

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

## Posouzení proveditelnosti malých modulárních reaktorů

Feasibility assessment of small modular reactors

Jan SLUKA

Vedoucí práce: Mgr. Ing. Vít Klein, Ph.D.  
2023



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sluka** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **499192**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Elektrotechnika a management**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Posouzení proveditelnosti malých modulárních reaktorů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Feasibility assessment of small modular reactors**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Specifika malých modulárních reaktorů
- 2) Povolování malých modulárních reaktorů
- 3) Ekonomické hodnocení malého modulárního reaktoru v JETE při různých úrovních lokalizace
- 4) Hlediska komerčního uplatnění malých modulárních reaktorů

Seznam doporučené literatury:

- 1) BEČVÁŘ JOSEF. Jaderné elektrárny. 1. vyd. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1981. ISBN 04-237-81
- 2) DOLEŽAL JAROSLAV, ŠTASTNÝ JIŘÍ, ŠPETLÍK JAN, BOUČEK STANISLAV a BRETTSCHEIDER ZBYNĚK. Jaderné a klasické elektrárny. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- 3) IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2022 Edition [online]. 2022 [vid. 2022-10-18]. Dostupné z: [https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/2022%20IAEA%20SMR%20ARIS%20Booklet\\_rev11\\_with%20cover.pdf](https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/2022%20IAEA%20SMR%20ARIS%20Booklet_rev11_with%20cover.pdf)
- 4) KLIK FRANTIŠEK a DALIBA JAROSLAV. Jaderná energetika. 2. vyd. Praha: Vydavatelství Českého vysokého učení technického, 2002. ISBN 80-010-2550-0.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D. katedra elektroenergetiky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **23.01.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

Ing. Mgr. Vít Klein, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_ Podpis studenta



## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 22. 5. 2023

Jan Sluka



## **Poděkování**

Mé poděkování patří Mgr. Ing. Vítu Kleinovi, Ph.D., za jeho ochotu, vstřícnost a připomínky k této práci a za čas, který mi věnoval při vedení bakalářské práce. Dále děkuji panu Ing. Jakubovi Límanovi, Ph.D., za poskytnutí potřebných informací a materiálů a za jeho veškeré podněty vedoucí ke zdokonalení této práce. V neposlední řadě děkuji také své rodině a přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili.





## **Abstrakt**

Bakalářská práce seznamuje s nasazováním malých modulárních reaktorů, a to především v tuzemském prostředí. Popisuje specifika malých modulárních reaktorů, jejich výhody a nevýhody. Dále se věnuje procesu povolování jaderného zdroje, popřípadě povolování malých modulárních reaktorů jako takových.

Hlavní kapitolou je ekonomické hodnocení nového jaderného zdroje v podobě malého modulárního reaktoru v oblasti jaderné elektrárny Temelín. Na závěr jsou uvedena hlediska na tuto novou technologii.

## **Klíčová slova**

SMR, malý modulární reaktor, hodnocení, povolování, specifika, hlediska



## **Abstract**

The bachelor's thesis introduces the deployment of small modular reactors, primarily in the domestic environment. It describes the specifics of small modular reactors, their advantages and disadvantages. It also deals with the process of permitting a nuclear source, or the permitting of small modular reactors as such.

The main chapter is the economic evaluation of a new nuclear source in the form of a small modular reactor in the area of the Temelín nuclear power plant. At the end, there are points of view on this new technology.

## **Keywords**

SMR, small modular reactor, assessment, permitting, specifications, aspects



## Obsah

1. Úvod .....	1
2. Specifika malých modulárních reaktorů .....	2
2.1. Definice .....	2
2.2. Typy malých modulárních reaktorů .....	3
2.2.1. Vodou chlazené reaktory .....	3
2.2.2. Plynem chlazené reaktory .....	7
2.2.3. Reaktory chlazené tekutými kovy .....	8
2.2.4. Reaktory chlazené tekutými solemi .....	9
2.3. Výhody a nevýhody malých modulárních reaktorů .....	9
2.3.1. Výhody .....	9
2.3.2. Nevýhody .....	11
2.4. Uvažované designy malých modulárních reaktorů pro ČR .....	12
2.4.1. NuScale .....	12
2.4.2. SMART100 .....	13
2.4.3. SMR-160 .....	13
2.4.4. Nuward .....	14
2.4.5. UK SMR .....	15
2.4.6. BWRX-300 .....	15
2.4.7. Westinghouse SMR .....	16
2.4.8. Parametry uvažovaných designů malých modulárních reaktorů .....	17
3. Povolování malých modulárních reaktorů .....	19
3.1. Investorská činnost .....	19
3.2. Právní rámec povolování jaderného zdroje .....	20
3.2.1. Přípravná fáze .....	20
3.2.2. Fáze výstavby .....	22
3.3. Povolení dle Atomového zákona .....	24
3.4. Návrhy činností v oblasti malých modulárních reaktorů .....	26
3.5. Současný stav projektů malých modulárních reaktorů v ČR .....	27
3.5.1. Temelín .....	27
3.5.2. Další lokality .....	27
4. Ekonomické hodnocení SMR v JETE .....	28
4.1. Předpoklady .....	28
4.2. Vstupní parametry ekonomického modelu .....	29
4.2.1. Investiční část .....	30

4.2.2.	Provozní náklady .....	31
4.2.3.	Diskont .....	31
4.2.4.	Tržní cena elektřiny a inflace .....	32
4.2.5.	Lokalizace personálu .....	32
4.2.6.	Charakteristiky projektu .....	33
4.3.	Kritéria ekonomické efektivity .....	33
4.3.1.	Čistá současná hodnota .....	33
4.3.2.	Roční ekvivalentní peněžní tok .....	34
4.3.3.	Vnitřní výnosové procento .....	34
4.3.4.	Doba splacení .....	34
4.3.5.	Diskontovaná doba splacení .....	35
4.3.6.	Výnosnost investice.....	35
4.4.	Výsledek ekonomické analýzy .....	36
4.5.	Citlivostní analýza .....	39
4.5.1.	Eskalace ceny elektřiny .....	39
4.5.2.	Využití maxima .....	40
4.5.3.	Diskontní míra.....	41
4.5.4.	Investiční náklady.....	42
4.5.5.	Inflace.....	42
4.5.6.	Lokalizace .....	43
4.6.	Rekapitulace hlavních vstupů a výsledků ekonomické analýzy.....	44
5.	Hlediska komerčního uplatnění SMR .....	45
5.1.	Uplatnění SMR .....	45
5.1.1.	Elektrická energie.....	46
5.1.2.	Tepelná energie .....	46
5.1.3.	Výroba vodíku.....	46
5.2.	Kvalitativní výzkum .....	46
5.2.1.	Dotazník .....	47
5.2.2.	Shrnutí výzkumu .....	52
6.	Závěr .....	55
7.	Seznam použité literatury a pramenů .....	57
8.	Seznam příloh .....	60

## Seznam obrázků

Obr. 2.1 Hlavní komponenty primárního okruhu tlakovodní elektrárny .....	4
Obr. 2.2: Integrální reaktor s vyznačeným tokem chladiva .....	5
Obr. 2.3: Zjednodušené schéma elektrárny s varným reaktorem.....	6
Obr. 2.4: Schéma typického reaktoru CANDU .....	7
Obr. 2.5: Design projektu HeFASTo .....	8
Obr. 2.6: Kompenzace investičních nákladů vzhledem k velkým reaktorům .....	11
Obr. 2.7: Výřez budovy s reaktorem – šesti modulový design VOYGR-6 .....	13
Obr. 2.8: Design projektu SMR-160 společnosti Holtec International.....	14
Obr. 2.9: Navrhovaný design stavby UK SMR společnosti Rolls-Royce .....	15
Obr. 2.10: Výřez projektu BWRX-300.....	16
Obr. 3.1: Strategické plánování ČR v oblasti energetiky.....	21
Obr. 3.2: Harmonogram činností v přípravné fázi projektového řízení.....	22
Obr. 3.3: Harmonogram činností ve výstavbové fázi projektového řízení .....	24
Obr. 3.4: Harmonogram projektového řízení SMR v ČR.....	25
Obr. 4.1: Kumulovaný diskontovaný CF projektu s vyznačenou NPV a DPP.....	37
Obr. 4.2: Závislost NPV na eskalaci ceny elektřiny .....	39
Obr. 4.3: Závislost PP a DPP na eskalaci ceny elektřiny.....	40
Obr. 4.4: Závislost NPV a IRR na době využití maxima.....	41
Obr. 4.5: Závislost NPV na diskontní míře.....	41
Obr. 4.6: Závislost NPV a IRR na měrných investičních nákladech.....	42
Obr. 4.7: Závislost NPV na meziroční inflační míře .....	43
Obr. 4.8: Závislost DPFO stavebního personálu na lokalizaci .....	43

## Seznam tabulek

Tab. 2.1: Rozdělení malých modulárních reaktorů .....	2
Tab. 2.2: Shrnutí významných parametrů projektu dodavatelů – část první.....	17
Tab. 2.3: Shrnutí významných parametrů projektu dodavatelů – část druhá .....	18
Tab. 3.1: Etapy neaktivních a aktivních zkoušek ve výstavbové fázi projektu.....	23
Tab. 3.2: Povolení jaderného zařízení dle Atomového zákona .....	24
Tab. 4.1: Vstupní veličiny investiční části projektu .....	31
Tab. 4.2: Provozní náklady projektu .....	31
Tab. 4.3: Základní charakteristiky projektu .....	33
Tab. 4.4: Výsledky ekonomické analýzy .....	38
Tab. 4.5: Rekapitulační tabulka vstupů a výstupů ekonomické analýzy.....	44



## Seznam zkratek

ASEK	Aktualizovaná energetická koncepce
AZ	Aktivní zkoušky
BWR	Varný reaktor
CANDU	Představitel těžkovodních reaktorů
CAPM	Model oceňování kapitálových aktiv
CDF	Pravděpodobnost závažného poškození aktivní zóny
CF	Peněžní tok
COL	Žádost o kombinovanou licenci
ČR	Česká republika
ČSÚ	Český statistický úřad
DG	Diesel generátor
DOE	Americké ministerstvo energetiky
DOSS	Dotčené orgány státní správy
DPFO	Daň z příjmu fyzických osob
DPP	Diskontovaná doba splácení
EIA	Posuzování vlivů na životní prostředí
ES	Energetické spouštění
ETE	Elektrárna Temelín
FOAK	První svého druhu
FS	Fyzikální spouštění
FZ	Funkční zkoušky
GCR	Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory
GDA	Britský licenční proces
GFR	Plynem chlazené rychlé reaktory
HCC	Hlavní cirkulační čerpadlo
HDP	Hrubý domácí produkt
HeFASTo	Projekt rychlého plynem chlazeného modulárního reaktoru
IAEA	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
IHZ	Integrovaná hydrozkouška

IP	Identifikace příležitosti
IRR	Vnitřní výnosové procento
JE	Jaderná elektrárna
JP	Jaderné palivo
JV	Forma spolupráce
JZ	Jaderné zařízení
KCF	Kumulovaný peněžní/hotovostní tok
KDCF	Kumulovaný diskontovaný peněžní/hotovostní tok
KV	Komplexní vyzkoušení
MOX	Směsné oxidické palivo
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
NPV	Čistá současná hodnota
NSSC	Úřad pro jadernou bezpečnost a zabezpečení v Jižní Koreji
NTK	Nadrozměrné a těžké komponenty
NZ	Neaktivní zkoušky
O&M	Provoz a údržba
ONR	Britský národní jaderný regulátor
OTE	Operátor trhu s elektřinou
OZE	Obnovitelný zdroj energie
PBZ	Předběžná bezpečnostní zpráva
PČO	Pomontážní čistící operace
PHWR	Těžkovodní reaktor
PP	Doba splácení
PÚR	Politika územního rozvoje
PWR	Tlakovodní reaktor
RCF	Roční ekvivalentní peněžní/hotovostní tok
ROI	Výnosnost investice
SCZT	Systémy centrálního zásobování teplem
SDA	Schválení standardního projektu

SEK	Státní energetická koncepce
SKŘ	System kontrolы řízení
SMR	Malý modulární reaktor
SUIP	Státní úřad inspekce práce
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivního odpadu
TIČR	Technická inspekce České republiky
ÚEK	Územní energetická koncepce
ÚP	Územní plánování
ÚPD	Územně plánovací dokumentace
US NRC	Úřad pro jadernou bezpečnost v USA
VDR	Kanadský licenční proces
ZBZ	Zadávací bezpečnostní zpráva
ZIK	Zkouška integrity kontejnmentu
ZP	Zkušební provoz
ZÚR	Zásady územního rozvoje



# 1. Úvod

Vzhledem k požadavkům společnosti na snižování emisí v podobě vyřazování neekologických zdrojů energie, se nabízí otázka, čím se tyto neekologické zdroje nahradí. Atraktivními kandidáty jsou v současné době zdroje energie využívající jaderných technologií, které umožňují konstantní dodávku energie, a jsou tak spolu s obnovitelnými zdroji energie uvažovány při utváření novodobého energetického mixu. Vývoj v jaderném sektoru dal za vznik nové generaci jaderných elektráren, které disponují inovacemi především bezpečnostního druhu. Favoritem jsou malé modulární reaktory, které jsou v současné době na vzestupu. Praktickému využívání technologie předchází dlouhodobá příprava s podstatnými riziky. I přes rizika se využití jaderných technologií stává v současné době lukrativním, i z pohledu přechodu státu k nízkoemisní výrobě energie.

Tato práce se věnuje popisu problematiky spojené s malými modulárními reaktory, technologií v poměrně rané době vývoje. Jmenovitě budou uvedeny základní druhy vyvíjených malých modulárních reaktorů a jejich specifika. Dále bude nastíněn povolovací rámec jaderného zařízení na území České republiky a hodnocení plánovaného malého modulárního reaktoru v lokalitě jaderné elektrárny Temelín. Poslední část shrne využití malých modulárních reaktorů, a poskytne názor odborníků na problematiku nasazování malých modulárních reaktorů v České republice.

Cílem práce je ukázat čtenáři způsob začlenění nové jaderné technologie mezi dosud používané zdroje energie.

## 2. Specifika malých modulárních reaktorů

Z historického hlediska se společnost zaměřovala u jaderných elektráren na dosažení co možná největšího výkonu. Vývoj a posun času však zvýšil atraktivitu menších jaderných zdrojů energií hned z několika důvodů. Proto se vyspělejší země znalé v jaderné technologii nyní věnují malým modulárním reaktorům, které by mohli významně přispět k řešení energetických a tím i ekonomických problémů.

### 2.1. Definice

Výraz „malé“ ve spojení malé modulární reaktory vyjadřuje instalovaný výkon reaktoru. Dle Mezinárodní agentury pro atomovou energii – *International Atomic Energy Agency* (IAEA) se rozdělují reaktory podle instalovaných elektrických výkonů. Zde pojem „malý“ označuje výkon s horní hranicí 300 MWe. Americké ministerstvo energetiky – *Department of Energy* (DOE) definuje hranice podle instalovaných tepelných výkonů kde malé modulární reaktory spadají do skupiny ohraničené instalovanými tepelnými výkony 250 až 1000 MWt [19][27].

Klasifikace	IAEA [MWe]	US DOE [MWt]
<b>Mini reaktory</b>	Nedefinováno	<250
<b>Malé reaktory</b>	<300	250–1000
<b>Střední reaktory</b>	300–700	1000–2000
<b>Velké reaktory</b>	>700	>2000

Tab. 2.1: Rozdělení malých modulárních reaktorů

Modularita je pak vlastnost reaktoru, která představuje jeden z hlavních aspektů této technologie. Výstavbu je možné přizpůsobit možnostem dopravní cesty a optimalizovat tak proces transportu dílčích součástí, které se na prostoru výstavby smontují dohromady. Některé designy jsou navíc modulární ve smyslu schopnosti postupného zvyšování instalovaného výkonu „po modulech“, to poskytuje možnost rozdělit investiční náklady, a tedy i možnost využít výnos z provozované části pro financování dalších modulů/bloků.

## 2.2. Typy malých modulárních reaktorů

V současné době se zdokonalování SMR věnují společnosti po celém světě. Princip jaderného štěpení v malých modulárních reaktorech je ale v zásadě stejný. Z hlediska využití typu neutronů ke štěpení jaderného paliva se rozdělují na tepelné a rychlé reaktory. Tepelné reaktory obsahují moderátory, které zpomalují neutrony tak, aby mohla být uskutečněna štěpná reakce. Jedná se o dnes konvenčně využívaný princip, který je podroben dlouhodobému provozu a testování a veškeré komerční reaktory využívají tento princip.

Druhý typ reaktorů pracuje s rychlými neutrony, tedy bez moderátoru. Nevýhodou je nutnost vyššího obohacení paliva, které je na rozdíl od paliva používaného v tepelných reaktorech, potenciálně vojensky zneužitelné. Hlavní výhodou rychlých reaktorů je ale možnost vyprodukovat více štěpného materiálu než spotřebovaného a tím štěpný materiál rozmnožovat během přeměny jaderné energie v tepelnou.

Přestože jsou v nynější době tepelné reaktory lukrativnější volbou pro komerční využití a rychlé reaktory jsou především ve fázi návrhů, projektování a testování jak ve velkých, tak malých modulárních variantách, je potřeba myslet do budoucna, kde budou mít rychlé reaktory zcela jistě důležité zastoupení kvůli jejich potenciálnímu využití pro předpoklad udržitelnosti jaderné energetiky [15].

Vhodným dělicím faktorem může být také použité chladivo v reaktoru, jelikož se jedná o stěžejní faktor doprovázený specifickými rysy jednotlivých reaktorů. Reaktory chlazené vodou jsou typicky tepelné. Reaktory chlazené roztavenými kovy jsou pak typicky rychlé. Reaktory chlazené solemi nebo plynem existují v obou variantách.

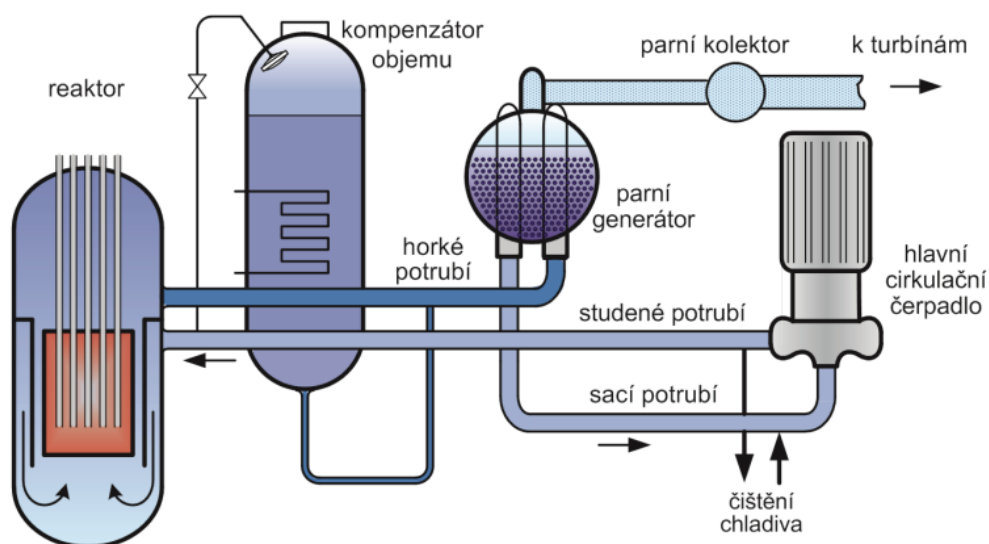
### 2.2.1. Vodou chlazené reaktory

Nejvyšší počet komerčních reaktorů ve světě jsou reaktory chlazené vodou. Je tedy logické že i mezi SMR budou zastupovat nejvyšší procento.

