

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Masarykův ústav vyšších studií



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Uplatnitelnost malých a středních modulárních reaktorů v České republice

Autor: Ing. Lukáš Novotný

Studijní program: Projektové řízení inovací

Vedoucí práce: doc. Ing. Dalibor Vytlačil, CSc.

PRAHA 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novotný** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **466719**
Fakulta/ústav: **Masarykův ústav vyšších studií**
Zadávací katedra/ústav: **Institut manažerských studií**
Studijní program: **Projektové řízení inovací**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Uplatnitelnost malých a středních modulárních reaktorů v České republice

Název diplomové práce anglicky:

Applicability of Small and Medium Modular Reactors in the Czech Republic

Pokyny pro vypracování:

CÍL PRÁCE: Analýza současného stavu vývoje v oblasti malých modulárních reaktorů s posouzením možností využití v České republice..

PŘÍNOS: Modulární reaktory jsou významnou inovací v energetice, která bude ovlivňovat výrobu elektrické energie v blízké budoucnosti. Diplomová práce bude využita jako podklad pro vznik koncepce využití malých modulárních reaktorů v ČR dle Programového prohlášení vlády. Práce je příspěvkem k zajištění energetické bezpečnosti.

OSNOVA: 1. Úvod; 2. Teoretická část - Energetika, Energetika v EU, Historie jaderné energetiky v ČR, Malé modulární reaktory, Lokality; 3. Praktická část - Výběr/doporučení designu SMR, Výběr/doporučení lokality pro výstavbu SMR; 4. Závěr.

METODY: Systémová analýza, vícekritériální rozhodování, hodnocení ekonomické efektivity

Seznam doporučené literatury:

International Atomic Energy Agency. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 1. vydání, Vídeň, IAEA, 2022

International Energy Agency. World Energy Outlook 2022. 1. vydání, Paříž, IEA Publications, 2022

Zákon č. 263/2016 Sb. Atomový zákon. Praha, Sbírka zákonů České republiky, 2016

VYTLAČIL, Dalibor. Projektové řízení a řízení projektů. 1. vydání. Praha: ČVUT, 2008

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Dalibor Vytlačil, CSc. katedra inženýrské informatiky FSv

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

Datum zadání diplomové práce: **09.12.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **27.04.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

doc. Ing. Dalibor Vytlačil, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Dagmar Skokanová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. PhDr. Vladimíra Dvořáková, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Uplatnitelnost malých a středních modulárních reaktorů v České republice* vypracoval samostatně pod vedením pana doc. Ing. Dalibora Vytlačila, CSc. s využitím použité literatury uvedené ve zdrojích.

V Praze dne:

Podpis:

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Daliboru Vytlačilovi, CSc. za jeho ochotu, čas, trpělivost a vedení při vypracovávání diplomové práce.

Anotace

Předkládaná diplomová práce vznikla za účelem posouzení uplatnitelnosti malých a středních modulárních reaktorů v České republice a k porovnání vybraných lehkovodních designů a potenciálních lokalit pro výstavbu. Teoretická část je věnována vývoji a současnému stavu energetiky, s rozšířením v oblasti jaderné energetiky, v České republice a jejímu ovlivnění legislativou Evropské unie. Následně jsou popsány vyvíjené technologie malých a středních modulárních reaktorů a požadavky české legislativy na umístování jaderných zařízení. V praktické části je provedena analýza trhu malých a středních modulárních reaktorů. Posouzení uplatnitelnosti malých a středních modulárních reaktorů v České republice je provedeno pro vybrané lehkovodní koncepty a uhelné lokality. Koncepty a lokality jsou hodnoceny dle stanovených kritérií s následným doporučením výběru.

Klíčová slova

SMR, dekarbonizace, uhelné lokality, atomový zákon, jaderná energetika

Annotation

The submitted diploma thesis was created to assess the applicability of small and medium modular reactors in the Czech Republic and to compare selected light water reactor designs and potential sites for construction. The theoretical part is devoted to the evolution and the current state of the energy sector, with an extension in the field of nuclear power, in the Czech Republic and the way it is influenced by the European Union legislation. Subsequently, the developed technologies of small and medium-sized modular reactors and the requirements of the Czech legislation on the siting of nuclear facilities are described. In the practical part, the market analysis of small and medium-sized modular reactors is carried out. An assessment of the applicability of small and medium modular reactors in the Czech Republic is performed for selected light water concepts and for coal power sites. The concepts and sites are evaluated according to set criteria with subsequent recommendations for selection.

Keywords

SMR, decarbonisation, coal power sites, Atomic Act, nuclear energy

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam použitých symbolů | 10 |
| Úvod..... | 11 |
| Teoretická část..... | 12 |
| 1 Energetika v ČR | 12 |
| 2 Energetika v Evropské unii..... | 18 |
| 3 Historie jaderné energetiky v ČR | 22 |
| 4 Malé modulární reaktory..... | 29 |
| 4.1 Tlakovodní reaktory | 30 |
| 4.2 Varné reaktory | 30 |
| 4.3 Těžkovodní reaktory..... | 31 |
| 4.4 Vysokoteplotní reaktory..... | 32 |
| 4.5 Plynem chlazené rychlé reaktory | 32 |
| 4.6 Sodíkem chlazené rychlé reaktory | 33 |
| 4.7 Olovem chlazené rychlé reaktory | 33 |
| 4.8 Solné reaktory | 34 |
| 4.9 Výhody a nevýhody malých modulárních reaktorů | 34 |
| 5 Lokality..... | 37 |
| Praktická část..... | 41 |
| 6 PESTEL analýza..... | 41 |
| 7 Porterův model 5 sil..... | 43 |
| 7.1 Dodavatelé – vyjednávací síla dodavatelů | 43 |
| 7.2 Zákazníci – vyjednávací síla zákazníků | 43 |
| 7.3 Substituty – hrozba vzniku substitutů..... | 44 |

| | | |
|--------|---|----|
| 7.4 | Potenciální konkurenti – hrozba vstupu nových konkurentů na trh | 45 |
| 7.5 | Konkurence v odvětví – stávající konkurenti | 45 |
| 8 | Analýza hodnotového řetězce | 47 |
| 8.1 | Primární procesy | 47 |
| 8.2 | Podpůrné a řídicí procesy..... | 47 |
| 9 | Analýza vnitřního prostředí odvětví | 49 |
| 9.1 | Fishbone diagram..... | 49 |
| 9.1.1 | Popis příčin..... | 50 |
| 9.1.2 | Návrhy..... | 50 |
| 9.2 | Analýza klíčových kompetencí | 51 |
| 10 | Matice SWOT | 52 |
| 10.1 | SWOT – faktory a váhy | 52 |
| 11 | Výběr designu SMR | 55 |
| 11.1 | Porovnání designů SMR..... | 55 |
| 11.2 | Výrobci malých modulárních reaktorů..... | 57 |
| 11.3 | Rozhodovací metody..... | 58 |
| 11.3.1 | Saatyho metoda..... | 59 |
| 11.3.2 | Metoda vyrovnání nákladů | 62 |
| 11.4 | Pořadí porovnávaných designů | 64 |
| 12 | Výběr lokality pro umístění SMR | 65 |
| 12.1 | Ledvice | 66 |
| 12.2 | Počerady | 66 |
| 12.3 | Pruněřov | 67 |
| 12.4 | Tušimice..... | 67 |
| 12.5 | Dětmarovice | 68 |

| | | |
|------|---|----|
| 12.6 | Mělník..... | 68 |
| 12.7 | Porovnání lokalit pro umístění SMR..... | 69 |
| | Závěr | 71 |
| | Použitá literatura | 73 |
| | Seznam obrázků..... | 81 |
| | Seznam tabulek..... | 82 |

Seznam použitých symbolů

| Zkratka | Význam |
|----------------|---|
| CAPEX | Kapitálové náklady |
| ENTSO-E | Sdružení evropských provozovatelů přenosových soustav |
| EU | Evropská unie |
| MAF | Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 |
| SFEU | Smlouva o fungování Evropské unie |
| SMR | Malé modulární reaktory |

Úvod

Malé a střední modulární reaktory představují pro mnoho států novou příležitost v oblasti energetiky. Jedná se o perspektivní technologii z hlediska bezpečnosti, flexibility dodávek a rozsahu uplatnění. Malé a střední modulární reaktory by tak mohly být implementovány nejen do rozvinutých přenosových sítí, ale i v rámci odlehlých lokalit, mezi které mohou patřit i ostrovy nebo odlehlé doly na severu Kanady. Zároveň mohou sloužit jako náhrada fosilních zdrojů v rámci stále se zvyšujících požadavků na dekarbonizaci výroby elektrické energie a tepla.

Diplomová práce na téma Uplatnitelnost malých a středních modulárních reaktorů v České republice je zaměřena na potenciál využití nových jaderných technologií na našem území. Pro vyhodnocení možné uplatnitelnosti je v rámci práce mapován současný stav energetiky České republiky s doplněním o energetickou politiku Evropské unie. Česká republika již dlouhodobě provozuje jaderné elektrárny, což představuje významnou výhodu z hlediska vybudovaných znalostí a výrobních a provozních kapacit. Získané znalosti u velkých jaderných bloků je nutné rozšířit o nové koncepce malých a středních modulárních reaktorů, které jsou popsány z hlediska rozdílů technologie, potenciálů možného využití a podmínek z hlediska umístování.

Hlavním cílem diplomové práce je předběžné hodnocení zvolených designů a lokalit pro možné umístění v České republice. Porovnání je vytvořeno pouze na úzkou skupinu reaktorů z více než 200 světově vyvíjených konceptů a pro lokality již zahrnuté v Politice územního rozvoje. Jedná se tak o předběžný výběr s nutností rozsáhlých navazujících prací hodnocení technologie i lokalit pro finální výběr a rozhodnutí o výstavbě malých nebo středních modulárních reaktorů v rámci komerčních nebo státních společností.

Teoretická část

1 Energetika v ČR

Od vzniku samostatného Československa uběhlo již více než 100 let. Společně se společenským vývojem docházelo i k vývoji technickému, mezi který se neoddělitelně řadí i sektor energetiky. V roce 1918 dosahovala hrubá spotřeba elektřiny hodnoty 1 TWh, bylo spotřebováno 500 TJ plynu, produkce z obnovitelných zdrojů energie činila 0,1 TWh a přenos s distribucí zajišťovalo 1 500 km vedení. Jednotlivé faktory ovlivňovaly výsledný počet odběratelů, kdy přístup k elektrické energii mělo pouhých 33 % obyvatel a průměrná spotřeba domácnosti dosahovala 100 kWh. Energetický sektor znamenal v období První republiky potenciál pro rozvoj hospodářství, a proto v roce 1919 Národní shromáždění přijalo zákon o všeobecné elektrizaci, pomocí kterého došlo k podpoře energetických společností a výstavbě až 500 km přenosových sítí ročně. Nově vybudované rozvodné sítě umožnily propojení jednotlivých zdrojů a koncových zákazníků. Jednotlivé zdroje se v průběhu let vyvíjely společně s vědeckými a technickými poznatky. V období 30. let 20. století byly využívány primárně vodní elektrárny a elektrárny spalující fosilní palivo. Následující desetiletí se neslo ve znamení plynofikace, budování elektráren a plynovodů. [1; 2]

V poválečném období bylo nutné obnovit hospodářství. Tyto snahy vyústily ve zdvojnásobení instalovaného výkonu elektráren, propojení decentralizovaných sítí v jednotnou centralizovanou soustavu a zvýšení spotřeby elektrické energie. Na území Čech a Moravy se rozvíjely dvě samostatné distribuční sítě na úrovni 220 kV, které byly v roce 1953 propojeny dvěma 100 kV linkami. Vedení 220 kV se brzy ukázalo jako nedostatečné pro požadavky průmyslu, a proto byla zahájena výstavba soustavy 400 kV. Prvních 346 km vedení na nové hladině bylo spuštěno v úseku Hradce u Kadaně – Prosenice v září 1965. Nově vybudovaná síť umožnila rozvoj energetických

zdrojů a letech 1970 až 1989 byly spuštěny elektrárny o celkovém výkonu 8 640 MW. V průběhu rozvoje došlo v roce 1979 k lednové energetické krizi, která negativně ovlivnila růst spotřeby elektrické energie. Zároveň ale otevřela příležitost pro jaderné zdroje. Po předchozích zkušenostech v ČSSR tak bylo rozhodnuto o výstavbě 4 bloků v lokalitě Dukovany a následujících 2 bloků v Temelíně. [1; 2]

Na začátku nového tisíciletí začalo docházet k významným změnám. Jednou z takových změn bylo zahájení snahy o snížení emisí v energetice. Masivně využívané uhelné elektrárny začaly být ekologizovány za účelem snížení dopadů na životní prostředí. Primárně byl cíleno na odsíření provozu, snížení počtu pevných částic a omezení emisí CO₂ a NO_x. Vysoký rozvoj energetického odvětví vyústil v roce 2001 zahájením činnosti Energetického regulačního úřadu, jehož cílem je do dnes regulace cen, ochrana zájmů spotřebitelů a držitelů licencí, kontrola hospodářské soutěže, dohled nad energetickým trhem a podpora využívání obnovitelných a druhotných zdrojů energií včetně kogenerace. Energetický regulační úřad nabyl vysoké důležitosti společně s postupným otevíráním trhu zahájeným v roce 2002. Otevření trhu umožnilo odběratelům výběr vlastního dodavatele elektrické energie. První přestupy byly povoleny velkým odběratelům a možnost se postupně rozšířila i na domácnosti v roce 2006. Trh se zemním plynem byl otevřen pro velké odběratele o tři roky později a na začátku roku 2007 byla celková liberalizace trhu dokončena. [1]

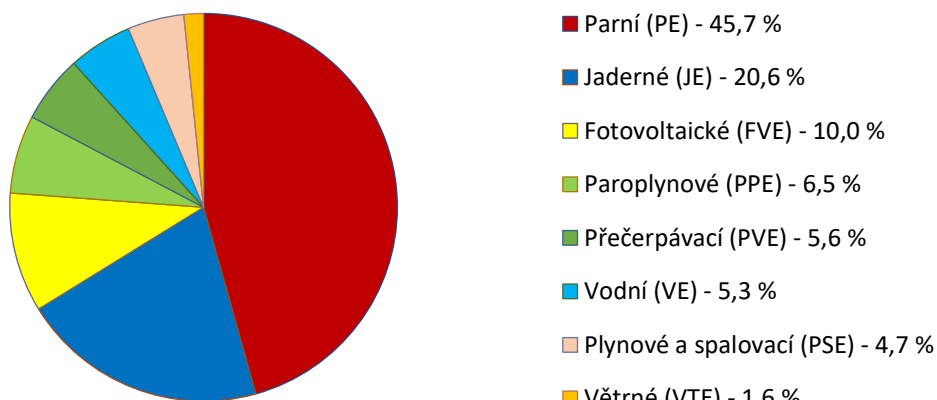
Dosud nejsledovanější energetické události 21. století spojené s úspěšnou výstavbou nových zdrojů byly spuštění jaderné elektrárny Temelín v roce 2002 a rychlý rozvoj fotovoltaických elektráren po roce 2008. K rozvoji fotovoltaických elektráren došlo na základě závazků České republiky vůči Evropské unii. Závazky zahrnovaly zvýšení hrubé konečné spotřeby energie v zemi na 13 % do roku 2020. Aby bylo možné závazky splnit a byla zajištěna ziskovost výstavby obnovitelných zdrojů, vytvořila Česká republika dotační systém podpory výstavby a provozu. Následná situace je často popisována jako „solární boom“, kdy vysoké výkupní ceny z fotovoltaických elektráren motivovaly

investory k rozsáhlým výstavbám. Následně došlo k regulaci dotačních programů a rozvoj obnovitelných zdrojů se výrazně zpomalil. [1]

Aktuální energetická situace, výstavba nových zdrojů a cena elektřiny je řešena Státní energetickou koncepcí z roku 2015. Státní energetická koncepce v sobě zahrnuje priority a strategické záměry státu v oblasti energetiky a slouží pro státní správu, investory i občany. Od předchozí energetické koncepce z roku 2004 bylo nutné v aktuální verzi zohlednit vstup do Evropské unie a příslušné dokumenty a politiky, včetně klimaticko-energetické politiky EU, nedostatečnou obnovu výrobních zdrojů a stárnoucí energetický mix, vzniklé tržní deformace nebo například i lidské kapacity a generační obnovu technických odborníků. Státní energetickou koncepcí je z důvodu dynamičnosti sektoru nutné obnovovat. Teze pro aktualizaci Státní energetické koncepce měly být schváleny vládou České republiky na začátku roku 2022 s odevzdáním prvního návrhu znění textu do jednoho roku od schválení tezí. Harmonogram nebyl naplněn z důvodu aktuální situace na Ukrajině a z důvodu zaměření na předsednictví České republiky v rámci Evropské unie. [3]

Historický vývoj a implementace národních strategií vyústily v současný energetický mix České republiky, který monitoruje Energetický regulační úřad a vydává čtvrtletní a roční zprávy o provozu elektrizační soustavy České republiky. Roční zpráva z roku 2021 ukazuje, že roční spotřeba elektrické energie v ČR dosáhla 61,8 TWh a přeshraniční saldo -11,1 TWh znamenající převažující celkový export nad importem. Zásobování přenosové soustavy bylo zajištěno následujícím energetickým mixem. [4]

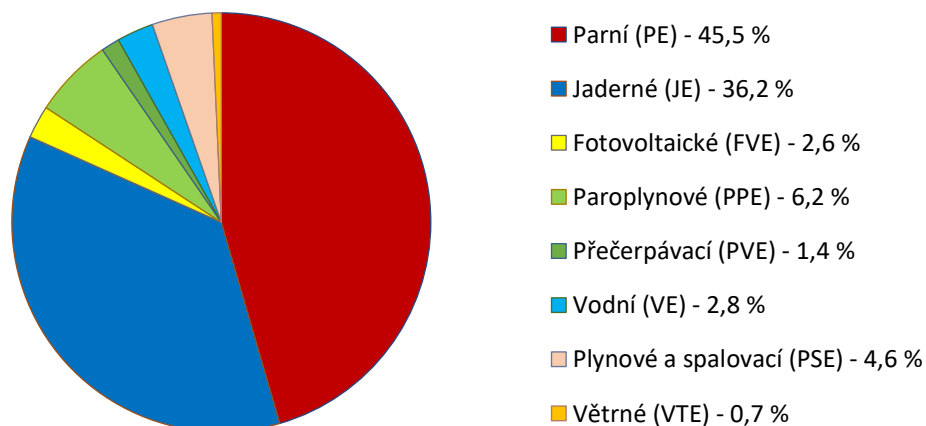
Podíl instalovaného výkonu ČR 2021



Obrázek 1: Podíl instalovaného výkonu jednotlivých zdrojů v ČR v roce 2021 [4]

