 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/52841/60959/636207/priloha006.pdf>
- [25] *Nuclear Power in Czech Republic* [online]. World Nuclear Association, 2023 [cit. 2023-01-25]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/czech-republic.aspx>



- [26] *Historie a současnost EDU* [online]. Skupina ČEZ [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu/historie-a-soucasnost>
- [27] *Nový jaderný zdroj v lokalitě Dukovany* [online]. Skupina ČEZ [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/nove-jaderna-zdroje/nove-dukovany>
- [28] *Územní řízení* [online]. Skupina ČEZ [cit. 2023-02-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/nove-jaderna-zdroje/nove-dukovany/uzemni-rizeni>
- [29] ZÁVODSKÝ, Petr. *Nový jaderný zdroj pro ČR stav přípravy v roce 2022* [online]. Skupina ČEZ, 2022 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: [https://www.jadernedny.cz/data/folders/03%20-%20202200914\\_Prezentace\\_NJZ\\_EDUII\\_Jadern%C3%A9%20dny\\_final-f215.pdf](https://www.jadernedny.cz/data/folders/03%20-%20202200914_Prezentace_NJZ_EDUII_Jadern%C3%A9%20dny_final-f215.pdf)
- [30] *Rusko a Čína jsou ze hry o Dukovany* [online]. Česká tisková kancelář, 2021 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/ekonomika-rusko-a-cina-jsou-ze-hry-o-dukovany-40372221>
- [31] *History of George Westinghouse - Innovation Changing the World* [online]. Westinghouse Nuclear [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.westinghousenuclear.com/about/history>
- [32] *Toshiba sells Westinghouse-related assets in USA* [online]. World Nuclear News, 2018 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/C-Toshiba-sells-Westinghouse-related-assets-in-USA-0604185.html>
- [33] *Nuclear Power in South Korea* [online]. World Nuclear Association, 2023 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/south-korea.aspx>
- [34] *Nuclear Power in France* [online]. World Nuclear Association, 2023 [cit. 2023-02-16]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>
- [35] *EDU – Technologie a zabezpečení* [online]. Skupina ČEZ [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/edu/technologie-a-zabezpeceni>
- [36] *The VVER today* [online]. Moscow: ROSATOM [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/0be/0be1220af25741375138ecd1afb18743.pdf>
- [37] *Zátěžové zkoušky* [online]. SÚJB, 2012 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/aktualne/NarZprCZ.pdf>
- [38] *ETE – Technologie a zabezpečení* [online]. Skupina ČEZ [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete/technologie-a-zabezpeceni-1>

- [39] *Jaderná elektrárna Temelín* [online]. Skupina ČEZ [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete/index.shtml>
- [40] *AP1000 Nuclear Power Plant - Passive Safety Systems* [online]. Westinghouse [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/ap1000-pwr/safety/passive-safety-systems>
- [41] *AP1000 Design Control Document* [online]. Westinghouse [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A411.pdf>
- [42] *Fourth Chinese AP1000 enters commercial operation* [online]. World Nuclear News, 2019 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Fourth-Chinese-AP1000-enters-commercial-operation>
- [43] *Building carbon-free nuclear energy* [online]. Southern Company [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.southerncompany.com/innovation/vogtle-3-and-4.html>
- [44] *Contract signed for first AP1000 unit in Ukraine* [online]. Nuclear News, 2021 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.ans.org/news/article-3459/contract-signed-for-first-ap1000-unit-in-ukraine/>
- [45] *APR1000 – Advanced Power Reactor 1000* [online]. KHNP, 2019 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: [https://aris.iaea.org/PDF/APR1000\\_20191130\\_R2.pdf](https://aris.iaea.org/PDF/APR1000_20191130_R2.pdf)
- [46] *Status report - Advanced Power Reactor (APR1000)* [online]. KHNP, 2011 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/PDF/APR1000.pdf>
- [47] *APR1000 for Czech New Nuclear Build Project* [online]. KHNP, 2021 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: [https://www.jadernedny.cz/data/folders/KHNP\\_JD2021-f76.pdf](https://www.jadernedny.cz/data/folders/KHNP_JD2021-f76.pdf)
- [48] *EDF submits to the Czech operator ČEZ and its project company Elektrárna Dukovany II its Initial Bid for one EPR1200 reactor to be constructed at the Dukovany site in the Czech Republic* [online]. EdF, 2022 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: [https://www.edf.fr/sites/groupe/files/epresspack/4295/PR\\_EDF-submits-to-the-Czech-operator-CEZ-its-Initial-Bid-for-one-EPR1200-reactor.pdf](https://www.edf.fr/sites/groupe/files/epresspack/4295/PR_EDF-submits-to-the-Czech-operator-CEZ-its-Initial-Bid-for-one-EPR1200-reactor.pdf)
- [49] *Francouzský jaderný blok EPR1200 pro Česko – předpoklady a přínosy* [online]. AtomInfo, 2021 [cit. 2023-04-20]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2021/06/francouzsky-jaderny-blok-epr1200-pro-cesko-pre/>
- [50] LEVERENZ, Rüdiger a Andreas GÖBEL. *The European Pressurized Water Reactor: A Safe and Competitive Solution for Future Energy Needs* [online]. Framatome, 2004 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/37/086/37086871.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/086/37086871.pdf)
- [51] *Summary description of the core and fuel assemblies* [online]. UK-EPR [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <http://epr-reactor.co.uk/ssmod/liblocal/docs/V3/Volume%2020-%20Design%20and%20Safety/2.D%20-%20Reactor%20and%20Core/2.D.1%20-%20Summary%20Description%20-%20v2.pdf>

- [52] *Národní Zpráva: Jaderná elektrárna Dukovany* [online]. NÚJB, 2001 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni\\_zpravy/Priloha1.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/zpravy/narodni_zpravy/Priloha1.pdf)
- [53] VALEŠ, Vladimír. *Nový jaderný zdroj Dukovany a limity dopravy velkých komponent* [online]. All for Power, 2021 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://allforpower.cz/jaderna-energetika/novy-jaderny-zdroj-dukovany-a-limity-dopravy-velkych-komponent-444>
- [54] VĚTROVEC, Vladislav. *Lapač aktivní zóny* [online]. iDnes, 2012 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://vetrovec.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=307933>
- [55] ADAMEC, Petr. *Bezpečnostní návod* [online]. Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2018 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://vetrovec.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=307933>
- [56] *EUR Document Revision E2* [online]. European Utility Requirements, 2021 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.europeanutilityrequirements.eu/>
- [57] *Status Report - The Evolutionary Power Reactor (EPR)* [online]. Areva, 2011 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/PDF/EPR.pdf>
- [58] *Energetika a teplo: Jaderná energetika* [online]. Technický týdeník, 2016 [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.technickytydenik.cz/>