Reaktory chlazené vodou lze rozdělit na lehkovodní a těžkovodní reaktory. Lehkovodní reaktory využívají jako chladicí médium (a moderátor) lehkou demineralizovanou vodu. Těžkovodní reaktory jsou pak moderovány a chlazeny těžkou vodou.

### 2.2.1.1. Tlakovodní reaktory

Tlakovodní reaktory – *Pressurized Water Reactors* (PWR) jsou nejzastoupenější skupinou komerčně využívaných reaktorů na světě. Během doby delší než 50 let se reaktor postupně zdokonaloval a standardizoval, základní princip se přitom nezměnil. Tento typ reaktoru je využíván mimo jiné ve dvou českých jaderných elektrárnách, a to v oblasti Dukovan a Temelína.



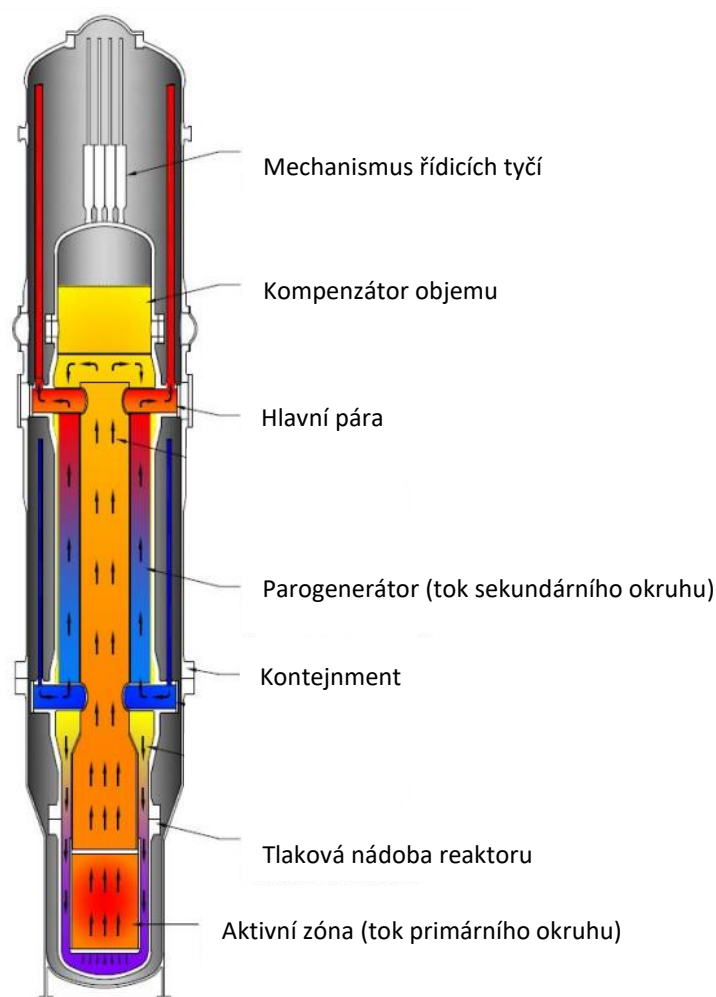
Obr. 2.1 Hlavní komponenty primárního okruhu tlakovodní elektrárny [10]

Elektrárna s tlakovodním reaktorem obsahuje typicky primární a sekundární okruh. V primárním okruhu obsahující reaktor je voda, tj. chladicí médium a zároveň moderátor, udržována v kapalném skupenství vysokými tlaky, typicky 10 až 16 MPa. V palivových proutcích plněných oxidem uranickým probíhá řízená štěpná reakce, při které se kinetická energie neutronů přemění na teplo předané chladicí vodě. Štěpením ohřátá voda předává část tepelné energie v parogenerátoru sekundárnímu okruhu a poté se vrací zpět do reaktoru. Střední ohřev vody v reaktoru je 20 až 35 °C a výstupní teplota se pohybuje mezi 270 až 335 °C. Sekundární okruh je oddělen od primárního okruhu a funguje typicky na základě Rankinova–Clausiova cyklu [10].

Novodobou variantou tlakovodního reaktoru je jeho integrální provedení, které je výhodné nejen z hlediska modularity reaktoru, ale především zvyšuje bezpečnost reaktoru už jen z principu konfigurace všech částí. Hlavní prvky primárního okruhu, tj. aktivní zóna, parogenerátor, kompenzátor a mechanismy regulačních tyčí jsou obsaženy v tlakové nádobě. Tímto způsobem je zmenšena potenciální hrozba prasknutí



hlavního cirkulačního potrubí s následnou ztrátou chladicího média za přijatelnou cenu v podobě větších rozměrů tlakové nádoby [31].

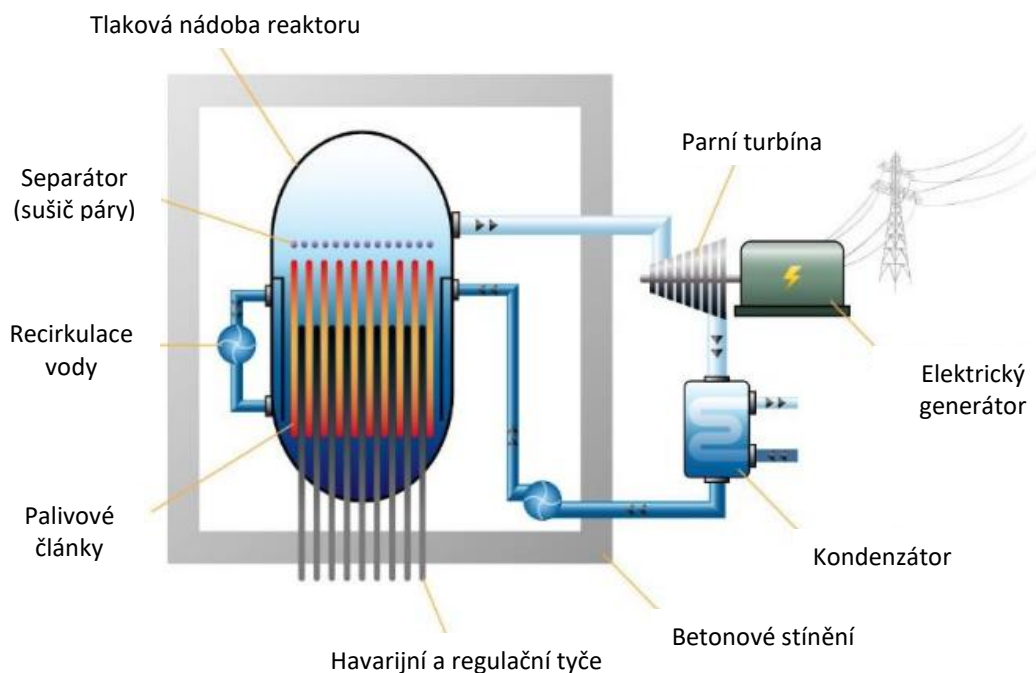


Obr. 2.2: Integrální reaktor s vyznačeným tokem chladiva [11]

### 2.2.1.2. Varné reaktory

Druhým typem lehkovodního reaktoru je reaktor varný – *Boiling Water Reactor* (BWR). Hlavními výhodami oproti tlakovodnímu reaktoru jsou především investiční náklady na výstavbu a nižší tlak v reaktorové nádobě než v reaktoru tlakovodním. Výstupní teplota je přibližně 288 °C a střední hodnota ohřevu 7 až 17 °C. Voda se mění na páru již v tlakové nádobě reaktoru a prochází celým cyklem elektrárny. Protože je voda i moderátorem, je potřeba zajistit v oblasti aktivní zóny stálý obsah páry ve vodě [1]. Elektrárna je tedy jednookruhová a nemá parogenerátor, čímž se zvyšuje účinnost tepelného cyklu oproti elektrárnám s více okruhy. Nevýhodou je, že chladivo se průchodem přes neutronové toky v aktivní zóně stává radioaktivně kontaminovaným a průběhem tepelného cyklu kontaminuje veškeré technologické součásti tepelného

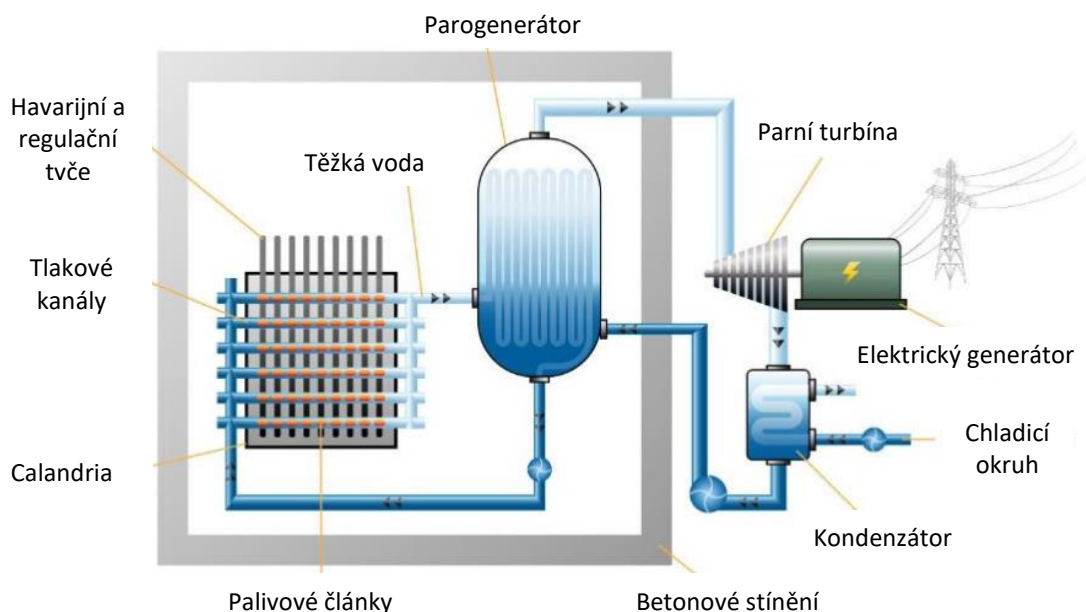
oběhu. Je tedy nutné provádět přísnější bezpečnostní opatření než v elektrárnách s tlakovodními reaktory [10].



Obr. 2.3: Zjednodušené schéma elektrárny s varným reaktorem [5]

### 2.2.1.3. Těžkovodní reaktory

Těžkovodní reaktory – *Pressurized Heavy-Water Reactor* (PHWR) nesou název podle moderátoru a chladicího média. Tím je tzv. těžká voda tvořená kyslíkem a deuteriem. Po PWR a BWR jsou těžkovodní reaktory třetími nejčastěji komerčně používanými reaktory. Nejvýznamnějším představitelem této skupiny jsou kanadské reaktory – *CANada Deuterium-Uranium* (CANDU). Těžká voda je jako moderátor efektivnější než klasická voda, a to umožňuje využití přírodního uranu jako paliva. To zjednodušuje palivový cyklus a tím je provoz ekonomičtější. Tlak těžké vody v tlakové nádobě je v podobných rozmezích jako ve varném reaktoru. Výstupní teplota je 305 °C a střední hodnota ohřevu může být až 45 °C [5].



Obr. 2.4: Schéma typického reaktoru CANDU [5]

## 2.2.2. Plynem chlazené reaktory

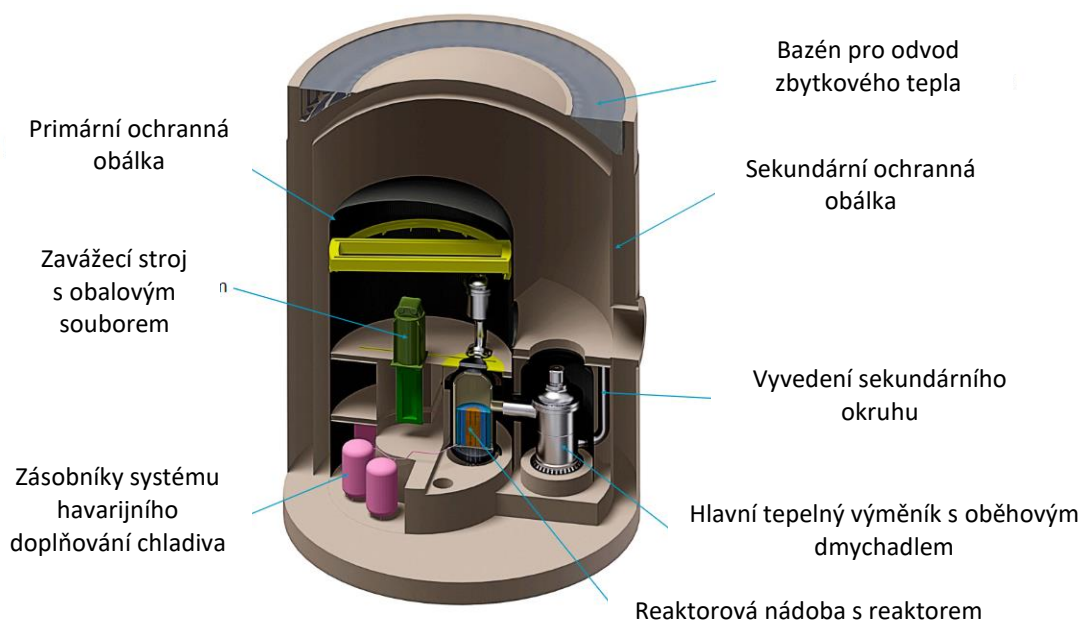
Již od samého počátku jaderné energetiky byly vyvíjeny plynem chlazené reaktory. Není tedy divu, že je ve světě snaha o modularizaci i těchto reaktorů. Reaktory chlazené plynem jsou buďto vysokoteplotní, obsahující typicky grafitový moderátor, pracující s tepelnými neutrony, nebo rychlé množivé, pracující s rychlými neutrony.

### 2.2.2.1. Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory

Jako reaktory chlazené vodou i vysokoteplotní plynem chlazený reaktor – *Gas-Cooled Reactor* (GCR) se řadí mezi tepelné reaktory. Jako moderátor je zde grafit a chladicím médiem je typicky oxid uhličitý nebo hélium. Palivem je vysoce obohacený uran v podobě částic s obalem pro udržení tvaru a zamezení úniku štěpných produktů při teplotách až 2000 °C. Chladivo o tlaku 3 až 5 MPa dosahuje při výstupu z reaktoru teploty 750 až 780 °C při střední hodnotě ohřevu až 500 °C. Díky vyšší teplotě oproti vodou chlazených reaktorech se nabízí využití pro teplotně náročné procesy jako je výroba vodíku. I když se elektrárny s tímto reaktorem provozují typicky jako dvouokruhové, parametry plynu umožňují i jednookruhový provoz s podstatně vyšší účinností tepelného cyklu. Celková účinnost elektrárny se dá také zvýšit integrací součástí, která zapříčiní snížení vlastní spotřeby a vyšší bezpečnost. Nastávají zde materiálové problémy kvůli korozi způsobené vysokou teplotou chladicího média [10].

### 2.2.2.2. Plynem chlazené rychlé reaktory

Jedním z ojedinělých projektů plynem chlazených rychlých reaktorů – *Gas-Cooled Fast Reactor* (GFR) je český projekt HeFASTo. Jak název napovídá, chladicím médiem je zde hélium. S tím se pojí obdobná materiálová rizika jako u GCR i když se jedná o rychlý reaktor. Tlakem v reaktorové nádobě 7,5 MPa, střední hodnotou ohřevu 450 °C a výstupní teplotou reaktoru 900 °C konkuruje GCR stejným průmyslovým využitím. Výhodou je možnost využití vyhořelého paliva reaktorů chlazených vodou v podobě směsného paliva MOX, které v tomto případě zvyšuje celkovou ekonomiku palivového



cyklu [29].

Obr. 2.5: Design projektu HeFASTo [29]

### 2.2.3. Reaktory chlazené tekutými kovy

Důležitou podmínkou pro funkčnost reaktorů pracujících s rychlými neutrony, jimiž reaktory chlazené tekutými kovy jsou, je použití takového chladicího média, které neutrony neabsorbují ani nezpomalují. V tomto ohledu se jeví jako vhodnou volbou například slitiny olova a bizmutu ale především sodík. Je relativně levný a disponuje vysokou tepelnou vodivostí, měrnou tepelnou kapacitou a bodem varu (cca 883 °C při atmosférickém tlaku). To umožňuje provoz při nízkém tlaku snižující riziko havárie, při které by byla zaručena přirozená cirkulace. Nevýhodou je pak nutnost udržovat kov v tekutém stavu nebo problematická reaktivita sodíku s vodou a vzduchem, která klade vysoké materiálové a těsnící nároky na celý primární okruh reaktoru. Momentálně

vyvíjené reaktory chlazené sodíkem pracují při tlaku v reaktoru kolem 0,2 MPa a s výstupní teplotou reaktoru přibližně 510 °C a střední hodnotou ohřevu 155 °C [1][2].

#### **2.2.4. Reaktory chlazené tekutými solemi**

Poslední aktivně vyvíjená skupina malých modulárních reaktorů pracuje i s rychlými, ale především s tepelnými neutrony. S grafitovým moderátorem jsou jejich chladičem tekuté soli, nejčastěji fluoridy, díky jejich chemické stabilitě a vysoké teplotě varu. Specifickým prvkem těchto reaktorů je kapalné palivo a možnost adaptace reaktoru na různé palivové cykly. Kapalné palivo umožňuje rychlou regulaci výkonu, a tedy i zvýšení bezpečnosti. Dalším bezpečnostním prvkem je poměrně nízký tlak v tlakové nádobě reaktoru, typicky do jednoho MPa. Střední hodnota ohřevu může být až 150 °C při výstupní teplotě 650 °C. To umožňuje využití v průmyslu vyžadující vysoké teploty [1].

### **2.3. Výhody a nevýhody malých modulárních reaktorů**

Nyní jsme seznámeni se základními technologickými rysy reaktorů. Je potřeba zdůraznit důvody, díky kterým je technologie SMR dnes považována za výhodnou. Každá technologie má výhody i nevýhody a SMR nejsou výjimkou. Je tedy potřeba zmínit nejen silné ale i slabé stránky nebo možná rizika spojená s výstavbou nebo provozem.

#### **2.3.1. Výhody**

Výrazným faktorem je, že u SMR se počítá s využitím reaktorů III+ generace, která klade důraz na bezpečnost, která je hlavním předmětem diskusí u jaderných technologií. Technologie SMR využívá pasivních bezpečnostních systémů, které výrazně snižují eskalaci a následky možné havárie. Jedná se o další snížení rizika těžké havárie, díky kterému lze například uvažovat o možnosti zhotovení SMR blíže k průmyslovým a osídleným oblastem, doprovázené snížením ztrát přenosu energie, a tedy zvýšením celkové efektivity.

Modularita je ve skutečnosti dvojitá stejnojmenná vlastnost, z nichž každá znamená něco jiného.