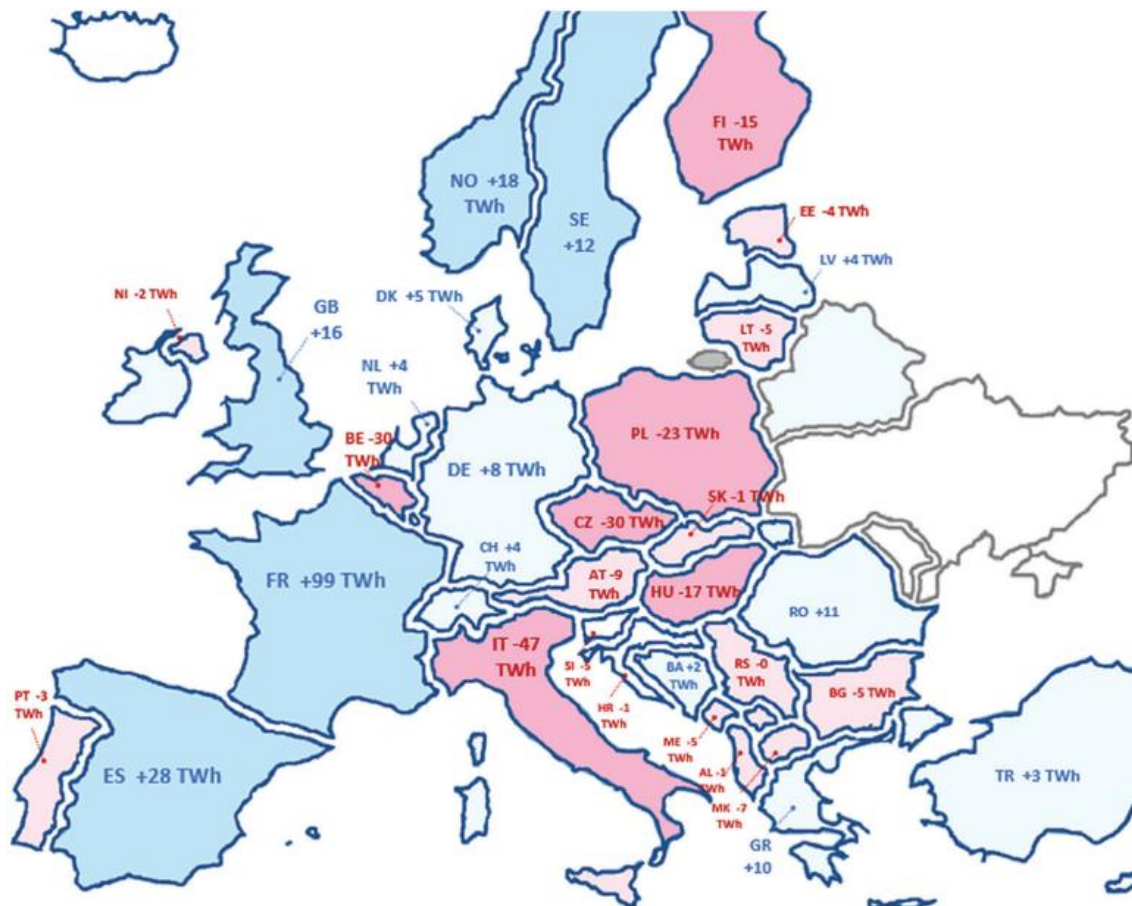
V grafu se projevuje výrazný historický vliv parních elektráren vybudovaných v 70. letech s navazující výstavbou jaderných zdrojů a také mohutnou výstavbu fotovoltaických zdrojů po roce 2008. Podíl instalovaného výkonu jednotlivých zdrojů elektrické energie je vhodné doplnit o graf hrubé roční výroby elektrické energie. Níže uvedený graf reflektuje vlastnosti jednotlivých zdrojů a jejich závislost na přírodě, ať už se jedná o délku osvitu nebo množství a rychlost proudícího větru a vody.

Hrubá výroba elektřiny ČR 2021



Obrázek 2: Podíl hrubé výroby jednotlivých zdrojů v ČR v roce 2021 [4]

Roční zprávy Energetického regulačního úřadu dlouhodobě zkoumají výše uvedené hodnoty. Od začátku tisíciletí byl energetický mix a množství instalovaných zdrojů v České republice výrazně v nadbytku a docházelo k exportu elektrické energie. Export elektrické energie znamenal soběstačnost z hlediska výroby, což pozitivně ovlivňovalo průmyslové a politické postavení České republiky. Statistiky historického a reálného stavu elektrizační soustavy poskytované Energetickým regulačním úřadem je z hlediska plánování nutné doplnit dalšími studii. Jednou z nejvýznamnějších studií zaměřených na budoucí rozvoj je Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF) zpracovávaný společností ČEPS spravující přenosovou soustavu. Studie jsou vypracovávány na základě legislativních požadavků a Nařízení Evropského parlamentu a Rady 714/2019 ve všech členských státech sdružení evropských provozovatelů přenosových soustav (ENTSO-E). Základním cílem dokumentu je sledování výrobních kapacit a jejich přiměřenosti ve vztahu k jednotlivým zdrojům. MAF vydaný v roce 2019 sleduje jednotlivé definované scénáře a jejich dopady na přenosovou soustavu v obdobích do roku 2040. Scénáře a časová období zkoumají na úrovni Evropské unie a České republiky saldo, předpokládanou ztrátu zatížení (Loss of Load Expectation – LOLE) a odhad nedodané elektřiny (Expected Energy not Served – EENS), včetně mezinárodních vlivů v rámci propojení energetických soustav. V rámci MAF vyplynulo, že v případě následování aktuálně plánovaného zeleného scénáře, splňujícího legislativu a smlouvy Evropské unie, lze v České republice v roce 2030 očekávat import 5,8 TWh, průměrné LOLE 2 237 hodin a průměrnou nedodanou elektřinu EENS na úrovni 1 661 GWh. Situace může být kritická i pro další státy Evropské unie, jak je znázorněno v následujícím přehledu. [5]



Obrázek 3: Přehled pro nízkouhlíkový scénář v roce 2040 zobrazující salda zemí v ENTSO-E [5]

2 Energetika v Evropské unii

Politika Evropské unie výraznou mírou ovlivňuje směřování jednotlivých členských států z hlediska energetiky. Právní základ pro aplikaci jednotlivých nařízení ustanovuje Smlouva o fungování Evropské unie (SFEU), konkrétně Hlava XXI – Energetika. SFEU se se zaměřuje na zabezpečení dodávek, energetické sítě, vnitřní trh s energií, vnější energetickou politiku a využívání jednotlivých zdrojů. O využívání jednotlivých zdrojů pojednává Článek 194. V bodě 1 Článku 194 je zdůrazněna potřeba ochrany a zlepšování životního prostředí v duchu solidarity mezi členskými státy při zajišťování bezpečnosti dodávek energie v EU, fungování elektrického trhu, podpoře energetické účinnosti a úspor elektrické energie včetně rozvoje nových a obnovitelných zdrojů a propojení energetických sítí. Členské státy nemají dle bodu 2 ovlivněny a omezeny práva z hlediska využívání svých vlastních energetických zdrojů, volbu mezi různými energetickými zdroji a základní skladbu zásobování energií. Není tak možné rozhodovat o energetickém mixu jednotlivých členských států. Na základě SFEU vznikají následná opatření, dohody a smlouvy. [6; 7]

- Zimní balíček

V roce 2015 došlo k podpisu Pařížské dohody, kterou se Evropská unie zavázala snížit emise skleníkových plynů. Závazek uvádí cíl snížení emisí o alespoň 40 % oproti roku 1990 do roku 2030. Za účelem realizace závěrů Pařížské dohody došlo dne 30.11.2016 k vydání Zimního balíčku. Dokument vydaný Evropskou komisí obsahuje osm návrhů cílících na přechod EU k čisté ekonomice a reformaci evropského energetického trhu. Návrhy mohou být dále rozděleny mezi úpravy existující legislativy energetického trhu, úpravy legislativy klimatické změny a nová řešení. Nejvýznamnější dopady na energetický mix obsahovala kategorie úpravy existující legislativy klimatických změn,

kdy došlo k revizím Směrnice o obnovitelných zdrojích energie a Směrnice o energetické účinnosti. Jaderná energetika do revizí zahrnuta nebyla. [8; 9]

- **Green Deal**

Po vydání Zimního balíčku začalo v Evropské unii docházet ke zpochybňování jednotlivých cílů z hlediska jejich nízké ambicióznosti. Na podněty reagovala prezidentka Ursula von der Leyen dne 11.12.2019 představením Evropského Green Dealu. Green Deal klade Evropské unii za cíl dosažení uhlíkové neutrality do roku 2050 v oblastech energetiky, dopravy a průmyslu. Vydaný Evropský právní rámec pro klima společně s uhlíkovou neutralitou obsahuje i aktualizaci cílů obsažených v Zimním balíčku. Došlo tak ke zvýšení cílů snižování emisí ze 40 % na alespoň 55 % do roku 2030. Jednotlivé požadavky byly shrnuty do balíčku Fit for 55 a měly by být podpořeny investicemi ve výši 1 bilionu eur. [10; 11; 12]

- **Fit for 55**

Balíček Fit for 55 byl přijat Evropskou komisí dne 14. července 2021 v návaznosti na Green Deal představený v roce 2019. Balíček cílí na zdůraznění pozice Evropské unie jakožto lídra v řešení klimatických otázek. Zásadními body jsou původně deklarované cíle zahrnující snížení emisí o 55 % oproti produkci v roce 1990 a dosažení klimatické neutrality do roku 2050. Regulační předpisy se zaměřují na výrobu elektrické energie, centrální zásobování teplem, kogeneraci, využití ploch, lesnictví a silniční transport. Dochází také ke změnám v systému emisních povolenek. Komise v balíčku navrhuje snížení emisních stropů a zvýšení omezení na roční produkce emisí. Tržní systém emisních povolenek začne postupně redukovat výjimky letecké dopravy a poprvé dochází také k zahrnutí lodní dopravy. Fit for 55 ovlivňuje i osobní dopravu, u které je požadováno snížení průměrných emisí nových automobilů o 55 % do roku 2030 a o 100 % do roku 2035. Porovnání je u obou údajů vůči hodnotám roku 2021.

Automobily vyrobené po roce 2035 tudíž musejí být bezemisní. Za účelem motivace ostatních zemí a omezení přesunu výroby do méně klimaticky ambiciózních států představila Evropská komise mechanismus uhlíkového vyrovnání. Importující státy a společnosti by tak měly finančně kompenzovat rozdíly mezi reálně vyprodukovanými emisemi ve výrobě a požadovanými emisemi v EU. Z hlediska energetické budoucnosti jsou podporovány primárně obnovitelné zdroje energie a energetická účinnost. [13]

- **Taxonomie – doplňkový delegovaný akt**

Vznik evropské taxonomie je ve velké míře spojován primárně s odvětvím bankovníctví. Dokument bankám umožňuje jednodušší orientaci a hodnocení možných investic z hlediska udržitelnosti, snižování dopadů na životní prostředí, přechodu na cirkulární ekonomiku, předcházení znečištění a obnovy biodiverzity a ekosystémů. V první verzi EU Taxonomie byly zahrnuty pouze obnovitelné zdroje energie. [14]

V návaznosti na základní dokument byl dne 2. února 2022 vydán doplňkový delegovaný akt. Rozšíření taxonomie objasňuje, že bylo nutné provést dodatečné studie v oblasti jaderné energetiky a dopadů jejího využívání na environmentální kritéria stanovená taxonomií. Primárně hodnoceným kritériem dle Evropské komise bylo „do no significant harm“. Zároveň došlo k zařazení plynu, jakožto fosilního paliva, mezi přechodně udržitelné investice. [15]

Finální text delegovaného aktu z 9. března 2022 oproti první zveřejněné verzi ze 31.12.2021 neobsahuje postupné přimíchávání obnovitelných plynů do fosilních plynů jednotlivých letech. Zachována byla ale nutnost přechodu na spalování výlučně obnovitelných plynů do konce roku 2035. Stejně tak zůstala přechodná povaha činností souvisejících se získáním energie pomocí spalování fosilních plynných paliv. Jaderná energetika je v aktuální verzi taxonomie hodnocena jako udržitelná technologie s možností výhodnějšího financování pro jaderné zdroje se stavebním povolením

obdrženým před rokem 2045. Zároveň Evropská komise podpořila kogeneraci v produkci tepla a vodíku. Významným bodem pro nové i současné projekty je nutnost přípravy výstavby a zprovoznění úložiště pro vysoce aktivní radioaktivní odpady do roku 2050. Dochází tak k významnému ovlivnění všech členských zemí využívajících jadernou energetiku a k akceleraci příprav hlubinných úložišť. Z hlediska obav v oblasti do no significant harm dochází k adresování možných vylučujících kritérií a nastavení přípustných limitů. Dále jsou řešeny body adaptace pro změnu klimatu, udržitelné využití a ochrana říčních a mořských zdrojů, přechod na cirkulární ekonomiku, předcházení a omezení znečištění a ochrana a obnova biodiverzity a ekosystémů. Mimo výstavbu nových jaderných zdrojů podporuje doplňkový delegovaný akt prodloužení životnosti provozovaných elektráren s rozhodnutím vydaným do roku 2040 a vývoj předkomerčních pokročilých technologií pro produkci elektrické energie s minimálním odpadem z palivového cyklu, neboli reaktory IV. generace. [16]

- **REPowerEU**

REPowerEU se řadí mezi jeden z nejnovějších dokumentů vydaných Evropskou komisí. Jedná se o plán zaměřený na úspory energie, výrobu čisté energie a diverzifikaci dodávek energií po ruské invazi na Ukrajinu. Evropská unie je z hlediska dodávek plynu zásobována primárně z Ruska. REPowerEU cílí na zvýšení soběstačnosti EU z hlediska dovozu surovin a energetické bezpečnosti. Nezávislost na ruských fosilních palivech by měla být dosažena do roku 2030. Kromě úspor elektrické energie Evropská komise podporuje rychlejší rozvoj obnovitelných zdrojů. Do roku 2027 by tak mělo být investováno o 210 miliard euro více, než bylo plánováno v předchozích iniciativách. S investicemi by měl členským státům pomoci Nástroj pro oživení a odolnost a z něj odvozené úvěry a nové granty financované z prodeje emisních povolenek. Členské státy tak mohou pro splnění cílů využít finance ve výši až 245 miliard eur. Ačkoliv bylo REPowerEU vydáno až po doplňkovém delegovaném aktu, jaderná energetika je v textu zmíněna pouze minimálně a pozornosti se jí dostává téměř výhradně v případě využití kogenerace s výrobou vodíku. [17]

3 Historie jaderné energetiky v ČR

Počátky jaderné energetiky na území České republiky se datují na začátek 50. let 20. století. V tomto období vznikl první výzkumný ústav zaměřený na jadernou energetiku, dnes Ústav jaderného výzkumu Řež, doplněný o první studijní programy a založení Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské v rámci ČVUT. Ke vzniku odborné a vědecké základny se přidalo vládní rozhodnutí o přípravě a zahájení výstavby první Československé jaderné elektrárny. [18]

V roce 1958 byla zahájena výstavba elektrárny v lokalitě Jaslovské Bohunice, dnešní Slovensko. Výstavbu zajišťovala společnost Škoda a reaktor byl dokončen roku 1972. Celkové náklady dosáhly 2,32 miliard československých korun a celý projekt byl financován ze státního rozpočtu. Koncept reaktoru A1 spočíval ve využití těžké vody jako moderátoru doplněné o CO₂ chladivo s celkovým čistým výkonem na úrovni 143 MW_e. Reaktor byl provozován s přírodním uranem. Z primárního okruhu bylo odváděno chladivo o teplotě 410 °C přes 6 parogenerátorů do sekundárního okruhu a následně na turbínu. [18; 19]

Reaktor A1 vyrobil za čtyři roky provozu celkem 916,1 MWh elektrické energie. Od spuštění reaktoru v roce 1972 došlo ke dvěma incidentům, kdy druhý případ vyústil v celkové uzavření elektrárny. První událost se odehrála 5.1.1976 a došlo k poruše uzavíracího mechanismu technologických palivových kanálů. Při výměně paliva, která u A1 probíhala za provozu reaktoru. Došlo k vymrštění palivového souboru a technologické zátky do prostoru reaktorové haly. Po vymrštění nastal únik chladiva z reaktoru do doby opětovného připojení zavážecího stroje, který otvor utěsnil. Dva zaměstnanci pracující na reaktorové hale nezaznamenali výstražné systémy a došlo u nich k udušení oxidem uhličitým. Při nehodě nedošlo k ozáření zaměstnanců,

k únikům radioaktivních látek do životního prostředí, ani k žádnému ohrožení veřejné bezpečnosti. Z tohoto důvodu neproběhlo zveřejnění informací. [19]

K druhému incidentu došlo 22.2.1977 při vložení nedostatečně zkontrolovaného palivového souboru do aktivní zóny. Vložený palivový soubor obsahoval nečistoty omezující průchodnost chladiva okolo jednotlivých palivových proutků. V aktivní zóně došlo k lokálnímu přehřátí paliva, technologického kanálu a těžké vody. Přehřátí způsobilo ztrátu integrity bariery mezi těžkovodním moderátorem a palivem s chladícím plynem. Došlo tak k porušení palivového pokrytí a zvýšenému úniku radioaktivity a štěpných produktů do primárního okruhu. Z důvodu koroze trubiček parogenerátorů došlo k netěsnosti mezi primárním a sekundárním okruhem, a tudíž i k úniku radioaktivity do sekundárního okruhu. Na základě analýz rozsahu škod rozhodla československá vláda v roce 1979 o uzavření a zahájení postupné likvidace elektrárny včetně odvozu paliva do Sovětského svazu. IAEA v roce 1991 vytvořila stupnici INES pro hodnocení závažnosti jaderných incidentů. Při zpětném hodnocení byla druhá nehoda ohodnocena stupněm 4 z celkových 7 možných. Rozhodnutí bylo učiněno po vyhodnocení úspěšného zachycení radioaktivních látek pomocí bariér a zabránění úniku radioaktivních látek do životního prostředí. Komunikace s veřejností proběhla pouze v omezeném rozsahu. Havárie tudíž není ve světě známa a obvykle není uváděna v žádných statistikách a zprávách, včetně zpráv Mezinárodní agentury pro atomovou energii. [19]

Znalosti z výstavby a provozu reaktoru A1 byly využity v Čechách i na Slovensku. V roce 1970 došlo k podpisu dohody mezi Československem a Sovětským svazem. Dohoda zahrnovala výstavbu 2 jaderných elektráren s celkovým výkonem 1 760 MW_e v lokalitách Jaslovské Bohunice a Dukovany. V rámci dohody o výstavbě byl využit ruský ověřený design reaktoru typu VVER-440. Jako první začala výstavba reaktorů V1 a V2 v lokalitě Jaslovské Bohunice a o 2 roky později, v roce 1974, byly zahájeny práce i v lokalitě Dukovany. Dukovanský projekt byl následně pozastaven a došlo ke změně

projektu z VVER 440/230 na typ VVER440/213. Po změně typu elektrárny byl projekt obnoven a v roce 1978 se zahájila výstavba. Na základě získaných zkušeností z reaktoru A1 mohlo být do projektu zapojené vysoké procento československých společností. Na území ČSSR bylo vyráběno více než 80 % technologie. Československé společnosti zastávaly i pozice generálních dodavatelů. V rámci stavby se jednalo o Průmyslové stavby Brno a technologii zajišťovala Škoda Praha. Ta v rámci technologie dodávala reaktorovou nádobu a turbogenerátory. Parogenerátory byly vyráběny společností Vítkovice. [20]