- Jak již bylo nastíněno v kapitole s definicí SMR, stěžejní vlastností je modularita. Tím se rozumí možnost konstrukce jednotlivých součástí u výrobce, které se dopraví na staveniště. Hlavní komponenty se tedy nemontují na místě

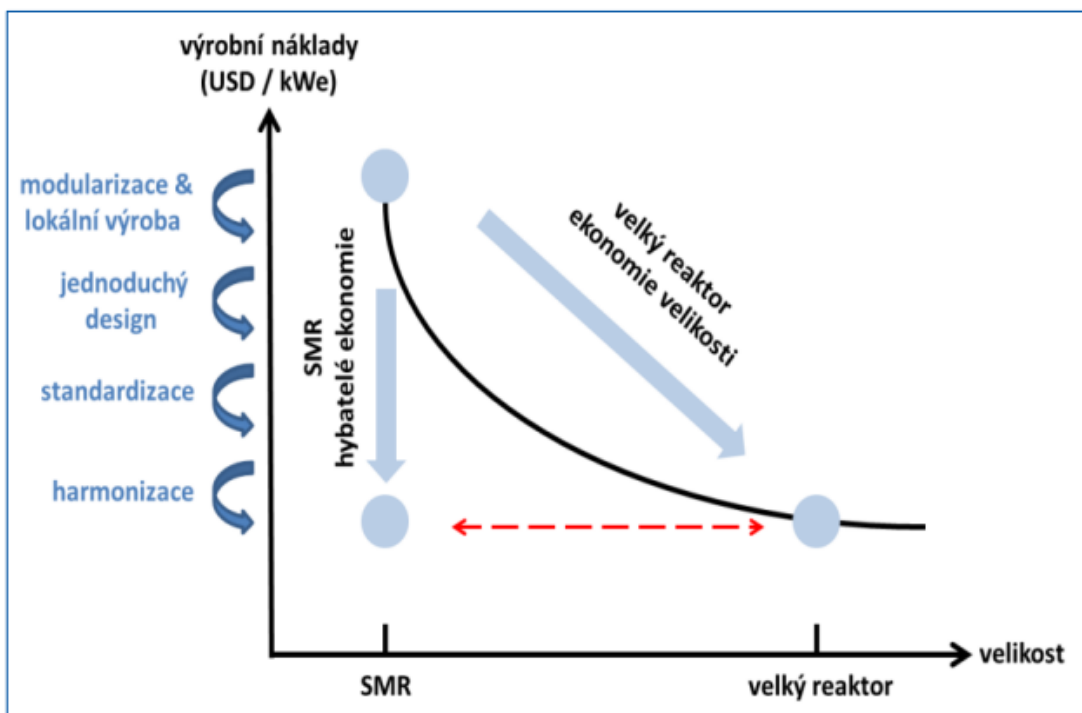
výstavby, jak je zvykem u elektráren o velkých instalovaných výkonech, nýbrž se prefabrikují. To umožní jistou úroveň unifikace, a tedy i zvýšení kvality a urychlení výstavby, potažmo snížení investičních nákladů. Úspěšné provedení sériové výroby se projeví ekonomicky také v podobě snížení cen technologie.

- Některé projekty SMR navíc umožňují modularizaci, která v tomto smyslu vyjadřuje schopnost rozdělení primárního okruhu do separátních bloků/modulů. Provozní stav lze tak docílit i s částí instalovaných modulů a další moduly lze např. financovat z výnosů provozované části. Moduly lze napojovat postupně, a tak se rozdělí investiční náklady do delšího časového intervalu.

Některé projekty SMR umožňují integrální uspořádání primárního okruhu. To umožňuje zahrnout celý primární okruh elektrárny do tlakové nádoby, čímž se zvyšuje celková bezpečnost minimalizací rizikových komponent primárního okruhu. Integrální uspořádání usnadňuje celkový provoz a u menších modulů i dopravu.

Jako všechny jaderné elektrárny jsou SMR ze své podstaty ideálním zdrojem energie pro základní zatížení. Kromě primární výroby elektrické energie lze v době nižší spotřeby elektrické energie využít SMR jako zdroj tepla nebo k nabízení podpůrných služeb. Vysokoteplotní SMR lze využít také pro vysokoteplotní průmysl, jako např. výrobu vodíku, odsolování vody atd. Navíc je výroba energie SMR nízkoemisní a lze ho brát v úvahu při vytváření novodobého ekologického energetického mixu.

Ekonomická konkurence schopnost SMR oproti klasickým velkým reaktorům je snižována menším instalovaným výkonem, zato je zvyšována kombinací již zmíněných faktorů. Primárně jde o modularizaci, celkové zjednodušení systému, standardizace a harmonizace výroby a snížení doby výstavby. Potenciál nižších investičních nákladů při zachování benefitů zdrojů energie na bázi jaderné technologie, s možností multifunkčního využití, tedy nejen k výrobě elektrické energie, ale i tepelné, popřípadě využití pro vysokoteplotní průmysl, snižuje investiční rizika, která jsou pro jaderná zařízení typická.



Obr. 2.6: Kompenzace investičních nákladů vzhledem k velkým reaktorům [32]

### 2.3.2. Nevýhody

Hlavní nevýhodou technologie SMR je fakt, že se jedná o technologii v raném stádiu vývoje. Většina projektů je ve fázi projektování a chybí tak nenahraditelné zkušenosti získané provozem. Ze stejného důvodu není zaběhlá potenciálně výhodná unifikace a sériová výroba komponent. To může mít za následek až nevýhodné investiční náklady první vlny nasazených SMR.

Každá země má různé požadavky pro obdržení licence designu SMR. Záleží pak na flexibilitě projektantů a schopnosti modifikace designu SMR, jestli bude projekt vůbec povolen na daném území. Protože se jedná o neotestovanou a potenciálně rizikovou technologii, bude potřeba vynaložit úsilí na vývoj designu SMR aby splnila licenční podmínky na území kde se uvažuje o výstavbě nebo na změnu licenčních kritérií, které nemusí být například přizpůsobené pro SMR technologie.

Velkou bariérou se může ukázat široká veřejnost. Kvůli negativním zkušenostem a vzniku jaderného odpadu při provozu jaderných elektráren je ve společnosti zakořeněný odpor vůči jaderné technologii, natož pak vůči nové a provozem nezkoušené jaderné technologii, a to i přes faktor nízkoemisní výroby energie, na které se v dnešní době bere důraz.

Zmíněné nevýhody jsou spíše riziky, které je možno minimalizovat. Při prvotní výstavbě lze i za cenu nezaručeného ekonomického prospěchu získat drahocenné provozní zkušenosti a možnost efektivního doladění technologie. Získané know-how je u zavádění nové technologie na světové úrovni významnou příležitostí.

## **2.4. Uvažované designy malých modulárních reaktorů pro ČR**

Projektovaných SMR je ve světě mnoho, avšak jejich připravenost je různá, a i když mohou být některé projekty lukrativnější než ostatní, nelze čekat příliš dlouhou dobu na jejich dokončení, které ani nelze přesně předpovědět.

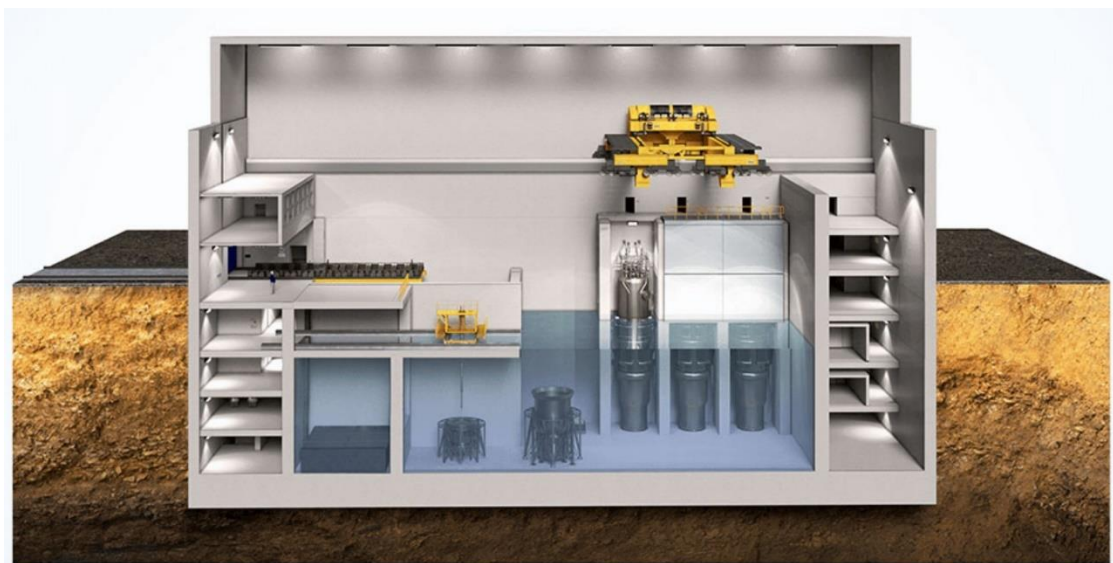
Cílem Skupiny ČEZ, jakožto jediného tuzemského investora, je uvedení pilotního SMR na českém území co nejdříve a v tuto dobu je v seznamu dodavatelů sedm SMR designů, které budou v této kapitole představeny.

### **2.4.1. NuScale**

Americký projekt NuScale umožňuje čtyř, šesti nebo dvanáctimodulové uspořádání s instalovaným elektrickým výkonem 77 MWe/modul a instalovaným tepelným výkonem 250 MWt/modul. Projekt si zakládá na kompaktním integrálním tlakovodním reaktoru s přirozenou cirkulací. Komponenty primárního okruhu jsou tedy umístěny v tlakové nádobě reaktoru a nejsou zapotřebí cirkulační čerpadla.

Stejnomená společnost pracovala na svém designu SMR již od roku 2000 a v roce 2020 obdržela schválení první verze SMR designu s moduly o instalovaném elektrickém výkonu 50 MWe od amerického regulačního úřadu pro jadernou bezpečnost – *Nuclear Regulatory Commission* (US NRC). První nasazení elektrárny – *First of a Kind* (FOAK) verze VOYGR-6, tedy šestimodulové verze s instalovaným elektrickým výkonem jednoho modulu 77 MWe, měla proběhnout v Národní laboratoři Idaho v roce 2026. Toto datum bylo v roce 2022 posunuto na rok 2029.





Obr. 2.7: Výřez budovy s reaktorem – šesti modulový design VOYGR-6 [30]

#### 2.4.2. SMART100

Jihokorejský projekt SMART100 společnosti KHNP spolupracující s jihokorejskou vládou je dvojblokovým integrálním tlakovodním reaktorem. Instalovaný elektrický výkon jednoho bloku/modulu je 100 MWe či 365 MWt tepelného. Projekt upřednostňuje pasivní bezpečnost, na kterou je dnes kladen značný důraz. Toho je dosaženo především integrálním řešením vyřazující veškeré primární potrubí (eliminace možnosti ztráty primárního chladiva). Společnost KHNP počítá s podílem tuzemského průmyslu jak v oblasti výstavby, tak v oblasti výroby mj. komponent primárního a sekundárního okruhu.

Celkový projekt SMART byl vyvíjen již od roku 1997 a i když v roce 2012 získal projekt schválení standardního projektu – *Standard Design Approval* (SDA) rozhodla se společnost změnit přístup a implementovat plně pasivní bezpečnostní systémy. Proces schvalování designu SMART100 korejským úřadem pro jadernou bezpečnost a zabezpečení – *Nuclear Safety and Security Commission* (NSSC) byl započat na začátku roku 2020 [13].

#### 2.4.3. SMR-160

Dalším americkým projektem je tlakovodní reaktor SMR-160 vyvíjený společností Holtec International. Instalovaný elektrický výkon jednoho bloku je 160 MWe a instalovaný tepelný výkon je 525 MWt. I když primární okruh není plně integrován do tlakové nádoby reaktoru, disponuje bezpečností minimalizací délky potrubí

primárního okruhu, zahrnutí některých komponent do tlakové nádoby reaktoru a přirozenou cirkulací chladiva v primárním okruhu. Výjimkou oproti ostatním zmíněným designům je delší projektová životnost bloku a to na 80 let.

Společnost Holtec International byla založena v roce 1986 a již dlouhodobě se věnuje činnostem v oblasti jaderné energetiky s podporou vlády. V roce 2024 bude společnost žádat US NRC o stavební licenci a v roce 2031 plánuje spuštění prvního SMR-160 u jaderné elektrárny v New Jersey [17].



Obr. 2.8: Design projektu SMR-160 společnosti Holtec International [12]

#### 2.4.4. Nuward

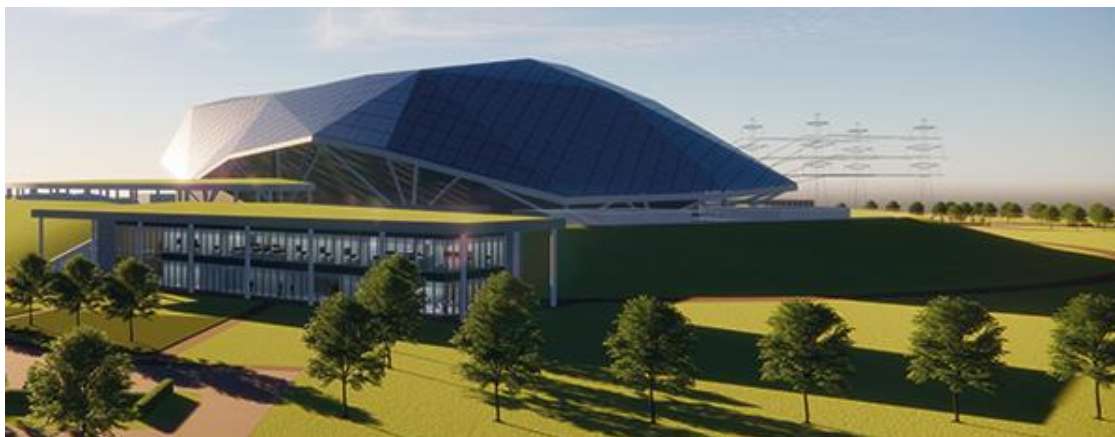
Nuward je projekt francouzské společnosti *Électricité de France* (EdF). Jde o integrální tlakovodní reaktor s pasivními bezpečnostními systémy s nucenou cirkulací. Design předpokládá dvojblokové uspořádání s elektrickým instalovaným výkonem 170 MWe/modul a tepelným instalovaným výkonem 540 MWt. Dvoumodulové uspořádání zvyšuje především flexibilitu provozu a údržby.

Společnost EdF zajišťuje v oblasti energetiky výrobu, projekty, distribuci a prodej elektřiny. Ve Francii jaderná energie tvoří většinový podíl výroby elektrické energie a EdF má velkou podporu vlády v podobě dotací pro vývoj a výstavbu. I když je projekt stále ve stavu přípravy designu, EdF předpokládá získání licence v roce 2029 a uvedení prvního bloku do provozu v roce 2034 [17].

### 2.4.5. UK SMR

Britským projektem společnosti Rolls-Royce je UK SMR. S instalovaným elektrickým výkonem 470 MWe a instalovaným tepelným výkonem 1276 MWt přesahuje tento tlakovodní reaktor definiční hranici IAEA, i tak se ale řadí mezi SMR kvůli kompaktnosti designu. Projekt se vyznačuje zajímavým pojetím modularity. Jednotlivé komponenty jsou smontovány do prostoru odpovídající rozměrům kvádrového kontejneru pro snadnou přepravu. Jednotlivé kvádry se na prostoru výstavby pouze spojí s dalšími příslušnými kvádry pomocí kostry. Výhodou je garance spolehlivosti jednotlivých „kvádrů“, protože jsou otestovány již na místě výroby, tedy v montážní hale. Jednotlivé „kvádry“ se tak na místě výstavby netestují, ale rovnou smontují do celkových okruhů.

Společnost Rolls-Royce podporovaná vládou je v nynější době ve schvalovacím procesu projektu u britského národního regulátora *Office for Nuclear Regulation* (ONR) a předpokládá spuštění první elektrárny již po roce 2030. Strategie společnosti Rolls-Royce tkví také ve vytvoření dodavatelského řetězce schopného pokrýt globální poptávku po projektu. Sestavení takového řetězce ale může značně omezit zapojení lokálních průmyslů do projektu [13][17].

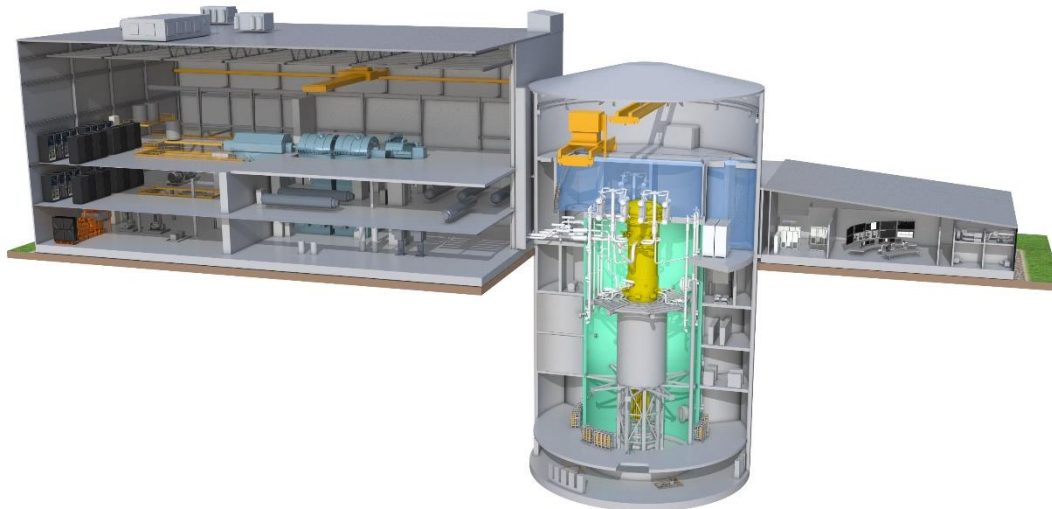


Obr. 2.9: Navrhovaný design stavby UK SMR společnosti Rolls-Royce [21]

### 2.4.6. BWRX-300

Šestým navrhovaným projektem pro výstavbu SMR v oblasti ETE je projekt BWRX-300 od americké společnosti GE Hitachi Nuclear Energy. Jde o lehkovodní varný reaktor s instalovaným elektrickým výkonem 300 MWe a instalovaným tepelným výkonem 870 MWt. I přes výhody varného reaktoru s sebou nese projekt různá rizika, a to především absence jakékoli zkušenosti tuzemského prostředí s touto technologií.

Společnost GE Hitachi se věnuje vývoji varných reaktorů již od roku 1955 a vlastní projekt BWRX-300 je desátou generací varného reaktoru navrženého GE Hitachi, který vychází z licencovaného reaktoru ESBWR. Společnost navíc upřednostňuje konsorcium, a je tedy nakloněna k zapojení lokálního průmyslu a infrastruktury. Při úspěšném získání licence je spuštění referenčního bloku v kanadském Darlingtonu plánováno na rok 2028 [17].



Obr. 2.10: Výřez projektu BWRX-300 [3]

#### 2.4.7. Westinghouse SMR

Kromě zmíněných projektů Skupina ČEZ komunikuje se společností Westinghouse Electric Company. Projekt je ale v příliš rané fázi vývoje, a není tedy schopen v této chvíli poskytnout bližší informace o nabízeném projektu.