Na lokalitě byly budovány současně dva dvoubloky, kdy zavážka paliva do prvního bloku byla zahájena na konci roku 1984. Po úspěšných zkouškách byl 12.2.1985 spuštěn první reaktor a 24.2. došlo k přifázování prvního generátoru k síti. O den později byl přifázován i druhý generátor a na začátku května 1985 byl u prvního bloku oficiálně zahájen zkušební provoz. Do roku 1987 došlo ke spuštění zbývajících bloků, kdy Dukovany 3 a Dukovany 4 byly spouštěny v jednom roce. Jedná se tak o světový unikát. Výstavba a zprovoznění 4 bloků na lokalitě Dukovany představovaly náklady ve výši 25 miliard Kč. Investiční náklady na výstavbu elektrárny již byly několikrát zaplacený, jelikož dle provozovatele vyrábí Dukovany elektřinu za 0,6 Kč/kWh. [20]



Obrázek 4: Jaderná elektrárna Dukovany [21]

Po úspěšném dokončení a spuštění elektrárny Dukovany byly v roce 1982 zahájeny práce na novém projektu, elektrárně Temelín. Pro lokalitu Temelín československá vláda vybrala ruské reaktory typu VVER 1000 model V-320. Před zahájením výstavby projekt převzala společnost Energoprojekt za účelem přepracování pro podmínky na dané lokalitě. Na základě přepracovaného projektu začala v roce 1987 výstavba dvou z původně plánovaných čtyř bloků. Plán na výstavbu bloků Temelín 3 a Temelín 4 byl pro Sametové revoluci pozastaven. Zároveň se v lokalitě začaly objevovat protesty proti prvním dvěma blokům, ke kterým se přidala i politická skepse. Po rozpadu Československa rozhodla v březnu roku 1993 česká vláda o dostavbě prvních dvou bloků. Na základě rozhodnutí došlo k vypsání nových tenderů na určité části technologie. V rámci tenderů vyhrála zakázku na systémy měření a regulace americká společnost Westinghouse. Jednalo se tak o první zakázku, kdy americká společnost dodávala tyto systémy, včetně diagnostických systémů a systémů na měření radiace, do ruského designu reaktoru. Westinghouse zároveň vyhrál zakázku na dodávky paliva pro první závoz a následné 4 vsázky. [18]

První závoz paliva do bloku Temelín 1 proběhl v červenci 2000 a 11. října byla spuštěna štěpná reakce. Z důvodu dlouhodobého odporu ze strany Rakouska proběhlo před prvním přifázováním do sítě, dne 21.12.2000, setkání v Melku. Jednání se účastnil tehdejší předseda české vlády Miloš Zeman, rakouský spolkový kancléř Wolfgang Schüssel a evropský komisař G. Verheugen. Na základě jednání bylo rozhodnuto o opakovaném prověření jaderné bezpečnosti elektrárny Temelín a o rozšíření posouzení EIA. Závěry a požadavky shrnuje Protokol z Melku, který byl následně přijat vládou ČR včetně následných usnesení umožňujících realizaci závěrů. Závěry byly 29.11.2001 představeny v Bruselu, kde došlo k přijetí Závěrů melkského procesu a následných opatření, tzv. Bruselského protokolu. Protokol se později stal součástí smlouvy o vstupu České republiky do Evropské unie. Po politických procesech byl v roce 2002 zahájen zkušební provoz prvního bloku a po zavezení paliva a patřičných zkouškách byl ke konci roku přifázován do přenosové soustavy i druhý blok. Zkušební provoz byl zahájen 18.4.2003. Výstavba elektrárny Temelín stála 98,6 miliardy Kč financovaných skupinou ČEZ pomocí půjčky ze Světové banky. [18; 22]



Obrázek 5: Jaderná elektrárna Temelín [23]

Následně vydaná Státní energetická koncepce z roku 2004 očekávala výstavbu alespoň dalších dvou bloků na území České republiky. V návaznosti na koncepci oznámil ČEZ v roce 2008 plán na výstavbu dvou bloků o celkovém výkonu 3 400 MW_e v lokalitě Temelín. Dle plánu měly být práce zahájeny v roce 2013 se spuštěním první jednotky do roku 2020. Do tenderu spuštěného v roce 2011 byly přizvány společnosti Westinghouse s reaktorem AP1000, Areva s reaktorem EPR a konsorcium společností Škoda JS, Atomstroyexport a OKB Gidropress s MIR-1200. V rámci zajištění konkurenceschopnosti projektu a dostatečného množství kapitálu plánovala česká vláda garance na výši prodejní ceny vyrobené energie. Docházelo by tak ke kompenzacím mezi cenou vyrobené elektrické energie a cenou na burze. Návrh byl podporován Ministerstvem průmyslu a obchodu a oponován Ministerstvem financí. Dle odhadů by podpora mohla znamenat až 10% navýšení účtů za elektrickou energii. V rámci vyjednávání Ministerstvo průmyslu a obchodu očekávalo cenu 60 eur/MWh, jiné odhady byly ve výši 90 eur/MWh a ČEZ požadoval 70 eur/MWh pro dosažení dostatečného zisku v porovnání s rizikem a forwardovými cenami na trzích. Forwardové ceny v polovině roku 2013 dosahovaly úrovně 40 eur/MWh. V rámci vyjednávání o podmínkách došlo ke změně vlády. Nová vláda rozhodla, že není otevřena poskytování garancí, které by mohly negativně ovlivnit koncové zákazníky. Rozhodnutí bylo učiněno i po zvážení předchozích zkušeností s podporami obnovitelných zdrojů. V březnu roku 2014 po neúspěšných jednáních s vládou ČR oznámila společnost ČEZ zájemcům zrušení tenderu na výstavbu Temelína 3 a 4. [18]

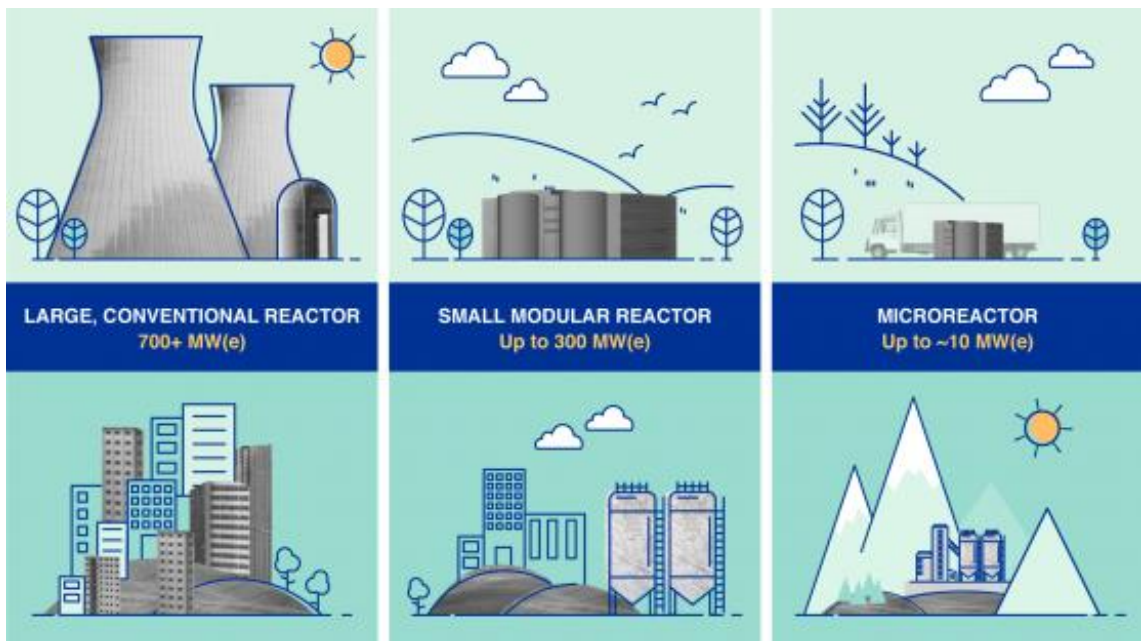
Komunikace s výrobcí po ukončení tenderu nebyly ukončeny. Naopak byly zájemci rozšířeni o Čínu a Jižní Koreu. Zároveň byla v červnu 2015 vydána nová Státní energetická koncepce zahrnující dlouhodobý výhled na výstavbu jaderných elektráren. Nová státní energetická koncepce se již primárně zaměřovala na jeden blok v lokalitě Dukovany z důvodu stáří zdroje a nutné budoucí výměny pro zajištění dostatečné výroby elektrické energie. Na základě předchozích diskusí vznikly dceřiné společnosti skupiny ČEZ – Elektrárna Dukovany II a Elektrárna Temelín II. Nově vzniklé dceřiné společnosti umožňují v případě potřeby odkoupení ze strany státu. Změna struktury

podniků vytvořila vhodnější podmínky pro zajištění financování. Byl tak vytvořen prostor pro další postup v jaderných projektech. Aktuálně probíhá tender na výstavbu elektrárny Dukovany 5 s opcí na další tři bloky. Do tenderu byly přizvány společnosti EDF (Francie), KHNP (Jižní Korea) a Westinghouse (USA). [18]

Kromě projektů na velké bloky monitoruje Česká republika možnosti uplatnění a výstavby malých modulárních reaktorů. Společnost ČEZ od roku 2019 podepsala memoranda o spolupráci se společnostmi vyvíjejícími lehkovodní malé modulární reaktory. Mezi tyto společnosti se řadí například NuScale, GE Hitachi nebo Rolls-Royce. V březnu roku 2022 byl skupinou ČEZ představen záměr využít lokalitu Temelín pro výstavbu prvního malého modulárního reaktoru v České republice. Ke spuštění by mělo dojít do roku 2035. [18]

4 Malé modulární reaktory

Malé modulární reaktory (SMR) jsou definovány jako jaderné elektrárny s výkonem obvykle do 300 MW_e a modulárním designem. Modulárním designem může být v tomto případě možnost usazení a propojení více jednotek, neboli modulů, v jedné lokalitě, nebo výroba po jednotlivých částech v továrnách. Propojení více jednotek je využíváno ojediněle, kdežto výrobu po jednotlivých částech v továrnách využívá většina vyvíjených konceptů. Malé modulární reaktory by tak měly být vyráběny v kontrolovaném prostředí, rychleji a s nižší mírou chybovosti. Mimo výrobu elektrické energie umožňují produkci tepla a propojení s výrobou vodíku a desalinizací. Výsledné využití ovlivňuje technologie zvoleného SMR. [24]



Obrázek 6: Rozdělení reaktorů dle Mezinárodní agentury pro atomovou energii [25]

4.1 Tlakovodní reaktory

Tlakovodní technologie je nejrozšířenějším typem reaktorů na světě s více než 300 jednotkami v komerčním provozu a dalšími stovkami jednotek využívanými v oblasti pohonů vojenských lodí a ponorek, pro které byl původně vyvíjen. Tlakovodní reaktory využívají jako chladivo a moderátor obyčejnou vodu. Charakteristickým znakem tlakovodních reaktorů je rozdělení na primární a sekundární oběh. Primární část slouží k odvodu tepla z aktivní zóny, které se pomocí parogenerátorů předává do sekundárního okruhu za účelem výroby elektrické energie za prostřednictvím turbín a generátoru. [26]

Aktivní zóna obsahuje 150-250 palivových souborů složených z 200-300 palivových proutků s obohacným uranem. Na jednu vsázku je tak využito až 100 tun uranu. Obohacený uran se účastní štěpných reakcí za vzniku tepla, čímž dochází k ohřevu chladiva na teploty okolo 325 °C. Při těchto teplotách by za atmosférického tlaku docházelo k varu, a proto je nutné udržovat okruh pod tlakem před 15 MPa. Pro zajištění bezpečnosti je nutné tlak udržovat, k čemuž slouží systém kompenzace objemu. Dalším bezpečnostním prvkem je inherentní bezpečnost zajištěná moderátorem. V případě zvýšení teploty moderátoru dochází ke snížení jeho moderačních vlastností a zpomalení štěpné reakce. Inherentní bezpečnost je doplněna o systémy dávkování boru. Bor v tlakovodních reaktorech slouží jako absorbátor pohlcující neutrony. Pohlcení neutronů opět zpomaluje štěpnou reakci a dostatečné množství boru znamená její úplné zastavení. [26]

4.2 Varné reaktory

Varné reaktory se v mnoha ohledech podobají tlakovodním reaktorům. Hlavním rozdílem je využití pouze jednoho okruhu s nižším tlakem. Provozování reaktoru při

tlaku okolo 7,5 MPa umožňuje dosahování varu již při 285 °C. V nádobě reaktoru je tak z celkového objemu udržováno 12-15 % páry, čímž je snížena moderační schopnost vody a pozitivně ovlivněna rychlost změny výkonu reaktoru. Pára odchází z nádoby reaktoru přes separátory páry přímo na turbínu. Jelikož se stále jedná o primární okruh obsahující aktivní páru, je nutné turbínu brát jako aktivní komponentu a zajistit dostatečné stínění za provozu a čištění povrchu při odstávkách. Náklady spojené s těmito procesy zvyšují provozní náklady a dochází k vyrovnání ekonomických bilancí v porovnání s tlakovodními reaktory, i přes nižší investiční náklady varných reaktorů. Z hlediska paliva obsahují varné reaktory až 750 palivových souborů složených z 90-100 palivových proutků. Aktivní zóna tak za provozu obsahuje až 140 tun obohaceného uranu. [26]

4.3 Těžkovodní reaktory

Těžkovodní reaktory pocházejí z Kanady z 50. let 20. století a jsou známé převážně pod názvem CANDU. Těžkovodní reaktory využívají jako moderátor těžkou vodu (D_2O), která slouží jako efektivnější moderátor. S pomocí efektivnějšího moderátoru není nutné využívat obohacování a reaktor je provozován s přírodním uranem. Dochází tak k vyššímu zisku energie na vytěžený kilogram uranové rudy, ale zároveň se zvyšuje množství použitého paliva a tím i celkovým objem odpadů na vyrobenou energii. Těžkovodní reaktory využívají pro moderátor nádobu zvanou calandria, kterou prochází několik set horizontálních tlakových trubiček vytvářejících prostor pro palivo. Trubičky jsou ochlazovány těžkou vodou a při parametrech 10 MPa a 290 °C odvádí teplo do parogenerátorů. Parogenerátory oddělují primární okruh od sekundárního a zajišťují přestup tepla s následným odvodem páry na turbínu. Těžkovodní reaktory umožňují kontinuální výměnu paliva bez odstávky reaktoru pomocí odizolování jednotlivých trubiček od chladicího oběhu. Palivo je tvořeno 37,5 m dlouhými palivovými tyčemi s pomocnými strukturami a jeden palivový kanál obsahuje 12 svazků. [26]

4.4 Vysokoteplotní reaktory

Vysokoteplotní reaktory se řadí mezi reaktory IV. generace. Jedná se o technologie využívající odlišná chladiva a moderátory, pokud jsou využity. Reaktory IV. generace mohou využívat ke štěpení neutrony z rychlého spektra, tudíž nedochází ke zpomalení a není přítomen moderátor. Vysokoteplotní reaktory jsou heliem chlazené, grafitem moderované reaktory s výstupní teplotou až 900 °C. Vysoké výstupní teploty jsou výhodné z hlediska kogenerace s výrobou vodíku pomocí termochemických procesů. V oblasti paliva možné využít obvyklých palivových proutků s peletkami nebo TRISO palivo. Kromě uranu obohaceného až na 20 % umožňují vysokoteplotní reaktory aplikaci alternativních palivových cyklů, jako například kombinaci uranu s plutoniem, samostatné plutonium, přepracované MOX palivo nebo směs uranu a thoria. Teplo vyprodukované v aktivní zóně přenáší chladivo přímo na heliovou turbínu. Zde probíhá přeměna z tepelné na elektrickou energii s vyšší účinností oproti lehkovodním reaktorům z důvodu vyšších parametrů na vstupu do turbíny. [27]

4.5 Plynem chlazené rychlé reaktory

Plynem chlazené rychlé reaktory jsou technologicky podobné vysokoteplotním reaktorům. Pro štěpnou reakci využívají rychlé spektrum neutronů, a proto není využit moderátor, ale pouze chladivo ve formě helia dosahujícího teplot až 850 °C. Z důvodu využití neutronů rychlého spektra je možné dosáhnout vyššího vyhoření a tím i minimalizace objemu a aktivity vyhořelého jaderného paliva. Pro přeměnu tepelné energie na mechanickou a následně elektrickou je možné využít přímý i nepřímý cyklus. Vždy je využita plynová turbína, kdy v případě nepřímého cyklu je teplo předáváno přes teplosměnné plochy a sekundární okruh je možné provozovat s jiným plynným médiem. Odpadní teplo z plynové turbíny může být odváděno pomocí parogenerátorů

na navazující parní turbínu. Kombinace plynových a parních turbín je obvyklá u plynových elektráren. Jedná se tak o ověřenou technologii využívanou v praxi s cílem zvýšení účinnosti oběhu a využití paliva. [27]

4.6 Sodíkem chlazené rychlé reaktory

Sodíkem chlazené rychlé reaktory využívají jako chladivo tekutý sodík. Výstupní teploty dosahují 500-550 °C pomocí štěpných reakcí uranového nebo MOX paliva. Sodík umožňuje akumulaci velkého množství energie v malém objemu a při provozu za nízkého, téměř atmosférického, tlaku. Z důvodu chemických vlastností sodíku jako chladiva je nutné v technologii udržovat provoz bez kyslíku a vzduchu. V případě kontaktu dochází k chemickým reakcím ohrožujícím bezpečnost provozu. Sodíkem chlazené reaktory obvykle využívají vložené chladicí okruhy zajišťující zvýšenou ochranu primárního okruhu obsahující palivo. Vložený okruh předává teplo do sekundárního okruhu s parním nebo plynovým cyklem využívajícím dusík nebo superkritický oxid uhličitý. [27]

4.7 Olovem chlazené rychlé reaktory

Olovem chlazené rychlé reaktory pracují s neutrony z rychlého spektra a chladivem z roztaveného olova, případně eutektickou směsí olova bismutu, za nízkých tlaků. Tyto reaktory mohou být využívány jako množivé nebo pro spalování aktinidů. Umožňují tak spalování paliva z lehkovodních reaktorů a minimalizaci objemu vyhořelého jaderného paliva. Oproti sodíkem chlazeným rychlým reaktorům mají vyšší bezpečnost. Roztavené olovo je relativně inertní chladivo s dobrými termodynamickými vlastnostmi. Není tak nutné do designu zahrnovat vložený okruh, čímž dochází ke snížení investičních nákladů. Nevýhodou olova i jeho směsi s bismutem jsou požadavky na materiály. Při provozování reaktoru nad 350 °C dochází k rychlému úbytku chromu z materiálu

komponent primárního okruhu a k následné korozi. Aby mohla být technologie olovem chlazených reaktorů provozována komerčně, bude muset dojít k významným posunům v oblastech materiálového inženýrství. [27]

4.8 Solné reaktory

Reaktory chlazené roztavenými soli představují širokou možnost využití jednotlivých solí s odlišnými vlastnostmi. Jejich největší potenciál je v oblasti minimalizace radioaktivního odpadu a objemu vyhořelého jaderného paliva. Oproti předchozím technologiím umožňují solné reaktory rozpuštění paliva do fluoridové soli. Při využití roztaveného paliva může být reaktor provozován s kontinuální online výměnou paliva bez ukončení štěpné reakce. Kromě běžně užívaného uranu umožňují solné reaktory množení plutonia nebo uranu 233 z thoria. Stejně jako u olovem chlazených reaktorů je pro komerční využití nutné vyvinout novější materiály s vyšší odolností vůči korozi a technologie účinnějšího řízení redoxního potenciálu. Reaktory chlazené roztavenými solemi byly vyvíjeny v 50. a 60. letech 20. století v USA, konkrétně v Oak Ridge National Laboratory, včetně výstavby dvou demonstračních jednotek. První návrhy využívaly pomalé spektrum neutronů a moderaci pomocí grafitu. V roce 2005 byl zahájen vývoj MSFR, rychlého solného reaktoru, který dosud nebyl aplikován. [27]

4.9 Výhody a nevýhody malých modulárních reaktorů

U jaderné energetiky bývá ve společnosti zvykem zaměřovat se nejprve na rizika a nevýhody. Největší nevýhodou malých modulárních reaktorů je nedostupnost technologie. Ačkoliv jsou již SMR ve světě v provozu na letadlových lodích a ponorkách, ke komerčnímu využití slouží pouze ruský Akademik Lomonosov. Ostatní designy a technologie jsou stále ve vývoji a jejich první uplatnění mimo Rusko a Čínu se očekává koncem 20. let. Jednotlivé státy se proto připravují na dostupnost komerčních

produktů. Zástupci kanadských provincií v roce 2019 odhadovali lokální potenciál trhu SMR ve výši 10 miliard dolarů a více než 150 miliard dolarů u trhu globálního. [28]

Další nevýhodou SMR by dle studie University of Pennsylvania měly být radioaktivní odpady. Studie uvádí, že v porovnání s velkými tlakovodními jadernými bloky budou SMR produkovat vyšší množství radioaktivních odpadů. Jedním z důvodů je nižší vyhoření paliva a jeho využití z důvodu odlišného rozložení aktivní zóny a vyššího úniku neutronů. Uniklé neutrony mohou způsobit indukovanou radioaktivitu v okolních materiálech, jako jsou například železo nebo beton. S materiály tak bude muset být nakládáno jako s radioaktivním odpadem, pokud nebude možné radioaktivitu odstranit chemickým čištěním, a bude nutné je ukládat do příslušných úložišť. Společně s využitím nových technologií reaktorů IV. generace dojde ke vzniku odlišných radiochemických vlivů oproti dnes používaným lehkým a těžkovodním reaktorům. [29]

Malé modulární reaktory jsou aktivně řešeny v zemích již provozujících jaderné elektrárny, ale i ve státech, které se na výstavbu prvních elektráren připravují. Je tudíž zřejmé, že SMR s sebou nesou výhody oproti velkým jaderným zdrojům i vůči ostatním zdrojům elektrické energie. Jelikož se SMR stále řadí mezi jaderné technologie, je nutné zachovat jadernou bezpečnost jako primární kritérium výstavby a provozu. Malé modulární reaktory mohou díky nižším výkonům využívat čistě pasivní chladicí a bezpečnostní systémy. Pasivní systémy nepotřebují k zajištění odvodu tepla elektrickou energii nebo počítačové a řídicí systémy a dokáží uchládit reaktor čistě pomocí fyzikálních jevů. Konkrétním příkladem je „zátká“ u solných reaktorů. V případě dosažení určité teploty se „zátká“ roztaví, čímž dojde k odvodu roztavené soli do separátních tanků a rychlému zchlazení okruhu. Malé modulární reaktory tak mohou dosahovat řádově vyšší bezpečnosti než velké bloky. [30]

Často opakovaným kladným argumentem pro výstavbu malých modulárních reaktorů je zkrácení času na přípravu a výstavbu. Komponenty pro SMR budou vyráběny a kompletovány v továrnách. Na lokalitu je tak dovezen celý modul. Tato změna umožňuje urychlení výroby a snížení nákladů oproti klasickým elektrárnám. Malé modulární reaktory dále umožňují různorodější aplikaci jaderných technologií, jelikož se jedná o jednodušší designy s kompaktnějším provedením. Otevírají tak možnosti výstavby v lokalitách nevhodných pro velké jaderné bloky z důvodu nižších požadavků na podloží, na chladicí vodu a přenosovou soustavu. SMR s nižšími výkony mohou být využity i v lokalitách bez přenosové sítě a v izolovaných oblastech, jako jsou například ostrovy nebo doly na severu Kanady a Ruska. V případě, že jsou uplatněny v přenosové soustavě, mohou SMR sloužit k zajišťování flexibility. Nové technologie umožňují škálovatelnost a udržování frekvence přenosové soustavy pomocí zajišťování podpůrných služeb. Jsou tak vhodné pro nahrazení aktuálně provozovaných uhelných a plynových elektráren. V těchto případech pomáhají i ke snížení vyprodukovaných emisí a vyvažování výroby z obnovitelných zdrojů. Zároveň mohou na již využívaných lokalitách zajistit zaměstnanost a využití zaměstnanců po potřebné rekvalifikaci. [31]

5 Lokality

Umísťování malých modulárních reaktorů se v České republice stejně jako u velkých bloků a přípovrchových, podzemních a hlubinných úložišť řídí zákonem č. 263/2016 Sb., atomový zákon a příslušnými vyhláškami. Zásadní vyhláškou pro výběr lokality a finální umístění je vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení ze 7. listopadu 2016. Vyhláška se zaměřuje především na problematiku umísťování z hlediska vlastností a charakteristik lokality, které musí být splněny, aby nedošlo k ohrožení jaderné bezpečnosti, jedinců nebo obyvatelstva jako takového. Na základě vydefinování vlastností a charakteristik lokality upravuje vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení požadavky na obsah a rozsah dokumentace včetně rozsahu a způsobu posuzování hodnot k povolené činnosti. [32]

Ve vyhlášce jsou definovány posuzované charakteristiky výskytu vlastností a jevů přírodních i jevů způsobených lidskou činností z hlediska ovlivnitelnosti stanovených bezpečnostních parametrů mezi nimiž je například jaderná bezpečnost nebo radiační ochrana. V první skupině přírodních dopadů jsou obsaženy:

- povodně,
- biologické jevy,
- seismicita,
- klimatické a meteorologické jevy,
- porušení území zlomem v zemské kůře,
- oběhy podzemních vod,
- další geodynamické jevy a geotechnické parametry základových půd,
- přírodní požáry.

Druhá skupina zahrnující nepřírodní jevy obsahuje:

- pád letadla a jiných objektů,
- výbuchy a požáry z lidské činnosti,
- kolizi s ochranným nebo bezpečnostním pásmem,
- vlivy již umístěného jaderného zařízení,

- silné vibrace,
- elektromagnetické interference,
- vířivé elektrické proudy,
- negativní projevy letecké, silniční, železniční a vodní dopravy,
- působení produktovodů a elektrického vedení,
- znečištění ovzduší, horninových prostředí, povrchových a podzemních vod,
- provoz zařízení, ve kterém se nacházejí nebo z nějž se uvolňují látky snadno hořlavé, výbušné, toxické, dusivé, s korozivními účinky nebo radioaktivní,
- jiné jevy, které mohou negativně ovlivnit jadernou bezpečnost, radiační ochranu, monitorování radiační situace, zvládnutí radiační mimořádné události a zabezpečení jaderného zařízení.

Kromě vlivů území na umístované zařízení je ve vyhlášce hodnocen i vliv umístovaného zařízení na území. Území v tomto případě zahrnuje obyvatelstvo, společnost, jednotlivce a životní prostředí. Hodnoceny jsou dopady z hlediska:

- šíření radioaktivních látek ovzduším, podzemní a povrchovou vodou a potravinovým řetězcem,
- rozložení a hustoty osídlení a jeho vývoje.

V případě posuzování umístění jaderného zařízení není posuzován projekt samostatně, ale ve vztahu k současnému stavu lokality, z hlediska souběžného působení a možného ovlivňování, budoucího vývoje výše zmíněných vlastností, jevů a vlastností jaderného zařízení a vlivu výkonu jaderného zařízení na území v případě jaderných zařízení s jaderným reaktorem, mezi které patří i malé modulární reaktory. Současně je posuzovaná lokalita pro umístění jaderného zařízení hodnocena se zahrnutím okolí ve vzdálenosti umožňující posouzení vlivu vlastností na jadernou bezpečnost, radiační ochranu a další bezpečnostní hlediska. Zároveň k rozšířenému posuzovanému území musí být využito dostupných záznamů osob, pokud jsou původci jednotlivých jevů, údajů správních orgánů o posuzovaném území, historické záznamy vztahující se k lokalitě, údaje z průzkumů včetně jejich hodnocení a přístrojově zjištěné a zaznamenané údaje. [32]

Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístování jaderného zařízení je doplněna o bezpečnostní návod BN-JB-4.1. (Rev. 1.0) Umístění jaderného zařízení – hodnocení přírodních

vlastností a jevů. Bezpečnostní návod slouží jako komentář k vyhlášce, doporučuje postup při její aplikaci v praxi a je zaměřen primárně na držitele příslušných povolení dle atomového zákona a žadatele o povolení. Při dodržení postupu uvedeného v bezpečnostním návodu je zajištěn soulad aktivit v dané oblasti s požadavky atomového zákona a jeho prováděcími předpisy, referenčními úrovněmi WENRA a doporučeními Mezinárodní agentury pro atomovou energii. Bezpečnostní návod by měl být také aplikován žadatelem pro přípravu dokumentace předkládané po dobu životního cyklu jaderného zařízení. [33]

Bezpečnostní návod stanovuje doporučený postup z hlediska měření a jejich vyhodnocení. V rámci vyhodnocení lokalit je vhodné provést předběžný monitoring z hlediska takzvaných vylučujících kritérií. Vylučující kritéria představují dle platné legislativy hodnoty jednotlivých parametrů, které nesmí být překročeny, avšak jejich překročení nemusí automaticky znamenat automatické vyloučení posuzované lokality. Pro dosažení potřebných hodnot je možné provést opatření v projektu plánovaného jaderného zařízení za účelem dosažení přípustných hodnot. Opatření jsou obvykle doprovázena vysokými kapitálovými investicemi, pro něž je nutné vyhodnotit změnu v ekonomice projektu. Bezpečnostní návod tuto problematiku zmiňuje v oblasti seismicity území, kde udává, že vylučující kritérium není stanoveno, jelikož je nepříznivé vlivy možno kompenzovat opatřeními. Současně však uvádí, že opatření mohou být vysoce ekonomicky náročná, čímž může dojít k vyloučení ze strany investora. [33]

U tektonických zlomů je míra vylučujícího kritéria stanovena. V tomto případě může dojít k vyloučení lokality při výskytu pohybové a seismicky aktivního zlomu nebo podobného pohybu zemské kůry do vzdálenosti 5 km s potenciálem projevu deformace přímo na jaderném zařízení. Zároveň může být vylučující potenciál vzniku doprovodného zlomu na pozemku jaderného zařízení s vlivem na jadernou bezpečnost, radiační ochranu a další parametry. Významným vylučujícím kritériem v tomto ohledu

je požadavek na nepoddolovanost území, což může představovat významnou komplikaci především na severu České republiky. I v tomto případě bezpečnostní návod umožňuje kompenzaci pomocí technických a administrativních opatření. [33]

Vylučujícím kritériem bez možných opatření je zásah do území s významnými zásobami podzemních vod, vyhlášených ochranných pásem vodních zdrojů, ochranných pásem minerálních vod a vyhlášených chráněných území přirozené akumulace vod. Výjimkou umožňující umístění jaderného zařízení na danou lokalitu je přezkoumání území z hlediska Ministerstva životního prostředí, které má pravomoci přehodnotit ochranná pásma. Tento postup je ovšem zdlouhavý a nejistý. V oblasti vod je dále zakázáno umístění jaderného zařízení při pravděpodobnosti výskytu povodní v lokalitě jednou za 100 let nebo vyšší. [33]

Dalším vylučujícím kritériem jsou nepříznivé vlastnosti základových půd. Základové půdy ovlivňují zakládání staveb s vlivem na jadernou bezpečnost. Vylučující je pro základové půdy průměrná rychlost příčných vln nižší než 360 m/s a únosnost nižší než 0,2 MPa. Dále je zakázáno umisťovat jaderná zařízení na lokality s vulkanickými horninami pliocenního až holecenního stáří nebo s projevy postvulkanické činnosti do vzdálenosti 5 km, na lokality s hrozbou svahových pohybů ohrožujících jadernou bezpečnost, na prosedavé nebo silně bobtnavé základové půdy, základové půdy řazené mezi středně nebo vysoce organické a lokality se výskytem ztekucení zemin. [33]

V rámci ostatních podmínek jsou při zvýšených rizicích doporučena náležitá opatření snižující možné dopady na jadernou bezpečnost, radiační ochranu, zvládání radiační mimořádné události a další bezpečnostní hlediska. V případě, že není rozhodnutí minimalizovat zjištěná rizika ve smyslu ALARA – as low as reasonably achievable, pak může dojít k vyloučení lokality. Z tohoto hlediska je obvykle vylučujícím kritériem právě ekonomické hledisko ze strany investora. [33]

Praktická část

Malé modulární reaktory jsou pouze jednou z více možných technologií pro výrobu elektrické či tepelné energie. Aby byl ve společnosti zájem o jejich výstavbu, musí být technologie doprovázena konkurenčními výhodami. Na základě dosažení dostatečné konkurenční výhody v porovnání s jinými technologiemi lze očekávat následný konkurenční boj v odvětví.

Praktická část diplomové práce je zaměřena na analýzu odvětví energetiky a malých modulárních reaktorů s následným porovnáním vybraných společností vyvíjejících nové designy a potenciálních lokalit pro uplatnění v České republice.

6 PESTEL analýza

Politické

- Podpora jaderné energetiky
- Přijetí doplňkového delegovaného aktu (Taxonomie) zahrnující jaderné elektrárny
- Podpora nízkoemisních zdrojů
- Zájem o zajištění energetické soběstačnosti

Ekonomické

- Dlouhodobé zakázky – výstavba, servis
- Ekonomická stabilita výroby energie
- Nesaturovaný trh – významný prostor pro rozvoj jednotlivých společností
- Propojení s českým dodavatelským řetězcem
- Poptávka významným způsobem převyšuje nabídku

Sociální

- Nedostatečné lidské kapacity
- Vysoká podpora jaderné energetiky ve společnosti

- Aktuálně dostupné designy jsou pouze v Číně a Rusku – pro západní svět nepřijatelné
- Obavy v oblasti vyhořelého jaderného paliva
- Obavy v rámci případných velkých havárií

Technologické

- Nutnost vysoké kvalifikace zaměstnanců
- Dosud masově nedostupná technologie
- U určitých designů možnost kogenerace tepla, vodíku, desalinizované vody

Legální

- Dokumenty IAEA – Mezinárodní atomové agentury ve Vídni
- Předpisy WENRA – Asociace regulačních orgánů západní Evropy
- Atomové zákony a předpisy jednotlivých států
- Legislativa není na SMR připravena, ale ve regulátoři otevření změnám

Environmentální

- Pařížská dohoda
- Fit for 55
- Obecný tlak na snižování emisí – SMR mají nízké LCA emise
- Obavy z produkce radioaktivních odpadů

7 Porterův model 5 sil

7.1 Dodavatelé – vyjednávací síla dodavatelů

- Zaměření: dodavatelé komponent pro malé modulární reaktory jsou často specializovaní primárně na jadernou energetiku z důvodu specifčnosti odvětví, vysoké náročnosti na kvalitu komponent a dokumentace.
- Množství: specifčnost a náročnost odvětví se negativně odráží na počtu potenciálních dodavatelů. Nízký počet dodavatelů ovlivňuje i nízký počet jaderných zařízení ve výstavbě od začátku tisíciletí.
- Nahraditelnost: velké množství dodavatelů se specializuje na úzkou skupinu výroby, případně služeb. Množnosti substituce jsou tak v nízkých jednotkách dodavatelů.
- Náklady na přechod k jinému dodavateli: náklady na přechod k jinému dodavateli jsou ovlivněny specifčností technologie. V případě nutnosti změny projektu z důvodu odlišného komponentu se jedná o velice komplikovaný, časově i znalostně náročný a drahý proces.
- Mezi dodavatele můžeme zařadit české společnosti Škoda JS, ZAT, Doosan, nebo zahraniční společnosti jako jsou Bechtel a podobně.
- Z výše uvedených důvodů je jednoznačná **vyšoká vyjednávací síla dodavatelů**. Do budoucna nelze očekávat významný rychlý nárůst dodavatelů z důvodu specifčnosti a vysokých vstupních nákladů v odvětví.

7.2 Zákazníci – vyjednávací síla zákazníků

- Velikost a koncentrace: každý z nás je uživatelem energetické energie, ale ne každý může vlastnit zařízení pro výrobu elektrické energie. Odvětví malých modulárních reaktorů tak necílí na celosvětovou populaci, ale primárně na energetické společnosti, kterých je ve světě velké množství. Zároveň se současnou situací mají o malé modulární reaktory zájem i velké společnosti v oblasti těžby, datacenter a teplárenství. Z tohoto důvodu můžeme jednat o velkém množství potenciálních zákazníků s rozložením po celém světě.
- Nahraditelnost: o produkci elektrické energie z nízkoemisních zdrojů je zájem od společností i vlád jednotlivých států. Lze očekávat, že nebudou dostatečné kapacity pro výrobu, a proto je nahraditelnost zákazníků relativně snadná.
- Náklady na přechod k jinému zákazníkovi: ačkoliv je technologie specifická jako odvětví, výsledný produkt lze při splnění zákonných podmínek umístit po celém světě. Společnosti v oblasti malých modulárních reaktorů vykazují vysoké náklady na vývoj. Po ukončení vývoje již dochází k výstavbě a dalším činnostem, které jsou nákladově z většiny na straně zákazníka. Zákazník tak vynakládá

významně vyšší náklady než výrobce a po závazném rozhodnutí lze očekávat zájem zákazníka o zachování vztahu.

- Zákazníky můžeme dělit z mnoha pohledů, kdy lze hodnotit jejich působnost (lokální nebo mezinárodní) nebo například zkušenosti s jadernou energetikou (již provozující, případně bez zkušeností). Konkrétní zákazníci jsou: ČEZ, Ontario Power Generation, UAMPS, Orlen.
- Z výše uvedených důvodů lze vyvodit **nízkou vyjednávací sílu kupujících**.