#### 2.4.8. Parametry uvažovaných designů malých modulárních reaktorů

	<b>NuScale</b>	<b>SMART100</b>	<b>SMR-160</b>
<b>Výrobce</b>	NuScale Power	KHNP	Holtec International
<b>Typ reaktoru</b>	iPWR	iPWR	PWR
<b>Uspořádání</b>	4/6/12 modulů	dvojblok	jednoblok
<b>Instalovaný výkon modulu/bloku [MWe/MWt]</b>	77/250	107/365	160/525
<b>Oběh</b>	Přirozený	Nucený	Přirozený
<b>Typ paliva</b>	UO <sub>2</sub> /17x17	UO <sub>2</sub> /17x17	UO <sub>2</sub>
<b>Obohacení [%]</b>	<5	<5	<5
<b>Kampaň [měsíce]</b>	24	30	24
<b>Koncept bezpečnostních systémů</b>	Pasivní	Pasivní	Pasivní
<b>Životnost [roky]</b>	60	60	80

Tab. 2.2: Shrnutí významných parametrů projektu dodavatelů – část první [17]

	<b>Nuward</b>	<b>UK SMR</b>	<b>BWRX-300</b>
<b>Výrobce</b>	EdF	Rolls-Royce	GE Hitachi
<b>Typ reaktoru</b>	iPWR	PWR	BWR
<b>Uspořádání</b>	dvojblok	jednoblok	jednoblok
<b>Instalovaný výkon modulu/bloku [MWe/MWt]</b>	170/540	470/1276	290/870
<b>Oběh</b>	Nucený	Nucený	Přirozený
<b>Typ paliva</b>	UO <sub>2</sub> /17x17	UO <sub>2</sub> /17x17	UO <sub>2</sub> /10x10
<b>Obohacení [%]</b>	<5	<5	<5
<b>Kampaň [měsíce]</b>	24	18-24	12-24
<b>Koncept bezpečnostních systémů</b>	Pasivní	Aktivní i pasivní	Pasivní
<b>Životnost [roky]</b>	60	60	60

Tab. 2.3: Shrnutí významných parametrů projektu dodavatelů – část druhá [17]



### 3. Povolování malých modulárních reaktorů

Realizace a provoz SMR je extrémně složitý soubor činností podložený řadou dokumentů, týkající se především technických a ekonomických analýz, a licenční dokumentace kterou žadatel přikládá k žádostem o povolení, díky kterým je projekt povolen příslušnými státními orgány.

Jaderná elektrárna, resp. SMR, která není prakticky dlouhodobě vyzkoušena hrozí riziko nejen investorského neúspěchu, ale především rizika bezpečnostního. Proto je v zájmu jak investora, tak státu zajistit jadernou bezpečnost a eliminovat možná rizika.

Projekt se zpravidla dělí na fázi přípravy a výstavby. Před začátkem přípravné fáze je provedena tzv. identifikace příležitosti, seznamující s myšlenkou projektu a dokládá jeho ekonomickou efektivitu. Fáze výstavby je započata samotnou výstavbou projektu, ale nekončí dokončením výstavby. Do výstavbové fáze se řadí i zkušební provoz a je zakončena řádnou kolaudací dle stavebního zákona a předáním díla.

Hlavními činnostmi investora je především zkoumání a příprava lokality pro umístění jaderného zařízení (JZ) a zajištění potřebných povolení pro výstavbu a provoz. Tato povolení jsou schvalována dle příslušných zákonů, vyhlášek a stanovisek dotčenými orgány státní správy (DOSS).

#### 3.1. Investorská činnost

První iniciativou investora je identifikace příležitosti (IP), popisující rozsah projektu, základní tržní a technologickou analýzu nebo možná rizika a příležitosti. Po odsouhlasení projektu nadchází přípravná fáze projektu, která zahrnuje především činnosti investora, dodavatele technologie a DOSS.

Po rozhodnutí realizovat projekt přichází na řadu vypracování projektové a licenční dokumentace podložené informacemi dodavatelských společností. Na základě této dokumentace jsou tvořeny žádosti o specifická povolení, stanoviska a rozhodnutí DOSS. Zlehčujícím faktorem, který je v turbulentním prostředí SMR významný, v povolovacím rámci SMR je **obálková metoda**. Některá rozhodnutí a související stanoviska a povolení DOSS je možné získat bez znalosti konkrétní technologie. Při obálkové metodě všechny dokumenty nepočítají s jedním specifickým projektem ale s obálkou, zahrnující skupinu uvažovaných projektů dohromady. Při určování parametrů „obálky“ je pak uváděn vždy

ten s nejvyššími nároky a nejméně příznivými parametry a při vyřazení jednoho projektu z obálky není nutné přepracovávat veškerou dokumentaci. Díky této metodě lze uvažovat vyšší počet dodavatelů technologie po delší dobu, takže se jedná i o prevenci projektu při odstupu dodavatele od nabídky např. při zkrachování dodavatelské společnosti.

Vedle interních dokumentací je na investorovi provést rešerši připravenosti legislativního prostředí pro SMR, které může mj. vyžadovat přizpůsobení projektu. Předběžná připravenost projektu na legislativní prostředí snižuje riziko prodloužení přípravné fáze projektování, které má za následek zvýšení nákladů projektu

## 3.2. Právní rámec povolování jaderného zdroje

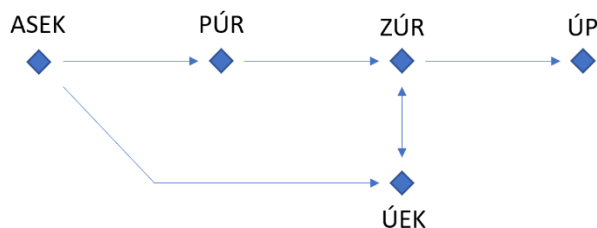
### 3.2.1. Přípravná fáze

Z hlediska dokumentace pro DOSS lze přípravnou fázi projektu rozdělit na dvě části. První část se zabývá především lokalitou a její vhodnosti k umístění JZ v rámci územního řízení. Výsledkem této části je Územní rozhodnutí. Druhá část se týká již samotného projektu podléhající stavebnímu řízení a zakončený Stavebním rozhodnutím, resp. stavebním povolením.

Kromě získání povolení různých DOSS pro umístění jaderného zdroje energie se musí zakomponovat možnost výstavby jaderného zdroje, resp. SMR do **Územního plánu** (ÚP) uvažované lokality. Cílem ÚP je uspořádání území infrastruktury, přírodních a obytných oblastí atd. při udržení kvality prostředí pro obyvatelstvo. **Územně plánovací dokumentace** (ÚPD), je pak tvořena ÚP všech oblastí v daném kraji, kde celý kraj spadá pod **Zásady územního rozvoje** (ZÚR). ZÚR jednotlivých krajů jsou utvářeny podle cílů **Politiky územního rozvoje** (PÚR) ČR. PÚR je pak nástrojem Ministerstva pro místní rozvoj, kterým koordinuje strategii zájmů ČR v rámci územního rozvoje. V případě nesouladu SMR s ÚP je nutné navrhnout aktualizaci dokumentace. Pokud není SMR v souladu ani se ZÚR nebo dokonce PÚR, je nutné aktualizovat a přizpůsobit celou kaskádu územního rozvoje.



Na úrovni ZÚR je pro energetický sektor, kterých se SMR týkají, zpracována dle zákona č. 406/2000 Sb., o hospodaření energií **Územní energetická koncepce (ÚEK)**. Dokument analyzuje energetický potenciál krajů a navrhuje cíle pro efektivní energetické hospodářství. Prvotním dokumentem, který je určující pro výše zmíněné, je **Státní energetická koncepce (SEK)**, na kterou dále navazuje **Aktualizovaná státní energetická koncepce (ASEK)**. Hlavním cílem SEK, resp. ASEK, je určení priorit a strategických záměrů státu v rámci energetického sektoru [9].



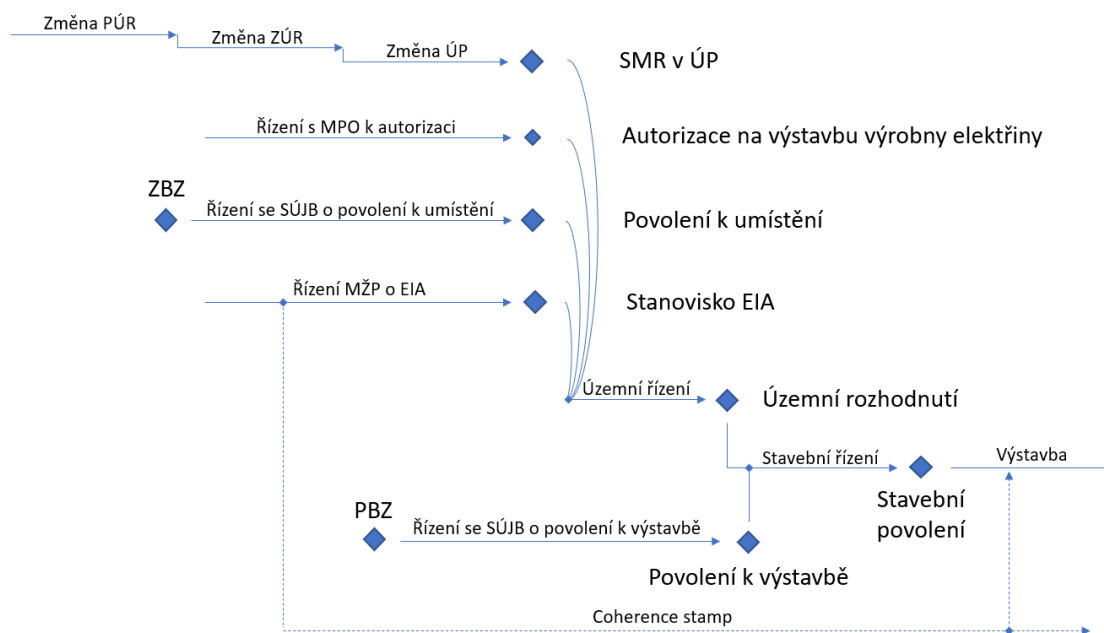
Obr. 3.1: Strategické plánování ČR v oblasti energetiky

DOSS určující a posuzující podmínky pro povolení umístění výstavby a provozu SMR v ČR je několik desítek. Rozsah povolení, stanovisek a rozhodnutí je však nejvýznamnější u dvou.

Zpravidla prvním je ministerstvo životního prostředí (MŽP), dohlížející na **Posuzování vlivů na životní prostředí – Environmental Impact Assessment (EIA)**, které je upraveno zákonem č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí. Na základě vyžádaných studií je vydáno **stanovisko EIA** o posouzení vlivu SMR na životní prostředí, které je jedním ze vstupních podkladů navazujícího územního řízení. Mimo to prostřednictvím verifikačního stanoviska (*Coherence stamp*) je i nadále v průběhu celého projektového řízení, tj. i po získání stavebního povolení, kontrolováno, zdali nedochází v průběhu realizace projektu k odklonu od obálky záměru, na který bylo posouzení dopadu na životní prostředí provedeno.

Druhým důležitým orgánem je Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB), který ve fázi územního řízení vydává povolení k umístění dle zákona č. 263/2016 Sb., **Atomový zákon** a vyhlášky č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení. V první části přípravné fáze projektování je podkladem pro řízení k povolení umístění schválená **Zadávací bezpečnostní zpráva (ZBZ)**. Pro stavební povolení se pak stejným způsobem stává **Předběžná bezpečnostní zpráva (PBZ)** vstupním faktorem řízení k povolení o výstavbě JZ.

Dalším DOSS je Ministerstvo průmyslu a obchodu (MPO). MPO uděluje státní **autorizaci** na výstavbu výroby elektřiny o celkovém instalovaném elektrickém výkonu 1 MW a více dle zákona č. 458/2000 Sb., **Energetický zákon**.



Obr. 3.2: Harmonogram činností v přípravné fázi projektového řízení

### 3.2.2. Fáze výstavby

Výstavbová fáze projektu zahrnuje výstavbu JZ a jeho následné prozkoušení. Fázi lze vymežit intervalem, který začíná získáním Stavebního povolení a končí kolaudačním rozhodnutím, po kterém již nastává komerční provoz elektrárny.

Hlavním úkolem investora, resp. budoucího provozovatele během výstavby je udržovat technický dozor na staveništi a koordinovat dodavatelskou činnost. Všechny činnosti výstavby jsou dodavatelem zaznamenávány do montážní dokumentace a ke všem komponentům a technologickým součástem jsou vedeny řádné protokoly. Ty jsou průběžně kontrolovány investorem, a předávány k prozkoumání dozorným orgánům, kterými jsou Technická inspekce České republiky (TIČR), Státní úřad inspekce práce (SÚIP) a SÚJB. Tyto orgány (především SÚJB) postupně vydávají povolení pro umožnění navazující práce. Po dokončení montáže přichází na řadu individuální zkoušky, jejíž cílem je zjištění správné funkčnosti a spolehlivosti jednotlivých součástí a zařízení. Po individuálních zkouškách je provedena **Pomontážní čistící operace** (PČO) a řízení k Povolení ke spuštění.

Na toto povolení nadchází dvě na sebe navazující sady zkoušek, **Neaktivní zkoušky** (NZ) a **Aktivní zkoušky** (AZ). NZ jsou prováděny bez jaderného paliva (JP) a s čistým

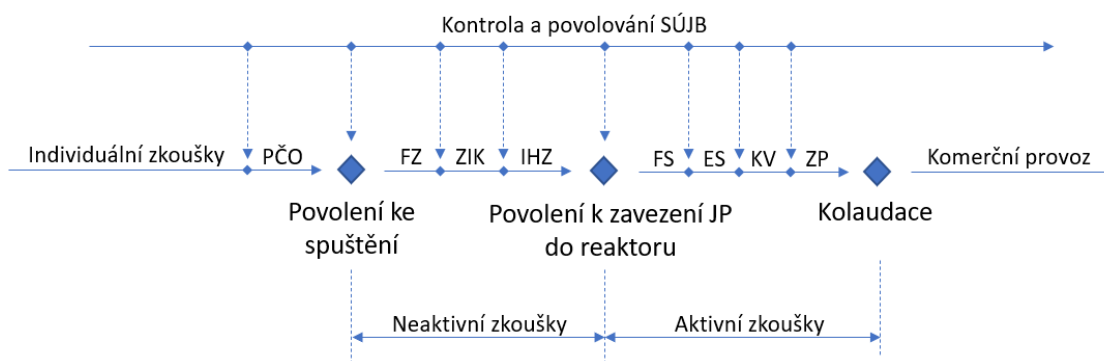
kondenzátem a AZ s jaderným palivem a kyselinou boritou. Dalším rozdílem je odpovědnost za zkoušky, která při NZ spadá na dodavatele ale při AZ již na provozovatele. Obě sady zkoušek se dále dělí na jednotlivé etapy a při postupu z jedné etapy do další je nutné dříve povolení na základě rozhodnutí SÚJB.

Typ zkoušky	Popis zkoušky
<b>Neaktivní zkoušky</b>	
FZ – Funkční zkoušky	Zkoušení systému primárního a sekundárního okruhu
ZIK – Zkouška integrity kontejnmentu	Testování materiálových a mechanických vlastností ochranné obálky
IHZ – Integrovaná hydrozkouška	Prokazování připravenosti komponent při nominálních parametrech primárního okruhu
<b>Aktivní zkoušky</b>	
FS – Fyzikální spouštění	Zavezení JP, 1. spouštění řetězové reakce
ES – Energetické spouštění	Zkoušky systému při abnormálních stavech a zapojení sekundárního okruhu
KV – Komplexní vyzkoušení	Celkové prozkoušení a odstranění nedostatků
ZP – Zkušební provoz	Provoz po delší dobu zahrnující alespoň jednu výměnu části paliva

Tab. 3.1: Etapy neaktivních a aktivních zkoušek ve výstavbové fázi projektu [24]

Na základě bezproblémového průběhu zkušební provozu je kolaudačním rozhodnutím povolena činnost komerčního provozu jaderné elektrárny na území České republiky.

Při výstavbě a připojování dalších bloků, resp. reaktorů není potřeba opakovat zkoušky společného zařízení ale pouze ovlivněného zařízení novým blokem.



Obr. 3.3: Harmonogram činností ve výstavbové fázi projektového řízení

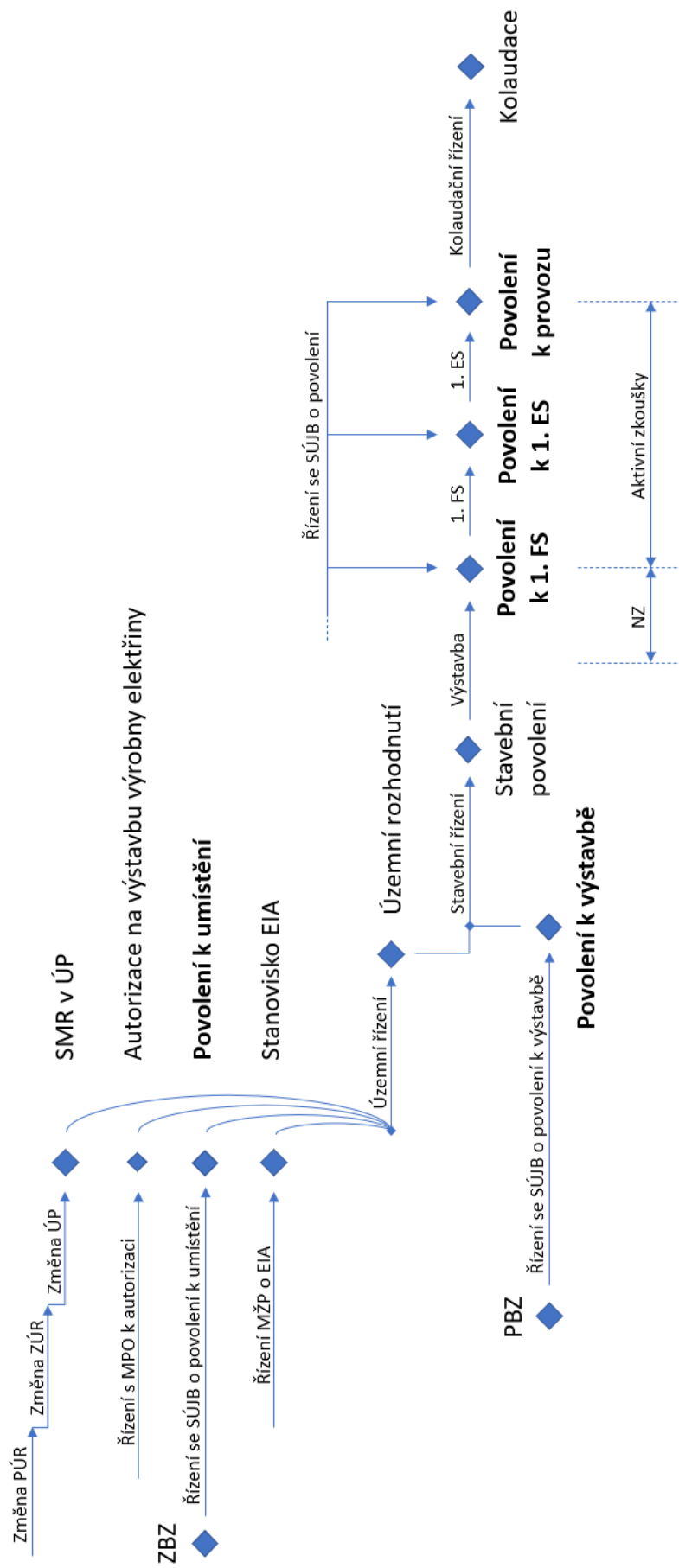
### 3.3. Povolení dle Atomového zákona

V předešlých kapitolách je naznačen možný postup investora pro postupné získávání hlavních povolení, stanovisek a rozhodnutí pro uvedení jaderného zařízení do komerčního provozu. Stejný rámec lze však rozdělit i jiným způsobem. Nabízí se rozdělení dle životních etap JZ, který je v souladu s devátým paragrafem Atomového zákona. Zákon uvádí seznam povolení nutných pro využívání jaderných zařízení.

Povolení	Lhůta pro vydání rozhodnutí SÚJB
Umístění jaderného zařízení	12 měsíců
Výstavba jaderného zařízení	18 měsíců
První fyzikální spouštění jaderného zařízení s jaderným reaktorem	12 měsíců
První energetické spouštění jaderného zařízení s jaderným reaktorem	6 měsíců
Provoz jaderného zařízení	6 měsíců

Tab. 3.2: Povolení jaderného zařízení dle Atomového zákona

Tabulka obsahuje maximální časové intervaly pro vydání rozhodnutí SÚJB, které jsou dány paragrafem 19 Atomového zákona. Je důležité zmínit, že řízení trvají takto vymezenou dobu pouze za předpokladu schválení všech podkladů a získání daných povolení. Při odvolávacích řízení je tento časový základ prodloužen. To má za následek prodlevy realizací projektů s JZ



Obr. 3.4: Harmonogram projektového řízení SMR v ČR

### 3.4. Návrhy činností v oblasti malých modulárních reaktorů

Jaderně-legislativní prostředí v ČR je přizpůsobeno velkým JZ s tlakovodními reaktory se zaměřením na provoz. Aktualizovaný Atomový zákon, účinný od roku 2017, nebyl otestován při povolování velkého energetického JZ. Není tedy jasné, zda bude vyhovovat současné inženýrské praxi, zejména pak inovativním SMR.

Zvýšení autonomních bezpečnostních vlastností, které zvyšují pasivní bezpečnost, menší množství štěpných produktů nebo celkové menší rozměry prokazují bezpečnostními analýzami tak nízkou frekvenci havarijních stavů, že je lze z legislativního hlediska považovat za vyloučené.

Prvním návrhem je umožnění předlicenčních konzultací investora se SÚJB. Dlouhodobý projekt jako je SMR se bude potýkat s nespočetnými riziky. Předlicenční konzultace zaručí včasnou informovanost, a tedy i připravenost obou stran k získání rozhodnutí a zkrácení doby řízení.

Významným faktorem ovlivňující výstavbu série SMR je nutnost licencování jednotlivých projektů zvlášť. Jednou z výhod SMR je možnost opakovatelné výroby a instalace komponent. Pokud by se počítalo s výstavbou několika projektů SMR od jednoho dodavatele po sobě, bylo by logické, kdyby po licencování prvního projektu nebylo nutné posuzování částí navazujících projektů, která jsou pro všechny lokality neměnná.

Při spojení investora s dodavatelem technologie SMR na úrovni partnerství je možné dosáhnout koordinace obou stran za účelem snížení nejen časových a finančních nákladů, ale i zjednodušení realizace řady projektů, protože s povolením od dodavatele lze přebírat a realizovat opakované technologické části projektu, které jsou nezávislé na lokalitě umístění SMR.

Nabízí se také zjednodušení licenčního prostředí, které momentálně klade v některých případech přísnější požadavky než požadavky IAEA. Příkladem vstřícného přístupu státu je možnost výběru povolování. Kromě postupu obdobnému tuzemskému je k dispozici využití Žádosti o kombinovanou licenci – *Combined License Application* (COL) platný v USA vydávaný US NRC. Licence zahrnuje povolení k výstavbě a následnému provozu (za daných podmínek) jaderné elektrárny po dobu 40 let [28].

## **3.5. Současný stav projektů malých modulárních reaktorů v ČR**

### **3.5.1. Temelín**

V rámci ČR je v současné době rozpracována přípravná fáze prvního SMR v lokalitě Temelín. Díky již stávající velké jaderné elektrárně je dotčená lokalita vedená jako jaderná. To by mohlo zjednodušit realizaci celého projektu.

„SMR v ETE“ se nachází v pokročilé části přípravné fáze projektu. Právě je schvalována komplexní ekonomickotechnická Studie proveditelnosti a zpracovány navazující studie o průzkumu lokality, tj. geologické, vodohospodářské, a implementace do elektrizační soustavy. Navazující činnosti pro rok 2023 se týkají především studií EIA a obstarání studií pro územní řízení včetně monitoringu lokality.

### **3.5.2. Další lokality**

Při realizaci pilotního SMR bude následovat další vlna projektů SMR, které budou mít za úkol nahradit deficit instalovaného elektrického výkonu vyřazujících uhelných elektráren. Prakticky by měly SMR nahradit stávající uhelné elektrárny. Výhodou využití lokalit uhelných elektráren je připravenost lokality z hlediska dostupnosti médií, napojovacích míst a územně plánovací připravenosti. Zkušenosti nabyté při realizaci a provozu pilotního projektu budou využity ke zlepšení nebo zrychlení navazujících projektů.

Pro další vlnu SMR se nabízí lokality zatím stále provozovaných uhelných elektráren, kterými jsou:

- Tušimice
- Pruněřov
- Ledvice
- Poříčí
- Dětmarovice

Projektové řízení lokalit je v rané fázi. Lokality Tušimice a Dětmarovice stojí v popředí seznamu a zpracovávají se pro ně předběžné studie proveditelnosti a provádějí se prvotní studie pro ověření vhodnosti lokalit pro umístění JZ.

## 4. Ekonomické hodnocení SMR v JETE

Lokalita Temelín je dostatečně rozlehlá schválená jaderná oblast, a proto je vhodným kandidátem pro umístění pilotního SMR v České republice. Při úspěšném zavedení technologie bude následovat testování a ladění následované výstavbou dalších SMR s využitím *lessons learned* principu na základě pilotního projektu.

V této sekci je nastíněno ekonomické hodnocení plánovaného umístění prvního českého SMR v oblasti jaderné elektrárny Temelín včetně ekonomického vlivu lokalizace. Termín lokalizace představuje v tomto případě podíl účasti českého průmyslu na výstavbě SMR v podobě služeb, projektování nebo dodávek technologických částí. Současný projekt plánovaného SMR je příležitostí pro tuzemský průmysl. V případě úspěšného zapojení českého průmyslu do nastávajících projektů v této oblasti by Česká republika získala výhodu ve znalosti nových technologií nad ostatními zeměmi.

Ekonomické hodnocení se provádí jako podklad, resp. argumentační materiál k rozhodnutí o provedení investičního rozhodnutí nebo výběru nejlepší varianty. Na základě ekonomického modelování projektu lze analyzovat varianty nebo ukazatele ekonomické efektivity a určit jeho silné a slabé stránky.

### 4.1. Předpoklady

Stanovená hodnota měrných investičních nákladů zahrnuje pouze koupi a instalaci technologie SMR. Ve skutečnosti budou investiční náklady zvýšeny o další investice, např. doprava, příprava lokality nebo přizpůsobení elektrizační soustavy. Zároveň jsou investiční náklady vztažené k instalovanému výkonu dle velkých elektrárenských bloků. Pro první SMR se předpokládají vyšší investiční náklady než u velkých bloků. Po standardizaci výrobních komponent a stabilizaci dodavatelského řetězce mají investiční náklady významně poklesnout.

Model počítá pouze s výrobou a prodejem elektrické energie. U SMR se ale uvažuje využití kombinované výroby elektrické energie a tepla, popř. vodíku nebo podpůrných služeb. Pokud by využití SMR nebylo podmíněno jinak, výroba by byla určována okamžitou poptávkou po komoditě. Zakomponování kombinované výroby by způsobilo změnu ekonomické efektivity.



Model předpokládá nejrychlejší možnou dobu realizace SMR bez zpoždění. To znamená, že v době přípravy bude všechna dokumentace schválena v základních lhůtách a výstavba nebude prodloužována. Zároveň se počítá se základní dobou životnosti elektrárny, kterou lze v praxi prodloužit při splnění určitých podmínek.

Celý projekt je financován pouze vlastním kapitálem nebo v případě obchodního modelu *joint venture* (JV) je projekt financován vlastním kapitálem dvou subjektů. V případě využití dalších způsobů financování, jakou je např. návratná finanční výpomoc, která je popsána zákonem č. 367/2021 Sb., o opatření přechodu ČR k nízkouhlíkové energetice, by se pro hodnocení projektu použila vážená cena kapitálu místo samotného diskontu.

Lokalizace projektu SMR má z pohledu státu ekonomický význam. Vyšší podíl zapojení tuzemského průmyslu vede u velkého projektu k významnému ekonomickému prospěchu státu. Při využití českého průmyslu by daň z velkého množství materiálu a drahých komponent pro výstavbu SMR tvořila nezanedbatelný příspěvek k státnímu rozpočtu. Dalším příspěvkem bude daň z příjmu fyzických osob (DPFO) tvořen veškerým českým personálem, který se bude podílet na přípravě, výstavbě a provozu SMR. Ekonomický model obsahuje výpočet DPFO nashromážděné po dobu výstavby lokalizovaného stavebního personálu.

## **4.2. Vstupní parametry ekonomického modelu**

Ekonomický model projektu SMR je zpracován z pohledu celkového projektu, který je dále rozdělen na možnosti rozložení projektu mezi dva spoluinvestory. Spojení spoluinvestorů lze uskutečnit skrze obchodní model (JV). V ekonomickém modelu jsou uvedeny tři scénáře připojení sekundárního subjektu do projektu podle doby, ve které se do projektu zapojí:

- JV1 – rozdělení projektu od počátku
- JV2 – rozdělení projektu od počátku výstavby
- JV3 – rozdělení projektu od počátku provozu

Moment zainvestování je pro sekundární financující subjekt různě rizikové podle stádia projektu. V době přípravy je riziko nejvyšší a při provozu je nejnižší. Základní model počítá s rozdělením hotovostních toků mezi hlavního a vedlejšího investora v poměru devíti ku jedné.

#### 4.2.1. Investiční část

V současné době nejsou k dispozici žádná přesná data, která by se opírala o skutečné projekty SMR. Proto je většina uvažovaných parametrů v ekonomických modelech přepočítána na základě velkých jaderných provozovaných bloků podle inženýrského odhadu nebo dostupných informací poskytnuté dodavatelem technologie.

Z technologického hlediska je vybrána elektrárna s technologií tlakovodního SMR s instalovaným elektrickým výkonem 300 MWe, vlastní spotřebou 20 MWe a dobou provozu 60 let. Parametry odpovídají výběru dodavatelských uvažovaných technologií. Doba přípravy je stanovena na šest let, během kterých je časově nejvíce zatěžující povolení k umístění dle Atomového zákona (12 měsíců) a povolení k výstavbě dle Atomového zákona (18 měsíců) jak bylo uvedeno v kapitole 3.3. Doba výstavby včetně zkoušek a zkušebního provozu se předpokládá na čtyři roky. Začátek projektu je stanoven na rok 2023 a začátek provozu na rok 2033.

Měrné investiční náklady jsou stanoveny způsobem *Overnight Cost* vztahované na instalovanou kWe. Při postupné realizaci dalších SMR lze předpokládat srovnatelné náklady s velkými bloky jaderných elektráren. Interval nákladů je stanoven od optimistických 5 000 EUR/kWe do pesimistických 10 000 EUR/kWe. V základním modelu je uvedena hodnota 7 000 EUR/kWe. Zároveň je tento parametr prověřen v citlivostní analýze.

Kumulovaný cashflow investičních nákladů po dobu realizace projektu odpovídá S křivce. V průběhu přípravy lze očekávat nižší náklady, a proto je do této doby rozloženo 15 % z celkových investičních nákladů. Při počátku výstavby významně vzrostou náklady spojené se stavebními činnostmi. Zbýlý podíl investičních nákladů tedy připadá na samotnou výstavbu projektu.

Doba využití maxima je doba odběru instalovaného výkonu odpovídající časové proměnného odběru za určité období a je v základním modelu stanovena na 8 000 h/rok. Při častějších údržbových operacích a přerušování provozu může být nižší, a proto je tento parametr podroben citlivostní analýze.

Vstupní veličina investiční části	Hodnota
Instalovaný výkon $P_1$ [MWe]	300
Vlastní spotřeba [MWe]	20
Doba přípravy [roky]	6
Doba výstavby [roky]	4
Doba provozu [roky]	60
Měrné investiční náklady [EUR/kWe]	7 000
Využití maxima [h/rok]	8 000

Tab. 4.1: Vstupní veličiny investiční části projektu

#### 4.2.2. Provozní náklady

Palivové náklady, provoz a údržba – *Operation and Maintenance* (O&M), režie, provozní investice a rezervní fond vyřazování je stanoven odhadem na základě dat z velkých bloků vztažených na vyrobenou elektrickou energii [18].

Mezi provozní náklady řadíme také odvod na jaderný účet, stanovený na 55 Kč za každou vyrobenou MWh elektrické energie. Z jaderného účtu je především financována činnost Správy úložišť radioaktivního odpadu (SÚRAO) [26].

Vstupní veličina provozní části	Hodnota
Palivo [EUR/MWh]	8
Režie [EUR/MWh]	2
O&M [EUR/MWh]	13
Provozní investice [EUR/MWh]	8
Rezervní fond [EUR/MWh]	6
Jaderný účet [EUR/MWh]	2

Tab. 4.2: Provozní náklady projektu

#### 4.2.3. Diskont

Diskontní míra vyjadřuje současnou hodnotu budoucích nejistých výnosů. Platí, že o kolik procent se zvýší diskontní míra o tolik procent se sníží výnosová hodnota. Diskontní míru lze určit různými způsoby. Jednou z metod je model oceňování kapitálových aktiv – *Capital Asset Pricing Model* (CAPM) [25].

CAPM určuje diskontní míru na základě bezrizikové výnosové míry, za kterou se považuje míra dlouhodobých státních dluhopisů, upravenou o očekávanou výnosovou míru trhu a koeficientem zohledňující tržní riziko určitého sektoru.

$$r = r_f + \beta \cdot (r_m - r_f) \quad (1)$$

$r$  Očekávaná diskontní míra [%]

$r_f$  Bezriziková úroková míra [%]

$\beta$  Systematické tržní riziko [-]

$r_m$  Očekávaná výnosnost trhu [%]

Pro model byly hodnoty tržního rizika a očekávané výnosnosti trhu určeny podle tržní analýzy učitele Damodarana. Bezriziková úroková míra je určena podle nejdelšího státního dluhopisu splatného k roku 2057, jehož výnosová míra je 4,85 %. Na základě stanovených hodnot je diskontní míra v základním modelu stanovena na 6,59 % [7, 8, 23].

#### 4.2.4. Tržní cena elektřiny a inflace

Tržní cena elektřiny je stanovena průměrem marginálních cen v prvních čtyřech měsících roku 2023 na 123 EUR/MWh. Eskalace ceny elektřiny je obtížné v dnešní turbulentní době určit, a proto je stanovena podle prognózy míry inflace kterou určila Česká národní banka pro konec roku 2024, tj. 2 %. Tato míra inflace je uvažována i v ekonomickém modelu [6, 22].

#### 4.2.5. Lokalizace personálu

Lokalizační část v ekonomickém modelu vyčísluje příspěvek ke státnímu rozpočtu skrze DPFO stavebního personálu. Dle Českého statistického úřadu (ČSÚ) činila hrubá mzda v posledním čtvrtletí roku 2022 ve stavebním sektoru 37 223 Kč. Daň z příjmu fyzických osob je ze základu 15 % a počet osob předpokládaného průměrného stavebního personálu na celou lokalitu je 1600. Lokalizace bude podrobena citlivostní analýze a v základním modelu je stanovena na 90 % [4].

#### 4.2.6. Charakteristiky projektu

Vstupní veličina projektu	Hodnota
Investiční náklady [mil. EUR]	2 100
Roční provozní náklady [mil. EUR]	87,36
Roční dodávka elektřiny [TWh]	2,24
Meziroční změna inflace [%]	2
Meziroční změna ceny elektřiny [%]	2
Diskont [%]	6,59

Tab. 4.3: Základní charakteristiky projektu

#### 4.3. Kritéria ekonomické efektivity

Kritéria ekonomické efektivity jsou nástroje, kterými investor získává informace o ekonomické povaze projektu. Stávají se tak ekonomickým vstupním faktorem pro rozhodnutí o uskutečnění, resp. výběru investice. Kritéria jsou absolutní nebo relativní a uvažující a neuvažující časového rozložení hotovostních toků [25].

##### 4.3.1. Čistá současná hodnota

*Net Present Value* (NPV) je z definice součet všech diskontovaných hotovostních toků, resp. současná hodnota příjmů a výdajů investice po dobu její životnosti. Hodnota NPV vyjadřuje zisk, resp. ztrátu při uskutečnění investičního rozhodnutí vyjádřený v současné hodnotě peněz. Pro výpočet je nutné určit diskontní sazbu, dobu životnosti investice a hotovostní toky ve všech letech investice. Hlavní nevýhodou NPV je nemožnost porovnání investic s různou dobou životnosti. Pro vyřešení tohoto problému se používá roční ekvivalentní peněžní tok [25].

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1 + r)^{-t} \quad (2)$$

*NPV* Čistá současná hodnota [mil. EUR]

*T* Doba životnosti investice [roky]

*t* Index roku [-]

*CF<sub>t</sub>* Hotovostní tok v roce *t* [mil. EUR]

*r* Diskontní sazba [%]

### 4.3.2. Roční ekvivalentní peněžní tok

Pro rovnoměrné rozdělení diskontovaných peněžních toků do jednotlivých let investice se používá roční ekvivalentní peněžní tok (RCF). Jde o NPV upravené anuitním faktorem. Používá se především pro porovnání investic s různou dobou životnosti. Obecně jde ale o názornější hodnotu, než je NPV [25].

$$RCF = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \cdot NPV \quad (3)$$

*RCF*            Roční ekvivalentní peněžní tok [mil. EUR]

*NPV*            Čistá současná hodnota [mil. EUR]

*T*                Doba životnosti investice [roky]

*r*                Diskontní sazba [%]

### 4.3.3. Vnitřní výnosové procento

*Internal Rate of Return* (IRR) je hodnota diskontní sazby, při které je NPV investice nulová. Pro výnosnost investice je žádoucí diskontní sazba investice nižší než hodnota IRR, která vychází ze vzorce pro NPV rovno nule. Protože se jedná o relativní kritérium, nastává problém při porovnávání více investic. To lze vyřešit rozdílovou investicí jejíž IRR určuje mez lepší ekonomické efektivity jedné investice nad druhou. IRR může být také nejednoznačné nebo nemusí vůbec existovat [25].

$$0 = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1 + IRR)^{-t} \quad (4)$$

*IRR*            Vnitřní výnosové procento [%]

*T*                Doba životnosti investice [roky]

*t*                Index roku [-]

*CF<sub>t</sub>*            Hotovostní tok v roce t [mil. EUR]

### 4.3.4. Doba splacení

*Payback Period* (PP) je doba, za kterou kladné hotovostní toky vyrovnají záporné hotovostní toky investičních nákladů při realizaci projektu. Pro efektivitu projektu se obecně předpokládá nižší doba PP, než je doba životnosti projektu. Nevýhodou kritéria je zanedbání událostí následující po době splacení a nezahrnutí časové ceny peněz [25].

$$\sum_{t=0}^{P-1} CF_t = \sum_{t=P}^{PP} CF_t \quad (5)$$

$PP$	Doba splacení [roky]
$P$	Doba realizace projektu [roky]
$t$	Index roku [-]
$CF_t$	Hotovostní tok v roce $t$ [mil. EUR]
$r$	Diskontní sazba [%]

#### 4.3.5. Diskontovaná doba splacení

*Discounted Payback Period* (DPP) je obdobná verze PP, která již zahrnuje časovou cenu peněz. Nevýhoda zanedbání událostí následující po době splacení je zachována [25].

$$\sum_{t=0}^{P-1} CF_t \cdot (1+r)^{-t} = \sum_{t=P}^{DPP} CF_t \cdot (1+r)^{-t} \quad (6)$$

$DPP$	Doba splacení zahrnující časovou cenu peněz [roky]
$P$	Doba realizace projektu [roky]
$t$	Index roku [-]
$CF_t$	Hotovostní tok v roce $t$ [mil. EUR]
$r$	Diskontní sazba [%]

#### 4.3.6. Výnosnost investice

*Return on Investment* (ROI) je kritérium zanedbávající časovou cenu peněz. Jde o podíl součtu hotovostních toků a investičních nákladů. Nejvýhodnější investice má nejvyšší hodnotu ROI. Jedná se o relativní kritérium a neinformuje tak o skutečných řádech hotovostních toků [25].

$$ROI = \frac{\sum_{t=0}^T CF_t}{T \cdot \sum_{t=0}^{P-1} CF_t} \cdot 100 \quad (7)$$

$ROI$	Výnosnost investice [%]
$T$	Doba životnosti investice [roky]
$P$	Doba realizace projektu [roky]
$t$	Index roku [-]
$CF_t$	Hotovostní tok v roce $t$ [mil. EUR]

#### **4.4. Výsledek ekonomické analýzy**

Výsledky ekonomického modelu SMR v ETE ukazují výnosnost projektu. Výnosným se projekt stává především díky dlouholetému nepřerušovanému provozu. Pro projekt vyšla NPV 1 042,4 mil. EUR a IRR 9,55 %. Významným problémem, na který ekonomický model ukazuje, je riziko v podobě dlouhé době návratnosti investice. Z hlediska projektu je PP necelých 20 let a DPP necelých 30 let. Právě dlouhá doba návratnosti dělá projekty jaderných zařízení rizikovými investicemi. Pro snížení rizik je zapotřebí spolupráce státu v podobě vhodného způsobu financování nebo garantování stability legislativního prostředí.