7.3 Substituty – hrozba vzniku substitutů

- Možnosti: odvětví malých modulárních reaktorů se zaměřuje na výrobu zařízení pro produkci elektrické a tepelné energie. Z tohoto hlediska jsou nejvýznamnějšími substitucemi obnovitelné zdroje, jako fotovoltaické, větrné a vodní elektrárny a velké jaderné zdroje, biomasové, paroplynové a uhelné elektrárny.
- Vlastnosti substitutů: ačkoliv všechny zdroje mají stejný výsledný produkt, každý z nich může mít jiný způsob dosažení výsledků, jinou roční dobu využití, účinnost produkce a teplotu vystupujícího média. Malé modulární reaktory tak dosahují vhodných vlastností, porovnatelných s velkými jadernými zdroji.
- Emisní zatížení: malé modulární reaktory jsou nízkoemisní zdroj a mohou dosahovat emisí v průběhu životnosti nižších než obnovitelné zdroje. Oproti uhelným a dalším fosilním zdrojům tak mají významnou výhodu.
- Instalovaný výkon na plochu: z hlediska výroby na jednotku plochy mají jaderné elektrárny značnou výhodu. Při porovnání zdrojů potřebují na produkci 1 MWh jaderné zdroje ročně plochu 0,3 m², což je více než 63x méně než je potřeba u fotovoltaických elektráren s 19 m².
- Náklady přechodu: přechod z nejaderných zdrojů na jaderné je znalostně i finančně náročný proces trvající i desítky let. Při využití obnovitelných zdrojů jsou fotovoltaické a větrné projekty jednodušší na přípravu.
- Z hlediska energetického sektoru lze do budoucna očekávat výrobu elektrické energie z obnovitelných zdrojů v kombinaci s jadernou energetikou včetně SMR. Z tohoto hlediska by mohlo docházet ke komplementaritě zdrojů místo substituce. Z tohoto důvodu lze očekávat spíše **nízkou hrozbu substitutů** s využitím odvětví dle konkrétních potřeb.

7.4 Potenciální konkurenti – hrozba vstupu nových konkurentů na trh

- Vysoké kapitálové a časové investice: odvětví malých modulárních reaktorů se vyznačuje vysokými kapitálovými investicemi potřebnými pro výzkum a vývoj technologie včetně první implementace a komerčního využití. Mnoho projektů je vyvíjených již od počátku tisíciletí a stále nedošlo ke komerčnímu spuštění.
- Výhody plynoucí z rozsahu: projekty ve vybraném odvětví mají silný strategický význam i v rámci státního HDP. Projekty malých modulárních reaktorů jsou tak často podporovány státy, ve kterých jsou vyvíjeny, čímž je dosaženo ztížení vstup nových subjektů na trh.
- Síťový efekt: malé modulární reaktory jsou založeny primárně na principu modularity a sériové výroby. Již historicky byla prokázána učící křivka zlevňující každý další modul a v případě dostatečného zájmu v lokalitě jsou jednotlivé společnosti připraveny vybudovat výrobní centra zaměřená na specifický region – například střední Evropu. Všichni vlastníci, případně zájemci o danou společnost, tímto získávají výhodu síťového efektu.
- Regulace: oblast energetiky, obzvláště jaderné, je významně regulována nejen na státní úrovni, ale i na úrovni Evropské Unie a celého světa. Splnění požadavků Mezinárodní agentury pro atomovou energii a státních regulátorů může být překážkou pro mnoho společností.
- Na trhu malých modulárních reaktorů je **hrozba nových konkurentů zanedbatelná**. I v případě vzniku nových konkurencí bude mít současný trh alespoň 10 let náskok a dostatečnou dobu na zvážení dalších postupů. Mezi potenciální konkurenty lze zařadit české společnosti CVŘ a Czech Atom.

7.5 Konkurence v odvětví – stávající konkurenti

- Uvádění výrobků na trh: v odvětví malých modulárních reaktorů je nyní zásadním předpokladem pro získání majoritního podílu na trhu úspěšné spuštění a provozování první jednotky. Ruské a čínské společnosti již malé reaktory provozují, ale z důvodu mezinárodních vztahů je prostor v Evropě a Severní Americe neobsazený, a tudíž bez saturace trhu.
- Marketing a mezinárodní dohody: konkurenční společnosti v odvětví mají různý přístup k marketingu produktů. Mnoho společností spoléhá na bilaterální dohody i přes nedostatečnou zralost výrobku, kdežto významně pokročilé společnosti vyčkávají na úspěšnou demonstraci výrobku, která by mohla narušit i již platné bilaterální dohody.

- Cenová konkurence: z hlediska charakteristiky odvětví nelze očekávat výrazné odchylky v cenách jednotlivých produktů vztažených na instalovaný výkon. Je očekávána spíše výkonová a technologická konkurence.
- Konkuruujícími společnostmi jsou: UK SMR, Holtec, KHNP, NuScale, EDF a GE Hitachi.
- Přestože je ve světě vyvíjen omezený počet reaktorů s vidinou reálné realizace, lze očekávat **vysokou intenzitu soupeření mezi existujícími konkurenty** právě z důvodu vysokého zájmu o technologii na dosud nerozděleném trhu.

V odvětví malých modulárních reaktorů je zásadní pro ziskovost vývoj legislativního prostředí, který může negativně ovlivnit sílu substitutů. Dále je potřeba udržet vysoký zájem zákazníků a rozšířit dodavatelský řetězec, čímž by došlo ke snížení vyjednávací síly dodavatelů a zvýšení konkurence, ovlivňující i výši nákladů na komponenty. Vzhledem ke strategii bude zásadní navázat silné vazby s dodavatelským řetězcem s cílem urychlení implementace prvních jednotek. V případě úspěšné výstavby bude významným způsobem ovlivněno rozdělení trhu a zvýšena síla vůči substitutům.

8 Analýza hodnotového řetězce

8.1 Primární procesy

- Vývoj v oblasti malých modulárních reaktorů je zásadně ovlivněn analýzou potřeb. Oproti ostatním energetickým odvětvím je z důvodu specifičnosti nutné komunikovat s potenciálními odběrateli ihned od zahájení vývoje. Tímto je možné plnit přání zákazníků od samotného počátku. Z důvodu komplexnosti problematiky a odvětví jako takového je využito vertikální integrace dodavatelského řetězce. Společnosti vyvíjí primárně projekt a dodavatelský řetězec následně zajišťuje materiály, sklady a další. V oblasti malých modulárních reaktorů tak lze očekávat unikátní znalosti projektu, které mohou být zákazníkem využívány nejen při výstavbě, ale i v procesu provozu a rozebírání elektrárny. Na základě těchto znalostí určuje každá společnost své dostupné služby. Následné procesy jako výroba a provoz, výstupní operace a servis a podpora jsou vždy specificky určeny podle požadavků konkrétního zákazníka. Významným způsobem jsou tyto procesy ovlivněny zkušenostmi zákazníka, stupněm rozvinutí jaderné energetiky v daném státě a požadavky ze strany vlád. Roztah procesů tak může být od odkoupení celého projektu zákazníkem s doplňujícími konzultacemi až po celkovou výstavbu včetně zajištění provozu. V celém odvětví se začínají formovat jednotlivé poptávky a předběžné dohody za účelem výstavby konkrétních zařízení. Marketing v tomto případě zastává významnou roli a je prováděn na úrovni B2B a B2G. Cenová strategie nyní není stanovena a lze očekávat její vytvoření v následujících letech.

8.2 Podpůrné a řídicí procesy

- V posledních dvou dekadách prošlo odvětví významným vývojem a lze očekávat, že tento rapidní vývoj bude pokračovat. Při vývoji docházelo k významnému technologickému rozvoji, získávání unikátních znalostí v odvětví a budování infrastruktury a lidských kapacit. Společně s tímto vývojem bylo nutné přizpůsobovat styl řízení společností. Z počátku týmy fungující pod univerzitami, nebo jako malé dceřiné společnosti fungující na operativním řízení, přešly na významně strukturované společnosti se strategickým řízením a cílem prodeje výsledného produktu. Odvětví si i tak zachovává na poměr jaderného odvětví vysoce dynamické prostředí cílící na zkušené inženýry i čerstvé absolventy.

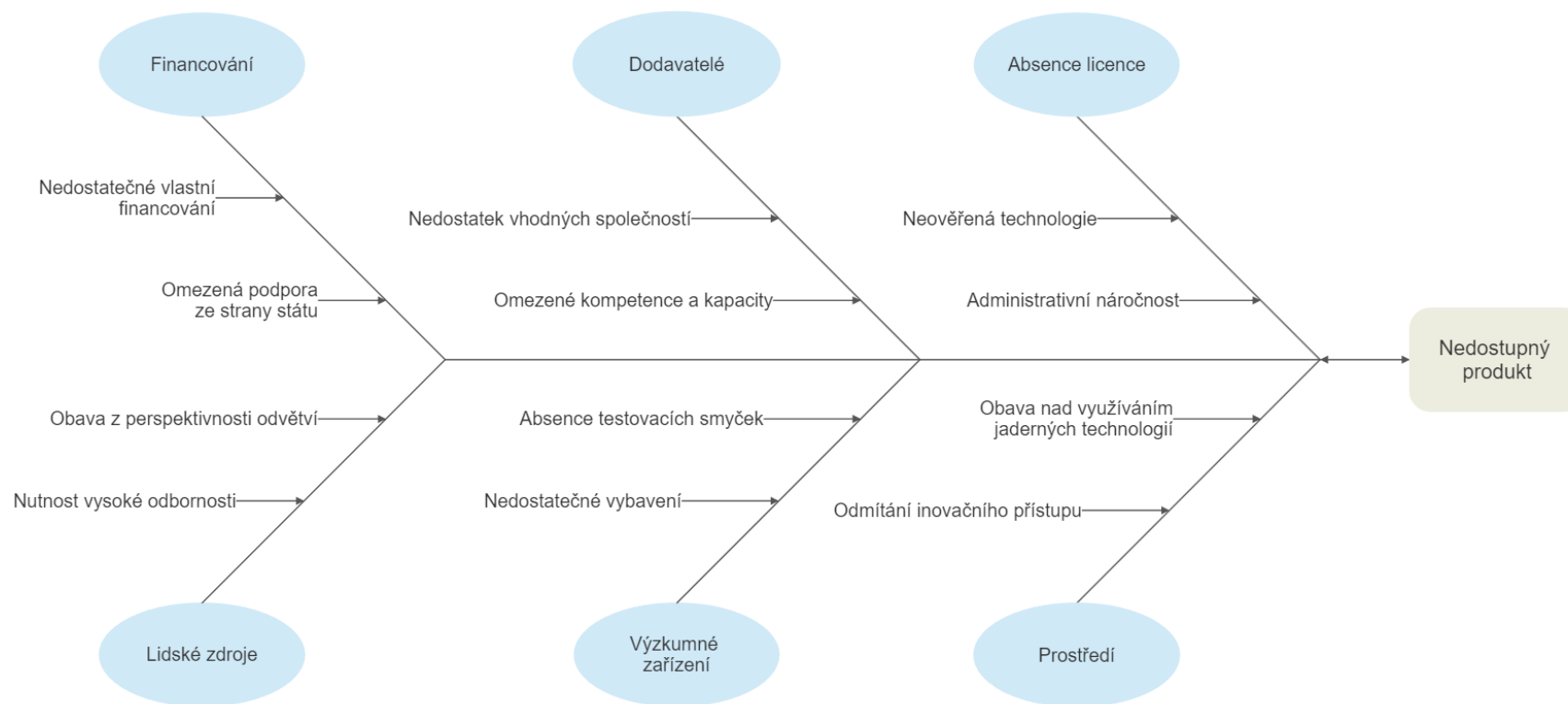
Společnosti v odvětví řídí dle mého názoru hodnotový řetězec správným stylem, který cílí nejen na hodnoty ostatních společností, ale i na hodnoty společnosti jako celku. V rámci marketingu se snaží podporovat využití jaderné energetiky jako čistého, nízkemisního zdroje s bezpečnými dodávkami po dobu více než 50 let. Tyto hodnoty jsou mi velice sympatické a podporuji je, což se odráží i na profesním uplatnění. Ze svého hlediska nejvíce podporuji dynamičnost, kterou odvětví do jaderné energetiky přináší, a možnost dlouhodobého uplatnění ve vysoce zaměřeném odvětví vyžadující specifický přístup.

V odvětví je vysoká možnost účtování prémiové ceny. Prémiová cena může být účtována z několika faktorů, jakými jsou například vysoká kvalifikovanost v odvětví, světově významný zájem o konečný produkt a unikátnost každé technologie. Žádný z výrobků daného odvětví není možné jednoduchým způsobem replikovat a při vývoji a licencování je nutná intenzivní komunikace s lokálními i mezinárodními regulátory. Tyto aspekty umožňují účtování prémiové ceny po celou dobu spolupráce.

Nejvýznamnějšími náklady v odvětví jsou v oblasti lidských zdrojů. Společnosti absolvují více než 10 let vývoje technologie bez žádného reálného produktu. Vývoj je tak často podporován jinými společnostmi, výzkumnými granty a přímými vládními podporami. Náklady na lidské zdroje se rozšiřují po celou dobu životnosti, kdy v prvních letech jsou dostačující nízké desítky zaměstnanců s následným rozšířením na vyšší stovky. Společně s náklady na lidské zdroje se přidávají náklady na výzkumná a testovací zařízení ověřující navrhovanou technologii. Po ověření technologie začíná fáze licencování, kde jsou náklady stanoveny zákony příslušných zemí a dosahují stovek milionů Kč. Po úspěšném licencování začínají společnosti v odvětví s prodejem výsledného produktu a generací zisku. Náklady na lidské zdroje se následně zvyšují a snižují dle množství a velikosti projektů, náklady na výzkum a testování jsou relativně konzistentní a náklady na licencování jsou obvykle rovny nule.

9 Analýza vnitřního prostředí odvětví

9.1 Fishbone diagram



Obrázek 7: Fishbone diagram

9.1.1 Popis příčin

- **Financování:** vybrané odvětví je závislé na stabilním financování v průběhu vývojové fáze projektu a pro přípravu projektu první jednotky. V případě nezajištění financování jsou společnosti negativně ovlivňovány i v ostatních faktorech. Problematické tak může být nedostatečné vlastní financování v kombinaci s omezenými státními podporami.
- **Lidské zdroje:** dostatečné a kvalitní lidské zdroje jsou základním předpokladem pro úspěch v odvětví malých modulárních reaktorů. Bez lidských kapacit nemůže vzniknout realistický návrh na projekt s cílem produkce finálního výrobku. Lidské kapacity jsou z důvodu historicky omezených možností výstavby jaderných zdrojů limitované, a proto lze očekávat významný konkurenční boj v odvětví.
- **Dodavatelé:** společnosti vyvíjející malé modulární reaktory se zaměřují na přípravu projektu, licencování a ověření technologie. Samotnou výrobu následně zajišťují dodavatelé. Obdobně jako u lidských zdrojů byly dodavatelské řetězce ovlivněny množstvím nových jaderných zařízení, čímž došlo ke ztrátě znalostí, pouštění technologií a přesměrování se na jiná odvětví. Při očekávaném vysokém zájmu o odvětví SMR tak může dojít k prodlužování lhůt z důvodu nedostatečných kapacit a kompetencí u omezeného počtu dodavatelů.
- **Výzkumné zařízení:** dostupnost výzkumného zařízení, vybavení laboratoří a množství testovacích smyček souvisí s nákladností a potřebnými znalostmi na sestavení zařízení. Nedostatek může ovlivnit ověřování technologie a licenční řízení, jelikož počítačové simulace mohou být pro určité problematiky nedostačující.
- **Absence licence:** obdržení licence je zásadní předpoklad pro možnost zahájení výstavby. Získání licence je i u známých a ověřených technologií náročný proces a v kombinaci s využitím nových technologií se jedná o kritický bod, vyžadující významné úsilí.
- **Prostředí:** odvětví jaderné energetiky je již od svého vzniku specificky vnímáno. Z důvodu prioritizace jaderné bezpečnosti je udržován konzervativní přístup využívající známé a ověřené technologie. Malé modulární reaktory mají za cíl zvýšení bezpečnosti provozu pomocí nových technologií, čímž může docházet k odmítavému přístupu. Významný faktor také může hrát vnímání veřejnosti a společenský pohled na jadernou energetiku.

9.1.2 Návrhy

- Zásadním předpokladem pro rozvoj odvětví je podpora ze strany vlád a veřejnosti s jednoznačným cílem ve vývoji energetického mixu. Tento faktor většina společností v odvětví není schopna ovlivnit.

- Faktor, který je možné ovlivnit jsou finance. V případě prokázání přínosnosti technologie na počátku vývoje je možné navázat intenzivní dlouhodobé spolupráce s finančními pobídkami. Výslední zákazníci se tak mohou stát investory od počátku vývoje a tím ovlivnit vývoj projektu. V návaznosti na finance dochází k rozšíření rozpočtu na výzkumná zařízení a s tím pojené ověřování technologie.
- Lidský faktor je nutné zajistit od zahajovací fáze projektu. Řešením problematiky je zapojení studujících vysokoškoláků, kteří mají zájem na získání prvních zkušeností. V kombinaci se zkušenějšími kolegy si tak odvětví může vychovávat nové generace zkušených zaměstnanců.
- Absence licence by měla být společností řešena zahájením komunikace s regulačními orgány od téměř úplného začátku projektu. Společně s jednotlivými připomínkami od dotčených orgánů tak může docházet k postupnému vývoji projektu. Opakem by mohly být zásadní změny v projektu po jeho dokončení a až následného zahájení komunikací s regulátorem.

9.2 Analýza klíčových kompetencí

Tabulka 1: Analýza klíčových kompetencí

| Klíčové kompetence | váha | Hodnocení (1-5) | | | Vážená hodnota | | |
|-----------------------------|------|--------------------|-------------|-----|----------------|-------------|------|
| | | SMR | velké bloky | OZE | SMR | velké bloky | OZE |
| Podíl na trhu | 0,05 | 1 | 3 | 2 | 0,05 | 0,15 | 0,1 |
| Očekávaný růst do roku 2050 | 0,15 | 4 | 4 | 3 | 0,2 | 0,2 | 0,15 |
| Jednotkové náklady | 0,1 | 2 | 3 | 5 | 0,1 | 0,15 | 0,25 |
| Výkon na plochu | 0,1 | 4 | 5 | 1 | 0,2 | 0,25 | 0,05 |
| Efektivnost reklamy | 0,05 | 5 | 3 | 5 | 0,25 | 0,15 | 0,25 |
| Roční využití produktu | 0,15 | 5 | 5 | 1 | 0,25 | 0,25 | 0,05 |
| Emise | 0,2 | 5 | 5 | 5 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| Dostupnost produktu | 0,1 | 1 | 3 | 5 | 0,05 | 0,15 | 0,25 |
| Životnost produktu | 0,1 | 4 | 5 | 2 | 0,2 | 0,25 | 0,1 |
| | 1,00 | Celková konkurence | | | 1,6 | 1,85 | 1,45 |

Z analýzy klíčových kompetencí vyplývá jednoznačná potřeba dostupného produktu, bez kterého není možné získávat náležitý podíl na trhu. Společně s dostupností produktu by tak mělo docházet i k postupnému růstu tržního podílu zejména do roku 2050. Následně bude potřeba správného řízení dodavatelského řetězce a projektů výstavby s cílem snížení jednotkových nákladů, k čemu by měla přispět modularita designů. Hodnocení v tabulce je voleno dle kritéria MAX (5 – nejlepší, 1 – nejhorší).