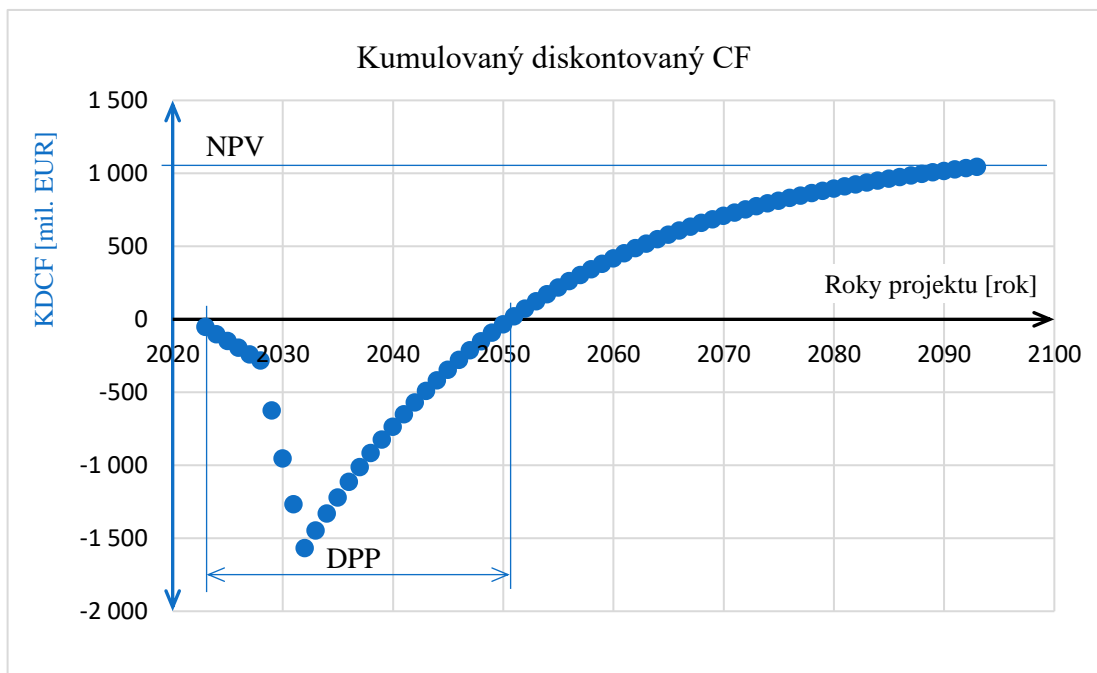
Ve variantách JV je vidět vyšší ekonomická efektivita vedlejšího investora s delší odstupem připojení k projektu.

Klíčovými riziky vstupující do projektu je nepředvídatelný vývoj ceny elektřiny a inflace. Projekt prokazuje kladnou ekonomickou efektivitu za předpokladu optimisticky zvolených hodnot meziročních změn veličin. V případě ceny elektřiny může být řešením např. zavedení výkupních cen, jako je to u podporovaných zdrojů energie.

Lokalizace většiny stavebního personálu přispívá daněmi z DPFO do státního rozpočtu 394 mil. Kč. Výše hodnoty je jedním z argumentů podporující náklonost státu k podpoře realizování projektů budování SMR.



Následující graf znázorňuje kumulovaný diskontovaný CF s vyznačenou hodnotou NPV a DPP, které odpovídá návratnost investice přibližně v roce 2051 a na další straně následuje tabulka shrnující ekonomické ukazatele projektu.



Obr. 4.1: Kumulovaný diskontovaný CF projektu s vyznačenou NPV a DPP

<b>Projekt</b>		
<b>NPV [mil. EUR]</b>		1 042,4
<b>RCF [mil. EUR]</b>		69,5
<b>IRR [%]</b>		9,55
<b>PP [roky]</b>		19,6
<b>DPP [roky]</b>		28,6
<b>ROI [%]</b>		14,50
<b>Daň z mezd stavebního personálu [mil. Kč]</b>		394,0
<b>JV1 – rozdělení projektu od počátku</b>		
	<b>Hlavní investor</b>	<b>Vedlejší investor</b>
<b>NPV [mil. EUR]</b>	938,1	104,2
<b>RCF [mil. EUR]</b>	62,5	6,9
<b>IRR [%]</b>	9,55	9,55
<b>PP [roky]</b>	19,6	19,6
<b>DPP [roky]</b>	29,2	28,6
<b>ROI [%]</b>	14,50	14,50
<b>JV2 – rozdělení projektu od počátku výstavby</b>		
	<b>Hlavní investor</b>	<b>Vedlejší investor</b>
<b>NPV [mil. EUR]</b>	909,8	132,5
<b>RCF [mil. EUR]</b>	60,6	8,8
<b>IRR [%]</b>	9,40	11,30
<b>PP [roky]</b>	19,8	12,4
<b>DPP [roky]</b>	29,2	17,9
<b>ROI [%]</b>	14,26	18,64
<b>JV3 – rozdělení projektu od počátku provozu</b>		
	<b>Hlavní investor</b>	<b>Vedlejší investor</b>
<b>NPV [mil. EUR]</b>	781,4	261,0
<b>RCF [mil. EUR]</b>	52,1	17,4
<b>IRR [%]</b>	8,86	-
<b>PP [roky]</b>	20,6	0,0
<b>DPP [roky]</b>	32,1	0,0
<b>ROI [%]</b>	12,90	-

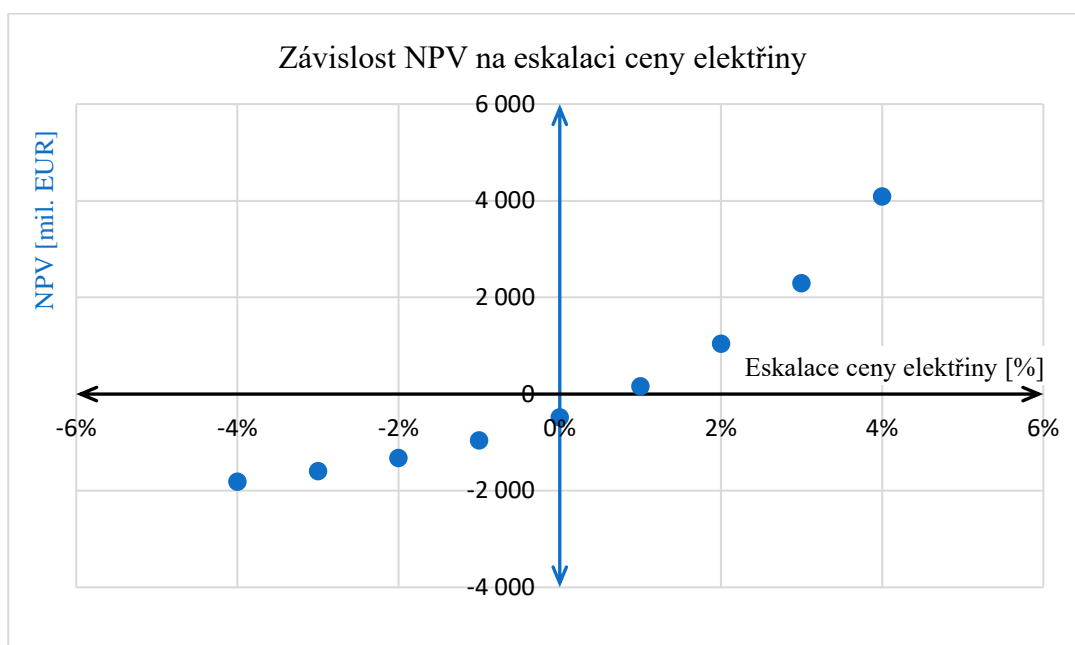
Tab. 4.4: Výsledky ekonomické analýzy

## 4.5. Citlivostní analýza

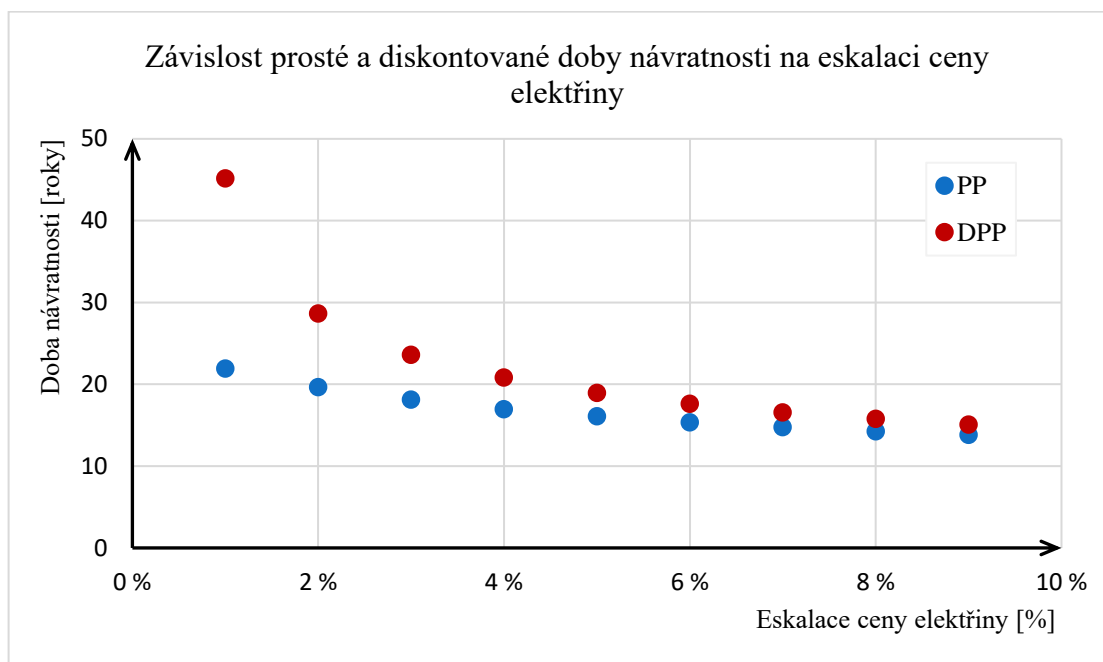
Citlivostní analýza znázorňuje, jakým způsobem se budou ekonomické ukazatele měnit při změně vstupní veličiny. Pro citlivostní analýzu jsou vybrány takové vstupní veličiny, které reagují na změnu nejcitlivěji.

### 4.5.1. Eskalace ceny elektřiny

Vývoj ceny elektřiny je faktorem silně ovlivňující ekonomickou efektivitu projektu. Na základě vývoje cen elektřiny v poslední době je prakticky nemožné určit statickou hodnotu meziroční změny takovým způsobem, aby odpovídal skutečnému vývoji po celou dobu životnosti elektrárny. Následující grafy znázorňují závislost NPV, PP a DPP na eskalaci ceny elektřiny.



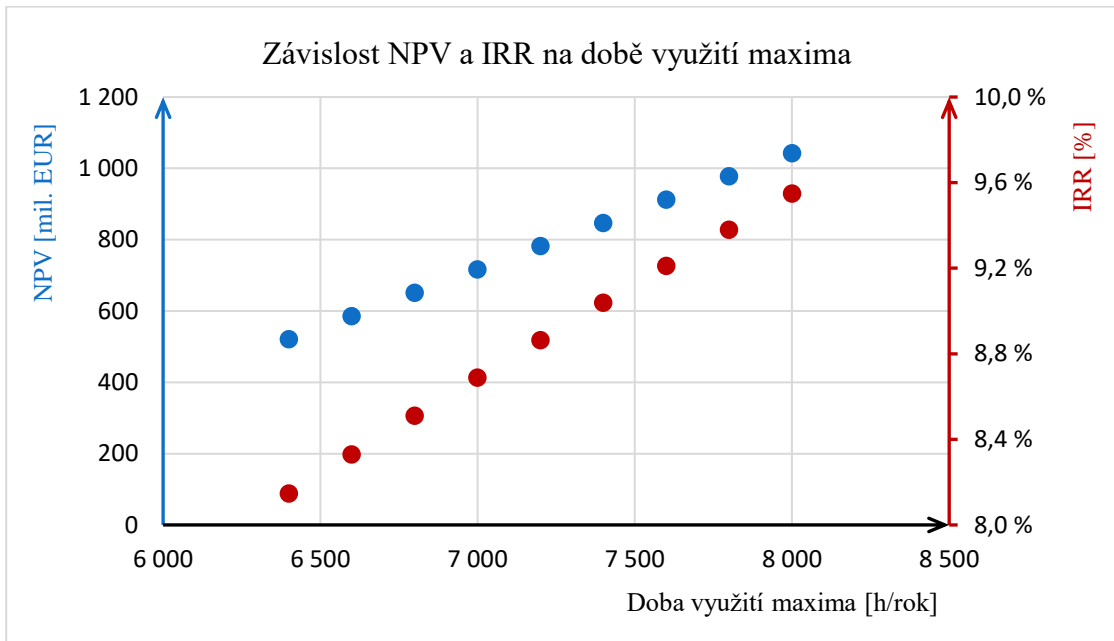
Obr. 4.2: Závislost NPV na eskalaci ceny elektřiny



Obr. 4.3: Závislost PP a DPP na eskalaci ceny elektřiny

#### 4.5.2. Využití maxima

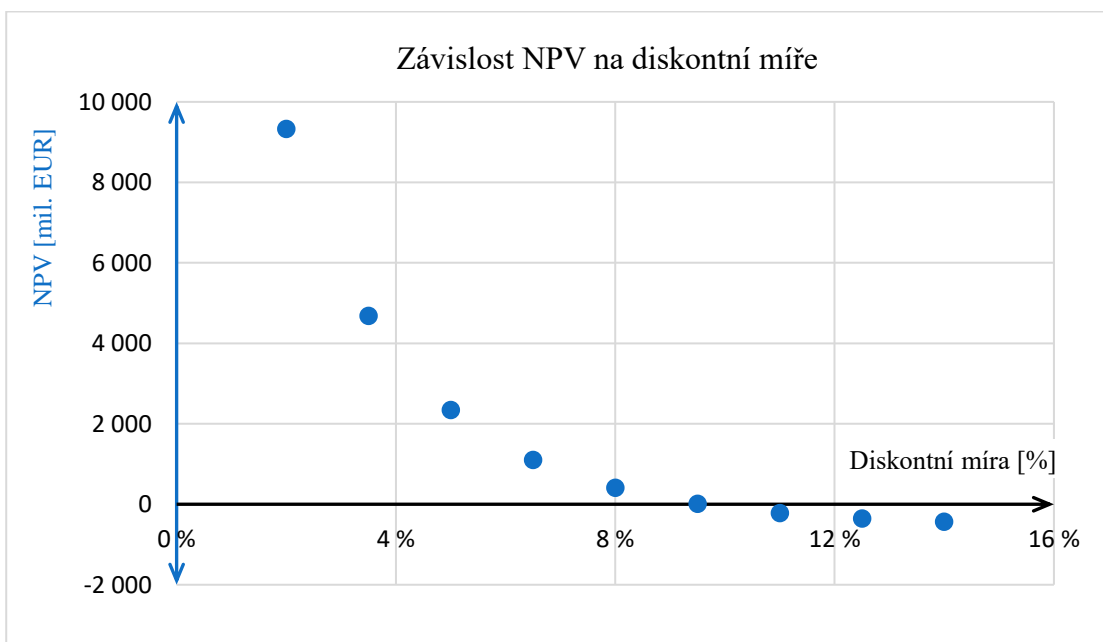
Doba využití maxima je důležitým faktorem z důvodu nezávislosti parametru na nepředvídatelných faktorech trhu a možnosti zvýšení ekonomické efektivity projektu při minimalizaci údržbových prací nebo zpomalení výměny paliva. Neovlivitelným faktorem vstupující do doby využití maxima je závislost vynuceného snížení výkonu na náhlou dodávku elektřiny do elektrifikační soustavy z intermitentních zdrojů.



Obr. 4.4: Závislost NPV a IRR na době využití maxima

#### 4.5.3. Diskontní míra

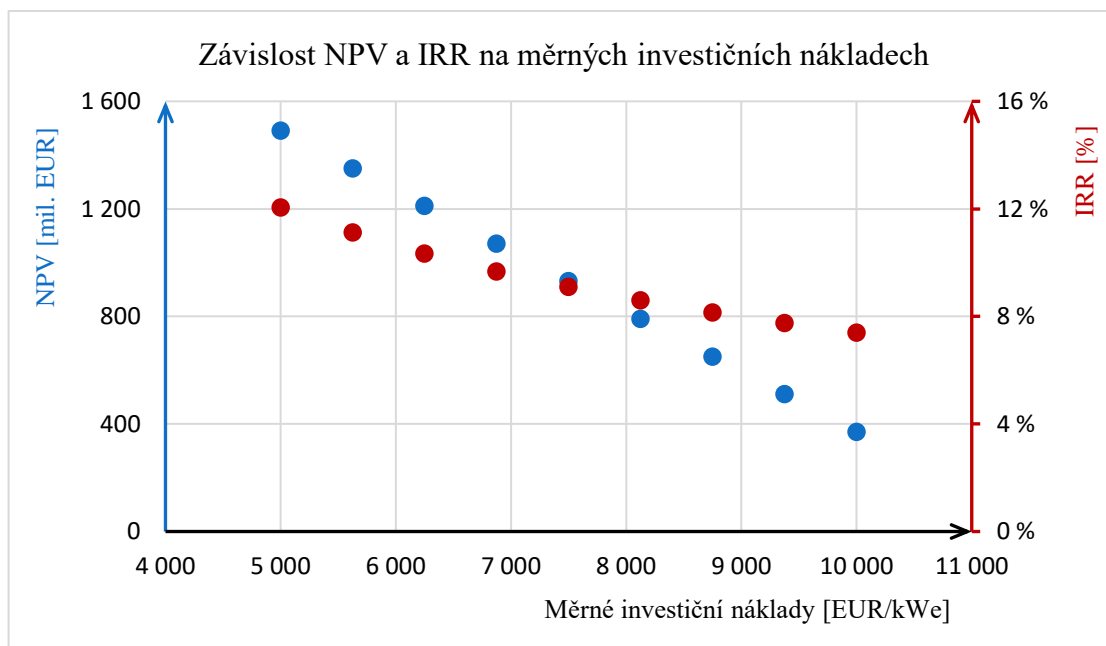
Pro citlivostní analýzu diskontní sazby projektu vyšla hodnota vnitřního výnosového procenta 9,62 %. Při uvažovaném diskontu 6,59 % je NPV projektu kladná. Na následujícím grafu je znázorněna závislost NPV projektu na určené diskontní míře.