10 Matice SWOT

Tabulka 2: Matice SWOT

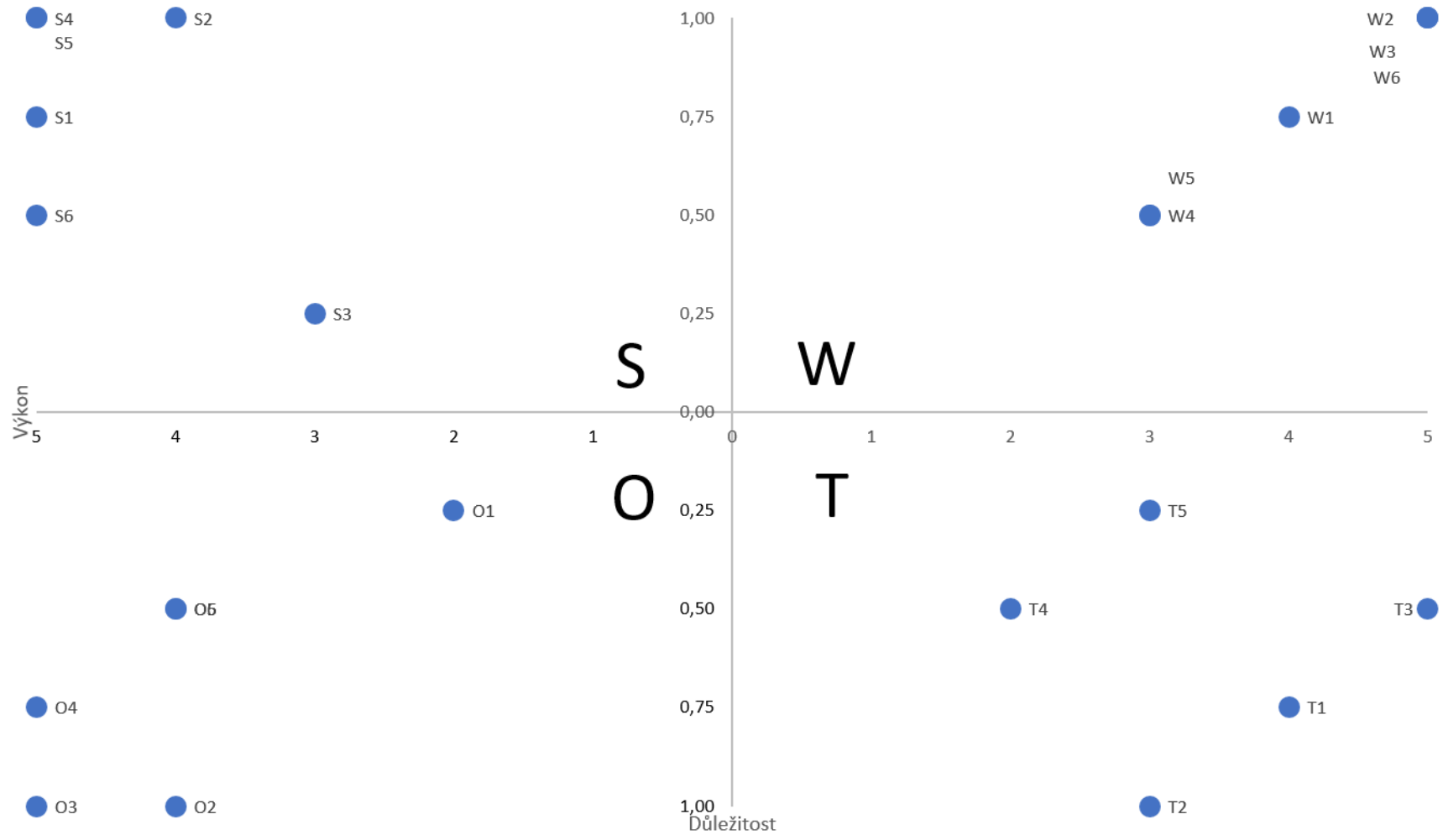
| | |
|--|---|
| Strenghts: <ul style="list-style-type: none"> - životnost produktu - zvýšená bezpečnost - efektivnost reklamy - roční využití produktu - emise v průběhu životnosti - výkon na plochu | Weaknesses: <ul style="list-style-type: none"> - vysoké jednotkové náklady - nedostupnost produktu - nedostatek lidských zdrojů - nedostatečné financování - neověřená technologie - neobdržená licence produktu |
| Opportunities: <ul style="list-style-type: none"> - harmonizace legislativy - politická přijatelnost - podpora nízkoemisních zdrojů - transformace energetického sektoru - velké množství zákazníků v odvětví - složitý vstup konkurentů na trh | Threats: <ul style="list-style-type: none"> - dodavatelský řetězec - možnost jaderné havárie – vnímání veřejnosti - obnovitelné zdroje – substituce - legislativní omezení specifická pro stát - odmítání inovačního přístupu |

10.1 SWOT – faktory a váhy

Tabulka 3: SWOT - faktory a váhy

| | | Hodnocené faktory | Výkon | Důležitost |
|------------|----|-----------------------------|-------|------------|
| Strenghts | S1 | Životnost produktu | 5 | 0,75 |
| | S2 | Zvýšená bezpečnost | 4 | 1,00 |
| | S3 | Efektivnost reklamy | 3 | 0,25 |
| | S4 | Roční využití produktu | 5 | 1,00 |
| | S5 | Emise v průběhu životnosti | 5 | 1,00 |
| | S6 | Výkon na plochu | 5 | 0,50 |
| Weaknesses | W1 | Vysoké jednotkové náklady | 4 | 0,75 |
| | W2 | Nedostupnost produktu | 5 | 1,00 |
| | W3 | Nedostatek lidských zdrojů | 5 | 1,00 |
| | W4 | Nedostatečné financování | 3 | 0,50 |
| | W5 | Neověřená technologie | 3 | 0,50 |
| | W6 | Neobdržená licence produktu | 5 | 1,00 |

| | | | | |
|---------------|----|--|---|------|
| Opportunities | O1 | Harmonizace legislativy | 2 | 0,25 |
| | O2 | Politická přijatelnost | 4 | 1,00 |
| | O3 | Podpora nízkoemisních zdrojů | 5 | 1,00 |
| | O4 | Transformace energetického sektoru | 5 | 0,75 |
| | O5 | Velké množství zákazníků v odvětví | 4 | 0,50 |
| | O6 | Složitý vstup konkurentů na trh | 4 | 0,50 |
| Threats | T1 | Dodavatelský řetězec | 4 | 0,75 |
| | T2 | Možnost jaderné havárie – vnímání veřejnosti | 3 | 1,00 |
| | T3 | Obnovitelné zdroje – substituce | 5 | 0,50 |
| | T4 | Legislativní omezení specifická pro stát | 2 | 0,50 |
| | T5 | Odmítání inovačního přístupu | 3 | 0,25 |



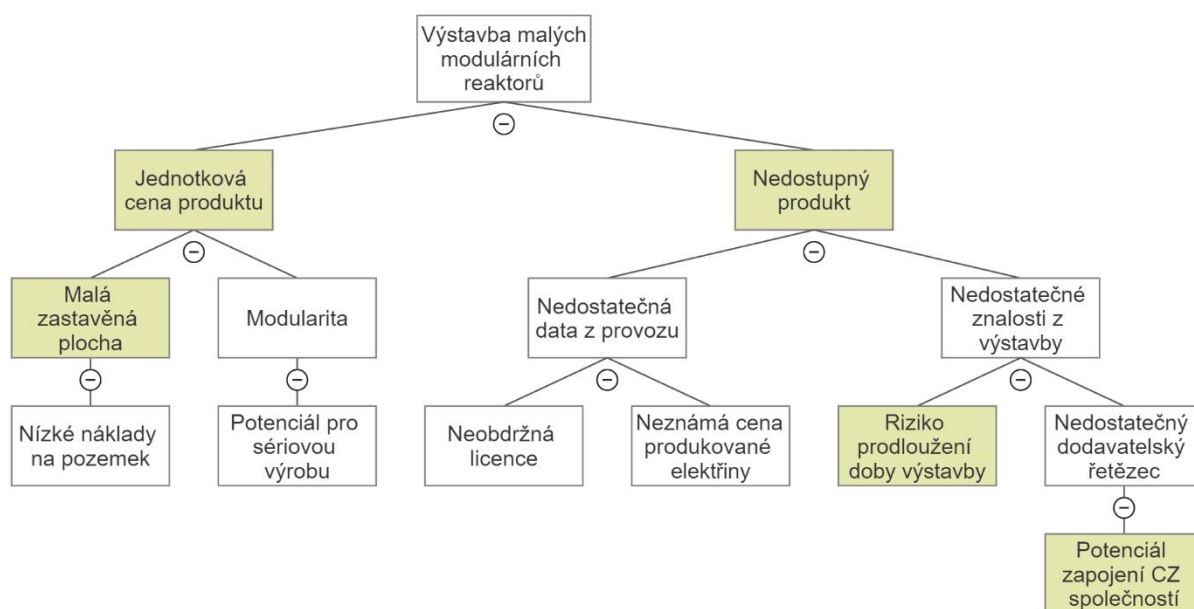
Obrázek 8: SWOT – rozložení

11 Výběr designu SMR

11.1 Porovnání designů SMR

Hlavní řešený problém pro státy se zájmem o výstavbu SMR je jakým způsobem by měla daná země zvolit design na výstavbu. Kritéria se liší dle preferencí v daném státu a vycházejí z výše uvedených analýz. Lze tak očekávat, že mohou být státy se zájmem o co nejrychlejší výstavbu, státy s preferencí výběru dle výkonu reaktoru, státy s nedostatkem vodních zdrojů a zájmem o minimalizaci spotřeby chladicí vody a mnohá další prioritní kritéria.

V rámci České republiky je aktuálně deklarován zájem o spuštění malého modulárního reaktoru v lokalitě Temelín do roku 2035. Další fáze projektu očekává otevření nových jaderných lokalit a identifikaci příležitosti využití SMR reaktorů na lokalitách současných uhelných a plynových zdrojů. Jedná se tak o jedno z hodnocených kritérií. Rozpad je možné vidět ve stromu kauzálních vztahů.



Obrázek 9: Strom kauzálních vztahů

Dostupnost produktu

- Jak již bylo uvedeno, Česká republika má zájem o výstavbu a zprovoznění prvního SMR reaktoru do roku 2035. Zároveň by nemělo dojít k situaci, kdy design stavěný v ČR bude světový unikát. Při zahájení stavby by měl být minimálně jeden reaktor daného výrobce již uveden v provozu, nebo alespoň v probíhající výstavbě za účelem snížení rizik. Zároveň tak dochází k získání znalostí o designu, čímž je urychlen legislativní proces předcházející výstavbě. Dostupnost produktu je tudíž důležitější kritérium v porovnání s dobou výstavby, která je podstatná, ale zahrnuje pouze jednoznačně definovaný proces ovlivněný primárně výrobcem a dodavatelem. Legislativní část je řešena úřady, čímž může dojít k významným prolukám.

Doba výstavby

- Energetický trh prochází po dlouhé době významnými změnami. Změny jsou ovlivněny snahou o snížení emisí, vývojem technologií, ale i situací s dostupností a cenou paliv. Do energetiky zasahují i rychlé změny, které nelze minimalizovat okamžitě. Abychom je mohli řešit co nejrychleji, potřebujeme kromě dostupného výrobku i produkt, který bude postaven rychle. Doba výstavby je tak důležitým kritériem.

Cena produktu

- V České republice aktuálně není žádná státní energetická společnost, která by měla jako primární cíl zajištění energetické bezpečnosti státu. Jedná se vždy o komerční subjekty provozující elektrárny za účelem zisku. Pro komerční subjekty je nutné znát náklady na výstavbu, provoz a činnosti související s provozem jaderného zdroje. Jelikož nebyl dosud postaven žádný modulární reaktor, jsou náklady těžko určitelné a jedná se spíše o odhady. V rámci zjednodušení bude v projektu pracováno s kapitálovými náklady na instalovaný kW_e.

Potenciál pro český průmysl

- Výstavba a provoz malých modulárních reaktorů představuje možnosti pro český průmysl a dodavatelský řetězec. V případě zapojení českého průmyslu dojde ke zvyšování HDP České republiky po dobu výstavby, provozu a následného rozebírání elektrárny. České společnosti tak mohou být zapojeny do stabilních zakázek trvajících více než 100 let v České republice i zahraničí, v případě, že budou zapojovány

v průběhu vývoje. Zároveň by ze strany výrobců mohlo dojít ke snížení jejich síly a rozšíření dodavatelů.

Rozloha elektrárny

- I přes výrazně nižší zastavenou plochu na jednotku výkonu oproti obnovitelným zdrojům, může u SMR docházet k omezením z hlediska velikosti zastavěné plochy. Kritérium velikosti pak může být v některých případech vylučující. Zastavěná plocha může být určující již pro výběr vhodných lokalit pro zahájení průzkumů.

11.2 Výrobci malých modulárních reaktorů

Po celém světě je vyvíjeno téměř 100 unikátních designů malých modulárních reaktorů. Významná část není aktuálně relevantní pro potenciální výstavbu do začátku 50. let. Jedná se o reaktory aplikující technologie IV. generace, neboli reaktory využívající jiná chladiva, a o reaktory s nedostatečným stupněm vývoje a připravenosti technologie. Zvolená kritéria jsou proto zohledněna pouze na omezené množství projektů relevantních pro Českou republiku dle v současné době nastavených priorit.

GE Hitachi – BWRX-300 (300 MW_e)

- Dostupnost produktu: 2028 – spuštění Kanada [34]
- Doba výstavby: 30 měsíců [35]
- Kapitálové náklady: 3 200 \$/kW_e (NOAK) [36]
- Potenciál pro český průmysl: nízký (možnost omezeného zapojení) [37]
- Rozloha elektrárny: 9 800 m² -> 32,7 m²/MW_e [34]

Holtec International – SMR-160 (160 MW_e)

- Dostupnost produktu: 2029 – spuštění USA [38]
- Doba výstavby: 36 měsíců [39]
- Kapitálové náklady: 4 065 \$/kW_e (NOAK) [40]
- Potenciál pro český průmysl: střední (možnost zapojení českého průmyslu a výstavby továrny při výstavbě většího množství elektráren v Evropě) [37]
- Rozloha elektrárny: 28 000 m² -> 175 m²/MW_e [34]

Rolls-Royce SMR – UK SMR (470 MW_e)

- Dostupnost produktu: 2030 – spuštění UK [41]
- Doba výstavby: 48 měsíců [42]
- Kapitálové náklady: 4 640 \$/kW_e (NOAK) [43]
- Potenciál pro český průmysl: vysoký (aktivní hledání společností pro zapojení českého průmyslu a zájem o výstavbu továrny) [37]
- Rozloha elektrárny: 40 000 m² -> 85,1 m²/MW_e [34]

NuScale Power Corporation – VOYGR (77 MW_e)

- Dostupnost produktu: 2030 – spuštění USA [44]
- Doba výstavby: 36 měsíců [45]
- Kapitálové náklady: 5 100 \$/kW_e (NOAK) [46]
- Potenciál pro český průmysl: nízký (většina výroby nejspíše již zajištěna) [47]
- Rozloha elektrárny: 140 000 m² -> 151,5 m²/MW_e (12modulová elektrárna) [34]

11.3 Rozhodovací metody

Za účelem provedení rozhodovacích metod byla nejprve převedena získaná data do přehlednější formy ve formě tabulky.

Tabulka 4: Designy malých modulárních reaktorů

| | Rok spuštění | Doba výstavby [měsíce] | CAPEX [\$/MW _e] | Potenciál pro ČR průmysl | Rozloha [m ² /MW _e] |
|----------|--------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|--|
| BWRX-300 | 2028 | 30 | 3 200 | nízký | 32,7 |
| SMR-160 | 2029 | 36 | 4 065 | střední | 175 |
| UK SMR | 2030 | 48 | 4 640 | vysoký | 85,1 |
| VOYGR | 2030 | 36 | 5 100 | nízký | 151,5 |

Jak již bylo výše uvedeno, v rámci SMR je významným faktorem rok spuštění první jednotky. Vychází tak, že BWRX-300 je v případě této preference na 1. místě. Pro zjednodušení přehledu v rámci preferencí v jednotlivých kritériích je vhodné pořadí určit i u dalších parametrů.

Tabulka 5: Designy SMR – pořadí jednotlivých kritérií

| | Rok spuštění | Doba výstavby [měsíce] | CAPEX [\$/MW _e] | Potenciál pro ČR průmysl | Rozloha [m ² /MW _e] |
|----------|--------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|--|
| BWRX-300 | 1 | 1 | 1 | 3,5 | 1 |
| SMR-160 | 2,5 | 2,5 | 2 | 2 | 4 |
| UK SMR | 2,5 | 4 | 3 | 1 | 2 |
| VOYGR | 3 | 2,5 | 4 | 3,5 | 3 |
| Povaha | MIN | MIN | MIN | MIN | MIN |

Hodnoty a pořadí jsou následně využity v dalších rozhodovacích procesech.

11.3.1 Saatyho metoda

Saatyho metodu, jakožto model vícekritériální analýzy (VAV), je vhodné využít pro spotřebitelské výběry, hodnocení efektivnosti, výběrová řízení a stanovení pořadí. Právě stanovení pořadí a výběrové řízení je vhodné na oblast malých modulárních reaktorů. Saatyho metoda využívá párové porovnání důležitosti u všech kritérií. V projektu byla využita stupnice: 1 – rovnocenná kritéria, 3 – slabá preference, 5 – silná preference, 7 – velmi silná preference, 9 – absolutní preference. Pomocí aplikace metody získáme váhy jednotlivých kritérií. Kritéria jsou dále využita v analytickém hierarchickém procesu společně s parametry za účelem získání pořadí.

Postup aplikace Saatyho metody včetně analytického hierarchického procesu:

Nejprve bylo využito párového porovnání podle důležitosti kritérií, kdy 1 = rovnocenná kritéria a 9 = absolutní preference. Nejvýznamnějším kritériem je v tomto případě rok spuštění. Pomocí geometrického průměru a následného poměru průměrů byly získány váhy jednotlivých kritérií.

Tabulka 6: Saatyho metoda – párové porovnání

| Saatyho metoda | Rok spuštění | Doba výstavby [měsíce] | CAPEX [\$/MWe] | Potenciál pro ČR průmysl | Rozloha [m ² /MWe] | Geomean | Váhy |
|-------------------------------|--------------|------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------------|---------|------|
| Rok spuštění | 1 | 4 | 3 | 5 | 9 | 3,52 | 0,49 |
| Doba výstavby [měsíce] | 0,25 | 1 | 0,50 | 2 | 6 | 1,08 | 0,15 |
| CAPEX [\$/MWe] | 0,33 | 2 | 1 | 3 | 7 | 1,70 | 0,23 |
| Potenciál pro průmysl | 0,20 | 0,50 | 0,33 | 1 | 5 | 0,70 | 0,10 |
| Rozloha [m ² /MWe] | 0,11 | 0,17 | 0,14 | 0,2 | 1 | 0,22 | 0,03 |

Po párovém porovnání je nutné propojit váhy s pořadím kritérií. Zde platí hodnocení, kdy 1 = nejlepší, 4 = nejhorší.

Tabulka 7: Saatyho metoda – vážené pořadí

| Pořadí | Rok spuštění | Doba výstavby [měsíce] | CAPEX [\$/MWe] | Potenciál pro ČR průmysl | Rozloha [m ² /MWe] | Vážené pořadí |
|----------|--------------|------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------------|---------------|
| BWRX-300 | 1 | 1 | 1 | 3,5 | 1 | 1,24 |
| SMR-160 | 2,5 | 2,5 | 2 | 2 | 4 | 2,38 |
| UK SMR | 2,5 | 4 | 3 | 1 | 2 | 2,68 |
| VOYGR | 3 | 2,5 | 4 | 3,5 | 3 | 3,21 |
| Váhy | 0,49 | 0,15 | 0,23 | 0,10 | 0,03 | |

Na Saatyho metodu navazuje analýza hierarchického procesu.