Obr. 4.5: Závislost NPV na diskontní míře

#### 4.5.4. Investiční náklady

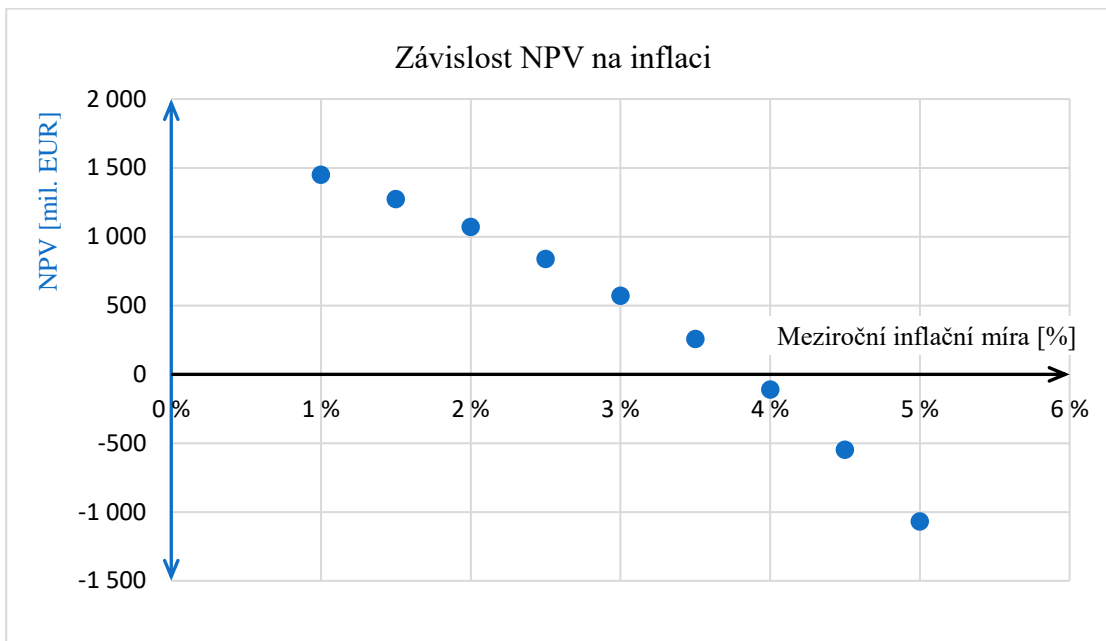
Zvyšování investičních nákladů vede k poklesu NPV a IRR. Změna investičních nákladů v rozmezí pěti až deseti tisíci EUR/kWe odpovídá IRR od 12 % do 8 %. Investiční náklady jsou u projektu klíčovým faktorem, a právě jejich potenciální snížení díky standardizování výroby by mělo způsobit mj. zvýšení konkurenční schopnosti mezi ostatními zdroji energie.



Obr. 4.6: Závislost NPV a IRR na měrných investičních nákladech

#### 4.5.5. Inflace

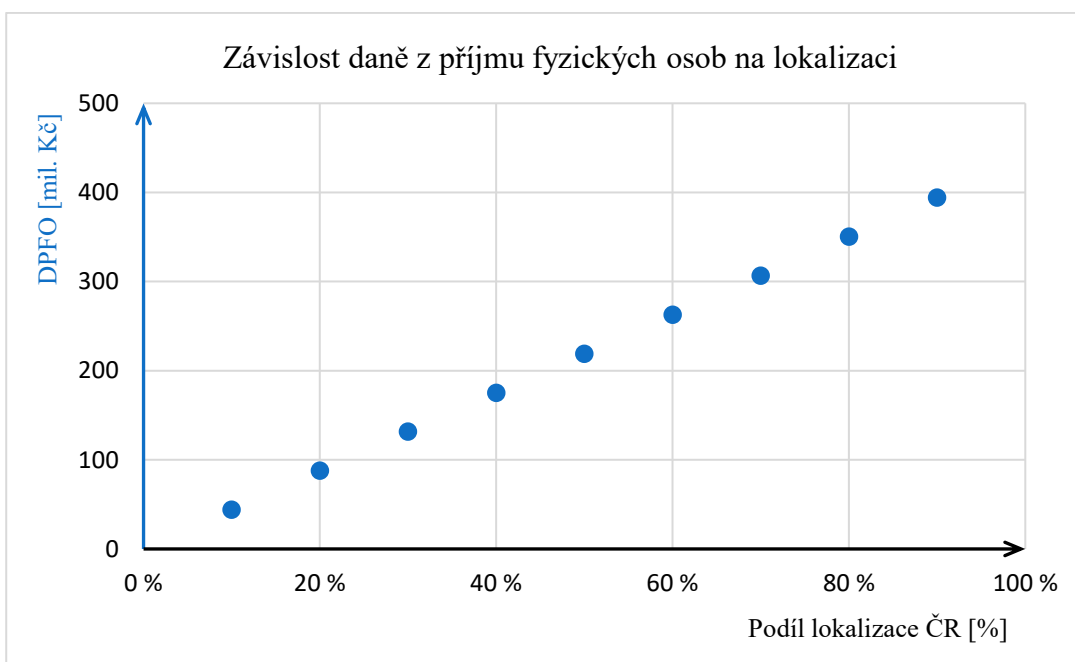
Dalším prvkem nutným pro kladnou ekonomickou efektivitu je příznivý vývoj inflace. Citlivostní analýza ukazuje že projekt se za daných parametrů stává ekonomicky nevýhodným z hlediska NPV již při 4% meziroční změně inflační míry.



Obr. 4.7: Závislost NPV na meziroční inflační míře

#### 4.5.6. Lokalizace

Lokalizační část modelu číselně naznačuje zvyšování zisku státu při maximalizaci lokalizace stavebního personálu. Graf naznačuje, že výše daně lokalizovaného stavebního personálu se pohybuje v řádech stovek miliónů Kč. Při vyčíslení dalších faktorů zmíněných v kapitole 4.1 bude příspěvek ke státnímu rozpočtu mnohem vyšší. Tento koncept je jedním z argumentů pozitivního angažování státu ve výstavbě SMR.



Obr. 4.8: Závislost DPFO stavebního personálu na lokalizaci

#### 4.6. Rekapitulace hlavních vstupů a výsledků ekonomické analýzy

<b>Vstupní veličina projektu</b>	<b>Hodnota</b>
Investiční náklady [mil. EUR]	2 100
Roční provozní náklady [mil. EUR]	87,36
Roční dodávka elektřiny [TWh]	2,24
Meziroční změna inflace [%]	2
Meziroční změna ceny elektřiny [%]	2
Diskont [%]	6,59
<b>Ukazatele ekonomické efektivity projektu</b>	<b>Hodnota</b>
NPV [mil. EUR]	1 042,4
RCF [mil. EUR]	69,5
IRR [%]	9,55
PP [roky]	19,6
DPP [roky]	28,6
ROI [%]	14,50

Tab. 4.5: Rekapitulační tabulka vstupů a výstupů ekonomické analýzy



## 5. Hlediska komerčního uplatnění SMR

Pro úspěch projektu je zapotřebí zajištění komerčního uplatnění produktu. Hlediska komercializace produktu nejsou pevně stanovena, i když jsou podmíněna povahou produktu. V případě SMR bude např. ekonomická efektivita jedním z dominantních faktorů při porovnávání projektů od různých dodavatelů, to ale automaticky nezaručuje výběr projektu podle nejlepších ekonomických ukazatelů. Technologické, ekonomické nebo jiné zdokonalování projektu zvyšuje hodnotu specifických ukazatelů, které jsou pak pro investora známkou tržní připravenosti.

Hlavním a bezpodmínečným faktorem u SMR je bezpečnost. Ukazatelem zaručující určitou bezpečnost designu je získání licence v zemi původu. Dalším milníkem může být úspěšná realizace FOAK projektu, kterou společnost prokazuje hladkost průběhu realizace a provozuschopnost technologie. Snaha dodavatelských společností o dosažení těchto dvou milníků v co nejbližší době je tedy pochopitelná, protože tak prokazují tržní připravenost svého projektu.

Prokázání tržní připravenosti je klíčová u nové technologie SMR. Pro investory je podstatné začít s realizováním SMR co nejdříve, a proto bude výběr dodavatele významně ovlivněn dobou dosažení zmíněných milníků. Harmonogramy uvažovaných designů SMR pro ČR udávají spouštění FOAK projektů kolem roku 2030. Dosažení tohoto milníku je však některými společnostmi i opakovaně odkládáno, a tím do určité míry dodavatelské společnosti mj. snižují důvěryhodnost svých projektů.

### 5.1. Uplatnění SMR

Obecně lze najít uplatnění SMR kdekoli, kde je zapotřebí teplo, které je výstupní formou energie SMR. Velikost a dopravitelnost umožňuje nasazení SMR v odlehlých průmyslových oblastech. Vysokou bezpečnost SMR lze využít naopak pro umístění zdroje do blízkosti osídlených oblastí jako výtopny a kogenerační zdroje. Možnosti uplatnění SMR v ČR jsou užší, ale neméně důležité. V současné chvíli se v ČR diskutuje především o třech hlavních využití SMR, a to především v návaznosti na uhlíkovou neutralitu.

### **5.1.1. Elektrická energie**

Hlavní potenciál SMR je náhrada především uhelných elektráren pro uspokojení tuzemské poptávky po elektrické energii.

Jaderné elektrárny jsou stabilním zdrojem energie s nízkými palivovými náklady. Proto je optimální nepřetržitý provoz pro pokrytí základního zatížení. Při přebytku výkonu lze nadbytečnou energii využít jiným způsobem, např. kombinovanou výrobou tepla.

Výkon jaderných elektráren lze i regulovat. Při zvyšování instalovaného elektrického výkonu intermitentních zdrojů je potřeba zajistit stabilitu elektrické sítě. SMR mohou poskytovat podpurné služby pro dodržení spolehlivého provozu elektrizační soustavy a tvořit s intermitentními zdroji vzájemně se doplňující energetický mix.

### **5.1.2. Tepelná energie**

Uhelné teplárny a výtopy jsou majoritním výrobcem tepla v ČR. Při odstavování uhelných zdrojů energie bude potřeba nalézt jejich náhradu. SMR umístěné v lokalitách postupně odstavovaných uhelných zdrojů by mohli využít stávající soustavy zásobování teplem, popř. je rozšířit. V současné době lze uvažovat pouze lokality stávajících elektráren, které vlastní Skupina ČEZ, protože většinu tepláren a výtopen vlastní soukromé subjekty.

### **5.1.3. Výroba vodíku**

Reaktory chlazené plynem a tekutými kovy nebo solemi umožňují vysokoteplotní výrobu tepla např. pro výrobu vodíku nebo jiného vysokoteplotního průmyslu. V případě vodíku, o který v současné době stoupá zájem při snaze dosažení uhlíkové neutrality se nabízí právě spojení SMR a výroby vodíku vysokoteplotní elektrolýzou. Vzhledem k bezpečnostním, a tedy i legislativním důvodům je realizace výroby vodíku v blízkosti jaderného zařízení v ČR takřka nemožná.

## **5.2. Kvalitativní výzkum**

Nasazení SMR v ČR je spojeno s řadou rizik a hledisek. Hledisek problematiky může být nespočetně a každý si může určit prioritu některého hlediska před jiným. Vhodným náhledem do problematiky je názor s pohledy odborníků v oblastech energetiky a SMR.

Tato kapitola obsahuje vhléd odborníků ze Skupiny ČEZ, která jako jediná v ČR provádí investorskou přípravu v oblasti SMR, na problematiku v podobě odpovědí na sestavený dotazník. Odpovědi respondentů shrnují různá hlediska komercionalizace. Respondenty jsou:

- Ing. Ivo Kouklík, MBA – konzultant pro divizi nová energetika, ČEZ, a. s.
- Ing. Silvana Jirotková – ředitelka útvaru rozvoje SMR, ČEZ, a. s.
- Ing. Jakub Líman, Ph.D. – manažer útvaru řízení programu SMR, ČEZ, a. s.
- Ing. Lukáš Novotný – specialista licencování a povolování SMR, ČEZ, a. s.

### 5.2.1. Dotazník

**a) Do jaké míry lze nahradit tuzemské uhelné elektrárny v rámci cílů dekarbonizace výstavbou SMR při snaze zachování alespoň částečné energetické soběstačnosti ČR?**

*„Jaderné reaktory jsou jednou z cest k dekarbonizaci. Uhelné elektrárny jsou především využívány v základním zatížení, proto z pohledu el. sítě je vhodné je nahradit jadernými elektrárnami. Myslím si, že pro pokrytí základního zatížení jsou vhodnější velké reaktory.*

*SMR beru jako významný doplněk a je potřeba je využít zejména v jiných než současných jaderných lokalitách a zvažovat jejich kombinaci pro výrobu tepla a elektřiny.“*

(Ing. Ivo Kouklík, MBA)

*„ČR v tuto chvíli svým energetickým mixem pokrývá veškerou svou spotřebu elektrické energie a elektřinu částečně vyváží. S ohledem na zajištění energetické bezpečnosti státu by dle názoru ČEPS neměla klesnout soběstačnost pod 90 %. Osobně zastávám stejný názor navíc v situaci, kdy v příštích letech s vynuceným odchodem od uhlí, bude celý evropský region v obdobné situaci. Pokud se řada zemí spolehne na částečný dovoz elektřiny, je otázkou, zda na druhé straně bude dostatek exportérů. Z dnešního pohledu se zdá, že nikoliv. Scénáře ČEPS i ČEZ a.s. ukazují na významné chybějící zdroje už v roce 2050, modely ČEZ a.s. hovoří o 35-55 chybějících TWh ročně, pokud nebude kromě 5. dukovanského bloku postaven i 6. a zároveň dva velké bloky v Temelíně. Tyto zdroje však postupně nahradí jen zdroje dosluhující. I přes masivní výstavbu OZE, především FVE, stále zbude dozdrojovat až 3 000 MWe instalovaného výkonu.*

*Právě toto množství se nabízí pokrýt výstavbou SMR, a to primárně v lokalitách, které jsou nyní závislé na uhlí.“*

(Ing. Silvana Jirotková)

*„Míra lokalitního nahrazení uhelných elektráren záleží na přírodních podmínkách lokality a hodnocení míry republikového nahrazení mělo být cílem vyhledávací studie MPO v roce 2016.“*

(Ing. Jakub Líman, Ph.D.)

*„V rámci České republiky má náhrada uhelných elektráren výstavbou jaderných elektráren, ať už velkých nebo malých, velký potenciál, jelikož do budoucna musíme zajistit stabilitu sítě a kontinuální dodávky pro domácnosti i průmysl. Náhradu uhlí za jaderné elektrárny zahrnuje i Státní energetická koncepce. Jaký poměr mezi velkými a malými zdroji do budoucna bude je složité odhadovat.*

*V rámci obměny zdrojů bychom se pro SMR měli soustředit i na teplárenství a zachování SCZT a podpořit decentralizaci zdrojů. V rámci SMR je nyní očekávána výstavba 3 000 MW<sub>e</sub>, kdy většina projektů je směřována na uhelné lokality. Jedná se tak o přibližně 30% náhradu.“*

(Ing. Lukáš Novotný)

**b) Jak lze lokalizací ovlivnit závislost na dodavatelské společnosti při výstavbě nebo provozu elektrárny se SMR? Jaké maximální lokalizace ČR lze podle současných možností tuzemského průmyslu dosáhnout?**

*„Závislost na dodavatelské společnosti je především otázkou převodu maximálního „Intellectual property“ na provozovatele. Lokalizace dodávek českými firmami a zejména dceřinými společnostmi ČEZ je dobrým předpokladem pro přenos know-how a jeho udržení. Toto platí pro objem zařízení vyráběného danými společnostmi. Je nutné zajistit i přenos know-how v oblasti projektu, IT atd.*

*Při reinkarnaci českých firem s vizí dlouhodobých zakázek a široké podpory vlády pro studenty středních a vysokých škol si troufnu odhadnout 70%. V podstatě mimo ČR vidím bezpečnostní SKŘ, HCC, palivo, parogenerátory, DG, radiační přístroje atd.“*

(Ing. Ivo Kouklík, MBA)

*„V oblasti přípravy výstavby velkých bloků je skloňována lokalizace v rozsahu kolem 65 %. Český průmysl má zcela jistě kapacity i kompetence toto pokrýt, případně si tyto*

*kapacity je schopen vybudovat. Základní podmínkou, aby toho bylo dosaženo, je jasné zadání státu, tj. deklaráce jaderného programu ČR pro budoucí minimálně 3 dekády. S takovým příslibem budou mít české firmy dostatek motivace se přizpůsobit. Podobně tomu bude v případě SMR.“*

(Ing. Silvana Jirotková)

*„Lokalizace nemá jen ekonomický dopad, ale zahrnuje spousta neocenitelných externalit jako např. jaderné know-how, prestiž nebo jaderná kompetence ČR. Maximální míra lokalizace se těžko odhaduje bez hotového projektu.“*

(Ing. Jakub Líman, Ph.D.)

*„Lokalizace dodavatelů SMR je zásadní pro pozitivní dopady projektu na HDP státu a minimalizaci rizik spojených se společnostmi v zahraničí. Pokud budou české společnosti zapojeny do výstavby, přenosu znalostí a sdílení technologie, dochází k budování soběstačnosti ČR v rámci jaderného programu. Soběstačnost je následně využita po celou dobu provozu pro servis a kontroly. Není tak nutné se spoléhat na zahraniční společnosti a stabilitu politického prostředí, ale vše je garantováno v rámci jednoho státu.*

*Maximální míra lokalizace se bude lišit podle zvolených designů, ale obecně lze hovořit o možnosti lokalizace přes 60 %.“*

(Ing. Lukáš Novotný)

**c) Není konkurenční boj dodavatelských společností o snahu nejrychlejší realizace FOAK projektu, potažmo komerčního prodeje rizikový z pohledu bezpečnosti a připravenosti technologie?**

*„Spěch vždy znamená vyšší riziko nedomyšleností a chyb. Je potřeba, aby si toto uvědomovali projektanti, provozovatelé i dozory a se zvýšenou pečlivostí kontrolovali předloženou dokumentaci a projekt a výrobu a testy. Ale vždy něco musí být poprvé, časové prodlužování neznámá, že vše bude bezpečnější.“*

(Ing. Ivo Kouklík, MBA)

*„Technologické firmy, které připravují svá řešení SMR, mají své ambiciózní plány přípravy a spuštění FOAK. Všechny připravované designy však musí projít standardním licenčním procesem. Regulátoři v příslušných zemích nejsou prozatím příliš nakloněni*

*jakémukoliv zrychlení, nemají na to kapacitu, a rozhodně ne na úkor bezpečnosti, ta bude vždycky na prvním místě.“*

(Ing. Silvana Jirotková)

*„Ano, je. V jaderném prostředí se využívá především dlouhodobě ověřených technologií. Chvat a spěch se neslučuje s jadernou kulturou.“*

(Ing. Jakub Líman, Ph.D.)

*„Není. Konkurenční boj je výhodný z hlediska rychlosti přípravy a snahy o dokončení designu. Zároveň je pro nás konkurence výhodná z hlediska ceny dodávané technologie. Bezpečnost musí být výrobcem zajištěna a zohledněna v rámci celého designu, a musí být prioritizována, ale vždy bude následovat dodatečná kontrola příslušného jaderného dozoru, který má povinnost ohlídat bezpečnostní hlediska projektu. Jaderné dozory nemohou být do konkurenčního boje zataženy a musí prověřit celý design. Nesmí dojít k ovlivňování jakéhokoliv rozhodování či urychlení procesů. Pokud by k tomu docházelo, tak konkurenční boj tvoří zásadní problém.“*

(Ing. Lukáš Novotný)

**d) Jakým způsobem ovlivňuje tuzemské legislativní prostředí povolování a realizaci SMR? Bude nutné současnou legislativu změnit pro úspěšné nasazení SMR v ČR?**

*„Legislativní prostředí ČR zatím SMR nezná. Bez změn příslušných zákonů a vyhlášek SMR ztrácí své největší výhody – jednoduchost a rychlost. Osobně bych za současného stavu legislativy SMR nestavěl.“*

(Ing. Ivo Kouklík, MBA)

*„Ano, legislativu bude nutné upravit. Novela atomového zákona je ostatně v běhu a její návrh by měl být připraven do konce roku. Je nutné jej, a především související vyhlášky upravit tak, aby byly použitelné i pro jiné technologie než VVER, pro jejichž provoz sloužily dosud.*

*Samostatnou kapitolu jsou úpravy, který by mohly proces licencování SMR urychlit, například využitím odstupňovaného přístupu. V případě SMR se oproti velkým blokům nabízí také licencování typového reaktoru, které by bylo aplikovatelné následně v jednotlivých lokalitách, kde by probíhalo již „jen“ povolování dané lokality v návaznosti na její specifika.“*

(Ing. Silvana Jirotková)

*„Ano, bude. Pomohly by doplňky atomového zákona. Jmenovitě např. možnosti předlicenčních konzultací s hmatatelným výstupem nebo zobecnit atomový zákon na úroveň požadavků IAEA. Momentálně je totiž atomový zákon šitý na míru pouze stávajícím provozovaným reaktorům v ČR.“*

(Ing. Jakub Líman, Ph.D.)

*„Zásadním způsobem. Povolování a realizace musí dodržovat povolovací procesy a pokud nebude SMR legislativě vyhovovat, není možné zahájit výstavbu. Tento fakt ovlivňuje například rozvoj reaktorů IV. generace, které nejsou v české legislativě vůbec uvažovány. Pro úspěšné nasazení není nutné legislativu změnit. Dle současných požadavků můžeme SMR postavit, ale výstavba s sebou ponese nutné změny v designu, prodloužení času výstavby a zvýšení nákladů. Tudíž je pro úspěšný rozvoj a implementaci SMR v rámci ČR nutné reflektovat požadavky nových technologií. Jedině tak je možné v rámci fleetové výstavby řešit u navazujících projektů pouze site specific změny a není nutné ověřovat vždy celý projekt.“*

(Ing. Lukáš Novotný)

**e) Do jaké míry se dá předpovídat angažovanost státu při nasazování SMR v ČR? Jaká je současná spolupráce Skupiny ČEZ a státu v oblasti SMR? Jak by spolupráce vypadala optimálně?**

*„V Česku je podle mě nemožné předpovídat dlouhodobé chování státu. Pokud stát nebude výrazně a razantně podporovat SMR, tyto reaktory v ČR nebudou. Optimální spolupráce – ve státní správě je pozice místopředsedy vlády pro jaderné projekty, který řídí všechna relevantní ministerstva v oblasti jaderných projektů. SÚJB je personálně obsazeno tak, aby licencování bylo pragmatické, rychlé a předvídatelné. Stát zjednodušuje legislativu. Stát je úspěšný v jednání s EU, garantuje financování a umožňuje rychlou organizaci výběrových řízení.“*

(Ing. Ivo Kouklík, MBA)

*„Stát prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu určuje politiku v energetickém sektoru prostřednictvím Státní energetické koncepce (SEK). V tuto chvíli běží její aktualizace. Prozatím byly zveřejněny Teze, které označují jaderné zdroje v kombinaci s OZE jako základ budoucího energetického mixu ČR. Jak přesně budou SMR v SEK*



*obsaženy, jak velký instalovaný výkon bude v cílech SEK obsažen v oblasti jaderných zdrojů prozatím není jasné. Zřejmé je, že v budoucnu budeme muset nejen nahradit stávající dosluhující bloky novými, ale také je doplnit minimálně 3 GWe dalších jaderných zdrojů, SMR se pro zajištění této části zdrojové základny nabízejí. Stát tedy musí určit směřování energetické politiky, ale také připravit adekvátní podmínky, a to v legislativě, vzdělávání i financování.“*

(Ing. Silvana Jirotková)

*„Angažovanost státu se momentálně nedá předpovídat, příkladem je zrušení temelínského tendru v roce 2014. Současná spolupráce Skupiny ČEZ se státem probíhá na úrovni pravidelných jednání technické skupiny. Ideálním stavem by byla jasná formulace cílů ze strany státu, tj. určení koncepce, resp. kroků k naplnění cílů státu, a to takovým způsobem, aby byli jasně přiřazené činnosti všech zúčastněných subjektů. Obecně jde o specifická zadání a vytváření investorského prostředí.“*

(Ing. Jakub Líman, Ph.D.)

*„Předpovídat zapojení státu je vždy ošemetné a nikdy není jistá podoba zapojení a garancí. V současné době probíhá spolupráce v rámci Stálého výboru pro výstavbu nových jaderných zdrojů a příslušných aktivit pod výbor spadajících. Výstupem by mohl být Plán pro rozvoj SMR, který by se stal zásadním dokumentem pro rozvoj SMR v ČR. Pokud by byl Plán schválen na vládní úrovni, jednalo by se o indikaci, že stát má o tuto technologii zájem. Optimálně by měl stát deklarovat své zájmy a vytvořit investiční prostředí stabilní pro výstavbu jaderných zdrojů.“*

(Ing. Lukáš Novotný)

### **5.2.2. Shrnutí výzkumu**

- a) Do jaké míry lze nahradit tuzemské uhelné elektrárny v rámci cílů dekarbonizace výstavbou SMR při snaze zachování alespoň částečné energetické soběstačnosti ČR?**

Otázka nahrazení uhelných elektráren v ČR lze pojmout dvěma směry. Možnost lokální náhrady uhelné elektrárny SMR je omezena především přírodními podmínkami specifické lokality a její možnosti pro přeměnu lokality na jadernou.

V celostátním měřítku bude zapotřebí co nejvíce vyplnit deficit vytvořený odchodem od uhlí. Stejně jako uhelné elektrárny jsou jaderné elektrárny vhodné pro využití



v základním zatížení, a proto jsou dobrým kandidátem pro snížení deficitu instalovaného výkonu při udržení stabilní a kontinuální dodávky elektřiny.

Podle předpokladů se očekávají i s nahrazenými bloky velkých jaderných elektráren desítky chybějících TWh elektrické energie, a to i za předpokladu stálého zvyšování podílu OZE v energetickém mixu. Pro uspokojení předpokládané poptávky je v uvažování výstavba 3 000 MWe instalovaného výkonu pomocí SMR, to odpovídá zhruba 30 % stávajícího instalovaného výkonu uhelných elektráren v ČR.

**b) Jak lze lokalizací ovlivnit závislost na dodavatelské společnosti při výstavbě nebo provozu elektrárny se SMR? Jaké maximální lokalizace ČR lze podle současných možností tuzemského průmyslu dosáhnout?**

Ovlivnění závislosti na dodavatelské společnosti je především otázkou přenosu know-how a jeho udržení, kterého lze lokalizací dosáhnout. Lokalizace tedy zapříčiní kromě pozitivního ekonomického dopadu také neocenitelný přínos v podobě získání jaderného know-how, prestiže a jaderné kompetence ČR. Tak lze dosáhnout minimalizaci rizik při výstavbě, provozu a servisu jaderných projektů a zvýší se tak soběstačnost ČR v jaderném sektoru.

V současné době lze možnou lokalizaci českého průmyslu stěží určit. Kromě možností českého průmyslu také záleží na designu zvolené technologie. Odborný odhad maximální lokalizace se pohybuje kolem 65 %. Odhad ovšem předpokládá aktivní činnost tuzemských firem při vizi dlouhodobých zakázek a podporu vlády v podobě garancí a deklarace dlouhodobého jaderného programu ČR.

**c) Není konkurenční boj dodavatelských společností o snahu nejrychlejší realizace FOAK projektu, potažmo komerčního prodeje rizikový z pohledu bezpečnosti a připravenosti technologie?**

Obecně není spěch v odvětví jaderných technologií velmi vítaný. I přes jakoukoliv snahu o zrychlení vývoje a realizace projektu je ale design podrobován licenčnímu procesu a příslušným jaderným dozorem zaručující dostatečnou úroveň technologie. Licenční procesy, kontroly a testy nejsou součástí konkurenčního boje a nejsou především kvůli důrazu na bezpečnost ani urychlovány.

**d) Jakým způsobem ovlivňuje tuzemské legislativní prostředí povolování a realizaci SMR? Bude nutné současnou legislativu změnit pro úspěšné nasazení SMR v ČR?**

Současná jaderná legislativa je přizpůsobena současně provozovaným reaktorům v ČR. Pro úspěšné nasazení SMR v ČR s využitím výhod technologie bude nutné legislativu zobecnit při zachování bezpečnostních požadavků. Inspirací pro změny mohou být mezinárodní požadavky IAEA.

Vhodné zlepšení legislativního prostředí může poskytnout odstupňovaný přístup, předlicenční konzultace nebo možnost licencování typového reaktoru. Tak by stačilo při opakované výstavbě licencovat pouze součásti technologie měnící se s lokalitou.

**e) Do jaké míry se dá předpovídat angažovanost státu při nasazování SMR v ČR? Jaká je současná spolupráce Skupiny ČEZ a státu v oblasti SMR? Jak by spolupráce vypadala optimálně?**

Angažovanost státu při nasazování SMR se předpovídat nedá i když je nutná, a to dlouhodobě. Skupina ČEZ je součástí Výboru pro výstavbu nových jaderných zdrojů v ČR, jehož výstupem by měl být plán pro rozvoj SMR.

Optimální přístup státu by spočíval především v jasné deklaraci zájmů, směru energetické politiky a zajištění legislativy, vzdělávání a financí, které vytvoří investiční prostředí pro výstavbu nových jaderných zdrojů.

## 6. Závěr

Bakalářská práce představuje specifika a povolování malých modulárních reaktorů, doplněnou o ekonomickou analýzu SMR v ČR a diskuzi odborníků o problematice nasazování SMR v ČR.

V rámci prvního úkolu a uvedení technologického zázemí jsem představil základní charakteristiku malých modulárních reaktorů. Reaktory jsem rozdělil dle typu chladicího média a zaznamenal hlavní parametry, využití, výhody a nevýhody reaktorů. Pro výstavbu SMR je ve výběrovém řízení celkem šest projektů s tlakovodními reaktory a jeden s varným. Směřování k tlakovodním reaktorům je racionální především z důvodu získaných zkušeností ze stávajících tuzemských elektráren v ČR.

Druhá část popisuje náročnost českého legislativního prostředí v oblasti výstavby nových jaderných zdrojů. Postup jsem popsal a vytvořil grafické znázornění, které čtenáři usnadňuje pochopení procesu povolování. Hlavním problémem současného legislativního prostředí je omezení pouze na provozované reaktory. Při snaze výstavby SMR by tak byli vytlačeny hlavní důvody pro výstavbu SMR, kterou je především jednoduchost a rychlost. Návrhů pro zlepšení legislativního prostředí je hned několik, obecně jde ale o jeho celkové zjednodušení a zobecnění pro plné využití výhodných aspektů, které SMR oddělují od velkých bloků.

Projekt SMR je za stanovených předpokladů výnosný a návratný. Výsledky ekonomické části přináší do diskuze klíčové argumenty. Výstavba SMR je spojena jako každý jaderný projekt s vysokými investičními náklady a dlouhou dobou návratnosti, a proto je z investičního hlediska rizikový. Jedná se ale o stabilní zdroj, který může v delším časovém horizontu nahradit emisní zdroje využívané v základním zatížení, které jsou nezbytné pro spolehlivou a nepřetržitou dodávku energie. Pro snahu o všeobecně žádanou energetickou soběstačnost by měl stát projevit významnou iniciativu při nasazování SMR v ČR a podpořit tak rozvoj jaderných projektů. Podpůrným argumentem je pak lokalizace výstavby a provozu SMR, ze které plyne mj. nezanedbatelný ekonomický přínos státu.

Poslední částí je souhrn klíčových hledisek o nasazování a uplatnění SMR v ČR na základě kvalitativního výzkumu. Otázky byli směřovány na dekarbonizaci, lokalizaci nebo legislativní prostředí. Na otevřené otázky respondenti odpovídali obdobně. Zmiňovány byli poznatky a problematické aspekty nasazování SMR v ČR.

Odborníci se shodují v názoru na českou jadernou legislativu, která se bude pro úspěšné uplatnění SMR aktualizovat. Dalším výstupem je nutnost angažování státu v podobě poskytování financí, garancí a obecně nastavování vhodného investičního prostředí, ve kterém je třeba stanovit činnosti a cíle ČR v energetickém sektoru.

Možností navázání na bakalářskou práci je hned několik. Z technického hlediska lze rozšířit specifika malých modulárních reaktorů o inovativní bezpečnostní nebo jiné prvky, a to především u projektů dodavatelských společností uvažovaných pro ČR. Projektový rámec harmonogramu realizace malých modulárních reaktorů lze důkladněji specifikovat a popř. aktualizovat. Dalším způsobem rozvedení projektového řízení je detailnější popis investorské činnosti, která předchází řízením, stanoviskům a rozhodnutím během povolovacího rámce. Ekonomickou část práce lze rozšířit především rozvedením ekonomického modelu o možné způsoby financování a jejich vlivu na model, alternativním určením dynamických faktorů nebo jinými pohledy na model.

## 7. Seznam použité literatury a pramenů

- [1] ARIS – Technical Data. *IAEA* [online]. 2013 [vid. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://aris.iaea.org/sites/RCS.html>
- [2] BEDNÁŘOVÁ, Alžběta. Sodíkové reaktory I: Jak fungují nejúspěšnější rychlé reaktory? *Atominfo.cz* [online]. 2013 [vid. 2022-12-26]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2013/04/sodikove-reaktory-i-jak-pracuji-nejvykonnejsi-rychle-reaktory-soucasnosti/>
- [3] BWRX-300. GE Hitachi Nuclear Energy [online]. 2023 [vid. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://nuclear.gewater.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300>
- [4] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. Průměrné mzdy - 4. čtvrtletí 2022 [online]. 2023 [vid. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/ci/prumerne-mzdy-4-ctvrtleti-2022>
- [5] ČEZ, a. s. Základní typy jaderných reaktorů [online]. 2022 [vid. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>
- [6] ČNB. Aktuální prognóza ČNB [online]. 2023 [vid. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.cnb.cz/cs/menova-politika/prognoza/>
- [7] DAMODARAN, Aswath. Country Default Spreads and Risk Premiums [online]. 2023 [vid. 2023-05-10]. Dostupné z: [https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New\\_Home\\_Page/datafile/ctryprem.html](https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/ctryprem.html)
- [8] DAMODARAN, Aswath. Useful Data Sets [online]. 2023 [vid. 2023-05-10]. Dostupné z: [https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New\\_Home\\_Page/datacurrent.html](https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datacurrent.html)
- [9] DEPARTMENT 32400. Státní energetická koncepce. *MPO* [online]. 2015.
- [10] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠŤASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny*. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [11] DOYLE, J., B. HALEY, C. FACHIOL, B. GALYEAN a D. T INGERSOLL. Highly reliable nuclear power for mission-critical applications [online]. 2016. Dostupné z: [www.nuscalepower.com](http://www.nuscalepower.com)

- [12] HOLTEC HIGHLIGHTS. Společnost Holtec pokračuje v plánu na realizaci projektu SMR-160 v České republice [online]. 2022.
- [13] IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments [online]. 2022 [vid. 2023-05-10]. Dostupné z: <http://aris.iaea.org>
- [14] JIROTKOVÁ, Silvana [rozhovor]. 2023.
- [15] KLIK, František a Jaroslav DALIBA. Jaderná energetika. Praha: ČVUT, 1995.
- [16] KOUKLÍK, Ivo [rozhovor]. 2023.
- [17] LÍMAN, Jakub. Aktivity skupiny ČEZ v oblasti SMR [konference] . 2022.
- [18] LÍMAN, Jakub [rozhovor]. 2023.
- [19] LIOU, Joanne. What are Small Modular Reactors (SMRs)? IAEA [online]. 2021 [vid. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- [20] NOVOTNÝ, Lukáš [rozhovor]. 2023.
- [21] NUCLEAR AMRC. Small modular reactors in the UK [online]. 2023 [vid. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://www.namrc.co.uk/intelligence/smr/>
- [22] OTE. Roční zpráva [online]. 2023 [vid. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/rocnizprava?date=2023-01-01>
- [23] PATRIA ONLINE. Dluhopisy online [online]. 2023 [vid. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.patria.cz/kurzy/online/CZ0001002059/bond.html?type=govcz#online>
- [24] SKUPINA ČEZ. Spouštění JE a zkušební provoz [online]. 2020 [vid. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/zivotni-cyklus-elektrarny/spousteni-je-a-zkusebni-provoz>
- [25] STARÝ, Oldřich a Blanka KUČERKOVÁ. Přednášky a semináře předmětu Základy finančního managementu B1B16ZFM1 [přednáška]. Praha: FEL ČVUT. 2023
- [26] SÚRAO. Naše poslání [online]. 2023 [vid. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.surao.cz/o-nas/nase-poslani/>
- [27] ŠEVEČEK, Martin. Malé modulární reaktory u nás a ve světě. oEnergetice.cz [online]. 2018 [vid. 2022-12-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/male-modularni-reaktory-u-nas-ve-svete>

- [28] US NRC. Combined License Applications For New Reactors [online]. 2022 [vid. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/large-lwr/col.html>
- [29] VÁCHA, Petr. Projekt HeFASTo [online]. *Skupina ÚJV*. 2021.
- [30] VOYGR Power Plants. NuScale Power [online]. 2023 [vid. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/en/products/voygr-smr-plants>
- [31] ZELIANG, Chireuding, Yi MI, Akira TOKUHIRO, Lixuan LU a Aleksey REZVOI. Integral PWR-type small modular reactor developmental status, design characteristics and passive features: A review. *Energies*. 2020, **13**(11). ISSN 19961073.
- [32] ŽEŽULA, Lubor. Přehled současného stavu projektů MMR ve světě [online]. 2021.

## **8. Seznam příloh**

Příloha 1: Ekonomický model – karta 1.: *Ekonomické hodnocení SMR v ETE*