Tabulka 8: Analýza hierarchického procesu

| Analýza hierarchického procesu | Rok spuštění | Doba výstavby [měsíce] | CAPEX [\$/MW _e] | Potenciál pro ČR průmysl | Rozloha [m ² /MW _e] |
|--------------------------------|--------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|--|
| BWRX-300 | 2028 | 30 | 3 200 | 3,5 | 32,7 |
| SMR-160 | 2029 | 36 | 4 065 | 2 | 175 |
| UK SMR | 2030 | 48 | 4 640 | 1 | 85,1 |
| VOYGR | 2030 | 36 | 5 100 | 3,5 | 151,5 |
| Povaha kritéria | MIN | MIN | MIN | MIN | MIN |
| Ideální varianta | 2028 | 30 | 3 200 | 1 | 32,7 |
| Bazální varianta | 2030 | 48 | 5 100 | 3,5 | 175 |
| Váhy | 0,49 | 0,15 | 0,23 | 0,10 | 0,03 |

V tabulce jsou uvedena jednotlivá kritéria a váha pro dané parametry. Zároveň je nutné stanovit, zda se jedná o kritérium s preferencí minimální nebo maximální hodnoty. Na základě MIN a MAX rozdělení můžeme stanovit ideální a bazální varianty. Pomocí parametrů a ideálních a bazálních variant byla vytvořena normalizovaná matice R, kde jednotlivé vstupy jsou u kritéria MIN získávány pomocí $R = (\text{kritérium 1} - \text{bazální váha}) / (\text{ideální varianta} - \text{bazální varianta})$. Na kritéria jsou dále aplikovány váhy, čímž byly získány výsledné užítky a tím i pořadí.

Tabulka 9: Analýza hierarchického procesu – výsledné pořadí

| Matice | Rok spuštění | Doba výstavby [měsíce] | CAPEX [\$/MW _e] | Potenciál pro ČR průmysl | Rozloha [m ² /MW _e] | Užitky |
|----------|--------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|--|--------|
| BWRX-300 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0,90 |
| SMR-160 | 0,50 | 0,67 | 0,54 | 0,6 | 0 | 0,53 |
| UK SMR | 0 | 0 | 0,24 | 1 | 0,63 | 0,17 |
| VOYGR | 0 | 0,67 | 0 | 0 | 0,17 | 0,11 |

11.3.2 Metoda vyrovnání nákladů

V rámci pokročilé metody je řešena metoda využívající vyrovnání nákladů pomocí ocenění ostatních kritérií. V případě rozhodování v oblasti malých modulárních reaktorů je využití této metody komplikované a bylo by nutné zhodnotit celou životnost projektu, trvající přes 60 let, zahrnout dopady do HDP při různé výši zapojení českého průmyslu, vzniklé příležitosti související s první výstavbou reaktoru tohoto typu na území Evropy a další kritéria s významnými dopady. I přesto se jedná o metodu, která nám může pomoci v oblasti hodnocení jednotlivých projektů s cílem výběru technologie. Zároveň je možné kritéria vždy přizpůsobit současné situaci a měnícím se kritériím.

Základním kritériem pro následné vyrovnání nákladů jsou zvoleny kapitálové náklady (CAPEX), které již v základu mají finanční vyjádření.

Tabulka 10: Metoda vyrovnávání nákladů – přehled parametrů

| | Rok spuštění | Doba výstavby [měsíce] | CAPEX [\$/MWe] | Potenciál pro ČR průmysl | Rozloha [m ² /MWe] |
|----------|--------------|------------------------|----------------|--------------------------|-------------------------------|
| BWRX-300 | 2028 | 30 | 3 200 | nízký | 32,7 |
| SMR-160 | 2029 | 36 | 4 065 | střední | 175 |
| UK SMR | 2030 | 48 | 4 640 | vysoký | 85,1 |
| VOYGR | 2030 | 36 | 5 100 | nízký | 151,5 |

Prvním zvoleným kritériem pro vyrovnání je rozloha. Na základě bonity půdy a nízké důležitosti kritéria lze bonitu využít místo komerční hodnoty. Tudíž je pracováno s odhadem: **1 m² = 25 Kč** ([\$/MWe]). Základem pro přepočítání je stanovena nejnižší hodnota – 32,7 m².

Tabulka 11: Metoda vyrovnávání nákladů – vyrovnání rozlohy

| | CAPEX [\$/MWe] | Rozloha [m ² /MWe] | Potenciál pro ČR průmysl |
|----------|----------------|-------------------------------|--------------------------|
| BWRX-300 | 3 200 | 32,7 | nízký |
| SMR-160 | 7 623 | 32,7 | střední |
| UK SMR | 5 950 | 32,7 | vysoký |
| VOYGR | 8 070 | 32,7 | nízký |

Dalším kritériem pro srovnání je potenciál pro ČR průmysl. Toto kritérium je velice obtížně hodnotitelné, jelikož by bylo vhodné jej vyjádřit přímo očekávanými dopady do HDP. Vyšší míra zapojení může znamenat pro Českou republiku navýšení HDP o jednotky procent. V tomto případě je úvaha zjednodušená. Jako základní kritérium je zvolené střední zapojení. V případě hodnocení vyššího, případně nižšího, je uvažováno zvýšení ceny o 1 000 \$/MW_e, respektive snížení o stejnou hodnotu.

Tabulka 12: Metoda vyrovnávání nákladů – vyrovnání potenciálu pro ČR

| | CAPEX [\$/MW _e] | Potenciál pro ČR průmysl | Doba výstavby [měsíce] |
|----------|-----------------------------|--------------------------|------------------------|
| BWRX-300 | 4 200 | střední | 30 |
| SMR-160 | 7 623 | střední | 36 |
| UK SMR | 4 950 | střední | 48 |
| VOYGR | 9 070 | střední | 36 |

Doba výstavby může má velký dopad na provoz a financování projektu. Údaje v tabulkách jsou hodnoty udávané výrobcí a bude nutné je ověřit reálnou výstavbou. Po získání reálných údajů bude kritérium nabývat na hodnotě. V současné době bylo stanoveno na 1 měsíc = 100 \$/MW_e se základní dobou trvání 36 měsíců.

Tabulka 13: Metoda vyrovnávání nákladů – vyrovnání doby výstavby

| | CAPEX [\$/MW _e] | Doba výstavby [měsíce] | Rok spuštění |
|----------|-----------------------------|------------------------|--------------|
| BWRX-300 | 3 600 | 36 | 2028 |
| SMR-160 | 7 623 | 36 | 2029 |
| UK SMR | 6 150 | 36 | 2030 |
| VOYGR | 9 070 | 36 | 2030 |

Posledním přepočítávaným kritériem je rok prvního spuštění. Kritérium je velice důležité a ovlivňuje rychlost licencování a možnosti výstavby v České republice. Mezi úzkým výběrem ze všech designů již došlo k prvnímu předvýběru. I proto bylo pro výsledný přepočet zvoleno 1 rok = 2 000 MW_e. Referenční rok pro výpočet je 2029.

Tabulka 14: Metoda vyrovnávání nákladů – výsledné pořadí

| | CAPEX [\$/MW _e] | Rok spuštění |
|----------|-----------------------------|--------------|
| BWRX-300 | 1 600 | 2029 |
| SMR-160 | 7 623 | 2029 |
| UK SMR | 8 150 | 2029 |
| VOYGR | 11 070 | 2029 |

11.4 Pořadí porovnávaných designů

V rámci řešení porovnávání jednotlivých designů a jejich vhodnosti pro Českou republiku byla řešena Saatyho metoda, analýza hierarchického procesu a metoda využívající vyrovnání nákladů. Saatyho metoda a analýza hierarchického procesu je v problematice rozhodovacího projektu v oblasti malých modulárních reaktorů za současně definovaných podmínek jednoznačnější, jelikož s sebou nese menší pravděpodobnost chyb oproti metodě využívající vyrovnání nákladů. Vyrovnání nákladů s sebou přináší nejistotu ve zvolených přepočtech.

I přes nejistoty vložené do metody vyrovnání nákladů jsou výsledky všech metod konzistentní. A to v pořadí:

1. GE Hitachi – BWRX-300
2. Holtec International – SMR-160
3. Rolls Royce – UK SMR
4. NuScale – VOYGR

Výsledky jsou významným způsobem ovlivněny rokem spuštění první jednotky. Kritérium prvního spuštění bylo hlavní z hlediska urychlení licencí i výstavby, což zásadním způsobem ovlivňuje požadovanou transformaci energetického sektoru.

V rámci vyrovnání nákladů nebylo kritérium prvního spuštění výrazně zvýhodněno oproti ostatním kritériím. Avšak i v tomto případě zůstalo pořadí stejné a byla tím prokázána výhodnost GE Hitachi BWRX-300 i v ostatních oblastech daného designu. Ačkoliv pořadí zůstalo stejné, došlo ke změně rozdílů mezi jednotlivými designy. Smývají se rozdíly mezi Holtec International a UK SMR. BWRX-300 je s významným rozdílem na první pozici.

12 Výběr lokality pro umístění SMR

Malé modulární reaktory představují potenciál pro Českou republiku z mnoha různých hledisek. Jedním z potenciálů je ekonomické hledisko výstavby a provozu elektrárny a zapojení českých společností s historicky významnými zkušenostmi s dodávkami v oblasti jaderné energetiky. Dodávky českých společností a jejich zapojení do dodavatelského řetězce společností vyrábějících a dodávajících malé modulární reaktory představuje možnost pro zvýšení zaměstnanosti v ovlivněných regionech, zvýšení kvality života a navýšení hrubého domácího produktu České republiky.

Z pohledu jednotlivých regionů představují SMR především možnost obměny dožívajících uhelných zdrojů za novější technologie. Využití malých modulárních reaktorů v uhelných lokalitách může zajistit zachování pracovních míst v regionech, zvýšení kvalifikace pracovníků a s ní spojené finanční ohodnocení. Tyto faktory se následně pozitivně promítají na množství obyvatel v lokalitě, navazující pracovní příležitosti a vyšší životní standard. Společně se sociálními dopady dochází také ke snížení vyprodukovaných emisí, které jsou u jaderných elektráren na úrovni obnovitelných zdrojů. [48]

V rámci výběru a hodnocení lokalit je tudíž vhodné se zaměřit na lokality s provozovaným uhelným zdrojem napojeným na centrální zásobování teplem. Napojení na centrální zásobování teplem umožňuje další využití jaderného reaktoru, zvýšení celkové účinnosti termodynamického oběhu a dekarbonizaci teplárenství pro danou soustavu. Takovýchto lokalit je v České republice velké množství, a proto jsou v rámci diplomové práce vybrány a hodnoceny nejaderné lokality zahrnuté v Politice územního rozvoje dle kategorie E4a, zahrnující plochy pro rozšíření koridorů pro vyvedení elektrického a tepelného výkonu. Konkrétně jsou zmíněny jaderné lokality a nejaderné lokality Ledvice, Počerady, Prunéřov, Tušimice, Dětmárovice a Mělník. [49]

12.1 Ledvice

Lokalita Ledvice se nachází v Ústeckém kraji u měst Teplice a Bílina a v současné době jsou v této lokalitě Skupinou ČEZ provozovány zdroje Ledvice 4 a Ledvice 6. Ostatní zdroje, zprovozněné v letech 1966 až 1969 byly odstaveny do roku 2015. Oba provozované bloky spalují hnědé uhlí z přílehlých dolů Bílina. Pro uvažované umístění je lokalita hodnocena z hlediska plochy odstavené elektrárny Ledvice II. [50]

Z hlediska vylučujících kritérií je hodnocena lokalita z hlediska záplavového území a pravděpodobnosti záplav 100 let a vyšší. Lokalita se nachází v blízkosti řeky Bílina, ale záplavová oblast na lokalitu nezasahuje. Vzhledem k blízkosti dolu v lokalitě hrozí kolize poddolovaného území a zvažované plochy pro výstavbu jaderného zařízení. Z tohoto pohledu je nutné pro lokalitu provést detailnější průzkumy. Z hlediska zlomů a jejich potenciálního vlivu na lokalitu se nejbližší zlom nachází ve vzdálenosti přibližně 2,2 km, a proto bude nutné hodnotit jeho lokalitu a potenciální dopady. [51; 52; 53]

12.2 Počerady

Počerady se stejně jako Ledvice nachází v Ústeckém kraji poblíž měst Louny, Žatec a Most. V rámci lokality působí dvě společnosti – Skupina ČEZ s paroplynovou elektrárnou a společnost Sev.en s hnědouhelnými bloky. Majetkové rozložení lokality by mohlo představovat komplikace z hlediska budoucího využití pro výstavbu jaderného zdroje. Elektrárna byla Skupinou ČEZ vybudována v letech 1970 až 1977 s šesti bloky, každý s výkonem 200 MW_e. Následně byl v roce 1994 odstaven první blok. Zbylé bloky byly později prodány společnosti Sev.en. [54]

Pro možnou výstavbu malého modulárního reaktoru v lokalitě Počerady může být z hlediska atomového zákona a příslušných vyhlášek částečná kolize lokality a záplavového území. Kritérium bude muset být hodnoceno na základě znalosti o umísťovaném projektu. Lokalita Počerady se nenachází na poddolovaném území, ani

nejsou známy nálezy krasových útvarů. Významným vylučujícím kritériem je tektonický zlom procházející uvažovanou lokalitou. Ačkoliv není u tektonického zlomu známa aktivita a je možné umístit SMR na jinou část pozemku, jedná se o kritérium s vysokou problematikou pro umístění. Výskyt zlomu je zároveň doplněn výskytem sopečného útvaru vrcholu Velká Volavka, který by mohl mít potenciálně vliv na umístění SMR. [51; 52; 53]

12.3 Pruněřov

Bloky Elektrárny Pruněřov II nacházející se u města Kadaň, Ústecký kraj, jsou nejmladšími uhelnými bloky Skupiny ČEZ a byly spuštěny v letech 1981 a 1982. Elektrárna Pruněřov II má po obnově celkový instalovaný výkon 3 x 250 MW_e. V lokalitě se dále nachází Elektrárna Pruněřov I, která byla odstavena v červnu 2020. [55]

Lokalita Pruněřov se nachází v okolí Pruněřovského potoka, u kterého nebylo zjištěno riziko z hlediska záplav. Komplikace nenastávají ani z pohledu poddolovanosti území. U lokality se nachází dobývací těžený prostor, ale nedochází k přímému zásahu do území. Z hlediska geotektonických poruch se u lokality nacházejí zakryté, předpokládané a zjištěné zlomy. Nejbližší zlom se nachází ve vzdálenosti přibližně 2 km, a proto bude nutné lokalitu podrobit dalšímu zkoumání. [51; 52; 53]

12.4 Tušimice

Lokalita Tušimice se nachází v blízkosti Elektrárny Pruněřov. V lokalitě je provozována Elektrárna Tušimice II se spuštěním výroby v letech 1974 až 1975 zahrnující čtyři bloky o výkonu 200 MW_e. Historicky na území byla využívána i Elektrárna Tušimice I. Všech šest bloků Elektrárny Tušimice I bylo odstaveno v průběhu 90. let 20. století. [56]

Tušimice se nachází u řeky Ohře, která nezasahuje do lokality a nepředstavuje povodňové riziko. U lokality se nachází přilehlý důl hnědého uhlí. Důl ani činnosti dolování se nenachází v lokalitě stávající elektrárny, ale pro další hodnocení lokality je nutné prověřit možné vlivy důlní činnosti. Tektonické zlomy jsou v lokalitě zakryté a nacházejí se přibližně 2,5 km od Tušimic. Lokalitou žádný zlom neprochází. [51; 52; 53]

12.5 Dětmorovice

Elektrárna Dětmorovice se nachází u Ostravy a je největší černouhelnou elektrárnou na území České republiky. Vybudována byla v letech 1972-1976 s instalovaným výkonem 800 MW_e, který byl následně snížen na 600 MW_e. Elektrárnu provozuje Skupina ČEZ. [57]

Dětmorovice se nacházejí u řeky Olše a záplavové území se dotýká zvažované lokality, ale nedochází k jejímu zásahu na území. Lokalita je vhodně umístěna i z hlediska poddolovanosti území, kdy nedochází k výskytu deformace území činností člověka ani krasovými útvary. Komplikace mohou nastat v rámci geotektonických parametrů, kdy jeden ze zakrytých zlomů částečně zasahuje do území lokality. Z tohoto pohledu je lokalitu nutné dále prověřit a případně upravit umístění SMR do jiné části vytyčených ploch. [51; 52; 53]

12.6 Mělník

Elektrárna Mělník, vlastněná a provozovaná Skupinou ČEZ, se nachází ve Středočeském kraji a je tak lokalitou nejbližší umístěnou hlavnímu městu Praha. Na lokalitě byly dříve provozovány tři technologické celky, kdy v roce 2021 došlo k ukončení provozu elektrárny Mělník III s instalovaným výkonem 500 MW_e. Dnes jsou v provozu zbývající dva bloky o celkovém výkonu 280 MW_e. Provozované bloky dodávají teplo pro Prahu. [58]

Lokalita Mělník se nachází v bezprostřední blízkosti toku řeky Labe. Území s pravděpodobností opakování zaplavení vyšší než 100 let by nemělo zasahovat do lokality. Pro případné navazující činnosti ale bude nutné provést konkrétnější hodnocení na základě konkrétního umístění. V blízkosti se nenachází žádné doly ani krasové útvary. Lokalita je z tohoto hlediska vyhovující. V porovnání s ostatními lokalitami se ve vzdálenosti do 5 km nenachází žádný zlom ani přesmyk. [51; 52; 53]

12.7 Porovnání lokalit pro umístění SMR

Výběr lokality pro umístění z hlediska požadavků atomového zákona, příslušných vyhlášek a bezpečnostních návodů je komplexní záležitostí, pro kterou je nutné vynaložit náklady v řádu desítek až nižších stovek miliónů korun. Z tohoto důvodu je vhodné provést předběžné hodnocení před zahájením investic do nákladných vrtů, studií a ostatních náležitostí.

Na základě výše uvedených lokalit jsou lokality hodnoceny v rámci třech potenciálně vylučujících kritérií. Prvním hodnoceným kritériem je kolize lokality s územím s pravděpodobností výskytu povodně jednou za 100 let a vyšší. Druhým hodnoceným kritériem je poddolovanost a výskyt krasových útvarů zasahujících do lokality. Posledním hodnoceným kritériem je vzdálenost od nejbližšího zlomu.

Jelikož se jedná o prvotní hodnocení lokalit, je pro zjednodušení využito rozdělení splnění parametrů kritérií do tří skupin. Každá skupina je označena vyhodnocena v tabulce na základě barevné stupnice s rozložením:

- Zelená – parametr s žádným nebo nízkým rizikem
- Žlutá – parametr se středním rizikem a nutným doplňujícím průzkumem
- Červená – parametr s vysokým rizikem a nutným doplňujícím průzkumem

Tabulka 15: Hodnocení lokalit pro umístění SMR

| Lokalita | Povodňové území | Poddolovanost | Vzdálenost nejbližšího zlomu |
|-------------|-----------------|---------------|------------------------------|
| Ledvice | | | 2,2 km |
| Počerady | | | 0 km |
| Pruněřov | | | 2 km |
| Tušimice | | | 2,5 km |
| Dětmarovice | | | 0 Km |
| Mělník | | | nad 5 km |

Na základě předběžného hodnocení lokalit z hlediska zvolených kritérií zásahu povodňového území, poddolovanosti a vzdálenosti od nejbližšího zlomu se jeví jako nejvhodnější lokalita Mělník.

Dalšími vhodnými lokalitami jsou Pruněřov, Tušimice a Dětmarovice. U všech těchto lokalit bude nutné prověřit vyskytující se zlomy, jejich aktivit a případný dopad na jaderné zařízení. U lokality Dětmarovice je zároveň nutné vhodné umístění zařízení v lokalitě, aby nedošlo k výskytu zlomu přímo na zastavěném území. Problematika umístění a zlomů je zásadním předpokladem pro možné využití také u lokality Ledvice. Zde poddolované území zasahuje pouze na část pozemku.

Jako nejméně vhodná se po předběžném hodnocení jeví lokalita Počerady. Dochází zde ke kolizi s povodňovým územím, procházejícím zlomem v lokalitě a výskytem sopečné činnosti v blízkosti potenciálního umístění.

Závěr

Náplní diplomové práce je analýza technologií malých a středních modulárních reaktorů s potenciálem uplatnění v České republice. Výrobní základna elektrické a tepelné energie bude v budoucnu procházet významnými změnami na základě požadavků ze strany Evropské unie i vlivem událostí v Evropě, které ovlivňují dodávky plynu. Současně využívané fosilní zdroje budou do budoucna nahrazovány nízkoe emisními zdroji a jaderné zdroje, včetně malých a středních modulárních reaktorů, představují významný potenciál pro dekarbonizaci, zachování zaměstnanosti v oblasti energetiky, zajištění zdrojové přiměřenosti a stability sítě a využití uzavíraných uhelných lokalit a jejich infrastruktury.

Za účelem hodnocení byly vybrány designy lehkovodních reaktorů, konkrétně designy od společností GE Hitachi, Holtec International, NuScale Power Corporation a Rolls-Royce SMR. Vybrané koncepty byly hodnoceny z hlediska plánovaného roku spuštění první jednotky, délky výstavby, očekávaných kapitálových investic na jednotku instalovaného výkonu, potenciálu pro český průmysl a rozlohy. Porovnání designů byla provedeno pomocí Saatyho metody. Pro ověření validity výsledku byla Saatyho metoda doplněna o metodu vyrovnání nákladů. U obou metod jsou výsledky významným způsobem ovlivněny kritériem s nejvyšší prioritou, kterou byl zvolen rok spuštění první jednotky pro zachování souladu s cíli stanovenými v rámci České republiky. Využitím obou metod bylo dosaženo stejných výsledků s různými odstupy mezi jednotlivými designy. Výsledkem obou analýz bylo získáno pořadí:

1. GE Hitachi – BWRX-300
2. Holtec International – SMR-160
3. Rolls Royce – UK SMR
4. NuScale – VOYGR

Pro budoucí uplatnění malých a středních modulárních reaktorů je nutné vybrané designy doplnit o potenciální lokality výstavby. V rámci hodnocení jsou využity nejaderné lokality uvedené v Politice územního rozvoje, kategorie E4a. Hodnocení bylo provedeno na základě požadavků platné legislativy České republiky, konkrétně dle atomového zákona, vyhlášky 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení a dle příslušného bezpečnostního návodu. U vybraných lokalit, kterými byly Ledvice, Počeradý, Prunéřov, Tušimice, Dětmárovice a Mělník, byly hodnoceny kritéria zásahu povodňového území do lokality, poddolovanost a výskyt krasových jevů a vzdálenost od nejbližšího zlomu.

Na základě hodnocených kritérií byly lokality rozděleny dle možného rizika nesplnění požadavků legislativy v dalších fázích průzkumu na:

- Lokality s nízkým rizikem: Mělník
- Lokality se středním rizikem: Prunéřov, Tušimice, Dětmárovice
- Lokality s vysokým rizikem: Ledvice, Počeradý

Výsledky jsou v případě výběru a hodnocení konceptů a lokalit zatíženy vysokou mírou nejistoty. Nejistota vzniká v obou případech nedostatečným množstvím dat, jelikož se jedná pouze o veřejně dostupné informace. Za účelem zvýšení relevantnosti hodnocení je vhodné uzavření smluv o mlčenlivosti s jednotlivými dodavateli a investice do průzkumů lokalit. Na základě těchto dat je možné provést detailní hodnocení s následným výběrem dodavatele, případně partnera pro dodání a umístění SMR.

Detailní hodnocení byla již provedena například společnostmi v Polsku nebo Estonsku. Na základě výběru dochází k aktivním spolupracím mezi zájemci a vyvíjejícími společnostmi. Ve světě tak dochází k rezervování výrobních kapacit a limitaci možného zapojení do dodavatelského řetězce. Pokud chce Česká republika využít svého potenciálu v rámci malých a středních modulárních reaktorů, je nutné nejpozději do 2 let vybrat partnera a připravit se na zapojení do trhu významným potenciálem.

Použitá literatura

- [1] *Infografika: Česká energetika slaví 100 let. Jak se za tu dobu změnila?* [online]. Třebíč: OM Solutions s.r.o., 2018 [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energetika-v-cr/ceska-energetika-slavi-100-let-se-za-tu-dobu-zmenila>
- [2] *Století elektřiny. Podívejte se do historie elektrické energie u nás* Zdroj: <https://www.denik.cz/ekonomika/stoleti-elektřiny-podivejte-se-do-historie-elektricke-energie-u-nas-20180711.html> [online]. Praha: VLTAVA LABE MEDIA a.s., 2018 [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://www.denik.cz/ekonomika/stoleti-elektřiny-podivejte-se-do-historie-elektricke-energie-u-nas-20180711.html>
- [3] *Státní energetická koncepce* [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2015 [cit. 2022-12-11]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/dokument158059.html>
- [4] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČESKÉ REPUBLIKY ZA ROK 2021*. Jihlava, 2022. Dostupné také z: <https://ipodpora.odbory.info/soubory/uploads/eruelektro2021.pdf>
- [5] *Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ)*. Praha, 2019. Dostupné také z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2021/2/Hodnoceni-zdrojove-primerenosti-ES-CR-_2019__1.pdf
- [6] CUICCI, Matteo. *Energetická politika: obecné zásady* [online]. Brusel: Evropská komise, 2021 [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/cs/sheet/68/energeticka-politika-obecne-zasady>
- [7] *Smlouva o fungování Evropské Unie: (Konsolidované znění)* [online]. Brusel:

- Evropská Unie, 2012 [cit. 2022-12-17]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:12012E/TXT&from=FI>
- [8] *Evropská energetika: Jaký je aktuální stav a kam směřuje?* [online]. 2022: Česká spořitelna, a.s., 2022 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www.csas.cz/cs/firmy/articles/evropska-energetika-jaky-je-aktualni-stav-a-kam-smeruje>
- [9] HANCHER, L. a B. WINTERS. *The EU Winter Package: Briefing Paper*. Londýn, 2017. Dostupné také z: <https://fsr.eui.eu/wp-content/uploads/The-EU-Winter-Package.pdf>
- [10] *European Green Deal* [online]. Brusel: Evropská komise, 2022 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal_en
- [11] PATEL, Alysha a Tay ROBINSON. *The EU Green Deal explained* [online]. Londýn: Norton Rose Fulbright, 2021 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www.nortonrosefulbright.com/en/knowledge/publications/c50c4cd9/the-eu-green-deal-explained>
- [12] *The European Green Deal* [online]. Brusel: ERRIN, 2022 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://errin.eu/tags/european-green-deal>
- [13] *„Fit for 55” package: EU legislative action for the climate* [online]. Londýn: Deloitte, 2022 [cit. 2022-12-18]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/ce/en/pages/about-deloitte/articles/ce-fit-for-55-package.html>
- [14] *EU Taxonomy Overview* [online]. Mnichov: Envoria, 2022 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://eu-taxonomy.info/info/eu-taxonomy-overview>
- [15] *The Complementary Climate Delegated Act* [online]. Londýn: Deloitte, 2022 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/ce/en/pages/tax/the-complementary-climate-delegated-act.html>

- [16] *Document 32022R1214: Commission Delegated Regulation (EU) 2022/1214 of 9 March 2022 amending Delegated Regulation (EU) 2021/2139 as regards economic activities in certain energy sectors and Delegated Regulation (EU) 2021/2178 as regards specific public disclosures for those economic activities (Text with EEA relevance)* [online]. Brusel: Evropská komise, 2022 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32022R1214>
- [17] *Plán REPowerEU: cenově dostupná, bezpečná a udržitelná energie pro Evropu* [online]. Brusel: Evropská komise, 2022 [cit. 2022-12-22]. Dostupné z: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_cs
- [18] Nuclear Power in Czech Republic. In: *World Nuclear Association* [online]. Londýn: World Nuclear Association, 2022 [cit. 2023-01-01]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/czech-republic.aspx>
- [19] KURUC, Jozef a Ľubomír MÁTEL. *Thirtieth anniversary of reactor accident in A-1 nuclear power plant Jaslovske Bohunice*. Bratislava, 2007. ISBN: 978-80-969290-9-2. Dostupné také z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/059/38059373.pdf
- [20] HROZEK, Dian. Jaderná elektrárna Dukovany je v provozu od roku 1985. In: *OEnergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions s.r.o., 2018 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/jaderna-elektrarna-dukovany>
- [21] Kdo postaví nový blok jaderné elektrárny Dukovany bude známo na konci roku 2022. In: *Ekonomický deník* [online]. Praha: Media Network s.r.o., 2020 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://ekonomickydenik.cz/postavi-novy-blok->

jaderne-elektrarny-bude-znamo-konci-roku-2022/

- [22] Historie výstavby Jaderné elektrárny Temelín. In: *Ekolist.cz* [online]. Praha: BEZK, z.s., 2006 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/historie-vystavby-jaderne-elektrarny-temelin>
- [23] Temelín dokončuje přechod z amerického paliva na ruské. In: *Aktuálně.cz* [online]. Praha: Economia, a.s., 2011 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/regiony/jihocesky/temelin-dokoncuje-prechod-z-americkeho-paliva-na-ruske/r~i:article:704941/>
- [24] *IAEA-TECDOC-2003: Lessons Learned in Regulating Small Modular Reactors: Challenges, Resolutions and Insights*. Vídeň, 2003. Dostupné také z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2003web.pdf>
- [25] What are Small Modular Reactors (SMRs)?. In: *IAEA* [online]. Vídeň: International Atomic Energy Agency, 2023 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- [26] *Nuclear Power Reactors* [online]. Londýn: World Nuclear Association, 2022 [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
- [27] *Handbook of generation IV nuclear reactors*. 1. vydání. Amsterdam: Elsevier, 2016. ISBN 978-0-08-100149-3.
- [28] *Are small nuclear reactors really better? Here are the pros and cons* [online]. Vancouver: Global News, 2020 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: <https://globalnews.ca/news/6243567/small-nuclear-reactors-environment/>
- [29] KRALL, Lindsay, Allison MACFARLANE a Rodney EWING. Nuclear waste from small modular reactors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2022, **119**(23). ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.2111833119

- [30] *Characteristics and advantages of Small Modular Reactors* [online]. Madrid: Foro Nuclear, 2020 [cit. 2022-12-29]. Dostupné z: <https://www.foronuclear.org/en/updates/in-depth/characteristics-and-advantages-of-smr/>
- [31] *4 Key Benefits of Advanced Small Modular Reactors* [online]. Washington: U.S. Department of Energy, 2020 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/ne/articles/4-key-benefits-advanced-small-modular-reactors>
- [32] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení. In: Č. 378/2016. Praha: Sagit, 2016, ročník 2016, částka 151, číslo 378. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/vyhlasky/378_2016.pdf
- [33] *Umístění jaderného zařízení - hodnocení přírodních vlastností a jevů: Jaderná bezpečnost, BN-JB-4.1 (Rev. 0.0)*. Praha, 2021. Dostupné také z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/BN-JB-4.1_Hodnoceni_vlastnosti_uzemi_k_umisteni_jaderneho_zarizeni.pdf
- [34] *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* [online]. Vídeň: IAEA, 2022 [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf
- [35] *BWRX-300* [online]. Wilmington: General Electric, 2023 [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/bwrx-300>
- [36] *SMRs Small modular reactors in the Australian context* [online]. Sidney: Minerals Council of Australia, 2022 [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: https://minerals.org.au/wp-content/uploads/2022/12/Small-modular-reactors-in-the-Australian-context_Ben-Heard_2022-update.pdf
- [37] *WHAT IS REALLY BEING BUILT: REAL PROJECTS FOR THE CONSTRUCTION OF LOWER-CAPACITY NUCLEAR REACTORS AND HOW WE CAN LEARN FROM THEM*

- IN THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR TECHNOLOGIES*. Praha, 2023. Dostupné také z: https://www.konferencsmr.cz/download.php?file_uid=609b0a44-259b-3da4-8da7-d241749f3c38
- [38] *Holtec ramps up SMR programme, eyes 2029 startup* [online]. Londýn: World Nuclear Association, 2022 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Holtec-ramps-up-SMR-programme,-eyes-2029-startup>
- [39] *Economical and Efficient* [online]. Camden: Holtec International, 2023 [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: <https://holteciinternational.com/products-and-services/smr/features/economical-and-efficient/>
- [40] *Holtec and Mitsubishi Electric partnering to advance SMR-160 small modular reactor program* [online]. Richmond: BioAge Group, 2015 [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2015/08/20150808-holtec.html>
- [41] *Rolls-Royce on track for 2030 delivery of UK SMR* [online]. Londýn: World Nuclear Association [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://world-nuclear-news.org/Articles/Rolls-Royce-on-track-for-2030-delivery-of-UK-SMR>
- [42] IAEA. *Status Report – UK SMR (Rolls-Royce and Partners) United Kingdom*. Vídeň, 2019. Dostupné také z: https://aris.iaea.org/PDF/UK-SMR_2020.pdf
- [43] WOODS, Alan. *Rolls-Royce SMR*. Helsinky, 2022. Dostupné také z: <https://wecfinland.fi/wp-content/uploads/2022/03/woods-rolls-royces-business-case-for-smrs.pdf>
- [44] *Projects: Carbon Free Power Project Idaho* [online]. Portland, USA: NuScale Power, 2023 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/en/projects>
- [45] *IEEFA U.S.: Small modular reactor “too late, too expensive, too risky and too uncertain”* [online]. Detroit: INSTITUTE FOR ENERGY ECONOMICS AND

- FINANCIAL ANALYSIS, 2022 [cit. 2023-01-14]. Dostupné z: <https://ieefa.org/articles/ieefa-us-small-modular-reactor-too-late-too-expensive-too-risky-and-too-uncertain>
- [46] *NuScale jako první žádá o licenci svého malého modulárního reaktoru* [online]. Třebíč: OM Solutions s.r.o., 2017 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/nuscale-jako-prvni-zada-licenci-sveho-maleho-modularniho-reaktoru>
- [47] *NuScale Power Places First Long Lead Material Production Order with Doosan Enerbility* [online]. Portland, USA: NuScale Power, 2023 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://www.nuscalepower.com/en/news/press-releases/2023/nuscale-power-places-first-long-lead-material-production-order-with-dosan-enerbility>
- [48] *Budoucnost energetiky je v jádru. Kraj bude s partnery spolupracovat na rozvoji malých modulárních reaktorů* [online]. In: . Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2022 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.vsb.cz/cs/detail-novinky/?reportId=44568&linkBack=%2Fcs%2Fmedia%2Findex.html>
- [49] *Politika územního rozvoje České republiky (ve znění závazném od 1.9.2021)*. Praha, Brno, 2021. Dostupné také z: https://www.mmr.cz/getmedia/f93f37d3-d404-4c0c-9bfa-dae429a440c1/PUR_CR_ve-zneni-zavaznem-od-1_9_2021_brozura_CZ_final.pdf.aspx?ext=.pdf
- [50] Elektrárna Ledvice. In: ČEZ [online]. Praha: ČEZ, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarna-ledvice-58177>
- [51] Hydroekologický informační systém VÚV TGM. In: *Výzkumný ústav vodohospodářství T. G. Masaryka* [online]. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářství T. G. Masaryka, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: https://heis.vuv.cz/data/webmap/isapi.dll?map=mp_isvs&lon=14.4233628&lat=

49.0239071&scale=52650

- [52] Důlní díla a poddolování. In: *Česká geologická služba* [online]. Praha: Česká geologická služba, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/dulni_dila_poddolovani/
- [53] Geovědní mapy 1 : 500 000. In: *Česká geologická služba* [online]. Praha: Česká geologická služba, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr500/>
- [54] ELEKTRÁRNA POČERADY. In: *Svět Energie: Vzdělávací portál ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/uhelne-elektrarny/uhelne-elektrarny-cez/elektrarna-pocerady>
- [55] Elektrárny Prunéřov. In: *ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarny-prunerov-58176>
- [56] Elektrárny Tušimice. In: *ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarny-tusimice-58175>
- [57] Elektrárna Dětmarovice. In: *ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarna-detmarovice-58185>
- [58] Elektrárna Mělník. In: *ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2023 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarna-melnik-58183>

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1: Podíl instalovaného výkonu jednotlivých zdrojů v ČR v roce 2021 [4]..... | 15 |
| Obrázek 2: Podíl hrubé výroby jednotlivých zdrojů v ČR v roce 2021 [4] | 15 |
| Obrázek 3: Přehled pro nízkouhlíkový scénář v roce 2040 zobrazující salda zemí v ENTSO-E [5] | 17 |
| Obrázek 4: Jaderná elektrárna Dukovany [21] | 25 |
| Obrázek 5: Jaderná elektrárna Temelín [23] | 26 |
| Obrázek 6: Rozdělení reaktorů dle Mezinárodní agentury pro atomovou energii [25] . | 29 |
| Obrázek 7: Fishbone diagram | 49 |
| Obrázek 8: SWOT – rozložení..... | 54 |
| Obrázek 9: Strom kauzálních vztahů..... | 55 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: Analýza klíčových kompetencí | 51 |
| Tabulka 2: Matice SWOT..... | 52 |
| Tabulka 3: SWOT - faktory a váhy..... | 52 |
| Tabulka 4: Designy malých modulárních reaktorů | 58 |
| Tabulka 5: Designy SMR – pořadí jednotlivých kritérií | 59 |
| Tabulka 6: Saatyho metoda – párové porovnání..... | 60 |
| Tabulka 7: Saatyho metoda – vážené pořadí..... | 60 |
| Tabulka 8: Analýza hierarchického procesu | 61 |
| Tabulka 9: Analýza hierarchického procesu – výsledné pořadí..... | 61 |
| Tabulka 10: Metoda vyrovnávání nákladů – přehled parametrů..... | 62 |
| Tabulka 11: Metoda vyrovnávání nákladů – vyrovnání rozlohy..... | 62 |
| Tabulka 12: Metoda vyrovnávání nákladů – vyrovnání potenciálu pro ČR | 63 |
| Tabulka 13: Metoda vyrovnávání nákladů – vyrovnání doby výstavby..... | 63 |
| Tabulka 14: Metoda vyrovnávání nákladů – výsledné pořadí | 63 |
| Tabulka 15: Hodnocení lokalit pro umístění SMR | 70 |